

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



## **PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Cálculo del Perfil de Régimen Binario de la Tecnología HSUPA  
en Diversos Sistemas de Comunicaciones Móviles**

**Marzo 2011**



# **Cálculo del Perfil de Régimen Binario de la Tecnología HSUPA en Diversos Sistemas de Comunicaciones Móviles**

**AUTOR: Enrique Rebollo García**

**TUTOR: Bazil Taha Ahmed**

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

**Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid**

**Marzo 2011**



# Agradecimientos

A mi tutor, Bazil, por su dedicación profesional a la realización de este estudio, y su disposición personal para colaborar conmigo y mis compañeros en cualquier momento.

A mis profesores, Jorge y José Luis, miembros del Grupo de Sistemas de Radiocomunicación y Comunicaciones Ópticas, por el apoyo mostrado a lo largo de mis años de estudiante en la Escuela Politécnica Superior.

A mi familia, en especial a mis padres, Enrique y Paz, por su apoyo incondicional desde hace más de una treintena de años para la consecución de mis logros en lo personal y lo profesional.

A Marcos, David y Arturo por continuar siendo mis amigos después de tantos años.

Al pueblo de Portman.



## Resumen:

El futuro de las redes de telecomunicaciones tiende a la integración de todo tipo de servicios en una única red de paquetes a la que el usuario pueda tener acceso ubicuo desde cualquier terminal. Esta tendencia se corresponde con el concepto de NGN (*Next Generation Networks*).

Las redes inalámbricas en general y, por supuesto, los estándares de telefonía móvil evolucionan también en esta dirección. En la actualidad HSPA (*High Speed Packet Access*) constituye el estándar de mayores prestaciones al que el usuario final puede tener acceso en el mercado de las comunicaciones móviles. Otros estándares con características más avanzadas como LTE (*Long Term Evolution*) no cuentan con despliegues en producción en el momento de finalizar este estudio.

HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) se presenta como una revisión del estándar UMTS Release 99, incrementando la tasa binaria en el enlace ascendente hasta los 5,76 Mbps. Nuevas revisiones del estándar han conseguido incrementar aún más su velocidad, pero tanto operadores como fabricantes de terminales no parecen especialmente interesados en explotar más allá esta tecnología

El objetivo de este estudio es analizar el rendimiento esta tecnología en situaciones reales en las que debe compartir recursos con los servicios tradicionales de voz y datos que se ofrecen simultáneamente.

El análisis se realizará para distintos escenarios como microceldas en autopistas con visión directa, microceldas en el interior de túneles, macroceldas y *High Altitude Platforms*. Cada uno de estos escenarios presenta características específicas como la estructura celular, los modelos de propagación, la distribución de usuarios, ... que han sido tomados en cuenta en las distintas simulaciones.

## Palabras clave:

- ☞ HSUPA
- ☞ UMTS
- ☞ W-CDMA
- ☞ 3GPP Release 6
- ☞ Potencia de Interferencia
- ☞ Microcelda
- ☞ Macrocelda
- ☞ HAP

## Abstract:

The future of telecommunication networks trends to the integration of all kind of services into one only packet network which can be accessed ubiquitously from any terminal. This trend is describes the concept of NGN (*Next Generation Networks*).

Wireless networks and, of course, mobile telephone standards evolve also this way. Actually, HSPA (*High Speed Packet Access*) is the highest performance standard available for users in the telecommunication market. Later standards with higher performance, like LTE (*Long Term Evolution*), are not deployed by the moment of this study.

HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) stands like a revision of UMTS Release 99 standard, increasing the uplink binary rate up to 5.76 Mbps. Later revisions of this standard have achieved to increase the speed even further, but carriers and terminal manufacturers don't seem especially interested in get this technology further.

This study is focused on analyzing the performance of this technology in real situations where it has to share resources with traditional voice and data services offered simultaneously.

The analysis will be done for different environments like highways microcells with LOS, microceldas inside tunnels, macrocells and *High Altitude Platforms*. Each of these environments presents specific features like the cellular structure, propagation models, user distribution ... which have been taken into account in every simulation.

## Key words:

- ☞ HSUPA
- ☞ UMTS
- ☞ W-CDMA
- ☞ 3GPP Release 6
- ☞ Interference Power
- ☞ Microcell
- ☞ Macrocell
- ☞ HAP

# Índice de Contenidos

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organización de la memoria .....	3
<b>2. Tecnología HSUPA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Evolución de las redes de telefonía móvil .....	5
2.1.1 Generación Cero .....	5
2.1.2 Primera Generación .....	6
2.1.3 Segunda Generación .....	6
2.1.4 Tercera Generación.....	7
2.2 Tecnología W-CDMA.....	7
2.2.1 Espectro ensanchado .....	7
2.2.2 CDMA .....	8
2.2.2.1 DS-CDMA .....	8
2.2.2.2 Receptor RAKE .....	11
2.2.3 W-CDMA .....	12
2.2.3.1 Traspaso con continuidad.....	13
2.2.3.2 Actividad discontinua de fuente.....	13
2.2.3.3 Compartición automática de carga.....	14
2.2.3.4 Protección frente a desvanecimientos por multitrayecto.....	14
2.2.3.5 Codificación de muy baja tasa .....	14
2.3 Estándar UMTS .....	15
2.3.1 Arquitectura .....	16
2.3.2 Core Network.....	16
2.3.2.1 AuC.....	16
2.3.2.2 HLR.....	17
2.3.2.3 VLR.....	17
2.3.2.4 EIR.....	17
2.3.2.5 MSC.....	17
2.3.2.6 SGSN .....	18
2.3.2.7 GGSN.....	18
2.3.3 UTRAN .....	18
2.3.3.1 Canales Lógicos.....	21
2.3.3.2 Canales de Transporte .....	21
2.3.3.3 Canales Físicos .....	22
2.3.3.3.1 P-CCPCH .....	22
2.3.3.3.2 S-CCPCH .....	22
2.3.3.3.3 PRACH .....	23
2.3.3.3.4 PCPCH .....	23
2.3.3.3.5 UL-DPDCH .....	24
2.3.3.3.6 UL-DPCCH.....	24
2.3.3.3.7 DL-DPDCH .....	25

2.3.3.3.8	DL-DPCCH .....	26
2.3.3.3.9	CPICH .....	27
2.3.3.3.10	SCH .....	27
2.3.3.3.11	PICH .....	27
2.3.3.3.12	AICH .....	27
2.3.4	Recursos de la interfaz radio .....	28
2.3.4.1	Tramas temporales .....	28
2.3.4.2	Códigos.....	29
2.3.4.2.1	Códigos ortogonales.....	29
2.3.4.2.2	Códigos de aleatorización .....	30
2.3.4.3	Codificación de canal .....	30
2.3.4.4	Modulación .....	31
2.3.4.5	Control de potencia .....	31
2.3.4.6	Antenas .....	32
2.4	HSUPA .....	32
2.4.1	Arquitectura .....	33
2.4.1.1	Canales de Transporte .....	35
2.4.1.1.1	E-DCH .....	35
2.4.1.2	Canales Físicos .....	37
2.4.1.2.1	E-DPCCH .....	37
2.4.1.2.2	E-DPDCH .....	38
2.4.1.2.3	E-HICH .....	40
2.4.1.2.4	E-AGCH .....	40
2.4.1.2.5	E-RGCH .....	41
2.4.2	MAC Layer .....	41
2.4.2.1	Información de scheduling.....	42
2.4.2.2	Información de HARQ .....	42
2.4.2.3	E-DCH Transport Format Combination .....	43
2.4.3	TTI.....	44
2.4.4	HARQ.....	45
2.4.5	Fast Scheduling.....	46
<b>3.</b>	<b>Estudio de HSUPA en microceldas – Autopistas.....</b>	<b>49</b>
3.1	Modelo de propagación.....	51
3.2	Análisis del uplink.....	52
3.2.1	Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos .....	53
3.2.2	Esperanza de interferencia para el servicio HSUPA .....	55
3.2.3	Varianza de interferencia para los servicios de voz y datos.....	56
3.2.4	Varianza de interferencia para el servicio HSUPA.....	57
3.2.5	Capacidad del sistema multiservicio .....	58
3.3	Resultados de las simulaciones.....	59
3.3.1	Servicio HSUPA .....	61
3.3.2	Servicio de voz .....	68
3.3.3	Servicio de datos .....	84
3.3.3	Voz, datos y HSUPA. ....	99

<b>4. Estudio de HSUPA en microceldas – Túneles.....</b>	<b>105</b>
4.1 Modelo de propagación.....	107
4.2 Análisis del uplink .....	108
4.2.1 Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos .....	109
4.2.2 Esperanza de interferencia para el servicio HSUPA .....	111
4.2.3 Varianza de interferencia para los servicios de voz y datos.....	112
4.2.4 Varianza de interferencia para el servicio HSUPA.....	113
4.2.5 Capacidad del sistema multiservicio .....	114
4.3 Resultados de las simulaciones .....	115
4.3.1 Servicio HSUPA.....	117
4.3.2 Servicio de voz.....	124
4.3.3 Servicio de datos .....	140
4.3.4 Voz, datos y HSUPA.....	156
<b>5. Estudio de HSUPA en macroceldas .....</b>	<b>163</b>
5.1 Modelo de propagación.....	164
5.2 Análisis del uplink .....	165
5.2.1 Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos .....	166
5.2.2 Esperanza de interferencia para el servicio HSUPA .....	168
5.2.3 Varianza de interferencia para los servicios de voz y datos.....	169
5.2.4 Varianza de interferencia para el servicio HSUPA.....	170
5.2.5 Capacidad del sistema multiservicio .....	171
5.3 Resultados de las simulaciones .....	172
5.3.1 Servicio HSUPA.....	175
5.3.2 Servicio de voz.....	187
5.3.3 Servicio de datos .....	201
<b>6. Estudio de HSUPA en HAPS.....</b>	<b>217</b>
6.1 Sistemas comerciales.....	219
6.1.1 Sky Station.....	219
6.1.2 Japanese Stratospheric Platform System .....	219
6.1.3 StartSat.....	220
6.1.4 Airborne Relay Communications System .....	221
6.1.5 HALO – Proteus .....	221
6.1.6 Helios.....	222
6.1.7 AVCS .....	222
6.1.8 Heliplat .....	223
6.2 Modelo de propagación.....	223
6.3 Análisis del uplink .....	224
6.3.1 Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos .....	226
6.3.2 Esperanza de interferencia para el servicio HSUPA .....	227
6.3.3 Varianza de interferencia para los servicios de voz y datos.....	228
6.3.4 Varianza de interferencia para el servicio HSUPA.....	229
6.3.5 Capacidad del sistema multiservicio .....	230

6.4	Resultados de las simulaciones.....	231
6.4.1	Servicio HSUPA .....	235
6.4.2	Servicio de voz .....	252
6.4.3	Servicio de datos .....	267
<b>7.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>217</b>
7.1	Células cigar-shaped en autopistas.....	283
7.2	Células cigar-shaped en túneles.....	284
7.3	Macroceldas.....	284
7.4	High Altitude Platforms.....	286
<b>8.</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>287</b>
<b>Anexo A – Presupuesto.....</b>		<b>289</b>
<b>Anexo B – Pliego de condiciones.....</b>		<b>291</b>
	Condiciones generales .....	291
	Condiciones particulares .....	294
<b>Anexo C – Publicaciones .....</b>		<b>297</b>
	WCDMA Uplink Capacity of Highways Cigar-Shaped Microcells with Incorporated HSUPA Service .....	297
	WCDMA Uplink Capacity of High Altitude Platforms (HAPs) Macrocells with Incorporated HSUPA Service.....	298

# Índice de Figuras

Figura 2.1- Clasificación de los sistemas de telefonía móvil.....	5
Figura 2.2 - Modulación DSSS.....	9
Figura 2.3 - Modulación DSSS.....	10
Figura 2.4 - Demodulación DSSS.....	10
Figura 2.5 - Transmisión / Recepción DSSS.....	11
Figura 2.6 - Diseño del receptor Rake .....	11
Figura 2.7- Arquitectura UTRAN.....	19
Figura 2.8 - Formato de trama del canal P-CCPCH .....	22
Figura 2.9 - Formato de trama del canal S-CCPCH .....	23
Figura 2.10 - Formato de trama del canal UL-DPDCH .....	24
Figura 2.11 - Formato de trama del canal UL-DPCCH.....	25
Figura 2.12 - Formato de trama de los canales DL-DPDCH y DL-DPCCH .....	26
Figura 2.13 - Orthogonal Variable Spreading Factor .....	29
Figura 2.14 - Arquitectura HSUPA .....	34
Figura 2.15 - Diferencias en el procesado de los canales DCH y E-DCH .....	36
Figura 2.16 - Formato de trama del canal E-DPCCH .....	37
Figura 2.17- Información transmitida por el canal E-DPCCH.....	38
Figura 2.18 - Formato de trama del canal E-DPDCH.....	39
Figura 2.19 - Formato de trama del canal E-HICH .....	40
Figura 2.20 - Información transmitida por el canal E-AGCH.....	41
Figura 2.21 - Transmission Time Interval (2ms ó 10ms).....	44
Figura 3.1 - Autopista M-50 - Madrid .....	49
Figura 3.2 - Célula cigar-shaped .....	50
Figura 3.3 - Patrón de radiación azimuth .....	50
Figura 3.4 - Modelo de microceldas cigar-shaped.....	52
Figura 3.5 - Modelo de microcelda.....	52
Figura 3.6 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA.....	62
Figura 3.7 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=16$ ) - Control de potencia.....	63
Figura 3.8 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=8$ ) - Control de potencia.....	63
Figura 3.9 - Esperanza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA .....	64
Figura 3.10 - Varianza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA.....	65

Figura 3.11 - Esperanza de potencia de interferencia sobre dos sectores vecinos .....	66
Figura 3.12 - Varianza de potencia de interferencia sobre dos sectores vecinos.....	66
Figura 3.13 - Capacidad del servicio HSUPA- 1 usuario externo.....	67
Figura 3.14 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz.....	68
Figura 3.15 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA .....	69
Figura 3.16 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA .....	70
Figura 3.17 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ ) .....	71
Figura 3.18 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ ) .....	72
Figura 3.19 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice $\gamma_1$ .....	73
Figura 3.20 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice $\gamma_1$ .....	74
Figura 3.21 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice $\gamma_2$ .....	75
Figura 3.22 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice $\gamma_2$ .....	75
Figura 3.23 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación $\sigma_1$ .....	76
Figura 3.24 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación $\sigma_1$ .....	77
Figura 3.25 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación $\sigma_2$ .....	78
Figura 3.26 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación $\sigma_2$ .....	78
Figura 3.27 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - distancia $R_b$ .....	79
Figura 3.28 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - distancia $R_b$ .....	80
Figura 3.29 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - $C_{dm}$ .....	81
Figura 3.30 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - $C_{dm}$ .....	81
Figura 3.31 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - $R$ .....	82
Figura 3.32 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - $R$ .....	83
Figura 3.33 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos .....	84
Figura 3.34 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA.....	85
Figura 3.35 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA.....	86
Figura 3.36 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ ).....	87
Figura 3.37 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ ).....	87
Figura 3.38 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice $\gamma_1$ .....	89
Figura 3.39 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice $\gamma_1$ .....	89
Figura 3.40 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice $\gamma_2$ .....	90
Figura 3.41 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice $\gamma_2$ .....	91
Figura 3.42 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación $\sigma_1$ .....	92
Figura 3.43 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación $\sigma_1$ .....	92
Figura 3.44 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación $\sigma_2$ .....	93
Figura 3.45 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación $\sigma_2$ .....	94

Figura 3.46 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - distancia $R_b$ .....	95
Figura 3.47 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - distancia $R_b$ .....	95
Figura 3.48 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - $C_{dm}$ .....	96
Figura 3.49 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - $C_{dm}$ .....	97
Figura 3.50 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - $R$ .....	98
Figura 3.51 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - $R$ .....	98
Figura 3.52 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 1 usuario datos R99 .....	100
Figura 3.53 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 2 usuarios datos R99 .....	101
Figura 3.54 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 3 usuarios datos R99 .....	102
Figura 3.55 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 4 usuarios datos R99 .....	103
Figura 4.1 – Túnel de la circunvalación M-30 - Madrid .....	105
Figura 4.2 - Célula cigar-shaped .....	106
Figura 4.3- Patrón de radiación azimuth .....	106
Figura 4.4 - Modelo de microceldas cigar-shaped.....	108
Figura 4.5 - Modelo de microcelda.....	108
Figura 4.6 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA.....	118
Figura 4.7 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=16$ ) - Control de potencia.....	119
Figura 4.8 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=8$ ) - Control de potencia.....	119
Figura 4.9 - Esperanza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA .....	120
Figura 4.10 - Varianza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA.....	121
Figura 4.11 - Esperanza de potencia de interferencia sobre dos sectores vecinos .....	122
Figura 4.12 - Varianza de potencia de interferencia sobre dos sectores vecinos .....	122
Figura 4.13 - Capacidad del servicio HSUPA- 1 usuario externo.....	123
Figura 4.14 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz .....	124
Figura 4.15 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA.....	125
Figura 4.16 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA.....	126
Figura 4.17 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ ) .....	127
Figura 4.18 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ ) .....	128
Figura 4.19 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice $\gamma$ .....	129
Figura 4.20 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice $\gamma$ .....	130
Figura 4.21 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - atenuación $n$ .....	131
Figura 4.22 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - atenuación $n$ .....	131
Figura 4.23 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - distancia $R_b$ .....	133
Figura 4.24 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - distancia $R_b$ .....	133
Figura 4.25 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación $\sigma_1$ .....	134

Figura 4.26 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación $\sigma_1$ .....	135
Figura 4.27 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación $\sigma_2$ .....	136
Figura 4.28 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación $\sigma_2$ .....	136
Figura 4.29 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - $C_{dm}$ .....	137
Figura 4.30 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - $C_{dm}$ .....	138
Figura 4.31 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - $R$ .....	139
Figura 4.32 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - $R$ .....	139
Figura 4.33 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos .....	140
Figura 4.34 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA.....	141
Figura 4.35 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA.....	142
Figura 4.36 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ ).....	143
Figura 4.37 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ ).....	144
Figura 4.38 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice $\gamma$ .....	145
Figura 4.39 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice $\gamma$ .....	146
Figura 4.40 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - atenuación $n$ .....	147
Figura 4.41 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - atenuación $n$ .....	147
Figura 4.42 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - distancia $R_b$ .....	149
Figura 4.43 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - distancia $R_b$ .....	149
Figura 4.44 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación $\sigma_1$ .....	150
Figura 4.45 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación $\sigma_1$ .....	151
Figura 4.46 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación $\sigma_2$ .....	152
Figura 4.47 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación $\sigma_2$ .....	152
Figura 4.48 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - $C_{dm}$ .....	153
Figura 4.49 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - $C_{dm}$ .....	154
Figura 4.50 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - $R$ .....	155
Figura 4.51 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - $R$ .....	155
Figura 4.52 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 1 usuario datos R99.....	157
Figura 4.53 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 2 usuarios datos R99 .....	158
Figura 4.54 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 3 usuarios datos R99 .....	159
Figura 4.55 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 4 usuarios datos R99 .....	160
Figura 5.1 - Estructura de la red celular .....	163
Figura 5.2 - Modelo de 5 coronas utilizado en el estudio.....	165
Figura 5.3 - Modelo de macroceldas .....	166
Figura 5.4 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Ciudad grande.....	175
Figura 5.5 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Ciudad media .....	176

Figura 5.6 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA – Suburbano .....	176
Figura 5.7 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Rural .....	176
Figura 5.8 Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Control de potencia - Ciudad grande.....	177
Figura 5.9 Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Control de potencia - Ciudad media.....	178
Figura 5.10 Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Control de potencia – Suburbano.....	178
Figura 5.11 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Control de potencia - Rural .....	178
Figura 5.12 - Exponente de propagación en función de la altura de la estación base .....	179
Figura 5.13 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA - Altura de la base - Ciudad grande .....	180
Figura 5.14 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA - Altura de la base - Ciudad media.....	180
Figura 5.15 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA - Altura de la base - Suburbano .....	180
Figura 5.16 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA - Altura de la base - Rural .....	181
Figura 5.17 – Estadísticos de potencia de interferencia - Ciudad grande .....	181
Figura 5.18 - Estadísticos de potencia de interferencia - Ciudad media .....	182
Figura 5.19 - Estadísticos de potencia de interferencia – Suburbano .....	182
Figura 5.20 - Estadísticos de potencia de interferencia - Rural .....	182
Figura 5.21 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo - Ciudad grande .....	183
Figura 5.22 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo - Ciudad media.....	184
Figura 5.23 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo - Suburbano .....	184
Figura 5.24 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo - Rural .....	185
Figura 5.25 - Capacidad del servicio HSUPA - 2 usuarios externos - Ciudad grande .....	186
Figura 5.26 - Capacidad del servicio HSUPA - 2 usuarios externos - Ciudad media .....	186
Figura 5.27 - Capacidad del servicio HSUPA - 2 usuarios externos – Suburbano .....	186
Figura 5.28 - - Capacidad del servicio HSUPA - 2 usuarios externos – Rural .....	187
Figura 5.29 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz - Ciudad grande .....	188
Figura 5.30 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz - Ciudad media .....	188
Figura 5.31 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz - Suburbano .....	189
Figura 5.32 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz - Rural .....	189
Figura 5.33 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA interno - Ciudad grande.....	191
Figura 5.34 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA interno - Ciudad media.....	191
Figura 5.35 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA interno - Suburbano .....	191
Figura 5.36 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA interno - Rural.....	192
Figura 5.37 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA internos - Ciudad grande.....	192
Figura 5.38 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA internos - Ciudad media.....	193
Figura 5.39 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA internos – Suburbano.....	193
Figura 5.40 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA internos - Rural.....	193

Figura 5.41 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo - Ciudad grande .....	194
Figura 5.42 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo - Ciudad media .....	195
Figura 5.43 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo - Suburbano .....	195
Figura 5.44 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo - Rural .....	196
Figura 5.45 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA externos - Ciudad grande .....	197
Figura 5.46 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA externos - Ciudad media .....	197
Figura 5.47 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA externos – Suburbano .....	197
Figura 5.48 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA externos - Rural .....	198
Figura 5.49 - Posibles localizaciones de los 6 usuarios interferentes .....	199
Figura 5.50 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos - Ciudad grande .....	199
Figura 5.51 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos - Ciudad media .....	200
Figura 5.52 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos - Suburbano .....	200
Figura 5.53 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos - Rural .....	201
Figura 5.54 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos - Ciudad grande .....	202
Figura 5.55 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos - Ciudad media .....	202
Figura 5.56- Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos - Suburbano.....	203
Figura 5.57 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos - Rural.....	203
Figura 5.58 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA interno - Ciudad grande .....	205
Figura 5.59 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA interno - Ciudad media.....	205
Figura 5.60 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA interno - Suburbano .....	205
Figura 5.61 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA interno - Rural .....	206
Figura 5.62 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA internos - Ciudad grande .....	206
Figura 5.63 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA internos - Ciudad media.....	207
Figura 5.64 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA internos – Suburbano .....	207
Figura 5.65 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA internos - Rural .....	207
Figura 5.66 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo - Ciudad grande.....	208
Figura 5.67 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo - Ciudad media .....	209
Figura 5.68 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo - Suburbano .....	209
Figura 5.69 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo - Rural.....	210
Figura 5.70 Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA externos - Ciudad grande.....	211
Figura 5.71 Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA externos - Ciudad media .....	211
Figura 5.72 Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA externos – Suburbano.....	211
Figura 5.73 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA externos – Rural.....	212
Figura 5.74 - Posibles localizaciones de los 6 usuarios interferentes .....	213
Figura 5.75 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos - Ciudad grande.....	213

Figura 5.76 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos - Ciudad media.....	214
Figura 5.77 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos - Suburbano .....	214
Figura 5.78 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos - Rural .....	215
Figura 6.1- Sky Station .....	219
Figura 6.2 - Japanese Stratospheric Platform System .....	220
Figura 6.3 –StartSat .....	220
Figura 6.4 - Sistema HALO .....	221
Figura 6.5 – Helios .....	222
Figura 6.6 – Heliplat.....	223
Figura 6.7 - Modelo de 5 coronas utilizado en las simulaciones .....	224
Figura 6.8 - Modelo de High Altitude Platform .....	225
Figura 6.9 - Eficiencia de reutilización de frecuencias.....	227
Figura 6.10 - Ganancia de la antena receptora .....	234
Figura 6.11 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA ( $G_p=16$ ).....	235
Figura 6.12 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA ( $G_p=8$ ).....	236
Figura 6.13 - Capacidad del servicio HSUPA - Radio celular .....	237
Figura 6.14 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=16$ ) - Velocidad máxima .....	238
Figura 6.15 - - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=8$ ) - Velocidad máxima .....	238
Figura 6.16 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=16$ ) - Altitud del HAP .....	239
Figura 6.17 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=8$ ) - Altitud del HAP .....	240
Figura 6.18 - Esperanza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA .....	241
Figura 6.19 - Varianza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA.....	242
Figura 6.20 - Posibles localizaciones del usuario interferente ( $0,1^\circ$ ).....	243
Figura 6.21 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo ( $0^\circ$ ) .....	243
Figura 6.22 - Posibles localizaciones del usuario interferente ( $29,9^\circ$ ).....	244
Figura 6.23 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo ( $29,9^\circ$ ) .....	245
Figura 6.24 - Célula en la que se localiza el usuario interferente.....	246
Figura 6.25 - Capacidad del servicio HSUPA ( $G_p=16$ ) - 1u interferente en la 1ª corona .....	247
Figura 6.26 - Capacidad del servicio HSUPA ( $G_p=8$ ) - 1u interferente en la 1ª corona .....	247
Figura 6.27 - Posibles localizaciones de los 6 usuarios interferentes.....	248
Figura 6.28 - Capacidad del servicio HSUPA - 6 usuarios externos ( $0,0^\circ$ ) .....	249
Figura 6.29 - Capacidad del servicio HSUPA - 6 usuarios externos ( $29,9^\circ$ ).....	249
Figura 6.30 - Células en las que se localizan los 6 usuarios interferentes .....	250
Figura 6.31 - Capacidad del servicio HSUPA ( $G_p=16$ ) - 6u interferentes en la 1ª corona .....	251
Figura 6.32 Capacidad del servicio HSUPA ( $G_p=8$ ) - 6u interferentes en la 1ª corona.....	251

Figura 6.33 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz.....	252
Figura 6.34 - Capacidad del servicio de voz - Radio celular .....	253
Figura 6.35 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz - Velocidad máxima .....	254
Figura 6.36 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) interno .....	255
Figura 6.37 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) interno .....	255
Figura 6.38 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ ) internos .....	256
Figura 6.39 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ ) internos .....	257
Figura 6.40 - Posibles localizaciones del usuario interferente ( $0,1^\circ$ ) .....	258
Figura 6.41 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo ( $0,0^\circ$ ) .....	258
Figura 6.42 - Posibles localizaciones del usuario interferente ( $29,9^\circ$ ) .....	259
Figura 6.43 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo ( $29,9^\circ$ ) .....	260
Figura 6.44 - Posibles localizaciones de los 6 usuarios interferentes .....	261
Figura 6.45 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos ( $0,0^\circ$ ) .....	262
Figura 6.46 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos ( $29,9^\circ$ ) .....	262
Figura 6.47 - Célula en la que se localiza el usuario interferente .....	263
Figura 6.48 - Capacidad del servicio de voz - 1u interferente en la 1ª corona .....	264
Figura 6.49 - Capacidad del servicio de voz - 1u interferente en la 1ª corona .....	264
Figura 6.50 - Células en las que se localizan los 6 usuarios interferentes .....	265
Figura 6.51 - Capacidad del servicio de voz - 6u interferentes en la 1ª corona.....	266
Figura 6.52 - Capacidad del servicio de voz - 6u interferentes en la 1ª corona.....	266
Figura 6.53 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos .....	267
Figura 6.54 - Capacidad del servicio de datos - Radio celular .....	268
Figura 6.55 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos - Velocidad máxima.....	269
Figura 6.56 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) interno.....	270
Figura 6.57 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) interno.....	270
Figura 6.58 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ ) internos.....	271
Figura 6.59 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ ) internos.....	272
Figura 6.60 - Posibles localizaciones del usuario interferente ( $0,1^\circ$ ) .....	273
Figura 6.61 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo ( $0,0^\circ$ ) .....	273
Figura 6.62 - Posibles localizaciones del usuario interferente ( $29,9^\circ$ ) .....	274
Figura 6.63 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo ( $29,9^\circ$ ) .....	275
Figura 6.64 - Posibles localizaciones de los 6 usuarios interferentes .....	276
Figura 6.65 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos ( $0,0^\circ$ ) .....	277
Figura 6.66 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos ( $29,9^\circ$ ).....	277
Figura 6.67 - Célula en la que se localiza el usuario interferente .....	278

Figura 6.68 - Capacidad del servicio de datos - 1u interferente en la 1ª corona .....	279
Figura 6.69 - Capacidad del servicio de datos - 1u interferente en la 1ª corona .....	279
Figura 6.70 - Células en las que se localizan los 6 usuarios interferentes .....	280
Figura 6.71 - Capacidad del servicio de datos - 6u interferentes en la 1ª corona.....	281
Figura 6.72 - Capacidad del servicio de datos - 6u interferentes en la 1ª corona.....	281



# 1. Introducción

## 1.1 Motivación

La evolución del mercado de las telecomunicaciones tiende a la integración de distintos tipos de servicios (voz, datos, video) en una única red global con protocolos IP y ubicuidad de acceso independientemente de la tecnología utilizada, sea esta fija o móvil.

Las redes celulares de telefonía móvil no son ajenas a esta tendencia. En 1999, la UIT define la IMT-2000 como estándar global para la tercera generación de redes de comunicaciones inalámbricas.

En 2000, el 3GPP especificó en su Release 99 la primera red 3G con interfaz aire CDMA: W-CDMA, conocido como UMTS en Europa. CDMA utiliza tecnología de espectro ensanchado y un esquema de codificación para permitir la multiplexación sobre un mismo canal físico.

Sin embargo, el crecimiento en la demanda de acceso móvil y la evolución hacia contenidos en tiempo real obliga a la búsqueda de nuevas tecnologías que aumenten la velocidad de transferencia y disminuyan los tiempos de latencia. Para dar respuesta a estas necesidades, el 3GPP continuó trabajando en la definición de nuevos estándares

En la Release 5 (2002) se define HSDPA que, introduciendo un nuevo canal compartido en el downlink, mejora la tasa binaria de descarga hasta los 14Mbps.

En la Release 6 (2004) se define HSUPA, mejorando la tasa binaria del uplink hasta los 5,76Mbps. La Release 7 (2007) incluye además una nueva categoría de dispositivos capaces de alcanzar los 11,5Mbps en este enlace.

La utilización conjunta de ambas tecnologías, conocida como HSPA, mejora de manera importante la eficiencia espectral de W-CDMA, aumentando significativamente su capacidad y disminuyendo los tiempos de latencia. De esta forma, las redes móviles consiguen unas prestaciones similares a otras tecnologías de acceso fijas, permitiendo ofrecer mediante accesos inalámbricos contenido multimedia y otros servicios en tiempo real.

HSPA, además de futuras evoluciones como LTE (3GPP Release 8), permitirán sustituir definitivamente las actuales redes móviles basadas en conmutación de circuitos por redes basadas en conmutación de paquetes, utilizando protocolos VoIP y señalización por SIP.

Así pues, nos encontramos en un escenario en el que los dispositivos móviles adquieren cada vez mayor funcionalidad, exigiendo a las redes inalámbricas mayores capacidades de movilidad, ubicuidad en el acceso y unas prestaciones equivalentes a las de las redes cableadas. Para dar respuesta a esta necesidad han ido surgiendo una gran cantidad de

tecnologías que mejoran sus prestaciones haciendo uso de menores factores de ensanchamiento y elevadas potencias de transmisión, mostrando, en general, una gran voracidad de recursos.

Pero... ¿Cómo se comportan estas tecnologías en escenarios reales donde las condiciones no son las idóneas? ¿Cómo conviven con otros servicios de telecomunicaciones? ¿En qué medida afectan a otros servicios tradicionales? ¿En qué medida se ven afectados por ellos? Dar respuesta a estos interrogantes es la verdadera motivación de este estudio.

## 1.2 Objetivos

El principal objetivo del estudio consiste en la elaboración de un perfil del régimen binario de subida de datos mediante tecnología HSUPA en función de :

- número de usuarios registrados dentro de una misma celda.
- distancia de dichos usuarios a la estación base.

Se analizará la tasa binaria de datos que puede alcanzarse en el uplink con esta tecnología en distintas aplicaciones de comunicaciones móviles y se realizará un estudio de cobertura.

De los resultados de este estudio, se extraerán conclusiones sobre sí, tras su despliegue completo, la tecnología HSUPA será capaz de competir con otras tecnologías de acceso cableado (típicamente xDSL).

Se realizará el estudio para distintos sistemas de telecomunicaciones en los que la tecnología HSUPA se utiliza en la actualidad:

Telefonía móvil: La tecnología HSUPA forma parte de la denominada generación 3.5, actualmente en proceso de implantación en España. Se realizarán estudios en los escenarios más habituales: una gran ciudad, una localidad suburbana y una zona rural.

HAP's : Sistema de comunicaciones que la UIT-R, denomina a las estaciones radioeléctricas que pueden embarcarse en globos, aviones estratosféricos o planeadores, capaces de permanecer durante días a altitudes de hasta 25km., Ideados como sistemas de emergencia para situaciones de guerra o desastres naturales, pueden resultar adecuados para implementar la tecnología HSUPA. . Se realizará un estudio sobre su viabilidad y régimen binario en un escenario de este tipo.

### 1.3 Organización de la memoria

La tecnología *High Speed Uplink Packet Access* no constituye en sí misma un estándar de comunicaciones móviles, sino más bien una mejora al sistema UMTS que en su modalidad más común implementa la tecnología WCDMA en su interfaz radio. Por ello, aunque nos centraremos en HSUPA como el objeto de este estudio, se incluyen en diferentes capítulos breves descripciones de estas otras tecnologías para asegurar la comprensión por parte del lector.

#### 1. Introducción

#### 2. Tecnología HSUPA

En este capítulo presenta un mapa de la evolución de las tecnologías de comunicaciones móviles hasta su estado actual. Se describen la tecnología de acceso WCDMA, así como los fundamentos básicos de las comunicaciones de espectro ensanchado. Se ofrece también una descripción básica el estándar UMTS y de los elementos y los protocolos que lo componen, prestando especial atención a la implementación del subsistema radio. Por último, se presenta el estándar HSUPA y conoceremos las tecnologías que permiten mejorar las prestaciones del uplink del enlace radio de UMTS.

#### 3. Estudio de HSUPA en microceldas – Autopistas

En este capítulo se ofrece una descripción básica del modelo de propagación definido para este tipo de entornos y del modelo matemático en el que se basan las simulaciones. Se estudia la capacidad de la célula para distintos servicios en condiciones del tipo de las que encontraríamos en un escenario real. Se estudiará el efecto que tiene sobre estos servicios la prestación simultánea de un servicio de datos de alta velocidad.

#### 4. Estudio de HSUPA en microceldas – Túneles

Se describen los modelos utilizados para este tipo de escenarios y se realizan las mismas simulaciones para distintos servicios..

5. Estudio de HSUPA en macroceldas

Se describen los modelos utilizados para este tipo de escenarios y se realizan las mismas simulaciones para distintos servicios.

6. Estudio de HSUPA en HAPS

Se describen los modelos utilizados para este tipo de escenarios y se realizan las mismas simulaciones para distintos servicios.

7. Conclusiones

8. Referencias

## 2. Tecnología HSUPA

### 2.1 Evolución de las redes de telefonía móvil

La evolución histórica de los sistemas de comunicaciones móviles se estructura en varias generaciones que agrupan sistemas de características técnicas similares. La Figura 2.1 muestra esta clasificación.

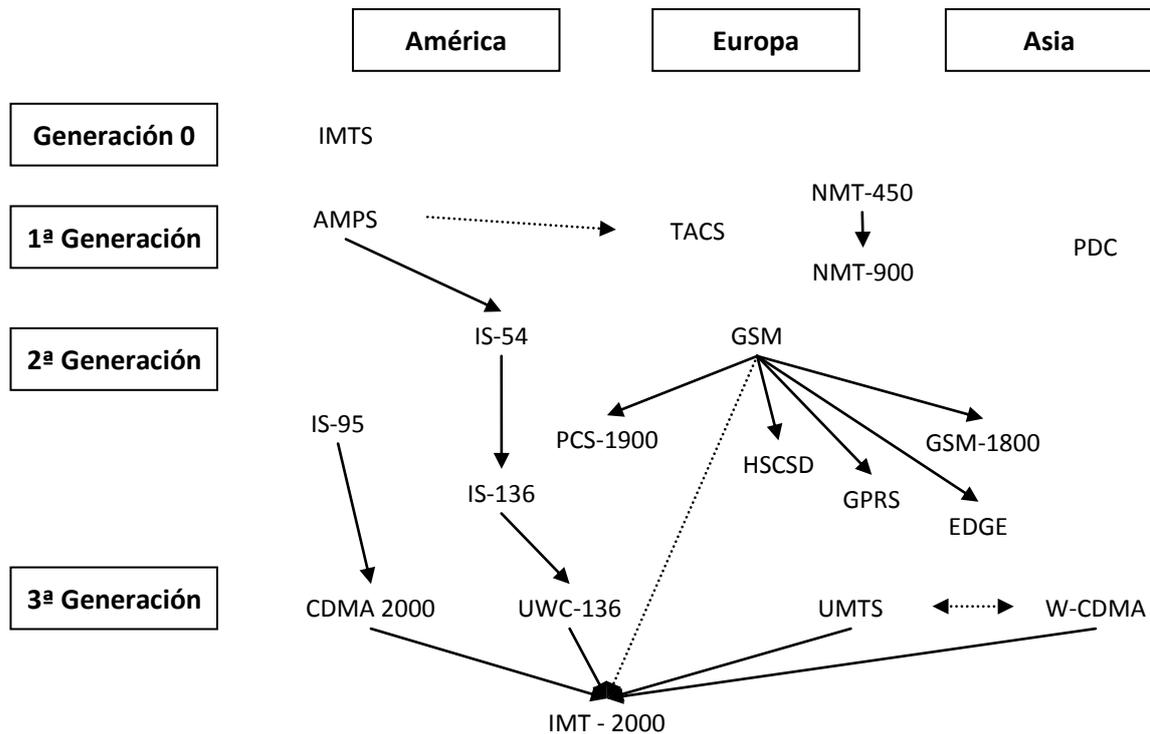


Figura 2.1- Clasificación de los sistemas de telefonía móvil

#### 2.1.1 Generación Cero

Esta generación está formada por sistemas no celulares que utilizaban estaciones base de gran potencia situadas en emplazamientos elevados ofreciendo cobertura a grandes áreas de radio 50 – 70 km.

En el enlace ascendente se empleaba un grupo de receptores repartidos estratégicamente por la región de cobertura, seleccionándose el más adecuado mediante un mecanismo de *voting*.

Estos sistemas transmitían la voz y la información de señalización mediante modulaciones analógicas en frecuencia. Se ofrecía acceso múltiple a distintos usuarios separando los canales en frecuencia (FDMA). Los enlaces ascendente y descendente también se separaban en frecuencia (FDD).

### 2.1.2 Primera Generación

Los sistemas pertenecientes a esta generación ya hacen uso del concepto celular clásico, separando el área de cobertura en células y reutilizando las frecuencias. Algunos de estos sistemas aún están en uso en la actualidad. El principal representante de esta generación es IMTS (*Improved Mobile Telephone System*) utilizado en Estados Unidos a mediados de los años 60.

En ellos, los canales de tráfico continúan siendo analógicos, basados en FDMA y FDD, pero la transmisión de la señalización es digital.

El principal representante de esta generación es AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) desplegado en Estados Unidos a partir de 1983. A partir de este estándar se desarrollaron otros en diferentes países de Europa como TACS (*Total Access Communication System*) en Reino Unido y España, ó NMT (*Nosdiska Mobil Telefongruppen*) en los países nórdicos.

### 2.1.3 Segunda Generación

Las limitaciones de los sistemas de 1ª generación comenzaron a hacerse evidentes a finales de los años 80, por lo que se comenzó a trabajar en el desarrollo de nuevos estándares.

En 1989 la TIA (*Telecommunications Industries Association*) liberó el estándar IS-54 ó D-AMPS, con transmisión digital y multiplexación por división en el tiempo.

En 1993 comenzó a funcionar en Estados Unidos el sistema IS-95. Este sistema, también llamado CDMA-One, fue el primer sistema móvil celular en utilizar la tecnología CDMA con ensanchamiento del espectro por secuencia directa. Posteriormente, este estándar se extendería a todo el continente americano y a Asia.

En Europa, el principal representante de esta generación es GSM (*Global System for Mobile communications*), basado en FDMA y TDMA. Este estándar fue puesto en funcionamiento en 1992 y actualmente está extendido por prácticamente todo el mundo.

### 2.1.4 Tercera Generación

Aunque los sistemas de 2ª Generación se encuentran aún en funcionamiento, la necesidad de una mayor capacidad y el limitado conjunto de servicios que con ellos puede ofrecerse hizo

Diversos organismos de estandarización, coordinados por la ITU (*International Telecommunication Union*), comenzaron a trabajar a finales de los años 80 en la especificación de un nuevo conjunto de sistemas que hiciera frente a esta demanda. El resultado de este esfuerzo conjunto fue la definición de IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications - 2000*), conocido actualmente como 3G.

En Estados Unidos y Asia, esta definición se encuentra implementada en el estándar CDMA-2000, que aprovecha parte de la infraestructura de IS-95.

En Europa, el principal representante de esta generación es UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) que puede utilizar distintas tecnologías en la interfaz radio, siendo la más modalidad más habitual la que utiliza W-CDMA. En el capítulo 4 de esta memoria puede encontrarse una descripción más detallada de este estándar.

## 2.2 Tecnología W-CDMA

### 2.2.1 Espectro ensanchado

Los sistemas de espectro ensanchado son aquéllos en los que el ancho de banda de las señales transmitidas es muy superior al mínimo necesario para transportar la información. Para este proceso es necesaria una secuencia de ensanchamiento o código, independiente de la señal de información y que debe ser conocida por el receptor para poder recuperarla.

A cambio de una mayor ocupación espectral, este tipo de sistemas presenta una serie de ventajas sobre los sistemas convencionales:

- Reducción de la densidad espectral de potencia
- Privacidad
- Protección frente a interferencias
- Elevada resolución temporal
- Protección frente al desvanecimiento multirayecto

## 2.2.2 CDMA

*Code Division Multiple Access* (CDMA) es un término genérico para varios métodos de multiplexación del medio basados en la tecnología de espectro expandido. Las señales se transmiten simultáneamente en el mismo canal utilizando distintos códigos ortogonales y pueden separarse en el receptor gracias a las propiedades de ensanchamiento espectral.

Respecto a las técnicas clásicas de multiplexación basadas en frecuencia (FDMA) o en tiempo (TDMA), el acceso CDMA se beneficia de la mejor adaptación de las señales de espectro ensanchado a los entornos en los que se despliegan este tipo de redes.

Existen distintas variantes de CDMA en función de la técnica de espectro ensanchado utilizada:

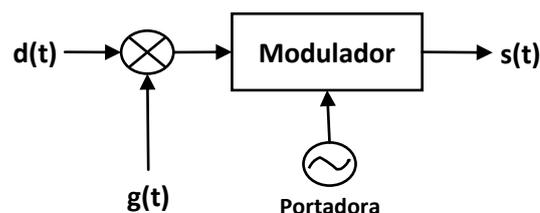
- *Frequency Hopping*, en las que la frecuencia de la portadora cambia en el tiempo según un patrón establecido.
- *Time Hopping*, en las que el intervalo de transmisión dentro de una estructura de trama temporal cambia según un patrón establecido.
- *Direct Sequence*, en las que la secuencia original se multiplica por una secuencia de chips de mucha mayor velocidad.
- *Multicarrier*, en las que se genera un conjunto de chips a partir de cada símbolo, cada uno de los cuales modula a una subportadora diferente.

De todas ellas, la modalidad de Secuencia Directa (DS) es la más habitual en sistemas de comunicaciones móviles y es la utilizada en los métodos de acceso W-CDMA.

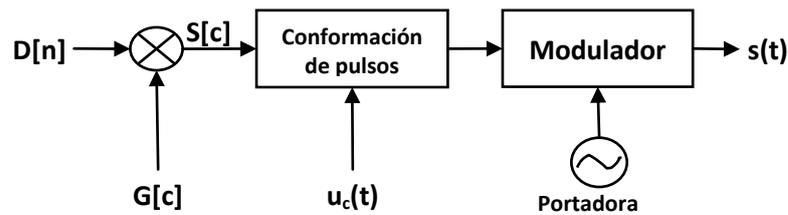
### 2.2.2.1 DS-CDMA

Una de las posibles formas de realizar la expansión espectral consiste en la multiplicación directa de la señal de información  $d(t)$  y el código de expansión  $c(t)$ .

La señal resultante de la multiplicación  $v(t)$  se aplica a un modulador a cuya salida se obtiene la señal RF,  $s(t)$ .



(a) multiplicación de formas de onda



(b) multiplicación de secuencias

Figura 2.2 - Modulación DSSS

El código es una señal digital con una velocidad binaria muy superior a la de la señal de información para realizar su expansión. A los símbolos de  $c(t)$  se les denomina *chips* para distinguirlos de los bits de  $d(t)$ .

En el estándar de comunicaciones móviles objeto de este estudio la secuencia de código es de tipo pseudoaleatorio o pseudoruido *PN*. Una secuencia *PN* es una sucesión de bits (+1,-1) que se repite con período muy grande y que tiene propiedades similares a las de una secuencia aleatoria incorrelada de media nula, estos, ruido blanco.

Sean

- $D[m]$  la secuencia de bits de datos con velocidad  $v_b = 1/T_b$
- $C[n]$  la secuencia de chips de código con velocidad  $v_c = 1/T_c = N v_b$

Las señales de datos y de código se representan como

$$d(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} D[m]u_b(t - mT_b)$$

$$c(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C[n]u_c(t - mT_c)$$

Siendo  $u_b$  y  $u_c$  impulsos rectangulares sin vuelta a cero, de amplitud unidad y duraciones  $T_b$  y  $T_c$  respectivamente. El coeficiente entero  $N$  se denomina factor de expansión.

La secuencia ensanchada  $V[n]$  se obtiene como

$$V[n] = C[n] D\left[\frac{n}{N}\right]$$

La señal en banda base  $v(t)$

$$v(t) = c(t)d(t) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} V[n]u_c(t - mT_c)$$

Sobre esta señal  $v(t)$  se realiza normalmente una modulación de canal IQ resultando la señal  $s(t)$  que es finalmente transmitida.

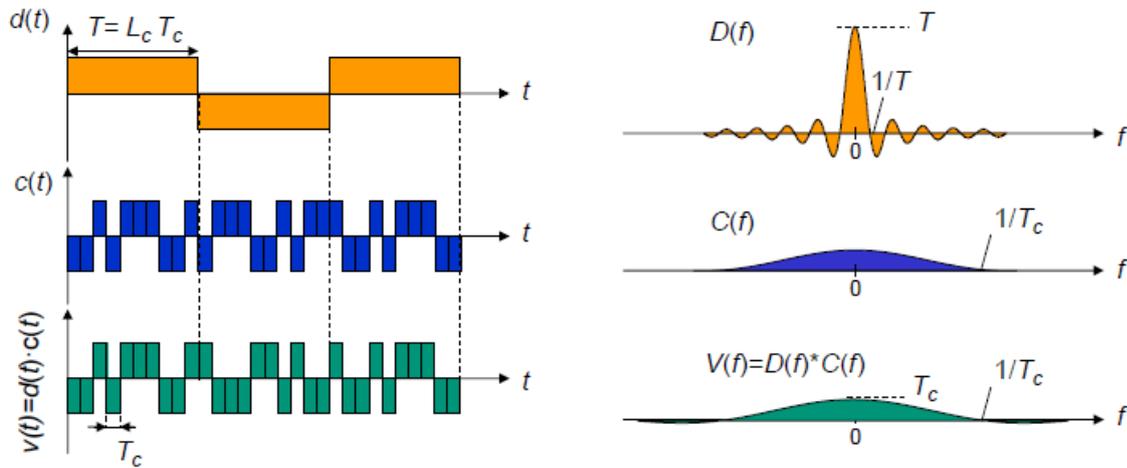
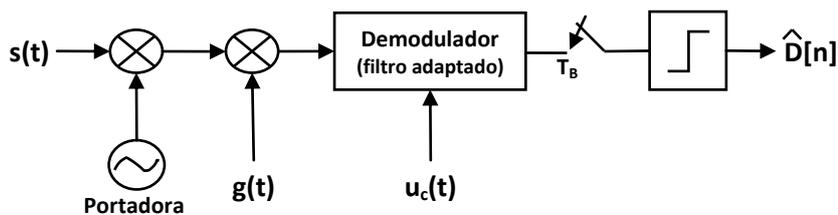


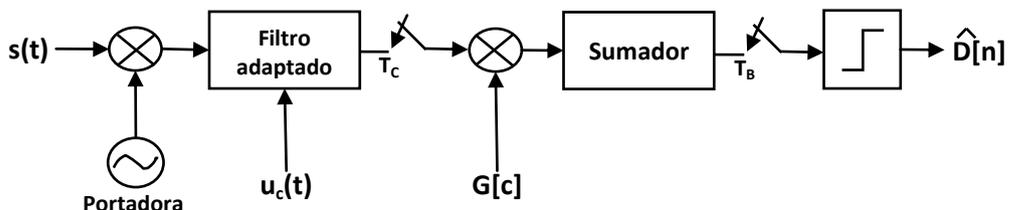
Figura 2.3 - Modulación DSSS

En recepción, después de la demodulación si hubo una modulación previa, la señal  $r(t)$  se multiplica de nuevo por una copia sincronizada de la señal de código  $c(t)$ , obteniendo nuevamente la señal  $d(t)$ .

$$r(t)c(t) = v(t)c(t) = d(t)c(t)d(t) = d(t)$$



(a) multiplicación de formas de onda



(b) multiplicación de secuencias

Figura 2.4 - Demodulación DSSS

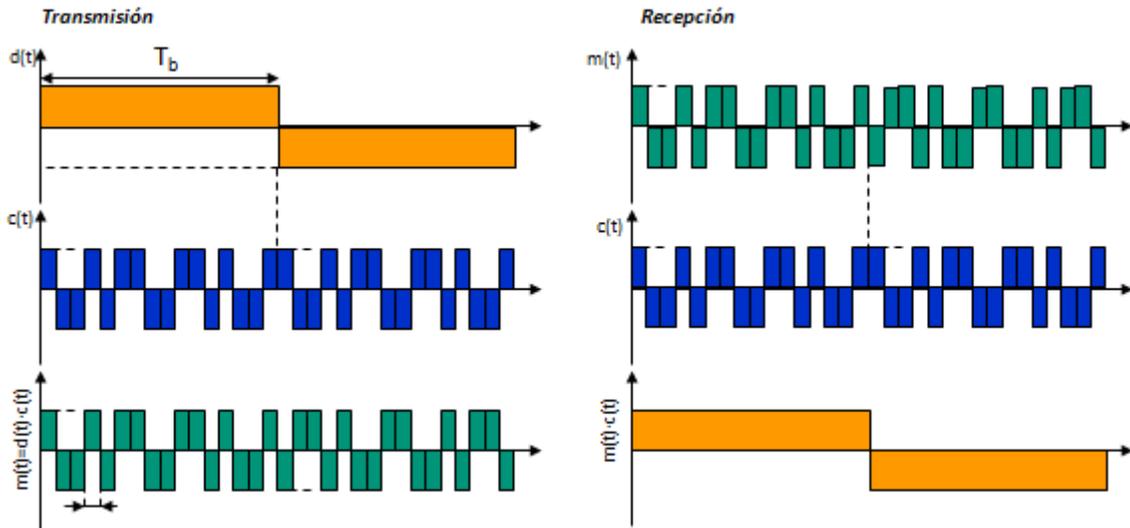


Figura 2.5 - Transmisión / Recepción DSSS

### 2.2.2.2 Receptor RAKE

Cuando transmitimos una señal DSSS por un canal con dispersión temporal, el filtro adaptado a la forma de onda recibida se implementa mediante una estructura conocida como receptor Rake, denominada así por su analogía con un rastrillo.

Este receptor consta de varias ramas retrasadas un tiempo  $T_c$  cuyas salidas se combinan linealmente según unos coeficientes, dando lugar al valor sobre el que se decidirá el símbolo recibido. La Figura 2.6 muestra esquemáticamente el diseño del receptor.

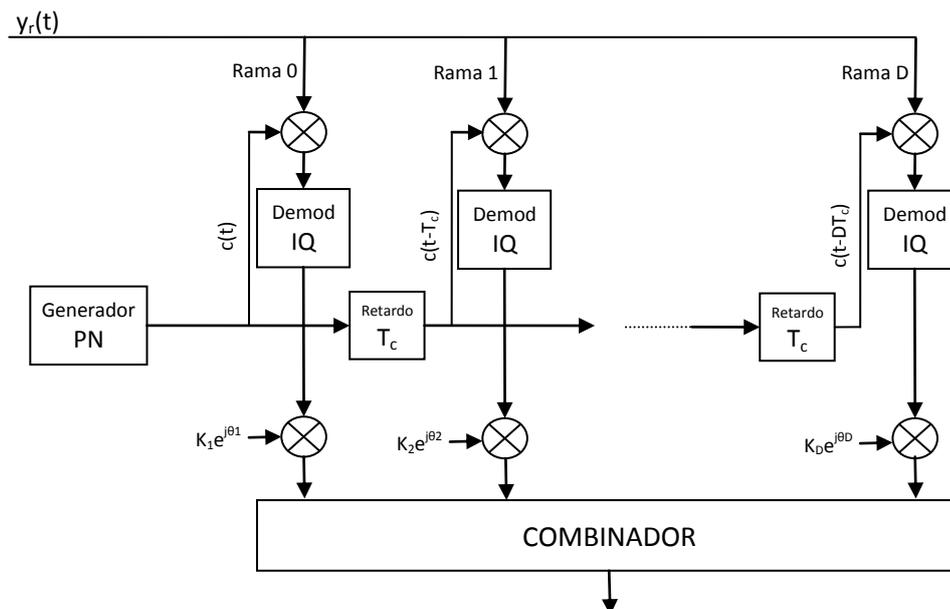


Figura 2.6 - Diseño del receptor Rake

El receptor detecta cada una de las componentes multitrayecto y realiza una combinación óptima de las mismas. De este modo, el receptor Rake puede interpretarse como un sistema de diversidad por combinación, en el que las réplicas de multitrayecto generadas por el canal son separadas por componentes. Estas componentes no son absolutamente independientes ya que existirá cierto grado de interferencia entre ellas, dependiendo de las características de autocorrelación de la secuencia de código utilizada.

### 2.2.3 W-CDMA

*Wideband Code Division Multiple Access* (W-CDMA) es una técnica de acceso múltiple por código CDMA basada en la modalidad *Direct Sequence* que constituye la base del sistema UMTS de tercera generación.

W-CDMA fue desarrollado a finales de los años 90 por el operador japonés NTT-DoCoMo como interfaz aire para FOMA, su red de 3ª generación. Esta propuesta fue aceptada por la ITU como parte de IMT2000, como alternativa a CDMA2000.

La denominación *wideband* surge de la comparación con el sistema CDMA de segunda generación IS-95, cuyo ancho de banda era de 1,25MHz. En este conjunto estaría englobados tanto la propuesta europeo-japonesa WCDMA como la propuesta americana CDMA2000.

Los sistemas celulares pueden agruparse en las siguientes categorías:

- Limitados por dimensiones, basados en dividir el espectro disponible en canales ortogonales. Dada la limitación de canales ortogonales, será necesario reutilizar estos canales agrupando células en clusters de forma que las células cocanal estén lo suficientemente alejadas. Pertenecen a esta categoría los sistemas FDMA y TDMA y los sistemas CDMA basados en códigos ortogonales.
- Limitados por interferencia, en los que se establece un conjunto prácticamente ilimitado de canales no ortogonales lo que hace innecesaria la reutilización. El número máximo de conexiones simultáneas vendrá limitado por el nivel de interferencia admisible. Pertenecen a esta categoría los sistemas CDMA con secuencias pseudoaleatorias (*PN*).

En general, los sistemas limitados por interferencia se adaptan de forma natural a condiciones cambiantes de interferencia, sin necesidad de técnicas de asignación dinámica de canales.

Los estándares de comunicaciones móviles CDMA se basan en el empleo de secuencias *PN*, combinando su utilización con secuencias ortogonales lo que supone una pequeña mejora adicional.

La utilización en la interfaz radio de DS-CDMA implica una serie de características que distinguen a estos sistemas de los clásicos basados en FDMA o TDMA.

### 2.2.3.1 Traspaso con continuidad

Los sistemas celulares CDMA posibilitan un método de traspaso denominado *soft hand-off* ó traspaso con continuidad, más fiable que el utilizado en los sistemas clásicos.

En FDMA y TDMA, cuando un terminal se mueva a la zona de cobertura de una célula contigua no puede continuar usando el canal (subportadora y/o timeslot) que tenía asignado ya que los canales disponibles en la célula vecina son distintos. La red deberá asignar un canal en la nueva célula y el informar al UE de que debe abandonar el canal que estaba utilizando y sintonizar el nuevo (*break-before-make*).

En CDMA, por el contrario, puede establecerse el nuevo enlace antes de abandonar el antiguo, manteniendo ambos durante un tiempo (*make-before-break*) y quedando el móvil asignado a una única estación base al finalizar el proceso. En este método de traspaso, que puede generalizarse para más de dos estaciones base, cada una de las estaciones mantienen contacto con el terminal hasta que ya no se considere necesario.

El traspaso con continuidad contribuye a mejorar la calidad e integridad de las llamadas y a reducir el nivel de interferencia en el enlace ascendente. Como contrapartida, puede incrementar la interferencia en el enlace descendente.

### 2.2.3.2 Actividad discontinua de fuente

En los sistemas limitados por interferencia, la reducción de esta se traduce directamente en un aumento de la capacidad. La actividad discontinua de fuente permite, además de incrementar la duración de la batería del terminal, reducir la potencia de transmisión durante los periodos de inactividad, lo que contribuye a la disminución del nivel global de interferencia.

Una aplicación de esta idea se encuentra en la función de transmisión discontinua (DTX) que incorporan los codificadores de voz en UMTS.

Si bien los sistemas limitados por dimensiones también pueden aprovecharse de estas técnicas para reducir el nivel de interferencia, la disminución sería mucho menos efectiva dado el reducido número de fuentes interferentes.

### 2.2.3.3 Compartición automática de carga

Los sistemas limitados por interferencia permiten compartir los recursos radioeléctricos entre las células de una manera automática y mucho más eficiente.

En sistemas limitados por dimensiones la asignación de canales para cada célula es rígida. Si una célula o sector tiene todos sus canales ocupados, cualquier intento de conexión será rechazado aunque existan canales libres en células vecinas.

En los limitados por interferencia, el número de canales de una célula no es fijo, sino que depende de la carga de las células vecinas. En la práctica, esto supone que las células que soportan mayor carga disminuyen su cobertura, cediendo parte de su carga. Este compromiso entre capacidad y cobertura de la célula se conoce con el nombre de *cell breathing*.

### 2.2.3.4 Protección frente a desvanecimientos por multitrayecto

Como se indicó anteriormente, una de las ventajas de las señales de espectro ensanchado es que permiten una elevada resolución temporal en el proceso de detección.

Mediante un receptor Rake y utilizando secuencias de código con propiedades de autocorrelación adecuadas pueden separarse réplicas de la señal sean mayores del periodo de chip. Con esto se logra una alta protección frente a los efectos del multitrayecto, ya que solo las réplicas con retardos comprendidos dentro del intervalo de resolución serán detectadas como una componente única.

Disminuyendo el periodo de chip se mejora la resolución temporal, consiguiendo aumentar la protección frente a los efectos negativos del multitrayecto.

### 2.2.3.5 Codificación de muy baja tasa

En un sistema clásico de banda estrecha, una codificación de canal de tasa  $r$  aumenta la velocidad de transmisión en el canal, lo que aumenta el ancho de banda necesario en un factor  $1/r$ .

En un sistema de espectro ensanchado, las características espectrales de la señal ensanchada son independientes de las de la señal antes de ensanchar, lo que permite utilizar mecanismos de codificación de canal de tasa muy baja.

Dentro de W-CDMA, el empleo de DS-CDMA permite la utilización de técnicas de codificación de canal mucho más potentes que las utilizadas en sistemas tradicionales.

En los sistemas de comunicaciones móviles digitales, lo habitual es utilizar un código detector de errores de bloque y un código corrector de tipo convolucional. En UMTS se emplean, además de CRC, códigos convolucionales de tasa  $\frac{1}{2}$  ó  $\frac{1}{3}$  o turbo-códigos de tasa  $\frac{1}{3}$ .

## 2.3 Estándar UMTS

*Universal Mobile Telecommunications System* es la propuesta europea de tecnología de red móvil de 3ª generación, cumpliendo con los requisitos técnicos especificados en la IMT-2000.

El termino UMTS es principalmente utilizado en Europa. En otras regiones, esta tecnología es conocida con otras siglas, como FOCA (la primera red 3G desplegada por el operador japonés NTT-DoCom) o W-CDMA.

La Release 99 del 3GPP es la primera definición de este estándar que consta de un conjunto de especificaciones organizadas en series, como puede consultarse en la Tabla 2.1. Dichas especificaciones se encuentran publicadas en la web del 3GPP <http://www.3gpp.org>

La modalidad más habitual de UMTS es la que utiliza la interfaz aire de W-CDMA, aunque el sistema soporta otras como se verá más adelante.

Al contrario de lo que sucedía con otras evoluciones de GSM como EDGE, UMTS necesita de nuevas bandas de frecuencia y nuevas estaciones base para su despliegue.

Teóricamente, UMTS soporta una tasa de transferencia máxima de 384kbit/s para conmutación de paquetes, lo que en su momento era una velocidad muy superior a la ofrecida por GPRS ó su evolución EDGE.

21	Requisitos
22	Aspectos de servicio
23	Realización técnica
24	Protocolos de señalización usuario – red
25	Aspectos radio
26	Códecs
27	Datos
28	Protocolos de señalización (RSS-CN)
29	Protocolos de señalización (red fija)
30	Gestión de programas
31	Módulo de identidad de usuarios USIM
32	Operación y mantenimiento (O&M)
33	Aspectos de seguridad
34	Especificaciones de pruebas y SIM
35	Algoritmos de seguridad

Tabla 2.1 - Series de especificaciones 3GPP R99

### 2.3.1 Arquitectura

El sistema UMTS se estructura en dos planos:

- La red de telecomunicaciones cuyo objeto es asegurar el transporte de la información extremo a extremo.
- La red de gestión con funciones auxiliares necesarias para la operación de la red: gestión de abonados, gestión de servicios contratados, facturación ...

En esta breve descripción del sistema nos centraremos exclusivamente en la red de telecomunicaciones, que a su vez se encuentra dividida en diferentes sub-sistemas:

- Core Network (CN)
- UMTS Radio Access Network (UTRAN)
- User Equipment (UE)

### 2.3.2 Core Network

El núcleo de red proporciona funciones de transporte, gestión e interconexión con otras redes fijas o móviles. Dentro de la definición del estándar se preveía un desarrollo evolutivo de este subsistema partiendo de la infraestructura actual de la red GSM / GPRS como comienzo de una migración hacia una red basada totalmente en el protocolo IP.

#### 2.3.2.1 AuC

El *Authentication Centre* es una base de datos que contiene información necesaria para la autenticación de una tarjeta SIM cuando esta intenta conectarse a la red. Una vez la autenticación es correcta, el HLR es autorizado a aceptar esta SIM y ofrecer los servicios asociados.

Entre la información almacenada en el AuC, encontramos el IMSI de la tarjeta y una clave secreta de autenticación  $K_i$  almacenada también en la SIM.

La seguridad del proceso de autenticación reside en este secreto compartido entre la SIM y el AuC. Esta clave  $K_i$  nunca se transmite, pero en combinación con el IMSI, permite la identificación del terminal y la generación de otra clave  $K_j$  utilizada para la encriptación de la información que se transmite por el aire.

### 2.3.2.2 HLR

El *Home Location Register* es una base de datos única para la red (aunque puede estar físicamente distribuida) con información detallada de cada suscriptor autorizado a utilizar la red. El HLR almacena información de todas las tarjetas SIM del operador, identificadas unívocamente por su IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*) y uno o varios números de teléfono asociados (MSISDN).

Otra información relevante almacenada en este elemento serían los servicios GSM habilitados para el suscriptor, la configuración de GPRS para permitir o no las conexiones de paquetes, localización actual del terminal (VLR / SGSN), configuraciones de desvíos ...

El HLR recibe y procesa transacciones MAP solicitadas por otros elementos de la red GSM.

### 2.3.2.3 VLR

El *Visitor Location Register* es una base de datos que almacena información de los terminales que se encuentra en la zona gestionada por un MSC. Es muy habitual encontrar que el MSC y el VLR se encuentren integrados en el mismo equipo físico.

Entre la información almacenada para cada usuario encontramos el actual LAI (*Location Area Identity*) que identifica bajo que BSC (*Base Station Controller*) se encuentra localizado el terminal y el TMSI (*Temporary Mobile Subscriber Identity*) que representa la identidad temporal de un equipo dentro de una determinada *Location Area*.

### 2.3.2.4 EIR

El *Equipment Identity Register* es una base de datos que almacena los IMEI de los terminales desde los que no debe permitirse el registro en la red o cuya actividad debe ser monitorizada. La funcionalidad de este equipo permite el seguimiento de los terminales que han sido robados, pero no en todos los países se encuentra en operación, lo que limita su efectividad.

### 2.3.2.5 MSC

El *Mobile Switching Center*, nodo principal en redes GSM / CDMA, es responsable del encaminamiento de las llamadas de voz, sms y otros servicios como multiconferencias, fax, conexiones de datos por conmutación de circuitos....

Además tomar decisiones de routing, el MSC crea y libera las conexiones extremo a extremo, gestiona la movilidad, los traspasos inter-BSC e inter-MSC y tiene funciones de accounting para la posterior facturación de los servicios.

Podemos encontrar diferentes nombres para distintos tipos de MSC's según el contexto en que nos encontremos:

- *Gateway-MSC* (G-MSC) es el MSC que determina en que Visited MSC se encuentra actualmente el suscriptor que está siendo llamado.
- *Visited MSC* (V-MSC) es el MSC responsable de la gestión de la zona en la que el terminal está localizado actualmente.
- *Anchor MSC* es el MSC desde el que se ha iniciado un proceso de handover.
- *Target MSC* es el MSC destino de un proceso de handover.

### 2.3.2.6 SGSN

Un *Serving GPRS Support Node* es responsable del envío y recepción de paquetes de datos desde o hacia los terminales móviles localizados en su *Service Area*. Esta tarea incluye rutado, gestión de la movilidad, gestión de las conexiones lógicas, autenticación....

El registro de un SGSN almacena información de la localización (célula actual, VLR actual....) y perfiles de usuario (IMSI, direcciones de la red de paquetes...) de todos los usuarios registrados en ese SGSN.

Además de estas funciones para la red GPRS, encontramos funciones específicas para la red W-CDMA como la tunelización y detunelización de los paquetes de datos enviados o recibidos a través del RNC.

### 2.3.2.7 GGSN

El *Gateway GPRS Support Node*, principal componente de la red GPRS, es responsable de la interconexión entre la red GPRS y otras redes externas de conmutación de paquetes (principalmente Internet).

El GGSN oculta toda la infraestructura GPRS de cara al exterior, por lo que es visto por otras redes como un router más que encamina tráfico a otra subred.

El GGSN es el punto de anclaje que habilita la movilidad del usuario en las redes GPRS ó UMTS, manteniendo la información de routing necesaria para tunelizar las PDU's hasta el SGSN que da servicio a un terminal.

### 2.3.3 UTRAN

*UMTS Terrestrial Radio Access Network* es el nombre escogido para el subsistema radio del estándar UMTS, que permite la conexión entre los terminales móviles y el núcleo de red.

Está formada por un conjunto de subsistemas RNS (*Radio Network Subsystem*) conectados al CN a través de una interfaz lu e interconectados entre sí a través de interfaces

lur. Cada RNS está constituido a su vez por un controlador RNC (*Radio Network Controller*) del que depende un conjunto de Nodos B.

Como ya se comentó, la tecnología W-CDMA elegida para el acceso radio obliga al despliegue de una nueva red, no pudiendo reutilizarse la infraestructura radio de la red GSM. Para la UTRAN se definen dos modalidades de W-CDMA:

- *Frequency Division Duplex* (FDD) que asigna dos frecuencias portadoras diferentes para los enlaces ascendente y descendente. Para cada sentido de la transmisión, se definen 12 portadoras con una separación nominal de 5MHz:
  - Uplink : 1920 – 1980 MHz
  - Downlink : 2110 – 2170 MHz
- *Time Division Duplex* (TDD) que utiliza la misma frecuencia para ambos enlaces multiplexándolos en el tiempo. Se definen 7 portadoras utilizadas para ambos sentidos de la transmisión entre 1900-1920MHz y 2010-2025MHz.

La arquitectura de protocolos de la interfaz radio de UMTS sigue el modelo OSI y la estructura específica de la capa 2 de la Recomendación UIT-R 1035. La Figura 2.7 presenta las distintas capas de esta arquitectura.

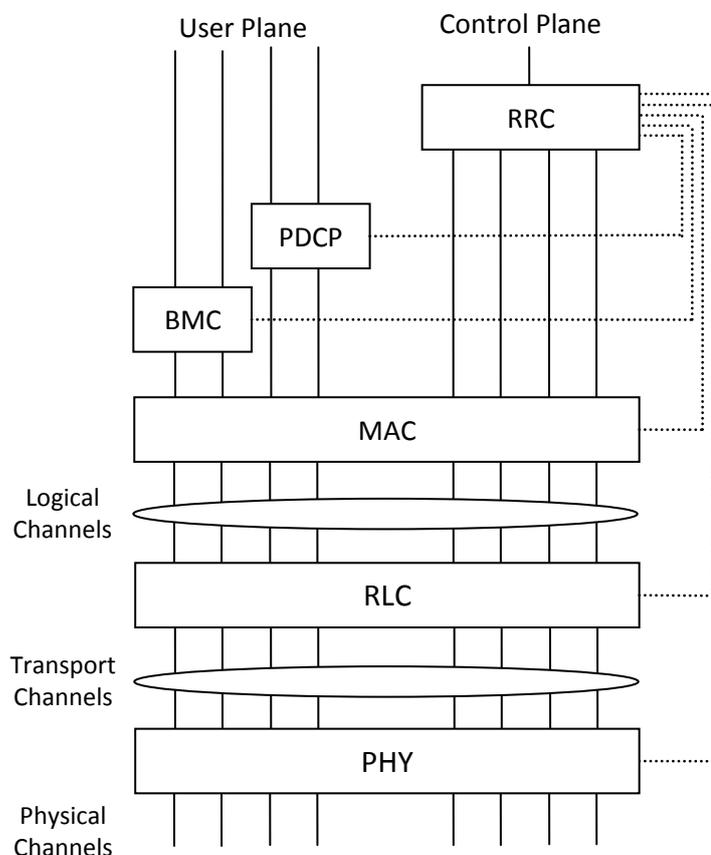


Figura 2.7- Arquitectura UTRAN

La capa física es la responsable de las siguientes tareas:

- Procesado de RF.
- Ensanchamiento / Modulación y Demodulación / Desensanchamiento.
- Distribución de potencia entre los canales físicos.
- Multiplexación de los canales de transporte sobre los canales físicos.
- Codificación de canal.
- Control de potencia
- Control de macrodiversidad
- Traspasos con continuidad.
- Medidas de RF (potencia, interferencia, retardos ...)

La capa 2 está dividida en distintas subcapas:

La subcapa BMC (*Broadcast / Multicast Control*) implementa un protocolo que regula el intercambio de información relativa a los servicios de multidifusión.

La subcapa PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*) implementa un protocolo que ejecuta tareas de compresión de los paquetes de datos procedentes de las capas superiores.

La subcapa RLC (*Radio Link Control*) ofrece servicios de transmisión de datos a la capa3. Sus principales funciones son:

- Transferencia de información entre las capas RRC y MAC (en modo transparente, no confirmado o confirmado).
- Segmentación de la información recibida de las capas superiores para que pueda ser transportadas en las PDU.
- Detección y corrección de errores por retransmisión (ARQ).
- Control de flujo de datos.

La subcapa MAC (*Media Access Control*) proporciona a las capas superiores servicios de transferencia de información de usuario y señalización a través de los canales lógicos. Sus principales funciones son:

- Selección del formato de transporte, según el canal.
- Tratamiento de las prioridades de transmisión.
- Organización de los procesos de difusión de información y de los avisos y notificaciones.
- Identificación de los UE.
- Multiplexación / Demultiplexación de las PDU's.
- Encaminamiento de la señalización de alto nivel.
- Mantenimiento de las conexiones.

La capa 3 y la subcapa RLC se dividen a su vez en dos planos: el plano C de control y señalización, y el plano U de información de usuario.

En el plano C, la capa 3 se desglosa en otras subcapas. La inferior RRC (*Radio Resource Control*) es la interfaz con la capa 2. Las capas de señalización más altas como la MM (*Mobility Management*) y la CC (*Call Control*) pertenecen ya al núcleo de red.

### 2.3.3.1 Canales Lógicos

- Canales de control
  - *Broadcast Control Channel* (BCCH) , del enlace descendente, hace multidifusión de la información general de configuración de la red.
  - *Paging Control Channel* (PCCH), del enlace descendente, se utiliza para enviar avisos a los terminales móviles
  - *Common Control Channel* (CCCH) , común bidireccional presente en ambos enlaces, para el intercambio de información de control con los terminales que acceden por primera vez a la célula tras un proceso de registro.
  - *Dedicated Control Channel* (DCCH) , dedicado bidireccional presente en ambos enlaces, para el intercambio de información de control con un terminal móvil concreto.
- Canales de tráfico
  - *Dedicated Traffic Channel* (DTCH), dedicado bidireccional, para el intercambio de información de usuario con un terminal concreto.
  - *Common Traffic Channel* (CTCH), común del enlace descendente, para la difusión de tráfico punto-multipunto con un grupo de terminales móviles.

### 2.3.3.2 Canales de Transporte

- *Broadcasting Channel* (BCH), del enlace descendente, difunde información específica del sistema y la célula en particular (timeslots disponibles, códigos de acceso, valores de interferencia...)
- *Paging Channel* (PCH), del enlace descendente, transmite información relativa a los procedimientos de aviso a los terminales.
- *Random Access Channel* (RACH), del enlace ascendente, para cursas peticiones de acceso por los UE desde cualquier lugar de la célula.

- *Common Packet Channel* (CPCH), del enlace ascendente, es una extensión del RACH para la transmisión de paquetes en el uplink.
- *Forward Access Channel* (FACH), del enlace descendente, para transmitir la respuesta a las solicitudes de acceso enviadas a través del RACH.
- *Downlink Shared Channel* (DSCH), del enlace descendente, transporta señales de usuario y de control. Está siempre asociado a un canal dedicado descendente.
- *Dedicated Channel* (DCH), dedicado bidireccional, para el intercambio de información de usuario y de control entre el terminal y la red. Puede transmitirse a toda la célula o hacia unos UE cuya situación sea conocida. Requiere control de potencia rápido y traspaso con continuidad.

### 2.3.3.3 Canales Físicos

#### 2.3.3.3.1 P-CCPCH

*Primary Common Control Physical Channel* es un canal físico que transporta el canal BCH.

Con un formato de transporte fijo, con una capacidad teórica de 20 bits y una tasa binaria constante de 30kbps. Durante la primera parte del intervalo no se transmite en este canal para permitir la difusión del SCH, por lo que su capacidad real es de 18 bits.

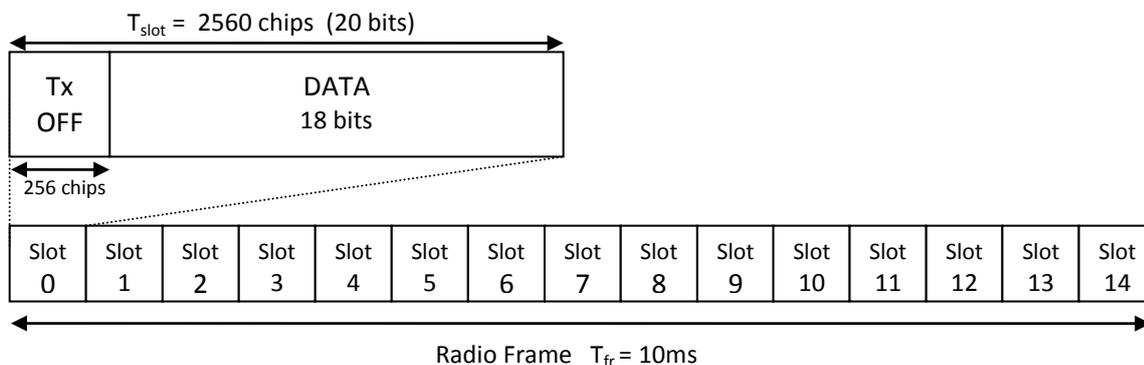


Figura 2.8 - Formato de trama del canal P-CCPCH

#### 2.3.3.3.2 S-CCPCH

*Secondary Common Control Physical Channel* es un canal físico que transporta los canales FACH y PCH multiplexados en el tiempo (aunque pueden también viajar en distintos S-CCPCH).

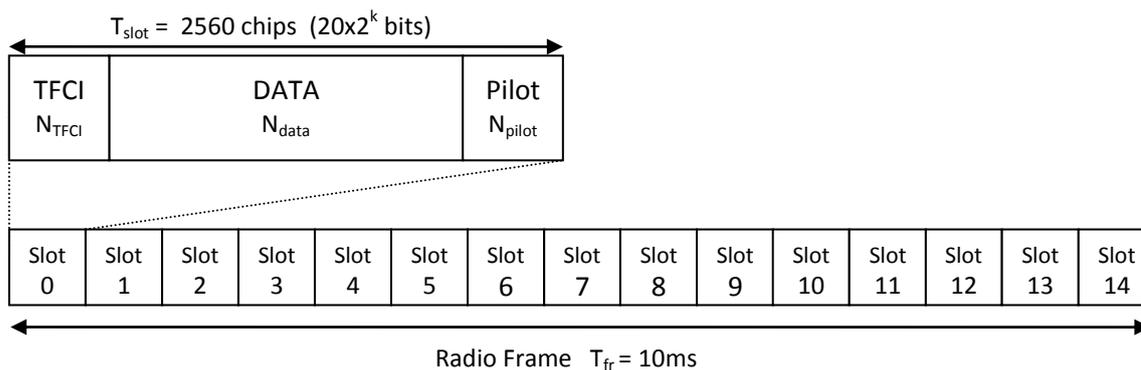


Figura 2.9 - Formato de trama del canal S-CCPCH

Se han definido 18 formatos de intervalo consecuencia de utilizar un factor de ensanchamiento variable entre 4 y 256. De esta forma, la velocidad binaria varía entre los 15kbps y los 960kbps. Se utiliza control de potencia en bucle abierto.

Formato intervalo	SF	$R_b$ (kb/s)	$R_s$ (ksimb/s)	$N_{TFCI}$	$N_{data}$	$N_{pilot}$
0	256	30	15	0	20	0
1	256	30	15	0	12	8
3	256	30	15	2	10	8
17	4	1.920	960	8	1.256	16

Tabla 2.2 - Formatos de intervalo del canal S-CCPCH

### 2.3.3.3 PRACH

*Physical Random Access Channel* es un canal físico común mediante el cual los terminales realizan las peticiones de recursos o transmiten paquetes cortos.

Los terminales pueden iniciar sus mensajes de acceso al comienzo de unos intervalos denominados Access Slots (AS) que tienen una duración de 10ms. Se han definido 15AS en un periodo de tiempo igual a 2 tramas. Los UE reciben por el BCCH información de control acerca de los AS disponibles para el acceso en cada momento.

La transmisión de los AS consiste en uno o varios preámbulos de 4.096 chips y de un mensaje con una duración de 10ms ó 20ms.

### 2.3.3.4 PCPCH

*Physical Common Packet Channel* es un canal físico del enlace ascendente que transporta el canal CPCH.

La estructura y temporización de los intervalos de acceso son similares a los del PRACH, con tres tipos de preámbulos de acceso, de detección de colisión y de control de potencia.

Al igual que en el PRACH, se han definido distintos tipos de intervalo que pueden consultarse en la Tabla 2.3.

Formato intervalo	SF	$R_b$ (kb/s)
0	256	15
1	256	15
2	256	15

Tabla 2.3 - Formatos de intervalo del canal PCPCH

### 2.3.3.3.5 UL-DPDCH

*UL Dedicated Physical Data Channel* es un canal físico del enlace ascendente que, mediante una modulación en fase binaria, transporte el canal DCH. Este canal físico se transmite multiplexado en fase y cuadratura junto con el canal UL-DPCCCH.

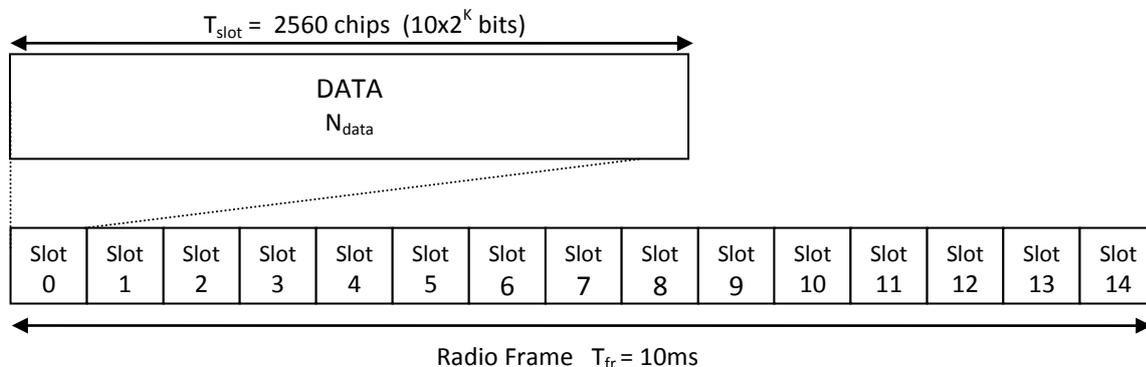


Figura 2.10 - Formato de trama del canal UL-DPDCH

El factor de ensanchamiento, y por lo tanto la tasa binaria y el número de bits transmitidos en cada intervalo dependen del parámetro entero  $k$ , que varía entre 0 y 6. Según este factor, se han definido distintos tipos de intervalo que se muestran en la Tabla 2.4.

Formato intervalo	SF	$R_b$ (kb/s)	$N_{data}$
0	256	15	10
2	64	60	40
4	16	240	160
2	4	960	640

Tabla 2.4 - Formatos de intervalo del canal UL-DPDCH

### 2.3.3.3.6 UL-DPCCH

*UL Dedicated Physical Control Channel* es un canal físico del enlace ascendente que, mediante una modulación en fase binaria, transporta información de control generada por la capa 1. Este canal físico se transmite multiplexado en fase y cuadratura junto con el canal UL-DPCCCH.

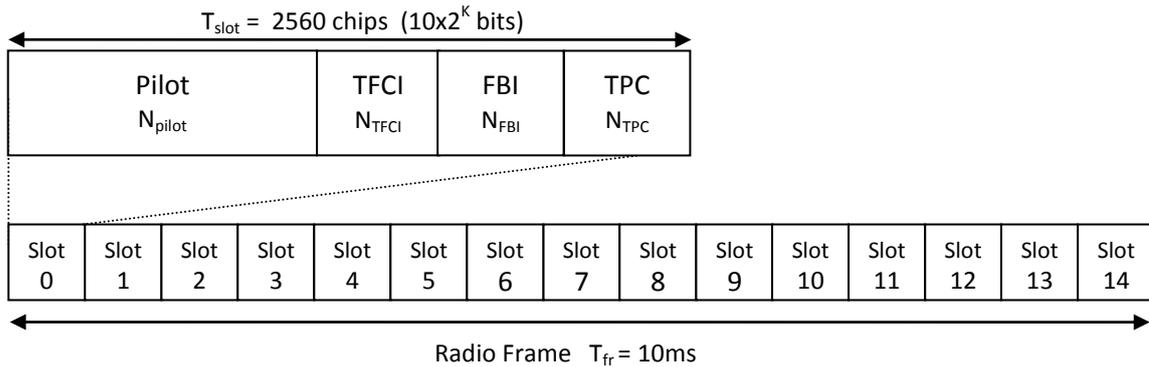


Figura 2.11 - Formato de trama del canal UL-DPCCH

Entre la información transmitida por este canal se incluye:

- Bits piloto para la detección coherente del canal radio ascendente.
- *Transport Format Combination Indicator* (TFCI) , usado cuando hay varios servicios simultáneos soportados por una misma conexión.
- *Feedback Information* (FBI) , contiene información necesaria cuando se utilizan técnicas que requieren una realimentación entre el UE y el Nodo-B, como diversidad de transmisión y diversidad de selección de ubicación SSDT.
- *Transmit Power Control* (TPC) para el control de potencia de los UE.

El canal DPCCH tiene un factor de ensanchamiento de 256, definiéndose distintos formatos de intervalo siendo los más habituales los mostrados en la Tabla 2.5.

Formato intervalo	SF	$R_b$ (kb/s)	$N_{pilot}$	$N_{TFCI}$	$N_{FBI}$	$N_{TPC}$
0	256	15	6	2	0	2
1	256	15	5	2	1	2
2	256	15	5	2	2	1

Tabla 2.5 - Formatos de intervalo del canal UL-DPCCH

### 2.3.3.3.7 DL-DPDCH

*DL Dedicated Physical Data Channel* es un canal físico del enlace descendente que, mediante una modulación en fase binaria, transporte el canal DCH. Este canal físico se transmite multiplexado en el tiempo junto con el canal DL-DPCCH, según se muestra en la Figura 2.11.

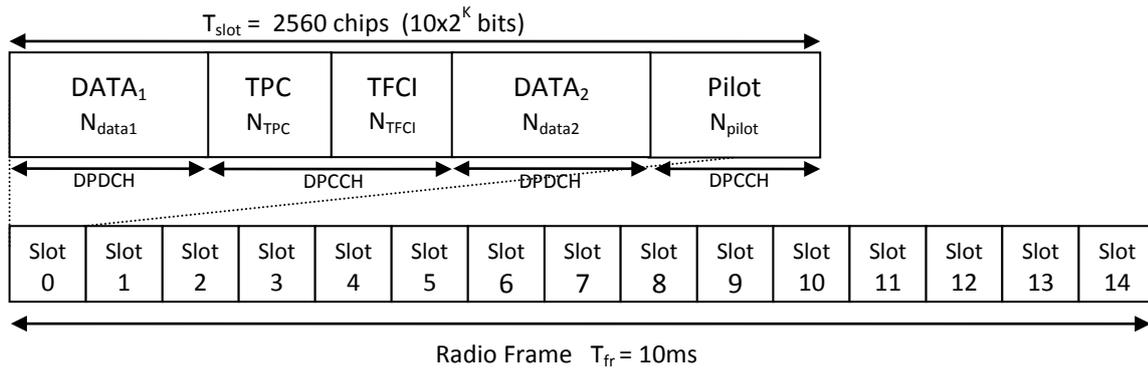


Figura 2.12 - Formato de trama de los canales DL-DPDCH y DL-DPCCH

El factor de ensanchamiento, y por lo tanto la tasa binaria y el número de bits transmitidos en cada intervalo dependen del parámetro entero  $k$ , que varía entre 0 y 7. Según este factor, se han definido distintos tipos de intervalo que se muestran en la Tabla 2.6.

Formato intervalo	SF	$R_b$ (kb/s)	$N_{data1}$	$N_{data2}$
0	512	15	0	4
2	256	30	2	14
11	128	60	6	22
16	4	1.920	248	1.000

Tabla 2.6 - Formatos de intervalo del canal DL-DPDCH

### 2.3.3.3.8 DL-DPCCH

*DL Dedicated Physical Control Channel* es un canal físico del enlace descendente que, mediante una modulación en fase binaria, transporta información de control generada por la capa 1. Este canal físico se transmite multiplexado en el tiempo junto con el canal DL-DPDCH, por lo que los tipos de intervalo definidos coinciden con los mostrados anteriormente.

Formato intervalo	SF	$R_b$ (kb/s)	$N_{TPC}$	$N_{TFCI}$	$N_{pilot}$
0	512	15	2	0	4
2	256	30	2	0	2
11	128	60	2	2	8
D16	4	1.920	8	8	16

Tabla 2.7 - Formatos de intervalo del canal DL-DPCCH

### 2.3.3.3.9 CPICH

*Common Pilot Channel* es un canal físico del enlace descendente utilizado por los terminales para la selección inicial de la célula. Se trata por lo tanto de un canal propio de la capa física que no tiene correspondencia con ningún canal de transporte.

El factor de ensanchamiento es siempre 256, con una velocidad binaria de 30kbps.

CPICH está formado por 2 subcanales:

- P-CPICH, el primario, que sirve como referencia de potencia en las mediciones de los terminales y como referencia de fase para los canales SCH, P-CCPCH, AICH, PICH.
- S-CPICH, el secundario, sirve como referencia de fase para los canales S-CCPCH y DL-DPCH.

### 2.3.3.3.10 SCH

*Synchronization Channel* es un canal físico del enlace descendente utilizado para la adquisición de la temporización de trama por parte de los terminales. Se trata por lo tanto de un canal propio de la capa física que no tiene correspondencia con ningún canal de transporte.

SCH está formado por 2 subcanales:

- P-SCH, el primario, transporta el código primario de sincronización  $c_p$  que se repite al comienzo de cada intervalo. Se trata de una secuencia de código de 256 chips elegida por sus buenas propiedades de correlación.
- S-SCH, el secundario, es una secuencia de 15 bloques de 256 chips.

### 2.3.3.3.11 PICH

*Paging Indicator Channel* es un canal físico del enlace descendente que transmite los *Paging Indicators* (PI), notificando al UE que debe leer el PCH.

PICH tiene un factor de ensanchamiento fijo de 256 y tiene una capacidad de 300 bits, de los cuales 288 se utilizan para los PI, no estando definidos los 12 restantes.

### 2.3.3.3.12 AICH

*Access Indication Channel* es un canal físico del enlace descendente que transmite los *Access Indicators* (AI) en respuesta a los preámbulos de acceso del PRACH.

AICH tiene un factor de ensanchamiento fijo de 256 y tiene una capacidad de 300 bits, de los cuales 288 se utilizan para los PI, no estando definidos los 12 restantes.

## 2.3.4 Recursos de la interfaz radio

### 2.3.4.1 Tramas temporales

A pesar de que la tecnología CDMA utilizada para ofrecer acceso múltiple en la interfaz radio, se ha definido un marco temporal para los enlaces ascendente y descendente. Cada Nodo-B tiene su propio reloj para la temporización de las tramas, lo que hace innecesaria la sincronización con fuentes de tiempo externas.

Dado que en los primeros despliegues de UMTS el servicio de voz continuaba siendo dominante, se estableció una duración de trama de  $T_f=10\text{ms}$ . Este tiempo es reducido, lo que introduce un menor retardo y favorece la transmisión de servicios en tiempo real como la voz, Una trama de mayor duración permitiría una mayor profundidad de entrelazado y , por tanto, una menor tasa de errores.

Cada trama se identifica con un valor numérico entre 0 y 4.095 denominado *System Frame Number* (SFN), y está compuesta por 15 Time Slots, numerados de 0 a 14, de duración 2/3ms.

Por encima de la trama, encontramos la supertrama, formada por 72 tramas con una duración de 720ms, múltiplo de la supertrama MF26 de GSM.

En el enlace descendente, se multiplexa la información de usuario y de control dentro de cada intervalo. El factor de ensanchamiento puede tener distintos valores, variando la tasa binaria entre los 15 y los 900 kbit/s.

$$SF = \frac{512}{2^k} \quad 0 \leq k \leq 7$$

	$V_{\text{chips}}$	$V_{\text{simbolo}}$	$V_{\text{bits}}$
Trama	38.400	38.400/SF	76.800/SF
Intervalo	2.560	2.560/SF	5.120/SF

Tabla 2.8 - Tasas binarias del enlace descendente

En el enlace ascendente, cada intervalo ofrece dos campos de datos separados para la información de usuario y la información de control. El factor de ensanchamiento puede tener distintos valores, variando la tasa binaria entre los 15 y los 1.920 kbit/s.

$$SF = \frac{256}{2^k} \quad 0 \leq k \leq 6$$

En ambos enlaces, la elección de k permite configurar distintos tipos de intervalos. En caso de requerir mayores tasas de transferencia, puede realizarse una transmisión multicódigo.

### 2.3.4.2 Códigos

Para la transmisión de la señal en UMTS se realiza una doble codificación:

- Código ortogonal expansor que realiza la expansión en cada canal físico
- Código de aleatorización (*Scrambling Code*).

#### 2.3.4.2.1 Códigos ortogonales

Los códigos de expansión utilizados en UMTS pertenecen a una familia de códigos ortogonales de factor de expansión variable OVSF, que preservan la ortogonalidad entre los enlaces descendentes de diferentes factores de expansión.

La Figura 2.13 muestra la estructura arborescente según la cual se generan los OVSF. Cada nivel  $n$  del árbol define  $n$  códigos ortogonales de factor de expansión  $SF=n$  que forman las  $n$  ramas de dicho nivel. De cada rama emergen dos: en la primera se duplican los chips de la rama origen y en la segunda se duplican cambiándolos de signo la segunda vez.

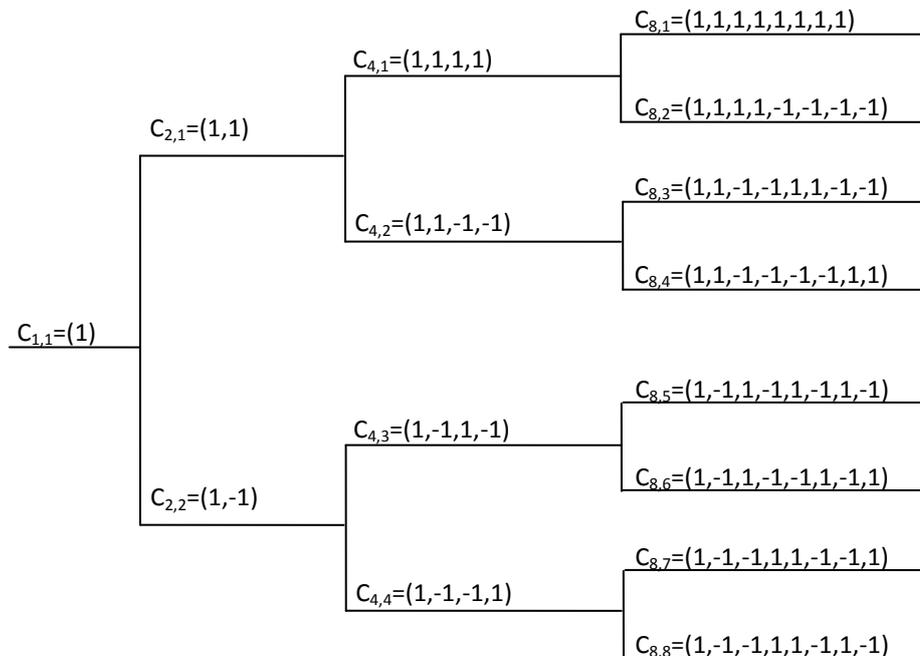


Figura 2.13 - Orthogonal Variable Spreading Factor

El número de códigos ortogonales es de 512 para el downlink y 256 para el uplink, pero en la práctica, el número de códigos utilizables es inferior. Si en una célula se está utilizando un código  $c_{n,i}$  para un usuario y servicio,  $n$  pueden usarse en la misma los progenitores ni los descendientes. En consecuencia, el número de códigos utilizables en una célula no es fijo, sino que depende de los factores de expansión utilizados.

En el enlace descendente, el código de canalización del BCCH está predefinido y es el mismo para todas las células de la red. Los códigos de canalización para los S-CCPCH los difunde el BCCH. Los códigos para los DPCH los decide la red, informando al UE en el

mensaje de concesión de acceso enviado por el FACH. Estos códigos pueden cambiar en el curso de una conexión como consecuencia de los traspasos.

En el enlace ascendente, a cada conexión se le asigna un código de canalización para el DPCCH y uno o más para los DPDCH. El UE negocia con la red el número de códigos y los factores de expansión utilizados según el tipo de servicio.

#### 2.3.4.2.2 Códigos de aleatorización

Los códigos SC (*Scrambling Code*) no son ortogonales sino pseudoaleatorios *PN* y deben poseer las siguientes propiedades:

- Buenas características de autocorrelación para evitar errores de sincronización y permitir separar con facilidad las componentes del multitrayecto.
- Baja correlación cruzada para reducir la interferencia del multiacceso.
- Elevada cuasi-aleatoriedad para que la señal resultante se asemeje al ruido blanco gaussiano.

Los códigos de aleatorización se aplican a secuencias de chips en cuadratura y fase por lo que son valores complejos.

En el enlace descendente, los códigos SC permiten la reutilización de códigos ortogonales en una misma célula y la distinción entre las diferentes células de la red. Se han definido  $2^{18}-1=262.143$  códigos de los que solo se utilizará una serie de 8.192 subdividida en 512 conjuntos de 16 códigos (uno primario y los otros 15 secundarios).

En el enlace ascendente, estos códigos establecen la distinción entre los diferentes usuarios cada uno de los cuales tiene asignado su propio SC. Se han definido  $2^{24}=16.777.216$  códigos llamados códigos largos (38.400 chips) y otros tantos cortos (256 chips), todos diferentes de los del downlink.

#### 2.3.4.3 Codificación de canal

Para la transmisión en UMTS se utilizan dos códigos de canal:

- Un código interno de bloque para detección de errores por CRC de 8, 12, 16 ó 24 bits.
- Un código externo para corrección de errores con distintas opciones:
  - o Códigos convolucionales de tasas  $r=1/2$  ó  $r=1/3$  y longitud  $L=9$ .
  - o Turbo-códigos con tasa  $r=1/3$  para servicios que requieran tasas de errores  $BER < 10^{-6}$ .

Los códigos de canal se aplican combinados con el entrelazado de bits con profundidades de 1, 2, 4 u 8 tramas (10, 20, 40 u 80 ms).

Los servicios en tiempo real utilizando la codificación FEC con corrección de errores en recepción. Los servicios que no requieren tiempo real usan una combinación de FEC y ARQ para el control de errores.

### 2.3.4.4 Modulación

La modulación utilizada en el enlace descendente es QPSK, utilizando filtros de premodulación en cosen alzado con un roll-off de  $\alpha=0,22$ .

En el enlace ascendente se utilizan dos modulaciones BPSK, una para el eje I y otra para el eje Q. Al igual que en el downlink, se utilizan filtros en coseno alzado con  $\alpha=0,22$ .

### 2.3.4.5 Control de potencia

Como se explicó en el capítulo de CDMA, cuando se utiliza esta tecnología la potencia de transmisión es un recurso limitado que tiene una influencia decisiva sobre la capacidad y la cobertura, por lo que es necesario administrarla de forma eficiente.

En UMTS se utilizan dos tipos de control:

- El control de potencia en bucle abierto (OLPC) se utiliza para el ajuste inicial de la potencia de transmisión del canal físico PRACH. El canal BCH difunde, entre otra información, la potencia transmitida en el canal CPICH, la interferencia  $I_B$  recibida en el Nodo-B y la relación señal–interferencia requerida. Antes de iniciar el acceso, el UE mide la potencia con que recibe el canal CPICH y, conocida la información anterior, puede calcular las pérdidas sufridas en el transito. De esta forma, se ajusta la potencia de transmisión de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$P_{tx} = SIR + I_B + L_{trans} + k$$

, siendo k una constante fijada por el operador.

De esta forma, el cálculo de la potencia de transmisión en el uplink se realiza en base a las pérdidas sufridas en el downlink. Dada la separación de frecuencias entre ambos enlaces, este método de control de potencia no es muy preciso, pero para los accesos iniciales no existe otra alternativa.

- El control de potencia en bucle cerrado (CLPC) se utiliza para conexiones ya establecidas, con canal dedicado. El Nodo-B mide la potencia recibida del piloto del DPCCH y estima la potencia total de interferencia, con lo que se puede calcular la SIR en recepción. Comparando estos valores con los valores objetivos, puede ordenar reducciones ( $TPC_{down}$ ) o aumentos ( $TPC_{up}$ ) de potencia al UE. Este ajuste de potencia se realiza cada 2/3 ms.

### 2.3.4.6 Antenas

Además de los sistemas clásicos de antenas omnidireccionales y sectoriales, la norma UMTS contempla la utilización de antenas inteligentes multihaz, con diagramas de radiación configurables que se dirigen a las zonas de la célula donde se encuentran los usuarios.

De esta forma se consigue reducir la interferencia, lo que conlleva beneficios para la capacidad y la cobertura. Para el uso de este tipo de antenas, se han especificado canales y subcanales físicos de radio.

Las antenas adaptativas se clasifican en dos familias:

- Las de conmutación entre haces crean múltiples haces hacia direcciones fijas, seleccionando el más adecuado en función del nivel de señal recibida.
- Las adaptativas utilizan algoritmos de procesamiento de señal que permiten identificar la señal y la interferencia, optimizando la SIR.

## 2.4 HSUPA

El estándar para comunicaciones móviles HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access*), definido en la Release 6 de UMTS publicada por 3GPP en diciembre de 2004, permite incrementar la tasa de transferencia en el uplink hasta los 7,2Mbps (por supuesto, en circunstancias ideales poco probables de encontrar en la práctica).

Esta especificación nació fruto de un estudio que comenzó 3 años atrás con objeto de incrementar las prestaciones del enlace ascendente definido en WCDMA Release '99 que alcanzaba unos "modestos" 384kbps.

Aunque no es absolutamente correcto, puede decirse que se trata de aplicar las técnicas ya utilizadas con éxito en HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*), definido en la Release 6 de UMTS del año 2004. Por ello, encontraremos muchas similitudes entre ambos estándares que se complementan dando lugar a la tecnología HSPA (*High-Speed Packet Access*) conocida comúnmente como 3,5G ó 3,75G.

Lógicamente, estas características han necesitado cierta adaptación dada las diferencias evidentes entre el uplink, donde la comunicación se realiza desde varios terminales a una única estación base, y el downlink, donde la situación es justamente la contraria.

Además de una tasa binaria más elevada, HSUPA ofrece ventajas sobre el uplink de WCDMA como una latencia reducida y una capacidad mejorada, lo que constituye un complemento natural para la tecnología HSDPA.

Es importante aclarar que el estándar HSUPA no constituye en sí mismo una tecnología de acceso, sino más bien una mejora al estándar WCDMA Release 99, del que utiliza una buena parte de sus características básicas para ofrecer un servicio funcional. Por ello, aunque nos centraremos en HSUPA como el objeto de este estudio, serán necesarias ciertas referencias al funcionamiento de la Release 99 para asegurar la comprensión por parte del lector.

Release	Fecha	Contenido
99	2000 Q1	Primera red UMTS 3G con interfaz aire CDMA
R4	2001 Q2	All-IP Core Network
R5	2002 Q1	HSDPA IMS
R6	2004 Q4	HSUPA MBMS Diversas mejoras a IMS
R7	2007 Q4	Aplicaciones real-time (menor latencia, QoS ...) HSPA+ EDGE Evolution
R8	2008 Q4	LTE. Nueva interfaz radio OFDMA MIMO
R9	2009 Q4	Interoperabilidad WiMax – LTE/UMTS Dual-Cell HSDPA con MIMO Dual-Cell HSUPA
R10	-	LTE Advanced Multi-Cell HSDPA

Tabla 2.9- Contenido de las distintas releases de 3GPP

### 2.4.1 Arquitectura

Para incrementar la capacidad y el rendimiento en el uplink, HSUPA hace uso de dos tecnologías básicas que ya se usaron previamente en HSDPA :

- *Fast scheduling*
- *Fast hibrid ARQ con soft combining*

HSUPA incluye también la posibilidad de utilizar un TTI 2 ms, permitiendo una adaptación más rápida en el enlace descendente, lo que posibilita un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles.

Todas estas mejoras sobre WCDMA están implementadas dentro de un nuevo canal de transporte denominado E-DCH (*Enhanced Dedicated Channel*).

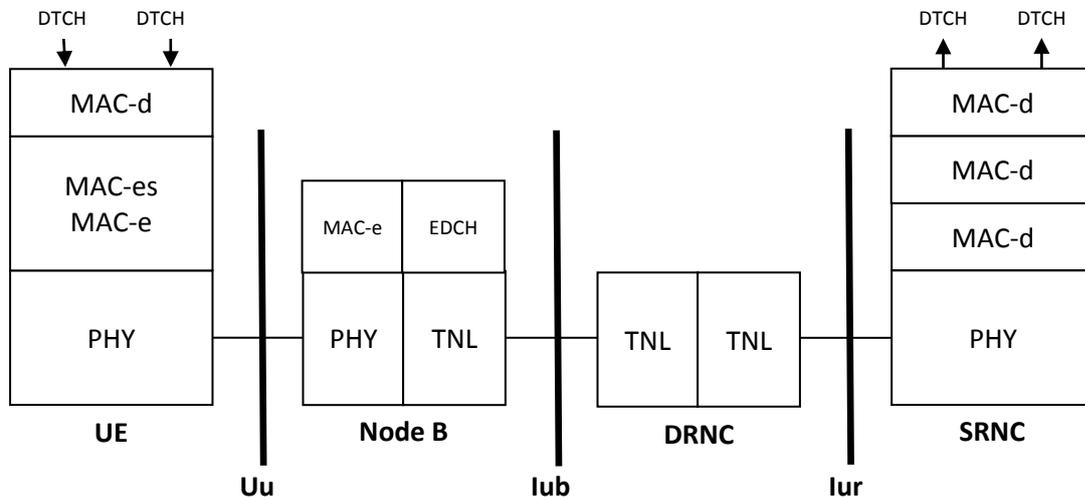


Figura 2.14 - Arquitectura HSUPA

Para soportar las nuevas capacidades del uplink, los nodos se ven modificados con respecto a los utilizados en WCDMA Release 99:

- *User Equipment*: aparece una nueva entidad MAC-es/MAC-e que será responsable de manejar la retransmisiones HARQ, la asignación de recursos, y la selección TFC del canal E-DCH.
- Nodo B: aparece la nueva entidad MAC -e que será responsable de mapeo
- S-RNC: aparece la nueva entidad MAC-es para garantizar el correcto orden en la secuencia de datos y permitir la combinación de la información recibida desde distintos Nodos B en caso de *soft handover*.

UE Category	Modulación	Códigos	TTI	Max. Bit Rate
1	BPSK	1 x SF4	10ms	0,73 Mbps
2	BPSK	2 x SF4	10ms & 2ms	1,46 Mbps
3	BPSK	2 x SF4	10ms	1,46 Mbps
4	BPSK	2 x SF2	10ms & 2ms	2,93 Mbps
5	BPSK	2 x SF2	10ms	2,00 Mbps
6	BPSK	2 x SF4 + 2 x SF2	10ms & 2ms	5,76 Mbps
7	BPSK / 4PAM	2 x SF4 + 2 x SF2	10ms & 2ms	11,5 Mbps
8	QPSK		2 ms	11,5 Mbps
9	QPSK / 16QAM		2 ms	23,0 Mbps

Tabla 2.10 - Categorías de terminales HSUPA

Con esta nueva especificación la tasa binaria del uplink puede alcanzar los 5,76 Mbps según la Release 6 del 3GPP. La Release 7 define una nueva categoría 7 que incluye nuevos esquemas de modulación e incrementa la tasa binaria hasta los 11,5 Mbps. A finales del año 2009, La Release 9 define la categoría 9 que implementa Dual-Cell HSUPA. Esta tecnología, mediante la agregación de recursos en el uplink, permite un mayor aprovechamiento del espectro disponible, llegando a los 23 Mbps. Actualmente no existe ningún despliegue en producción de esta especificación.

### 2.4.1.1 Canales de Transporte

#### 2.4.1.1.1 E-DCH

*Enhanced Dedicated Channel* es el nuevo canal de transporte del uplink donde se implementan las mejoras con respecto al uplink de la Release 99. El procesamiento de este nuevo canal de transporte es similar al del canal DCH, habiendo únicamente dos diferencias:

- cada terminal puede tener activo un único canal E-DCH, mientras que anteriormente multiplexarse la información sobre distintos canales DCH en paralelo. En cualquier caso, como se describirá más adelante, la capa MAC es capaz de multiplexar distintos servicios sobre un único canal E-DCH.
- se soporta *Híbrido-ARQ*

El procesamiento de la capa de transporte mapea la información contenida en el canal E-DCH sobre uno o varios canales E-DPDCH para su transmisión en la capa física. Cuando se utiliza el canal E-DPDCH se transmite en paralelo un canal E-DPDCH que contiene toda la información de control necesaria para poder recibir el canal de datos

Esta función se realiza en paralelo al procesamiento del canal DCH del uplink R99. Por ello, ambos canales de transporte pueden ser utilizados simultáneamente en el mismo terminal, estando el canal DCH limitado a una velocidad máxima de 64kbps cuando el canal E-DCH está configurado.

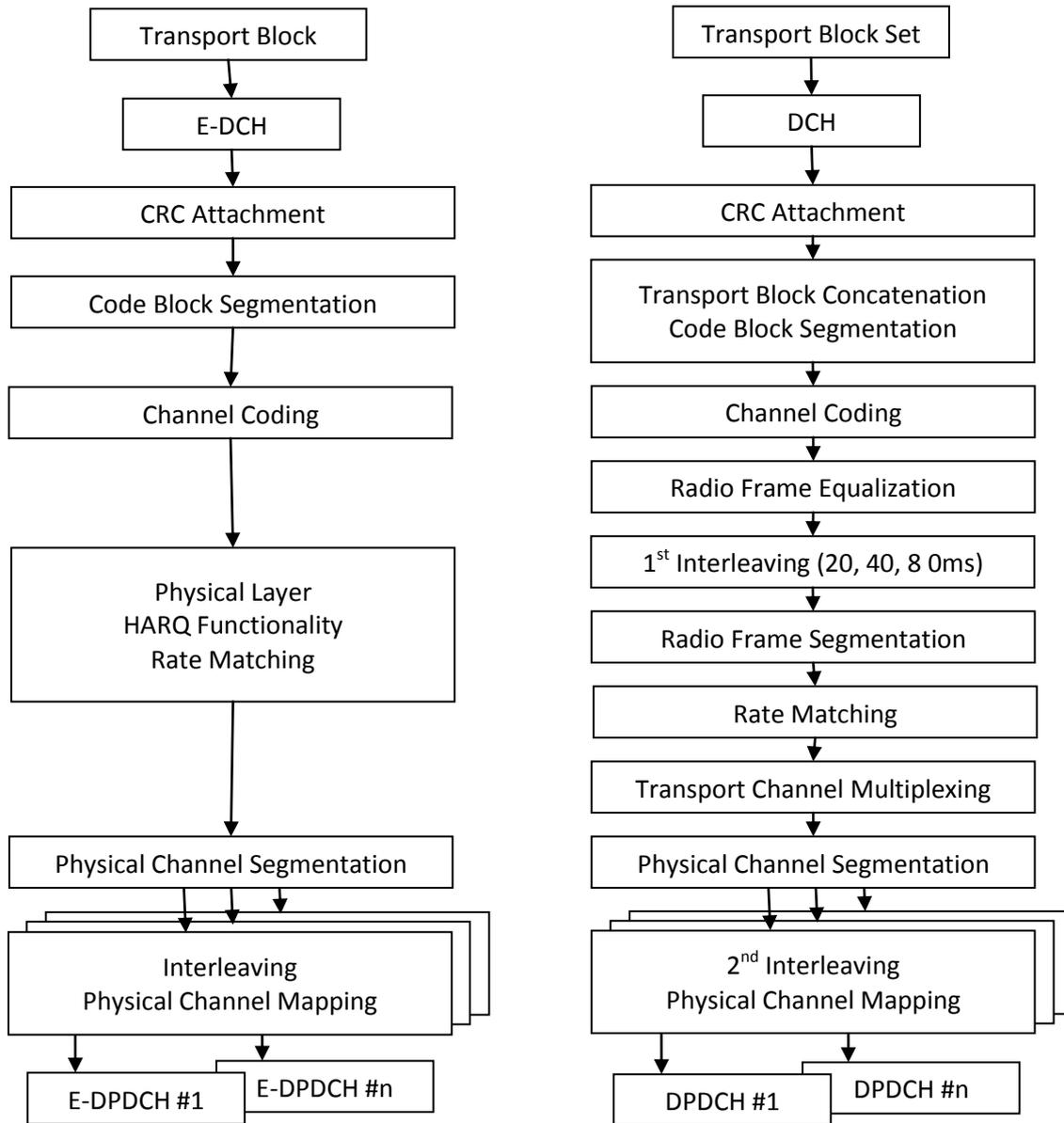


Figura 2.15 - Diferencias en el procesado de los canales DCH y E-DCH

La Figura 2.15 muestra las diferencias en las cadenas de procesado para los canales DCH y E-DCH:

- CRC Attachment
  - o E-DCH siempre añade un CRC de 24 bits al bloque recibido de la capa MAC.
  - o la longitud del CRC añadido al canal DCH es configurable entre 0, 8, 12, 16 o 24 bits.

- Code Block Segmentation
  - o E-DCH segmenta la entrada en bloques de la misma longitud con un tamaño máximo de 5114 bits.
  - o el tamaño máximo de bloque para DCH depende de la codificación utilizada (5114 para turbo-códigos y 504 para códigos convolucionales).
- Channel Coding
  - o para E-DCH se utiliza un turbo-código con una tasa de codificación de 1/3.
  - o para DCH pueden utilizarse turbo-códigos con tasas de codificación de 1/3 ó códigos convolucionales con tasas de 1/2 ó 1/3.
- HARQ Functionality
  - o E-DCH ajusta la información de bloque entre los bits disponibles en el canal físico y genera la información de redundancia incremental necesaria para el proceso HARQ
  - o DCH no dispone de esta funcionalidad.

### 2.4.1.2 Canales Físicos

#### 2.4.1.2.1 E-DPCCH

Introducido en el uplink a partir de la Release 6, *E-DCH Dedicated Physical Control Channel* transmite al Nodo B la información de capa 1 necesaria para la decodificación del canal de datos y la asignación de recursos por parte del scheduler. Este canal coexiste con todos los canales de dedicados de la Release 5 de 3GPP.

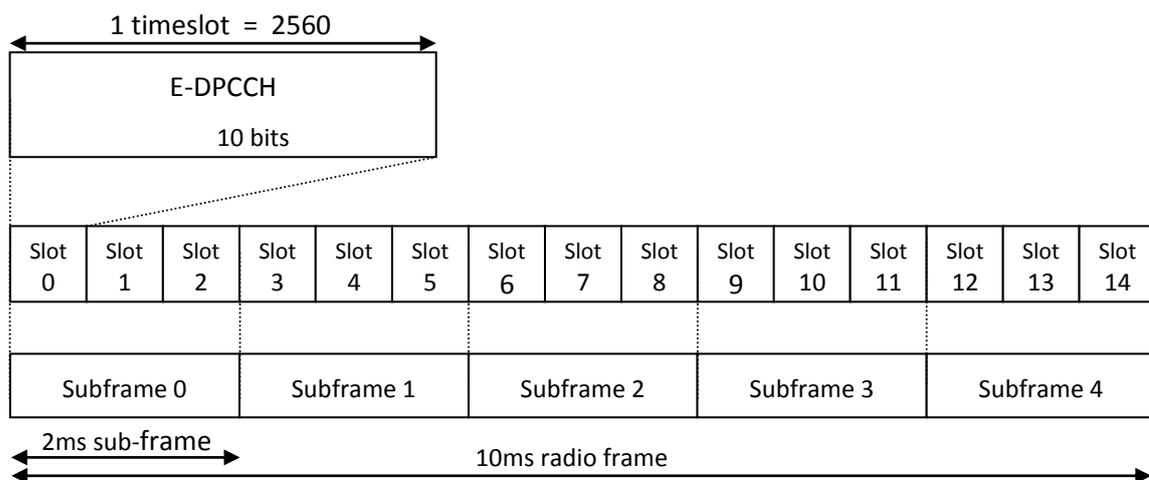


Figura 2.16 - Formato de trama del canal E-DPCCH

El canal E-DPCCH tiene un único formato de slot con factor de ensanchamiento 256 y es capaz de transmitir 30 bits en cada subframe de 2ms. De estos 30 bits, codificados con un esquema *Reed-Muller* de segundo orden, únicamente 10 bits contienen información acerca del canal E-DPDCH:

- **E-TFCI - E-DCH Transport Format Combination Indicator**  
Indica el formato de transporte utilizado en los canales E-DPDCH, informando al receptor de cuantos canales se transmiten en paralelo y que factor de ensanchamiento esta utilizándose.
- **RSN - Retransmission Sequence Number**  
Indica el número de secuencia del proceso HARQ del bloque que se está enviando. La transmisión inicial del bloque se envía con valor 0, la primera retransmisión con valor 1, la segunda con valor 2 y las siguientes con valor 3.
- **Happy Bit**  
Indica si el terminal está satisfecho con la tasa de transferencia actual, relacionada directamente con la potencia de transmisión permitida, o, por el contrario, necesitaría una mayor utilización de los recursos compartidos.

RSN Re-transmission Sequence Number	E-TFCI E-DCH Transport Format Combination Indicator	Happy Bit
---	---	-----------

Figura 2.17- Información transmitida por el canal E-DPCCH

#### 2.4.1.2.2 E-DPDCH

Introducido en el uplink a partir de la Release 6, *E-DCH Dedicated Physical Data Channel* es utilizado como portador de la información resultante del procesado del canal E-DCH. Este canal coexiste con todos los canales de dedicados de la Release 5 de 3GPP.

El canal E-DPDCH tiene una estructura similar a la del canal DPDCH de la Release 99. Ambos utilizan una modulación BPSK y siguen el mismo bucle de control de potencia.

Al igual que DPDCH, utiliza factores de ensanchamiento ortogonales (OVSFs) para ajustar el número de bits sobre cada canal a la cantidad de datos transmitida y pueden multiplexarse varios canales en paralelo para aumentar la velocidad de transmisión.

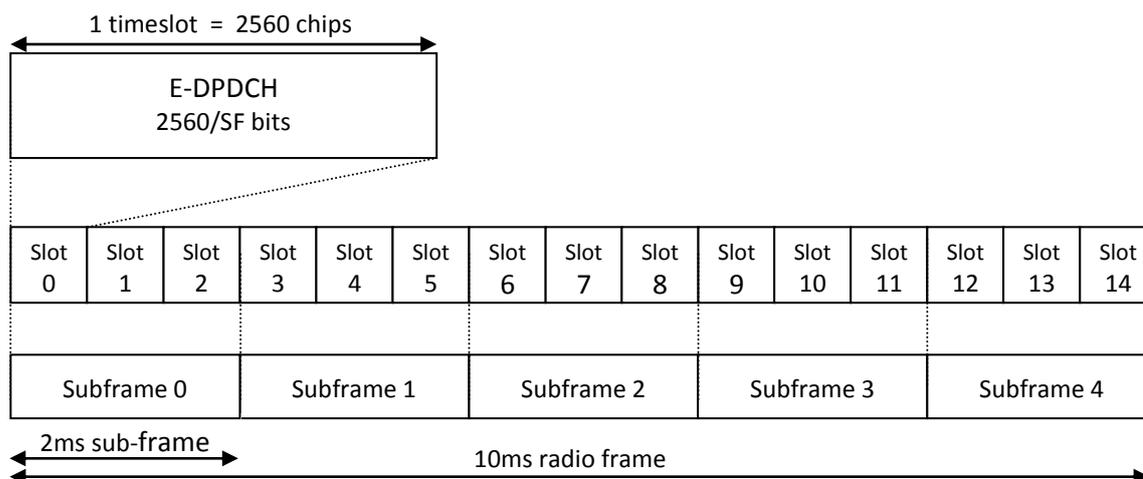


Figura 2.18 - Formato de trama del canal E-DPDCH

Sobre la Release 99, E-DPDCH añade el soporte para un factor de ensanchamiento de 2 lo que permite enviar el doble de bits por canal y por código que con DPDCH, cuyo mínimo factor soportado es de 4. El nuevo canal dedicado soporta una transmisión simultánea de hasta 2 códigos SF2 más 2 códigos SF4, alcanzando de este modo los 5.76Mbps teóricos.

Bit Rate	Release '99 DPDCH	Release 6 E-DPDCH
15-960 kbps	SF256 – SF4	SF256 – SF4
1.92 Mbps	2xSF4	2xSF4
2.88 Mbps	3xSF4	-
3.84 Mbps	4xSF4	2xSF2
4.80 Mbps	5xSF4	-
5.76 Mbps	6xSF4	2xSF4 + 2xSF2

Tabla 2.11 - Comparación entre los canales DPDCH y E-DPDCH

E-DPDCH introduce también una nueva longitud de TTI de 2ms. Se mantiene también la estructura de frame de 10ms utilizada en la Release 99, pero cuando se utiliza el TTI de 2ms el frame de 10ms se divide en 5 subframes independientes.

Formato intervalo	Spreading Factor	Bit Rate (Kbps)	Bits / TTI	
			2 ms	10 ms
0	256	15	30	150
1	128	30	60	300
2	64	60	120	600
3	32	120	240	1200
4	16	240	480	2400
5	8	480	960	4800
6	4	960	1920	9600
7	2	1920	3840	19200
8	4	1920	3840	19200
9	2	3840	7680	38400

Tabla 2.12 - Formatos de intervalo del canal E-DPDCH

### 2.4.1.2.3 E-HICH

*E-DCH HARQ Indicator Channel* es un canal físico del enlace descendente introducido a partir de la Release 6 de la especificación 3GPP. Su función es permitir al Nodo-B confirmar la correcta recepción de la información transmitida en un TTI.

El factor de ensanchamiento utilizado es fijo de 128 y la modulación BPSK, con lo que se alcanza una velocidad binaria de 60kbps (120 bits por cada subframe de 2ms, 40 bits por timeslot).

La especificación presenta 40 secuencias ortogonales de códigos, permitiendo a un grupo de conexiones HSUPA compartir los mismos códigos de canalización. La secuencia de cada una de estas conexiones variará de acuerdo a una de los 40 patrones de salto definidos.

Estos 40 patrones de datos son compartidos con el canal E-RGCH, permitiendo al RNC soportar 20 conexiones HSUPA (20xE-HICH + 20xE-RGCH) con una única canalización.

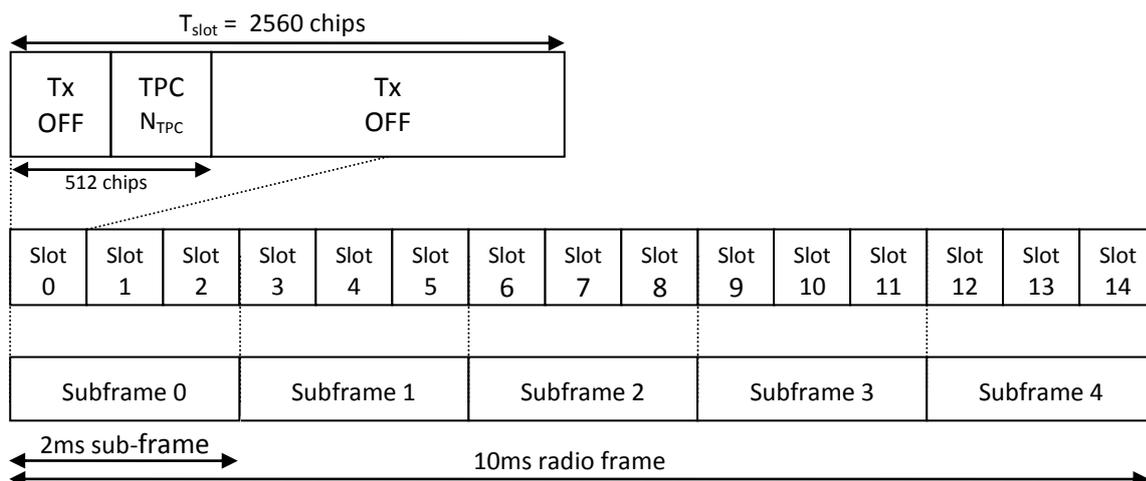


Figura 2.19 - Formato de trama del canal E-HICH

### 2.4.1.2.4 E-AGCH

*E-DCH Absolute Grant Channel* es un canal físico del enlace descendente introducido a partir de la Release 6 de la especificación de 3GPP. Su función es transmitir información necesaria para la asignación de recursos en el proceso de scheduling.

El factor de ensanchamiento utilizado es siempre 256 y la modulación BPSK, con lo que se transmite a una velocidad binaria de 30kbps (60 bits por cada subframe de 2ms).

La información transmitida en esta canal sirve al Nodo-B para trasladar al terminal las decisiones tomadas por el scheduler:

- *Absolute Grant Value*  
Indica al terminal, mediante un valor entre 0 y 31, el ratio de potencia con el que puede transmitir el canal E-DPDCH.
- *Absolute Grant Scope*  
Utilizado para activar o desactivar uno o varios procesos HARQ. Esta funcionalidad está disponible únicamente cuando se utiliza un TTI de 2ms.

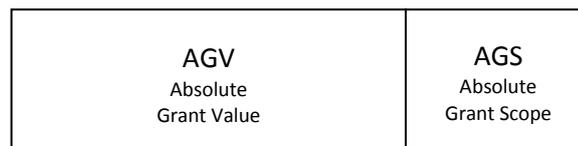


Figura 2.20 - Información transmitida por el canal E-AGCH

De forma similar al canal HS-SCCH de HSDPA, se añade un CRC de 16 bits a esta información y se aplica una máscara con el UE-id del terminal, lo que permite al UE saber cuando las indicaciones están dirigidas a él.

### 2.4.1.2.5 E-RGCH

*E-DCH Relative Grant Channel* es un canal físico del enlace descendente introducido a partir de la Release 6 de la especificación de 3GPP. Su función es transmitir información necesaria para la asignación de recursos en el proceso de scheduling.

La información transmitida por este canal contiene comandos relativos de scheduling que indican el ratio de potencia con el que se autoriza a transmitir al terminal.

Del mismo modo que E-HICH, el factor de ensanchamiento utilizado es 128 y la modulación BPSK.

La estructura de trama es exactamente igual a la del canal E-HICH mostrada en la Figura 2.19.

## 2.4.2 MAC Layer

La especificación de la capa MAC tiene mucha más funcionalidad en HSUPA de la que tiene en HSDPA.

### 2.4.2.1 Información de scheduling

La información de scheduling transportada en la PDU de MAC-es consiste en 4 elementos, sumando un total de 18 bits:

- TEBS – *Total E-DCH Buffer Status* (5 bits)  
Guarda la cantidad total de datos contenidos en el buffer de transmisión del terminal. Esta información es utilizada por el scheduler a la hora de decidir la tasa binaria a la que el terminal pueda transmitir.
- HLID – *Highest Priority Logical Channel ID* (4 bits)  
Indica el canal lógico de mayor prioridad que tiene datos almacenados en el buffer de transmisión del terminal. Esta información puede ser utilizada por el scheduler para decidir a qué terminales deberían asignarse recursos primeramente.
- HLBS – *Highest Priority Logical Channel Buffer Status* (4 bits)  
Guarda la cantidad de datos contenidos en el buffer de transmisión del terminal para el canal lógico indicado por el valor HLID. Esta información puede ser utilizada por el scheduler para decidir a qué terminales deberían asignarse recursos primeramente.
- UPH – *Uplink Power Headroom*(5 bits)  
Informa al Nodo B del ratio entre la máxima potencia de transmisión permitida al terminal y la potencia transmitida en el canal piloto DPCCH. Esta información puede ser utilizada por el scheduler para

La SI es transmitida periódicamente por el UE o cuando, no teniendo permiso para transmitir a ninguna tasa, el terminal recibe información en el buffer para ser transmitida.

Esta información es utilizada por el scheduler del Nodo-B en conjunción con el *happy-bit* del canal E-DPCCH.

### 2.4.2.2 Información de HARQ

Dentro del uplink de la Release 99 se contemplaba la posibilidad de que varios canales DCH coexistieran simultáneamente entre el terminal y el Nodo-B, lo que permitía la diferenciación y la aplicación de políticas de QoS.

Esta resulta una diferencia fundamental con HSUPA, donde cada terminal puede tener configurado un único canal E-DCH como máximo. Por ello, para diferenciar tráfico y poder aplicar políticas de QoS, cada servicio debe ser mapeado sobre un flujo MAC-d diferente con sus atributos específicos:

- máximo número de retransmisiones del paquete antes de descartarlo.
- offset de potencia de transmisión específico para el flujo

Estos dos atributos no son independientes, dado que un mayor o menor offset permitido en potencia impacta directamente sobre la probabilidad de que sea necesaria una retransmisión

De esta forma, mientras los flujos de tráfico no sensibles al retardo tendrán un offset de potencia reducido y un número elevado de retransmisiones permitidas, los flujos de tráfico en tiempo real tendrán offsets de potencia más elevados y un número menor de retransmisiones.

### 2.4.2.3 E-DCH Transport Format Combination

Como se describió anteriormente los comandos *relative-grant* y *absolute-grant* transmitidos por los canales E-RGCH y E-AGCH ajustan la potencia máxima permitida con la que el terminal puede transmitir en el canal E-DPDCH en relación con la potencia transmitida en el DPCCH.

Estos comandos de scheduling tienen efecto también sobre la selección por parte del terminal del formato del canal de transporte E-DCH que define el número de bits a transmitir en cada TTI. El proceso de selección de E-TFC es también parte de la capa MAC.

Inicialmente, el terminal dispone de una lista de los tamaños de bloque que puede utilizar y de las potencias relativas que se requieren para la transmisión de cada uno de estos.

El terminal comienza a preparar la transmisión de bloque de transporte E-DCH dentro de un TTI evaluando la potencia máxima que puede utilizar para la transmisión del canal E-DPDCH. A continuación, se comprueba el offset de potencia del flujo de datos MAC-d de mayor prioridad en el buffer, que será el offset de potencia a utilizar a la hora de transmitir en el canal E-DPDCH. Cada tamaño de bloque unido a un offset de potencia seleccionado para un determinado flujo MAC-d recibe el nombre de E-DCH *Transport Format Combination* (E-TFC).

Entonces, el terminal comprueba el offset máximo de potencia que puede utilizar para la transmisión del canal E-DPDCH. Este parámetro está controlado por las información de los comandos *relative-grant* y *absolute-grant*.

Para la selección del E-TFC, UE selecciona el máximo tamaño de bloque que cumple la condición de que el offset de potencia asociado al bloque sumado al offset de potencia asociado al flujo MAC-d sea menor o igual que el máximo offset de potencia permitido.

### 2.4.3 TTI

*Transmission Time Interval* define la longitud de una transmisión en el enlace radio que puede ser decodificada de manera independiente. Este tiempo está relacionado con la encapsulación de la información de las capas superiores en tramas de la capa física.

HSUPA permite elegir entre dos TTI's de 2 y 10 ms. El TTI de 2 ms minimiza la latencia de transmisión beneficiando a los servicios en tiempo real. El TTI de 10 ms es necesario por motivos de cobertura para asegurar el servicio en el borde de la célula.

Utilizando un TTI de 2ms se obtiene una disminución en el retardo siempre y cuando no sea necesario un número elevado de retransmisiones, y el retardo entre estas sea inferior comparado con el TTI de 10ms. Sin embargo, a medida que nos aproximamos al borde de la celda, la utilización de esta longitud de intervalo supone un alto consumo de potencia de transmisión. Si además, el número de usuarios activos es elevado, la utilización de un periodo de 2ms resulta imposible.

Para tasas binarias de hasta 2Mbps no se encuentran diferencias importantes en la capacidad del sistema utilizando una longitud de intervalo u otra. Cuando pretendemos elevar la velocidad por encima de los 2Mbps por usuario, el tamaño de bloque para un TTI de 10ms sería demasiado grande, por lo que estas velocidades se ofrecen únicamente utilizando un TTI de 2ms.

Cuando el terminal se encuentra a grandes distancias de la base, las velocidades de transmisión en el uplink tienen limitaciones como consecuencia de las potencias de transmisión. La Figura 2.21 ilustra este concepto.

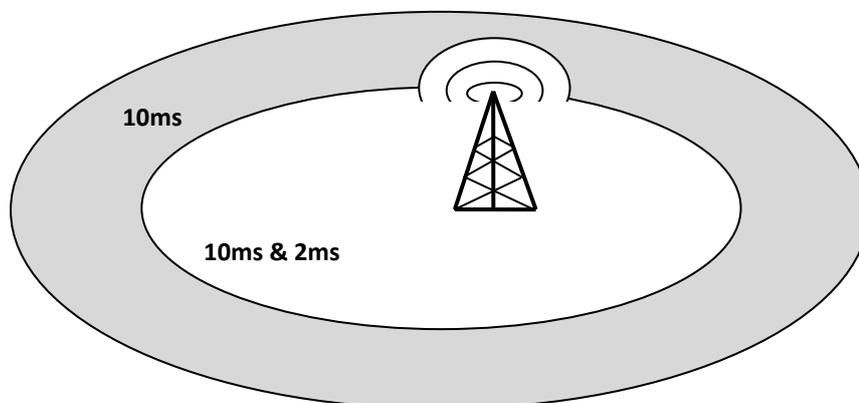


Figura 2.21 - Transmission Time Interval (2ms ó 10ms)

### 2.4.4 HARQ

El protocolo HARQ (*Hybrid ARQ*) representa la combinación ARQ (*Automatic Repeat Query*) con técnicas de corrección de errores FEC (*Forward Error Correction*).

Recordemos que ARQ es un método de detección de errores basado en ACK's enviados por el receptor para indicar la correcta recepción del paquete, consiguiendo así una correcta transmisión de la información sobre servicios no confiables. El terminal mantiene en memoria la información cuya recepción no ha sido confirmada. Si el emisor no recibe dicha confirmación la capa MAC retransmitirá de nuevo esa porción de la información hasta recibir un ACK o alcanzar el valor máximo de retransmisiones fijado. ARQ permite la detección de errores, pero no la corrección de los mismos, lo que obliga a la retransmisión.

En las técnicas FEC, el emisor añade determinada información redundante, seleccionada de forma que permita la corrección de errores en el emisor, evitando en un buen número de casos las retransmisiones, lo que reduce en un menor ancho de banda necesario.

*Hybrid ARQ* añade bits para permitir la corrección de un subconjunto de todas las combinaciones erróneas posibles, utilizando ARQ únicamente para la detección de aquellos errores que no pueden ser corregidos por técnicas FEC. De este modo, las prestaciones de HARQ son muy superiores a las de ARQ simple cuando se transmite por canales donde la señal recibida es muy pobre.

HSUPA soporta HARQ con *soft combining* almacenando los bloques de información recibidos erróneamente, en lugar de descartarlos, para combinarlos con los siguientes bloques recibidos fruto de la retransmisión y utilizar la esta información para recuperar correctamente los datos. La variante utilizada es *chase combining* en la que cada retransmisión contiene exactamente la misma información, por lo que cada transmisión puede interpretarse como un incremento en la  $E_b/N_o$  de la señal recibida.

En HSUPA, la implementación de HARQ utilizada es *stop-and-wait*. Se trata de la forma más sencilla de protocolo, donde el emisor no emite un paquete de información hasta que no haya sido confirmada la correcta recepción del anterior. Básicamente se trata de un protocolo de ventana deslizante con tamaño de ventana 1, por lo que la utilización que se hace del canal es menos eficiente que en otras implementaciones como *Go-Back-N* ó *Selective Repeat*.

HSUPA soporta *soft handover* lo supone una complicación adicional el proceso HARQ dado que involucra a todos los Nodos-B incluidos en el *Active Set* del terminal. Cada Nodo-B ejecuta su proceso HARQ de manera independiente y la reordenación de paquetes se realiza en el RNC. En términos de arquitectura, esto obliga, como puede comprobarse en la Figura 2.14, a crear una nueva entidad MAC en el RNC.

## 2.4.5 Fast Scheduling

El scheduler es un elemento clave dentro del uplink, siendo responsable de controlar en qué momento y con qué tasa binaria puede transmitir cada terminal, en función del nivel de interferencia que afecta al resto de usuarios en el Nodo B.

Cuando el UE transmite a una mayor tasa binaria, la potencia recibida en el Nodo B debe ser a su vez más elevada para mantener la  $E_b/N_o$  necesaria para una correcta demodulación. El terminal podría, en cualquier momento, aumentar la tasa binaria a la que puede transmitir incrementando la potencia de transmisión, sin embargo, dada la no ortogonalidad del uplink, la potencia recibida de un UE supone interferencia para el resto.

Así pues, en el uplink el recurso compartido es el nivel de interferencia tolerable dentro de la celda. Si este nivel es demasiado alto, algunas transmisiones dentro de la célula podrían no ser recibidas correctamente para permitir su demodulación. Por el contrario, si la interferencia se encuentra por debajo del nivel tolerable, la capacidad del sistema no se está explotando en su totalidad.

Uno de los objetivos fijados en la definición de HSUPA es soportar *Fast Scheduling*, lo que permitirá al sistema modificar de manera rápida la velocidad de transmisión de cada terminal.

Recordemos que el nuevo canal de transporte introducido en el uplink, *Enhanced Dedicated Channel*, es un canal dedicado, no compartido con ninguna otra conexión. Así pues, el único recurso compartido por las distintas conexiones del uplink será el nivel de potencia recibido en el Nodo B. Esta es una diferencia fundamental con respecto al enlace descendente, dado que en HSDPA las transmisiones son ortogonales entre ellas.

El concepto *noise-rise* o *rise-over-thermal* es una medida del incremento de interferencia en la célula como consecuencia de actividad en la transmisión. Está definido como  $(I_o + N_o)/N_o$ , siendo  $I_o$  y  $N_o$  las densidades espectrales de potencia de interferencia y ruido respectivamente. Por ejemplo, 0dB indican un sistema completamente descargado, mientras 3dB indican una densidad espectral de potencia debida a la transmisión en el uplink igual a la densidad espectral de potencia de ruido.

El proceso de scheduling opera según un esquema petición - respuesta, donde los terminales solicitan permiso para el envío de información y el scheduler decide cuándo y cuantos terminales estarán autorizados. En la solicitud, el terminal envía información acerca del estado de ocupación del buffer de transmisión

Dentro del estándar HSUPA se definen dos modos para el proceso de scheduling:

- *Scheduled Grant*: siguiendo un esquema petición-respuesta, los terminales envían solicitudes de transmisión al Nodo-B incluyendo información sobre la ocupación del buffer de transmisión y el margen de potencia disponible. El scheduler, en base a esta información, decide que terminales y cuando están autorizados a transmitir.
- *Non-scheduled Grant*: únicamente se informa al terminal del máximo tamaño de bloque que puede transmitir por el canal E-DCH durante un TTI. Este valor está relacionado de manera determinista con la máxima potencia de transmisión. De esta forma, se permite una transmisión decidida unilateralmente por parte del terminal sin necesidad de una autorización previa por parte del scheduler. Este modo es utilizado principalmente para servicios en tiempo real que requieren una latencia reducida.

Cada flujo MAC-d es configurado para utilizar uno u otro modo y el terminal ajusta las velocidades de transmisión de forma independiente. La tasa binaria máxima para flujos non-scheduled es configurada en el setup de la conexión, mientras que para flujos scheduled la potencia de transmisión utilizada es controlada dinámicamente por el Nodo-B mediante los mensajes enviados por los canales físicos E-AGCH y E-RGCH.



## 3. Estudio de HSUPA en microceldas – Autopistas

Las autopistas son vías de circulación para vehículos terrestres que permiten desplazarse de forma rápida y segura y admiten un gran volumen de tráfico. Para ser considerada autopista una vía debe reunir una serie de requisitos, entre ellos:

- tener 2 bandas de circulación, 1 para cada sentido
- un mínimo de 2 carriles en cada banda con arcenes laterales
- curvas poco pronunciadas que permitan circular sin aminorar la marcha
- ausencia de cruces a nivel

En España se optó por la conversión de nuestras antiguas carreteras nacionales duplicando las calzadas para crear autovías, que, a diferencia de las autopistas, permiten la circulación de otros vehículos además de automóviles (camiones, tractores...)



Figura 3.1 - Autopista M-50 - Madrid

Para ofrecer cobertura con sistemas celulares en autovías en entornos rurales aislados se utiliza una estructura *cigar-shaped*, en la que cada una de las células presenta una forma alargada que recuerda a la de un cigarro, tal y como puede verse en la Figura 3.2

Dicha forma puede observarse también en otros escenarios, como entornos urbanos, cuando el efecto de los edificios hace que la región de cobertura de una célula tenga la forma de una calle o una gran avenida.

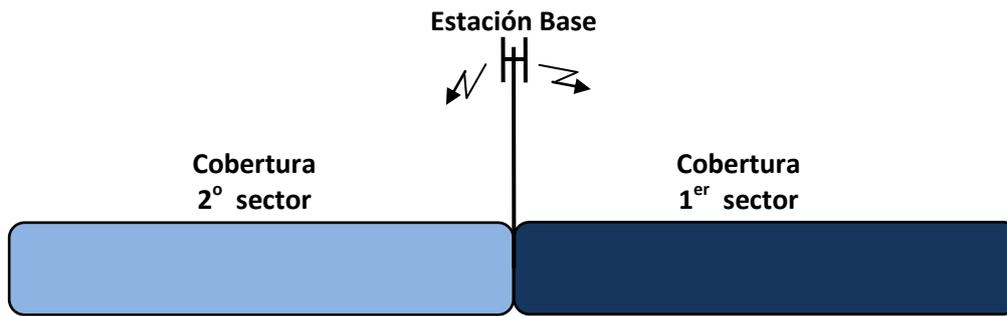


Figura 3.2 - Célula cigar-shaped

En esta configuración, cada una de las células está dividida en 2 sectores a los que se ofrece cobertura desde un emplazamiento con 2 antenas directivas. Como se verá a continuación, una menor *SLL* de estas antenas supondrá una disminución de la interferencia provocada desde el otro sector de la célula y, como consecuencia, una mayor capacidad.



Figura 3.3 - Patrón de radiación azimuth

El radio de cobertura de cada uno de los sectores estará comprendido entre 1 - 1,5km, dependiendo del número de terminales a los que deba ofrecerse servicio y, por supuesto, de las características orográficas del terreno (lo cual queda fuera del alcance de este estudio).

Un aspecto importante a tener en cuenta es que los usuarios que utilizaran este servicio viajarán en el interior de vehículos y se estarán moviendo a velocidades elevadas del orden de 120 km/h.

El presente capítulo está basado en [4], donde se analiza para este tipo de escenarios la capacidad del uplink de UMTS sin tener en cuenta el efecto de los usuarios del servicio HSUPA. Se presentará el modelo de propagación que mejor aproxima las condiciones de este escenario y se realizará un estudio matemático de la capacidad del uplink mezclando distintos tipos de servicio. Por último, a partir de estos modelos, se mostrarán los resultados obtenidos para diversas simulaciones en las que se estudia la capacidad de los servicios tradicionales de voz y datos y el impacto que supone sobre estos la prestación de un servicio de datos de alta velocidad como HSUPA.

### 3.1 Modelo de propagación

Para calcular las pérdidas de propagación sufridas en un escenario como este se utilizará un modelo de tierra plana con doble pendiente con presencia de efecto shadowing con una distribución log-normal.

Así pues, tendremos dos exponentes de propagación diferentes: un valor  $\gamma_1$  hasta una distancia  $R_b$  y un valor mayor  $\gamma_2$  a partir de dicha distancia.

La distancia  $R_b$  deberá definirse con un valor aproximado de:

$$R_b \approx \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad (3.1)$$

Siendo

- $\lambda$  la longitud de onda
- $h_b$  la altura de la antena de la estación base
- $h_m$  la altura de la antena del terminal

De esta forma, las pérdidas de propagación en el uplink de un usuario situado a una distancia  $r$  de la estación base seguirán la siguiente expresión:

$$L_p(dB) \approx L_b + L_g + 10\gamma_1 \log_{10} \left( \frac{r}{R_b} \right) + \xi_1 \quad \text{para } r \leq R_b \quad (3.2)$$

$$L_p(dB) \approx L_b + L_g + 10\gamma_2 \log_{10} \left( \frac{r}{R_b} \right) + \xi_2 \quad \text{para } r > R_b \quad (3.3)$$

Siendo:

- $L_b$  las pérdidas de propagación a la distancia  $R_b$  definidas como:

$$L_b(dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right) + 10\gamma_1 \log_{10}(R_b) \quad (3.4)$$

- $L_g$  las pérdidas debidas a los cristales del vehículo (del orden de 3dB)

El efecto de shadowing provoca en la práctica una desviación de las pérdidas frente al valor esperado. Esta desviación vendrá dada por las variables aleatorias  $\xi_1$  y  $\xi_2$  con distribución gaussiana de media cero y desviación estándar  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  de respectivamente.

## 3.2 Análisis del uplink

Para el cálculo de los estadísticos de interferencia y la capacidad del sector, se utilizará un modelo formado por 5 microceldas de 2 sectores de radio  $R$ . La Figura 3.4 ilustra este modelo.

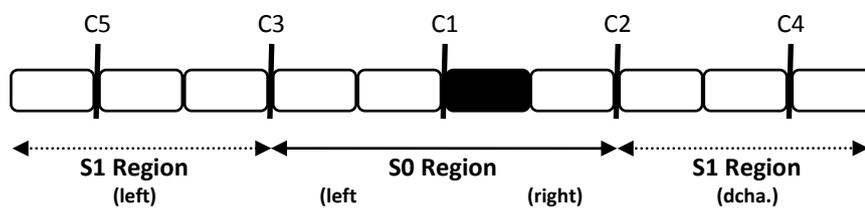


Figura 3.4 - Modelo de microceldas cigar-shaped

Supongamos un usuario interferente situado a una distancia  $r_{im}$  de la estación base a la que está conectado y a una distancia  $r_{id}$  de la estación base bajo estudio, tal y como se muestra en la Figura 3.5.

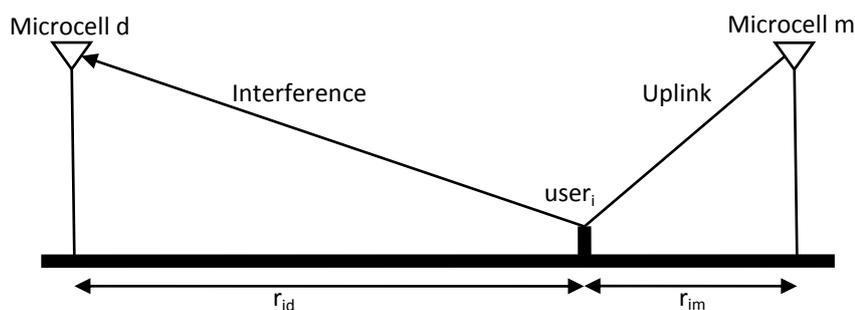


Figura 3.5 - Modelo de microcelda

La relación entre las señales de interferencia  $L(r_{id}, r_{im})$  debida exclusivamente a las pérdidas por distancia vendrá dada por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(\gamma_2 - \gamma_1)} \frac{r_{im}^{\gamma_1}}{r_{id}^{\gamma_2}} \quad \text{para } r_{id} > R_b \text{ y } r_{im} < R_b \quad (3.5)$$

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(\gamma_1 - \gamma_2)} \frac{r_{im}^{\gamma_2}}{r_{id}^{\gamma_1}} \quad \text{para } r_{id} < R_b \text{ y } r_{im} > R_b \quad (3.6)$$

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left(\frac{r_{im}}{r_{id}}\right)^{\gamma_2} \quad \text{para } r_{id} > R_b \text{ y } r_{im} > R_b \quad (3.7)$$

Si además incluimos el efecto del shadowing, la relación entre las señales de interferencia  $L_{shd}(r_{id}, r_{im})$  debida a la distancia y al efecto shadowing vendrá dada por la ecuación:

$$L_{shd}(r_{id}, r_{im}) = 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} L(r_{id}, r_{im}) \quad (3.8)$$

A continuación se estudiarán los estadísticos de interferencia intercelular e intracelular para cada uno de los servicios.

### 3.2.1 Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos

Dada la penetración en el mercado de estos servicios, supondremos una distribución uniforme de usuarios con una densidad  $\rho_s = N_{u,s}/R$  en cada uno de los sectores.

En la parte derecha de la región  $S_0$ , la esperanza de interferencia intercelular vendrá dada por:

$$E[I_{S_0}]_{r,s} = \alpha_s \rho_s \int_{S_0} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \partial r \quad (3.9)$$

Donde el factor  $f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right)$  modela el efecto de shadowing, estando definido por la siguiente ecuación:

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{\frac{(\sigma\beta)^2}{2}} Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left\{\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right\}\right] \quad (3.10)$$

donde  $\beta = \frac{\ln 10}{10}$  y  $Q(x)$  la función de distribución complementaria de la distribución gaussiana, definida como:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-v^2/2} dv \quad (3.11)$$

Utilizaremos  $\sigma^2$  como valor general para la desviación típica de las variables aleatorias que representan el efecto shadowing. Para su cálculo utilizaremos la siguiente expresión:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_1^2 \quad \text{para } r_{id} < R_b \text{ y } r_{im} < R_b \quad (3.12)$$

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_2^2 \quad \text{para } r_{id} > R_b \text{ y } r_{im} > R_b \quad (3.13)$$

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{dm})\sigma_1\sigma_2 \quad \text{en el resto de casos} \quad (3.14)$$

Siendo  $C_{dm}$  el coeficiente de correlación intersites.

En la parte derecha de la región S1, la esperanza de interferencia intercelular vendrá dada por:

$$E[I_{S1}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{S1_r} L(r_{id}, r_{im}) E \left[ 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} \right] \partial r \quad (3.15)$$

Resultando el valor esperado de potencia de interferencia intercelular:

$$E[P]_{inter,s} = P_{r,s} E[I]_{inter,s} = P_{r,s} (E[I_{S0}]_{r,s} + E[I_{S1}]_{r,s})(1 + sll) \quad (3.16)$$

Calculamos el valor esperado de potencia de interferencia intracelular como:

$$E[P]_{intra,s} = P_{r,s} E[I]_{intra,s} \approx P_{r,s} \alpha_s N_{u,s} (1 + sll) \quad (3.17)$$

Si consideramos un control de potencia imperfecto con un error con desviación estándar  $\sigma_c$ , la esperanza de potencia de interferencia total generada por el servicio s vendrá dada por la ecuación:

$$E[P_{int}]_s = e^{\frac{\beta^2 \sigma_c^2}{2}} (E[P]_{intra,s} + E[P]_{inter,s}) \quad (3.18)$$

### 3.2.2 Esperanza de interferencia para el servicio HSUPA

A día de hoy, servicios como HSUPA aún no están tan extendidos entre el gran público, además de no poder ofrecer la misma capacidad por el elevado nivel de interferencia que se genera entre usuarios.

Así pues, el número de usuarios que utilizarán este servicio concurrentemente dentro del mismo sector es mucho más limitado. Por ello, a la hora de calcular los estadísticos de interferencia para HSUPA lo haremos para un único usuario en lugar de integrar a lo largo de toda la región.

Calcularemos la relación entre las señales de interferencia  $L(r_{id}, r_{im})$  utilizando las ecuaciones (3.5) (3.6) y (3.7) y la desviación típica del efecto shadowing  $\sigma$  mediante las ecuaciones (3.11) (3.12) y (3.13), del mismo modo que se hizo previamente para los servicios de datos y voz.

Asumimos que el usuario HSUPA objeto de estudio se encuentra en la parte derecha de la región S0 por lo que esta será la única interferencia generada, no generándose ninguna en la región S1 ni en la parte izquierda de la región S0.

De esta forma, el valor esperado para la potencia de interferencia intercelular generada por el servicio HSUPA vendrá dado por la expresión:

$$E[P]_{inter,HSUPA} = P_{r,HSUPA} E[I]_{inter,HSUPA} = P_{r,HSUPA} \alpha_{HSUPA} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \quad (3.19)$$

En adelante los valores  $l$  y  $m$  representarán la probabilidad de que el terminal se encuentre conectado a otra estación base distinta de la que estamos estudiando.

$$l = Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left(\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right)\right] \quad (3.20)$$

$$m = Q\left[2\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left(\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right)\right] \quad (3.21)$$

El valor esperado para la potencia de interferencia intracelular generada por el servicio HSUPA se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$E[P]_{intra,HSUPA} = P_{r,HSUPA} E[I]_{intra,HSUPA} \approx P_{r,HSUPA} \alpha_{HSUPA} (1 - l) \quad (3.22)$$

Considerando nuevamente un control de potencia imperfecto con desviación típica y sumando ambos valores, obtendremos la esperanza de potencia de interferencia total:

$$E[P_{int}]_{HSUPA} = e^{\frac{\beta^2 \sigma_c^2}{2}} (E[P]_{intra,HSUPA} + E[P]_{inter,HSUPA}) \quad (3.23)$$

### 3.2.3 Varianza de interferencia para los servicios de voz y datos

Al igual que hicimos previamente para calcular el valor esperado, supondremos una distribución uniforme de usuarios con una densidad  $\rho_s = N_{u,s}/R$  en cada uno de los sectores.

De esta forma, la varianza de potencia de interferencia intercelular generada en la parte derecha de la región S0 vendrá dada por:

$$Var[P_{S0}]_{r,s} = \rho_s P_{r,s}^2 \int_{S0,r} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) - q \alpha_s^2 f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \right\} \partial r \quad (3.24)$$

Donde los factores  $f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right)$  y  $g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right)$  modelan el efecto de shadowing, estando definidos de la siguiente forma:

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{\frac{(\beta\sigma)^2}{2}} l = e^{\frac{(\beta\sigma)^2}{2}} Q \left[ \beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10} \left( \frac{1}{L(r_{id}, r_{im})} \right) \right] \quad (3.25)$$

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{2(\beta\sigma)^2} m = e^{2(\beta\sigma)^2} Q \left[ 2\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10} \left( \frac{1}{L(r_{id}, r_{im})} \right) \right] \quad (3.26)$$

Siendo

$$p = e^{2\beta^2 \sigma_c^2} \quad (3.27)$$

$$q = e^{\beta^2 \sigma_c^2} \quad (3.28)$$

La varianza de potencia intercelular generada por los usuarios situados en la parte derecha de la región S1 vendrá dada por:

$$Var[P_{S1}]_{r,s} \approx \rho_s P_{r,s}^2 \int_{S1,r} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s E \left[ \left( 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} \right)^2 \right] - q \alpha_s^2 E^2 \left[ 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} \right] \right\} \partial r \quad (3.29)$$

Siendo la varianza de potencia intercelular total:

$$Var[P]_{inter,s} = (Var[P_{S0}]_{r,s} + Var[P_{S1}]_{r,s})(1 + sl^2) \quad (3.30)$$

Para el cálculo de la varianza de potencia intracelular utilizaremos la siguiente expresión:

$$Var[P]_{intra,s} = N_{u,s} P_{r,s}^2 (p\alpha_s - q\alpha_s^2)(1 + sl^2) \quad (3.31)$$

Sumando ambos valores, obtendremos la varianza de potencia de interferencia total:

$$Var[P]_{int,s} = Var[P]_{intra,s} + Var[P]_{inter,s} \quad (3.32)$$

### 3.2.4 Varianza de interferencia para el servicio HSUPA

Nuevamente, a la hora de calcular los estadísticos de interferencia para el servicio HSUPA lo haremos para un único usuario en lugar de integrar a lo largo de toda la región.

De esta forma, el valor esperado para la potencia de interferencia intercelular generada por el servicio HSUPA vendrá dado por la expresión:

$$\begin{aligned} Var[P]_{inter,HSUPA} &= P_{r,HSUPA}^2 Var[I]_{inter,HSUPA} \\ &= P_{r,HSUPA}^2 [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p\alpha_{HSUPA} g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) - q\alpha_{HSUPA}^2 f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (3.33)$$

El valor esperado para la potencia de interferencia intracelular generada por el servicio HSUPA se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$Var[P]_{intra,HSUPA} = N_{u,HSUPA} P_{r,HSUPA}^2 (p\alpha_{HSUPA} - q\alpha_{HSUPA}^2) \quad (3.34)$$

Sumando ambos valores, obtendremos la varianza de potencia de interferencia total:

$$Var[P]_{int,HSUPA} = var[P]_{intra,HSUPA} + var[P]_{inter,HSUPA} \quad (3.35)$$

### 3.2.5 Capacidad del sistema multiservicio

Así pues, aplicando unas u otras ecuaciones según corresponda, habremos obtenido los valores de los estadísticos de potencia de interferencia para cada uno de los servicios. Los estadísticos de interferencia totales se calcularán como la suma de los resultados para cada uno de los servicios.

$$E[P_{int}] = \sum_s E[P_{int}]_s \quad (3.36)$$

$$Var[P_{int}] = \sum_s Var[P_{int}]_s \quad (3.37)$$

Así pues, para una probabilidad de desbordamiento determinada, podemos calcular la SIR del servicio  $s$  como:

$$\left[ \frac{C}{I} \right]_s = \frac{\varepsilon P_{r,s}}{E[P_{int}] + P_N + \gamma \sqrt{var[P_{int}]}} \quad (3.38)$$

La relación entre la  $SNR_{bit}$  viene definida por la siguiente expresión:

$$\frac{E_b}{N_o} = G_p \left[ \frac{C}{I} \right] \quad (3.39)$$

Cuando ofrecemos distintos servicios en nuestro sistema, las potencias máximas transmitidas guardan la siguiente relación (en dB):

$$\left( \frac{P_{tx,HSUPA}}{P_{tx,datos}} \right)_{dB} = (1 + \delta_1) \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{G_{p,datos} / \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{datos}}{G_{p,HSUPA} / \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{HSUPA}} \right) \right] \quad (3.40)$$

$$\left( \frac{P_{tx,HSUPA}}{P_{tx,voz}} \right)_{dB} = (1 + \delta_2) \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{G_{p,voz} / \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{voz}}{G_{p,HSUPA} / \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{HSUPA}} \right) \right] \quad (3.41)$$

Siendo  $\delta_1$  y  $\delta_2$  factores de corrección con valor dentro el intervalo  $[-0,1 - 0,1]$ .

## 3.3 Resultados de las simulaciones

Aplicando el modelo descrito para redes desplegadas a lo largo de autopistas en entornos rurales, se han realizado simulaciones para estudiar en qué medida la capacidad del uplink de los servicios tradicionales de voz y datos se ve afectada por los nuevos servicios de datos de alta velocidad.

Los cálculos descritos con anterioridad se han implementado con ayuda de la herramienta Matlab y las simulaciones se han realizado con los siguientes valores que se consideran ajustados a los que razonablemente encontraremos en la realidad.

- Radio del sector
  - $R = 1000 \text{ mt}$
  
- Distancia del punto de ruptura entre las dos pendientes
  - $R_b = 300\text{m}$
  
- Propagación
  - $\gamma_1 = 2$
  - $\gamma_2 = 4$
  
- Shadowing
  - $\sigma_1 = 3\text{dB}$
  - $\sigma_2 = 6\text{dB}$
  - $C_{dm} = 0,5$

- Ganancias de procesado
  - 256 para el servicio de voz
  - 32 para el servicio de datos
  - 16 (240kbps) y 8 (480kbps) para el servicio HSUPA
  
- Potencia máxima transmitida
  - 30dBm para el servicio HSUPA
  - Los valores para los servicios de voz y datos ha sido calculado utilizando las ecuaciones (3.40) y (3.41).

	HSUPA $G_p=16$	HSUPA $G_p=8$
Voice	20,6 dBm	18,1 dBm
Data	27,0 dBm	24,5 dBm

Tabla 3.1 - Potencias máximas de transmisión

- $E_b/N_o$  requerida
  - 7dB para el servicio de voz
  - 4dB para el servicio de datos
  - Los valores para el servicio HSUPA se han extraído de [12]. Dichos valores están calculados para peatones moviéndose a una velocidad de 3km/h, mientras que nuestros usuarios viajarán en vehículos a velocidades del orden de 120km/h. Para compensar esta diferencia se han añadido 0,8dB extra a los valores originales.

	HSUPA $G_p=16$	HSUPA $G_p=8$
$E_b/N_o$	4.8dB	4.8dB

Tabla 3.2 -  $E_b/N_o$  requerida por el servicio HSUPA

- Potencia de ruido en el receptor de  $P_n = -100dBm$ .
- Ganancia de la antena de la estación base de 12dB con un  $SLL$  de -15dB.

Para la probabilidad de desbordamiento se considera aceptable un valor del 1% y las capacidades mostradas a continuación han sido calculadas de acuerdo a este porcentaje.

#### 3.3.1 Servicio HSUPA

Analizaremos en primer lugar las prestaciones del servicio HSUPA en autopistas en ausencia de otros servicios.

La Figura 3.6 muestra la capacidad del sector para el servicio HSUPA cuando este es el único servicio ofrecido, no existiendo ningún otro usuario que pueda generar interferencia. Es decir, sin usuarios de otros servicios dentro o fuera del sector bajo estudio, ni otros usuarios HSUPA en sectores próximos al nuestro. Evidentemente, esta situación es completamente irreal pero su estudio teórico nos permitirá hacer algunas conclusiones.

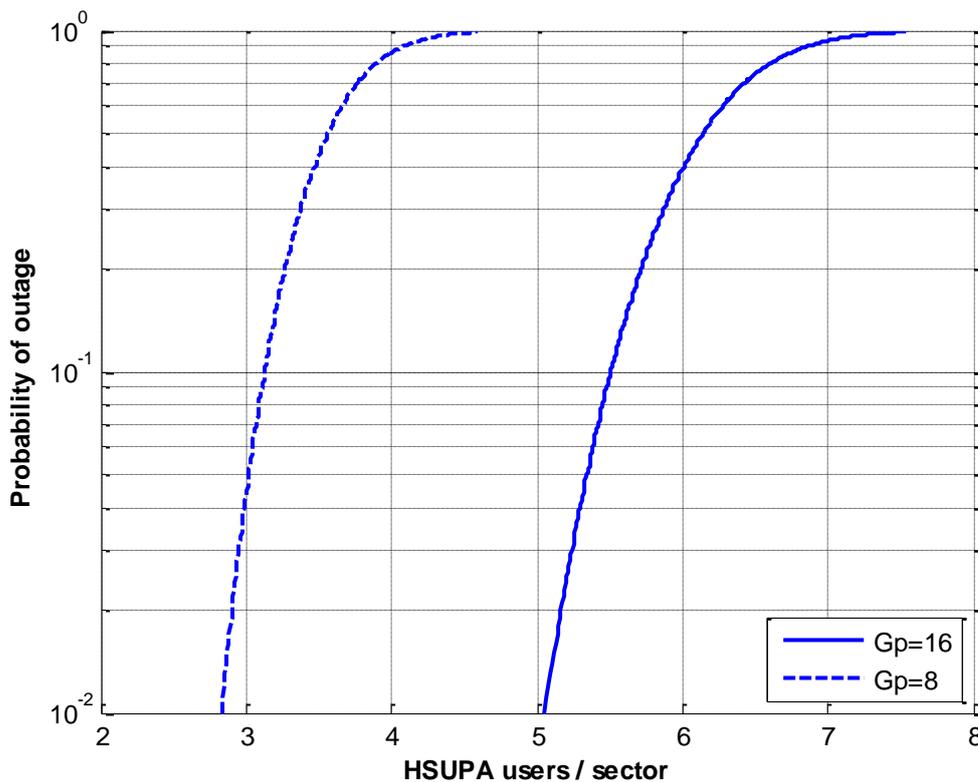


Figura 3.6 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA

Para una probabilidad de desbordamiento del 1%, observamos una capacidad máxima de 5 usuarios utilizando una ganancia de procesamiento de 16, y 2 usuarios (casi 3) para una ganancia de procesamiento de 8.

Analizaremos ahora la importancia de realizar un buen control de potencia, minimizando los errores, para obtener la mayor capacidad. Las Figuras 3.7 y 3.8 muestran la capacidad del sector para el servicio HSUPA para distintos valores del parámetro  $\sigma_c$ .

Las variaciones de este parámetro dentro de las simulaciones corresponden, en la realidad, a variaciones en el paso de control de potencia. Establecer un paso más fino permite cometer un menor error residual pero en canales con variaciones rápidas (*fading*) será necesario un paso mayor para permitir correcciones de forma más rápida.

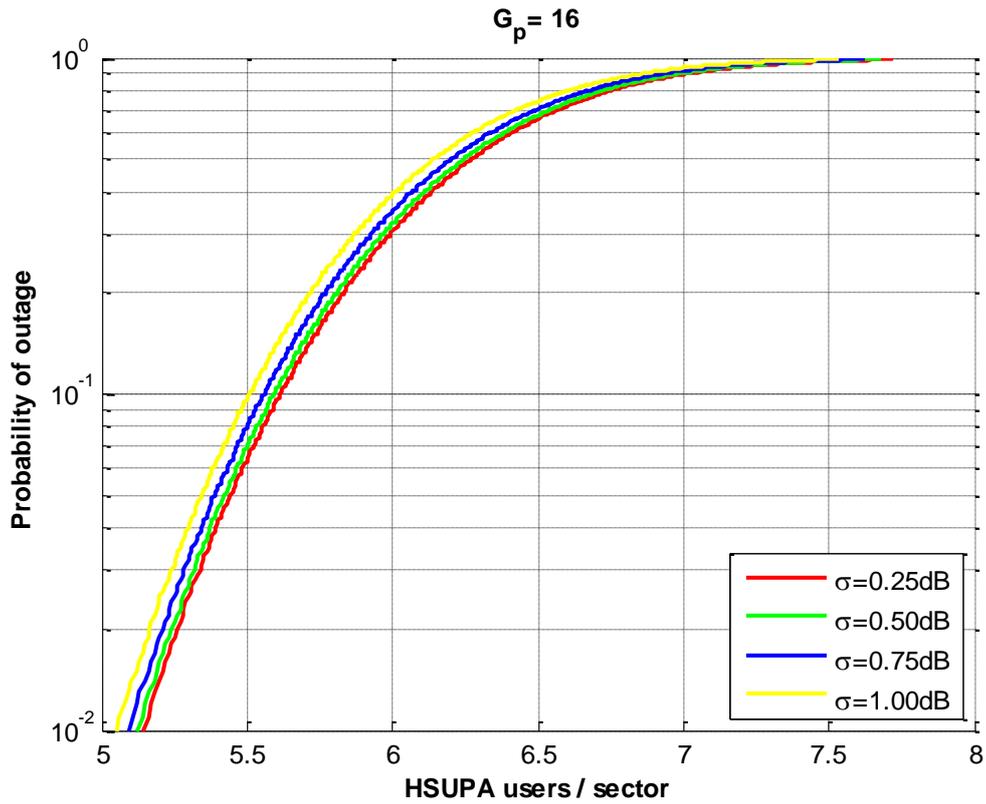


Figura 3.7 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=16$ ) - Control de potencia

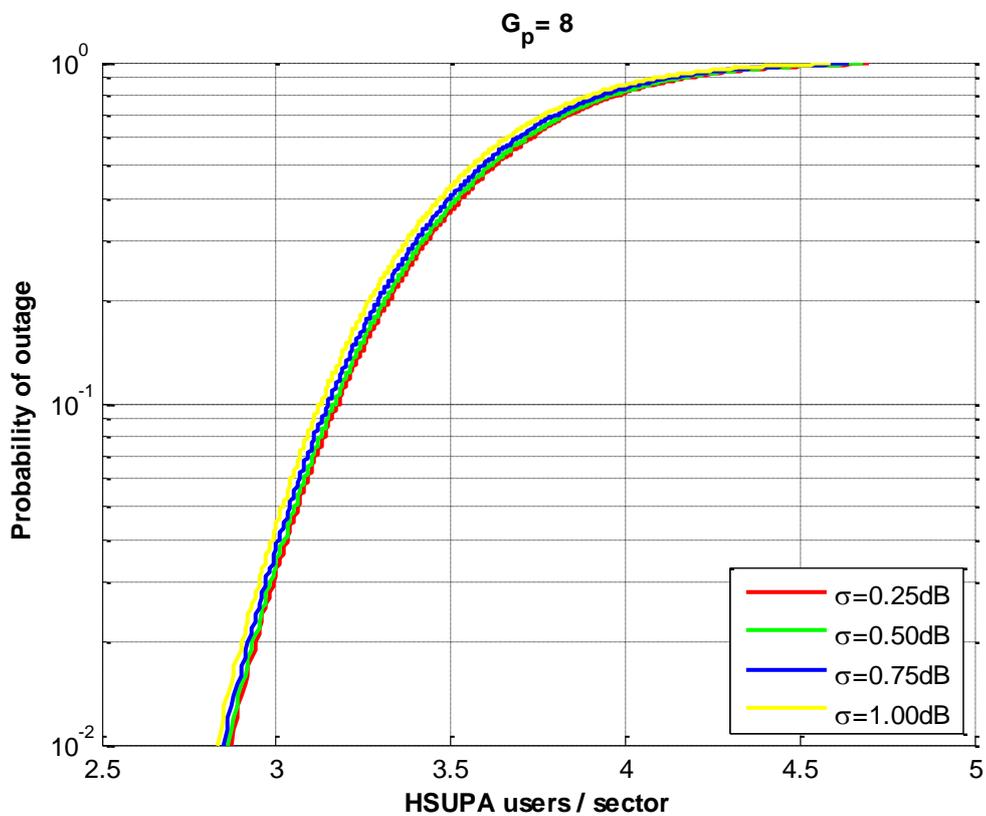


Figura 3.8 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=8$ ) - Control de potencia

Podemos observar como para valores menores del parámetro  $\sigma_c$  se comenten menores errores en el control de potencia, lo que beneficia la capacidad del sector.

En los siguientes apartados se estudiará el efecto que los usuarios del servicio HSUPA tienen sobre la capacidad de otros servicios. Para ello, comenzaremos calculando los estadísticos de interferencia del servicio HSUPA. Las Figuras 3.9 y 3.10 muestran el valor medio esperado y la varianza de la potencia de interferencia generada por un usuario situado a una distancia  $d$  de la estación base bajo estudio. Estas gráficas ya nos adelantan de que forma la localización del usuario afectará al resto de servicios.

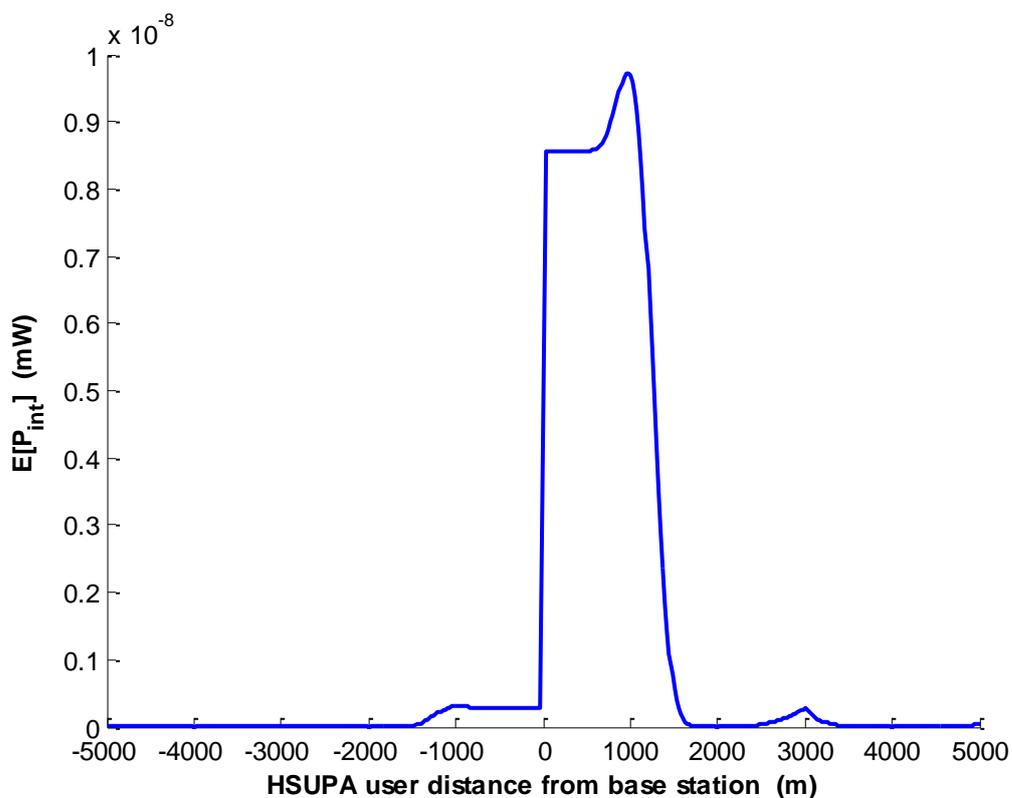


Figura 3.9 - Esperanza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA

Para la esperanza de potencia de interferencia se ha obtenido un valor máximo de  $9,73 \times 10^{-9}$  mW cuando el usuario interferente se encuentra situado a una distancia de 975 mt de la estación base. A partir de esa distancia la potencia de interferencia disminuye hasta hacerse prácticamente nula a partir de los 1800 mt.

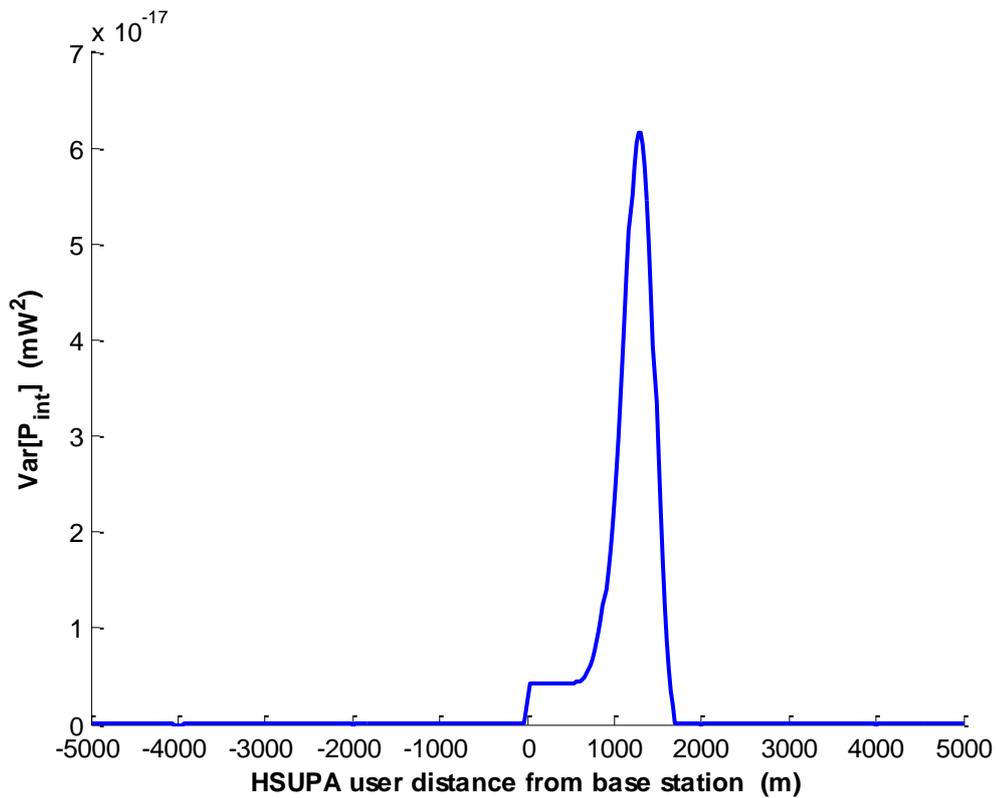


Figura 3.10 - Varianza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA

Para la varianza de potencia de interferencia se ha obtenido un valor máximo de  $6,16 \times 10^{-17} \text{ mW}^2$  cuando el usuario interferente se encuentra situado a una distancia de 1275 mt de la estación base.

En ambas gráficas puede apreciarse como la interferencia generada por el usuario HSUPA es prácticamente nula fuera de la región S0. Esta situación no debe confundirnos, ya que si tenemos en cuenta el sistema celular completo, será a partir de este punto donde el usuario comience a generar mayor potencia de interferencia sobre la estación base del sector colindante.

Las Figuras 3.11 y 3.12 muestran en detalle los estadísticos de potencia de interferencia generada por un usuario del servicio localizado en la parte derecha de la región S0.

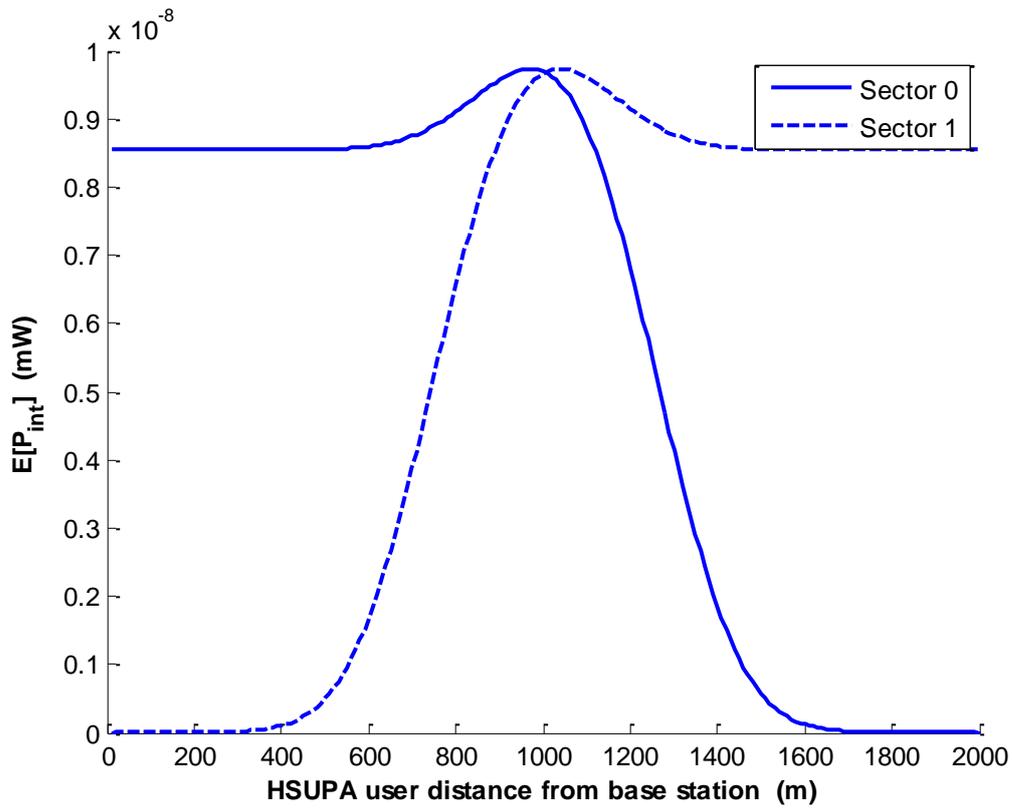


Figura 3.11 - Esperanza de potencia de interferencia sobre dos sectores vecinos

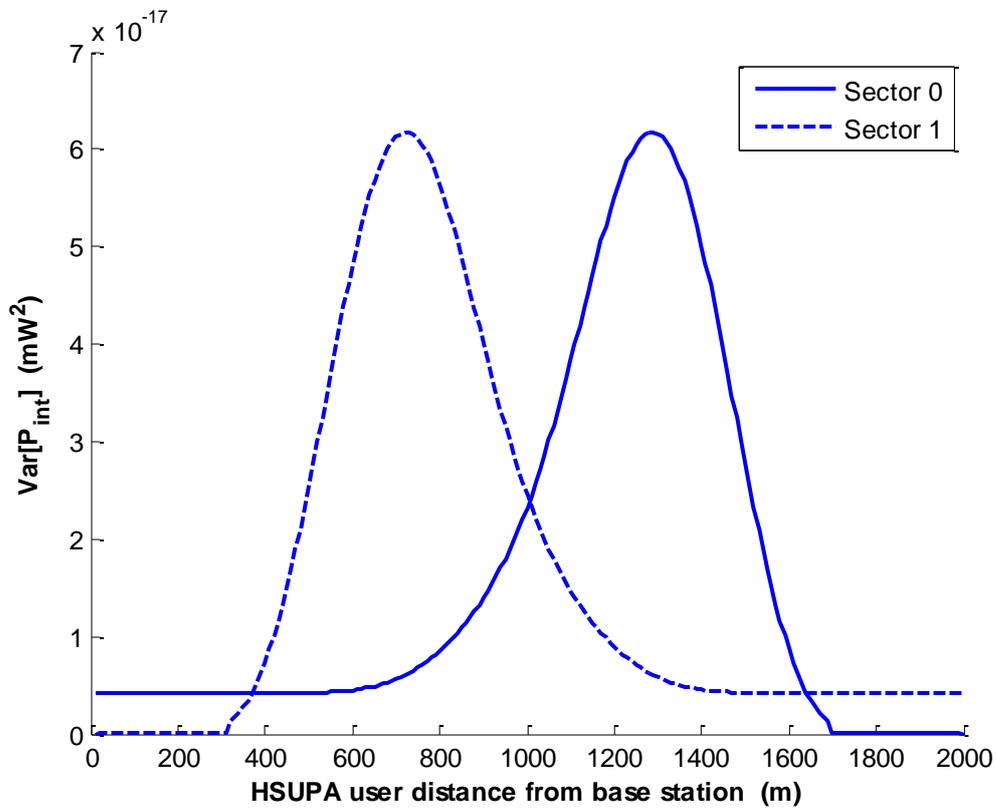


Figura 3.12 - Varianza de potencia de interferencia sobre dos sectores vecinos

Como se comentó anteriormente, todas estas simulaciones se han realizado suponiendo la ausencia total de usuarios de este u otros servicios en cualquiera de los sectores próximos desde los que la interferencia generada fuera suficiente para afectar a la capacidad. Se trata por tanto de un caso ideal. Veamos a continuación como un usuario del servicio HSUPA fuera del sector bajo estudio afecta a la prestación del servicio dentro de este.

Situaremos el nuevo usuario interferente a una distancia  $r$  de la estación base de referencia, siempre en el exterior del sector bajo estudio. La Figura 3.13 muestra la capacidad de la célula para el servicio HSUPA con un usuario adicional del servicio. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

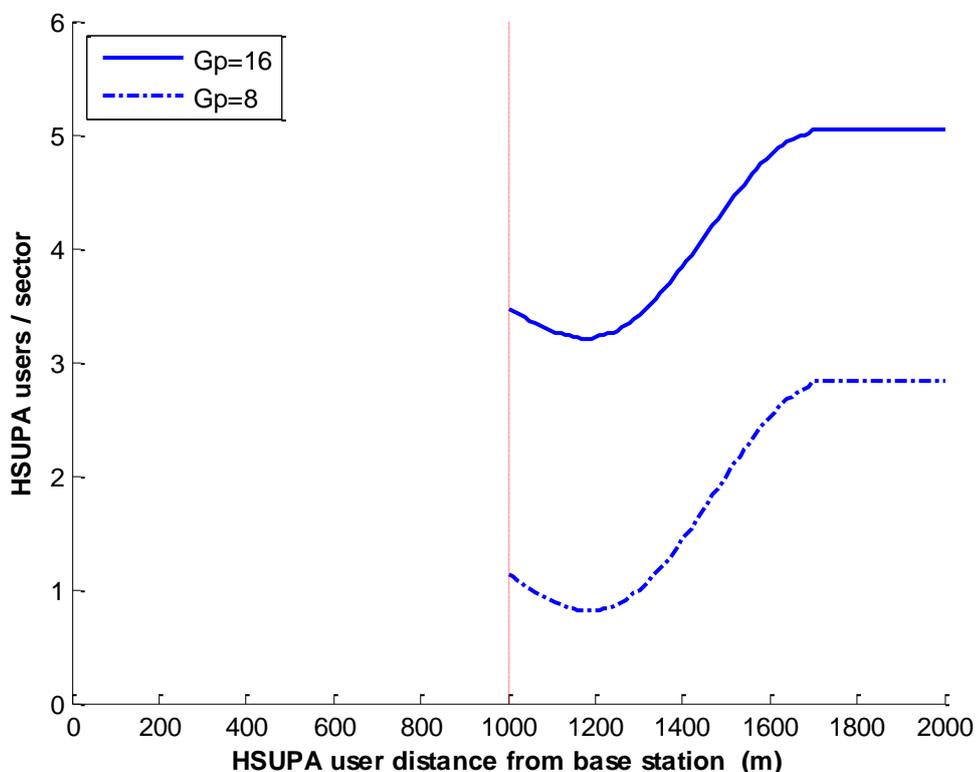


Figura 3.13 - Capacidad del servicio HSUPA- 1 usuario externo

Para  $G_p=16$  se ha obtenido una capacidad mínima de 3 usuarios cuando el usuario interferente se encuentra a una distancia de 1170 mt. En estas circunstancias, para  $G_p=8$ , la capacidad alcanza valores por debajo de 1. A medida que el usuario interferente se aleja de la estación base bajo estudio la capacidad crece hasta llegar, a partir de los 1700mt, a los valores calculados en ausencia de otros servicios que causen interferencia.

### 3.3.2 Servicio de voz

Una vez hemos caracterizado la interferencia generada por el usuario HSUPA, veamos de qué forma afecta a esta al servicio de voz, suponiendo que la densidad de usuarios en cada uno de los sectores es por unidad de longitud.

La Figura 3.14 muestra la capacidad de un sector par el servicio de voz cuando este es el único servicio utilizado. Comprobamos que para una probabilidad de desbordamiento del 1% la capacidad máxima estimada es de 55 usuarios simultáneos.

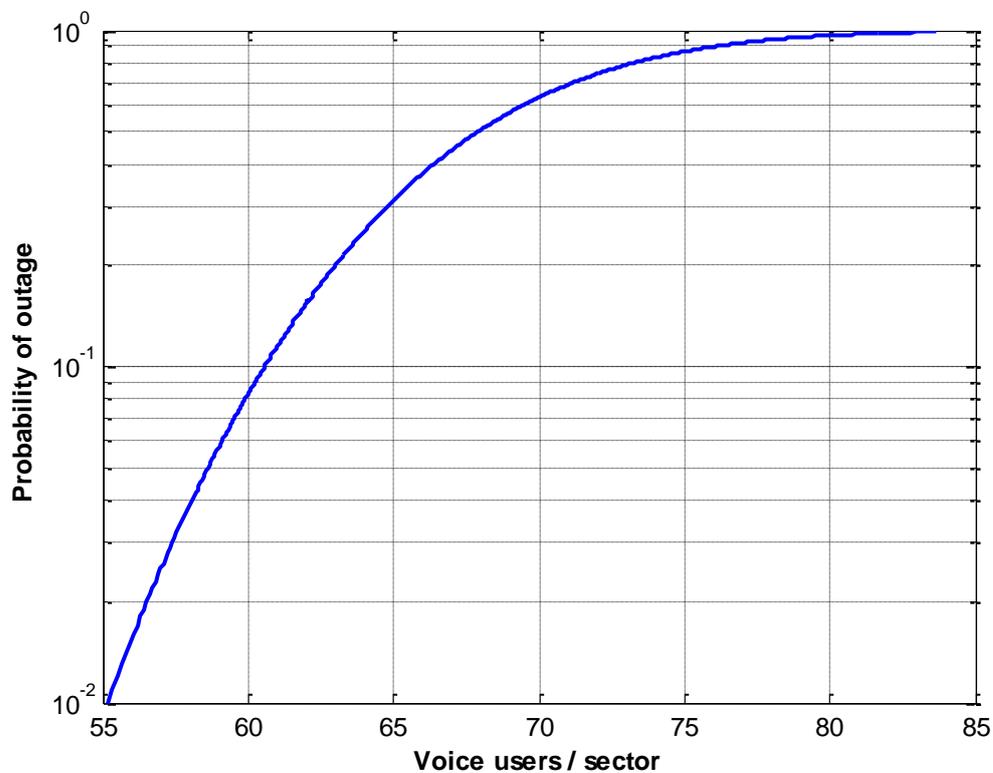


Figura 3.14 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz

Veamos ahora en qué medida esta capacidad se ve afectada por la presencia de un usuario HSUPA. La Figura 3.15 muestra la capacidad del sector para el servicio de voz con un usuario HSUPA presente a una distancia  $d$  de la estación base de referencia. Se ha realizado la simulación para valores de la ganancia de procesamiento de 16 y 8.

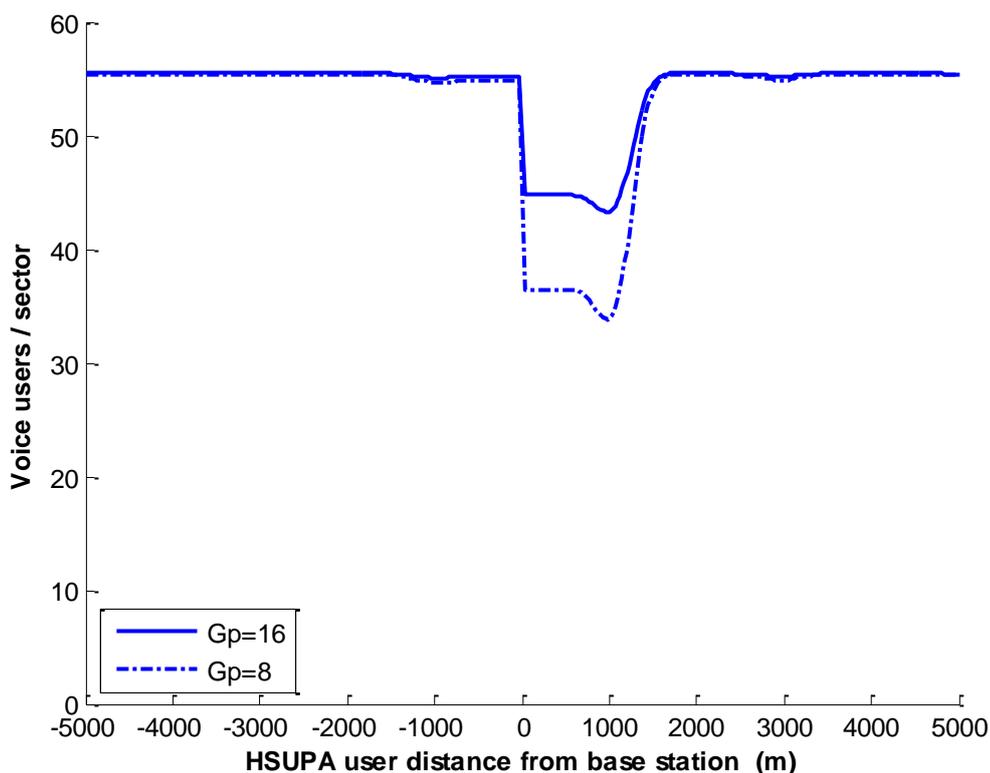


Figura 3.15 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA

Puede comprobarse como la capacidad del servicio de voz se ve drásticamente reducida cuando el usuario HSUPA se encuentra en la parte derecha de la región S0, coincidiendo con la distancia a la que los valores de potencia de interferencia mostrados en la Figura 3.9 son mayores.

Cuando el usuario HSUPA se mueve fuera de esta zona, la potencia de interferencia captada por la antena de la estación base de referencia es muy reducida, debido a dos razones:

- la región S1 se encuentra por encima de los 2 km de distancia en cuyo recorrido la señal sufre unas pérdidas de propagación elevadas.
- en la parte izquierda de ambas regiones, la baja ganancia del lóbulo secundario de la antena receptora hace que las señales procedentes de este área se reciban de forma mucho más débil.

Por estos motivos, el valor obtenido para la capacidad del servicio de voz en esos casos se aproxima a los 55 usuarios calculados previamente en ausencia de otros servicios.

Así pues, dado que la interferencia generada por nuestro usuario únicamente afectará significativamente al servicio de voz cuando este se encuentre entre los 0 y 2.000m, centraremos nuestro estudio en esta región. La Figura 3.16 muestra con mayor detalle la capacidad del sector para el servicio de voz con un usuario HSUPA presente en la parte derecha de la región S0. Se ha realizado la simulación para valores de la ganancia de procesado de 16 y 8.

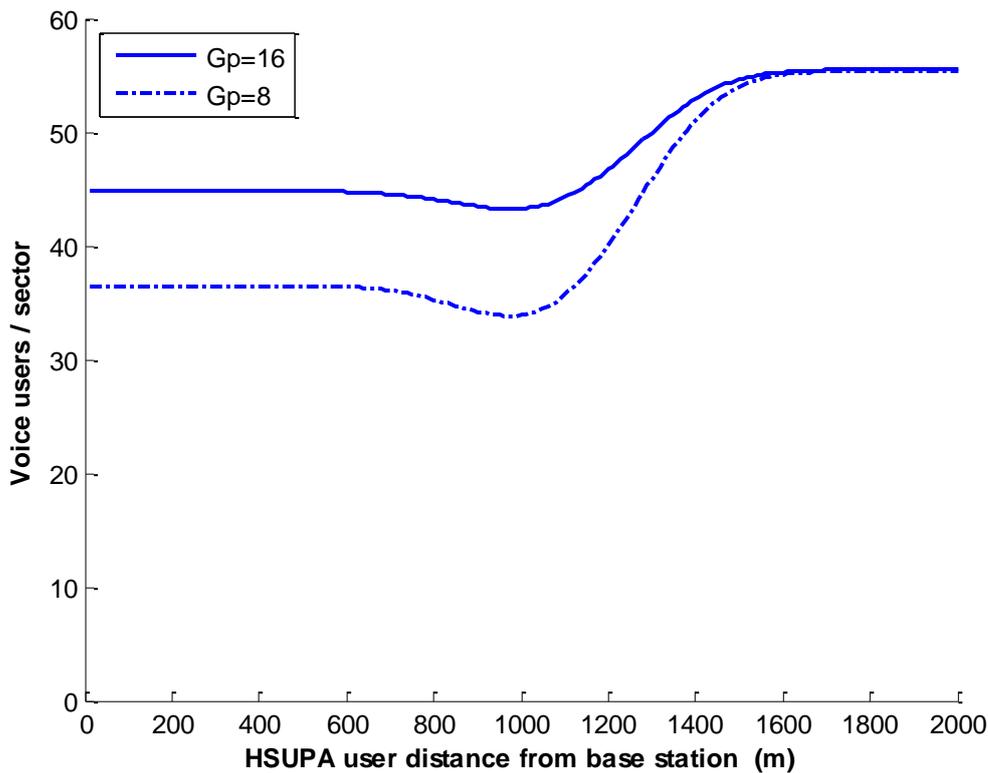


Figura 3.16 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA

Para el servicio de voz se obtienen capacidades de 44 usuarios para  $G_p=16$  y 36 usuarios para  $G_p=8$ , cuando el usuario interferente se encuentra en localizaciones próximas a la estación base de referencia. Aproximadamente a partir de los 500 mt, la capacidad comienza a disminuir significativamente, alcanzando sus valores mínimos cuando la distancia del usuario HSUPA a la estación base es de 980 mt. Las capacidades calculadas en estas circunstancias son de 43 usuarios para  $G_p=16$  y 33 usuarios para  $G_p=8$ . A medida que el usuario interferente se aleja de la estación base bajo estudio la capacidad crece hasta llegar, a partir de los 1600mt, a los valores calculados en ausencia de otros servicios que causen interferencia.

A continuación añadiremos un segundo usuario del servicio HSUPA, también moviéndose dentro de la parte derecha de la región S0. Las Figuras 3.17 y 3.18 muestran la capacidad del sector para el servicio de voz en función de la distancia de la estación base a la que se encuentran los dos usuarios HSUPA. Para la ganancia de procesamiento se han utilizado valores de 16 y 8 respectivamente.

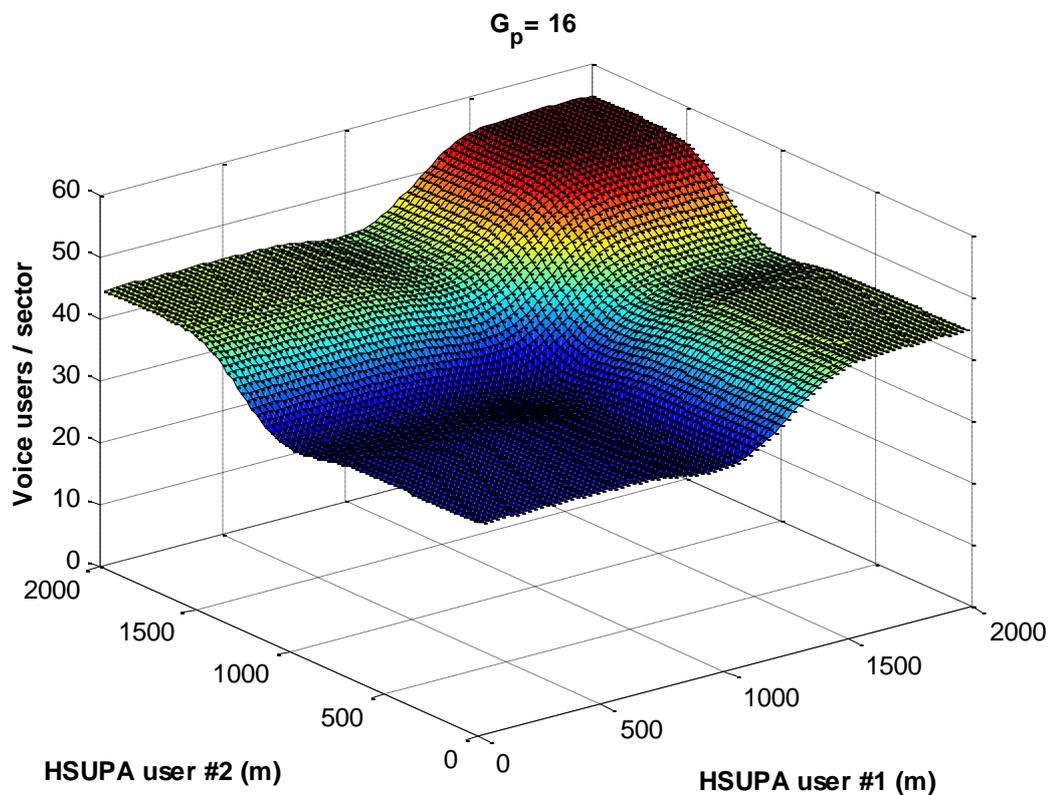


Figura 3.17 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ )

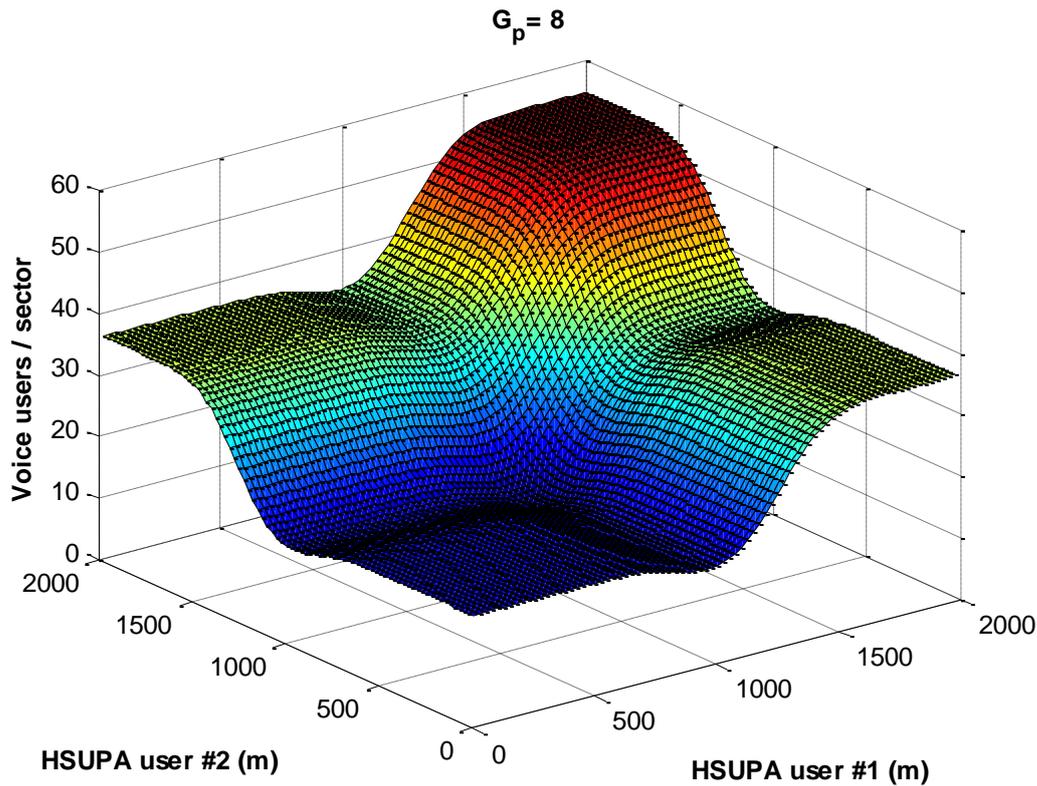


Figura 3.18 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ )

Observamos como estando uno de los usuarios en el borde de la región S0 y siendo la interferencia generada casi nula, la gráfica presenta perfiles de capacidad similares a los mostrados en la Figura 3.16.

Con ambos usuarios situados a más de 1700m, en el borde de la región S0, se obtiene la capacidad máxima de 55 usuarios. Este valor coincide con el que se obtuvo para la capacidad del servicio de voz en ausencia de otros servicios, lo que indica que la interferencia generada por ambos usuarios es mínima en la antena de referencia, aunque sí estará siendo importante para el sector contiguo cuya estación base de encuentra muy próxima.

A partir de ahí, la capacidad decrece a medida que ambos usuarios se mueven a distancias intermedias, obteniéndose valores mínimos de 31 usuarios para  $G_p=16$  y 13 usuarios para  $G_p=8$ , cuando ambos usuarios se encuentran alrededor de los 1000 mt, generando la máxima interferencia sobre la estación base de referencia.

Una vez comprobada la forma en que nuestros usuarios HSUPA afectarán la capacidad del servicio de voz, estudiaremos como el resto de parámetros del modelo de propagación presentado afectan a este valor.

Las Figuras 3.19 y 3.20 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  que separe nuestro usuario HSUPA de la estación base de referencia y del índice de propagación  $\gamma_1$ . Recordemos que en el modelo de propagación de doble pendiente propuesto, el índice  $\gamma_1$  se aplica hasta una distancia  $R_b$ .

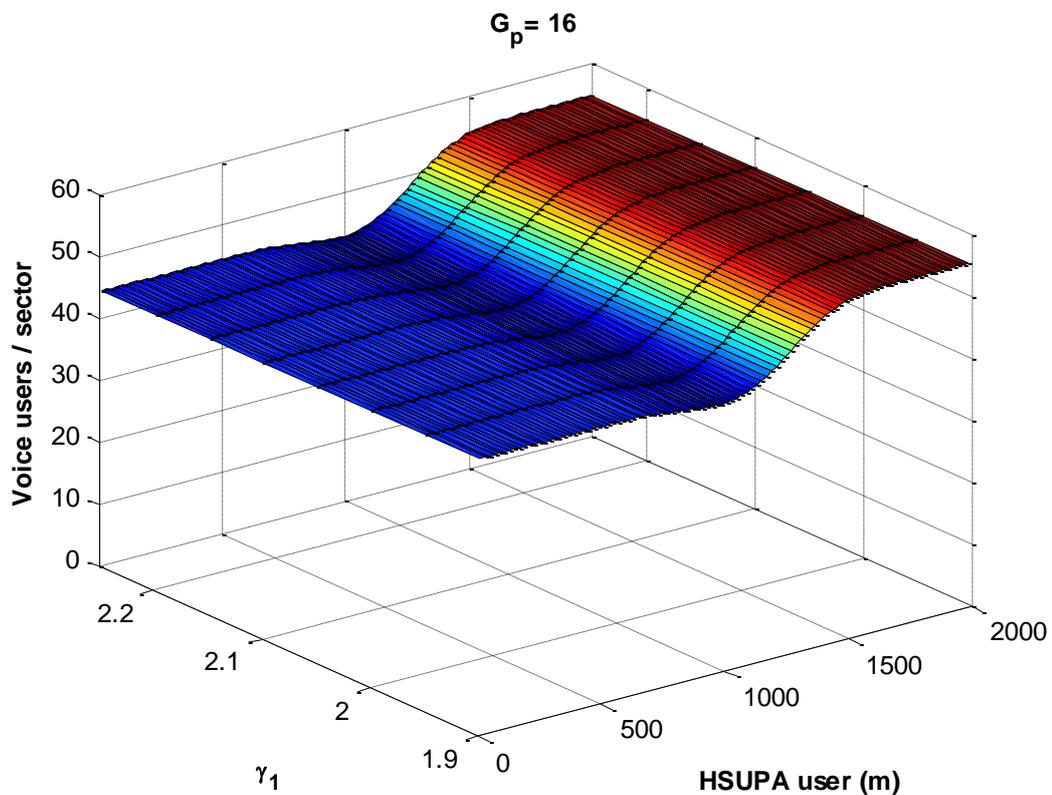


Figura 3.19 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice  $\gamma_1$

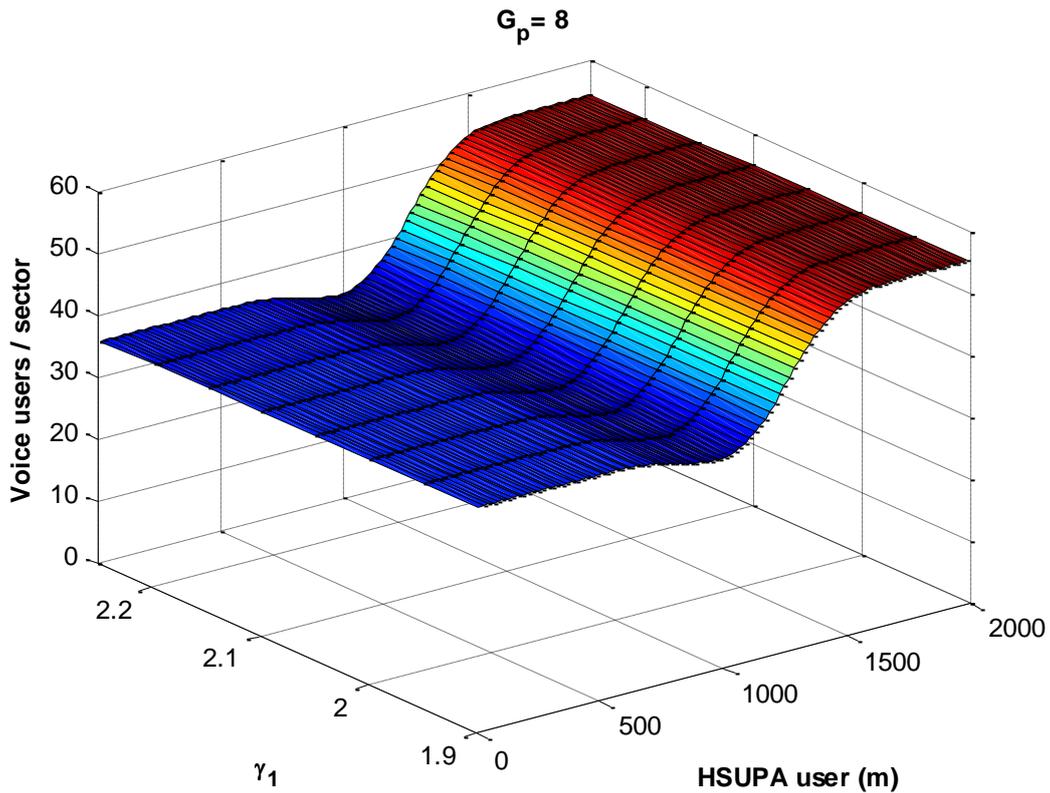


Figura 3.20 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice  $\gamma_1$

Puede apreciarse a simple vista como el índice de propagación  $\gamma_1$  apenas tiene incidencia sobre la capacidad soportada.

Las Figuras 3.21 y 3.22 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  que separe nuestro usuario HSUPA de la estación base de referencia y del índice de propagación  $\gamma_2$ . Recordemos que en el modelo de propagación de doble pendiente propuesto, el índice  $\gamma_2$  se aplica a partir de una distancia  $R_b$ .

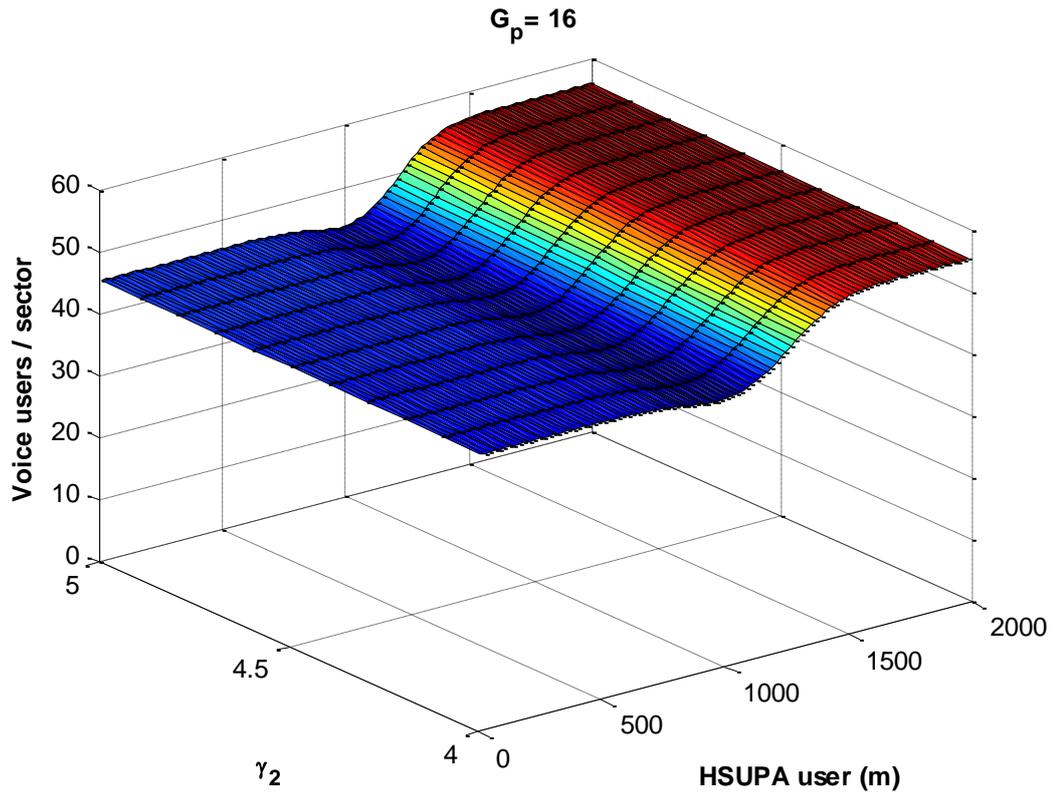


Figura 3.21 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice  $\gamma_2$

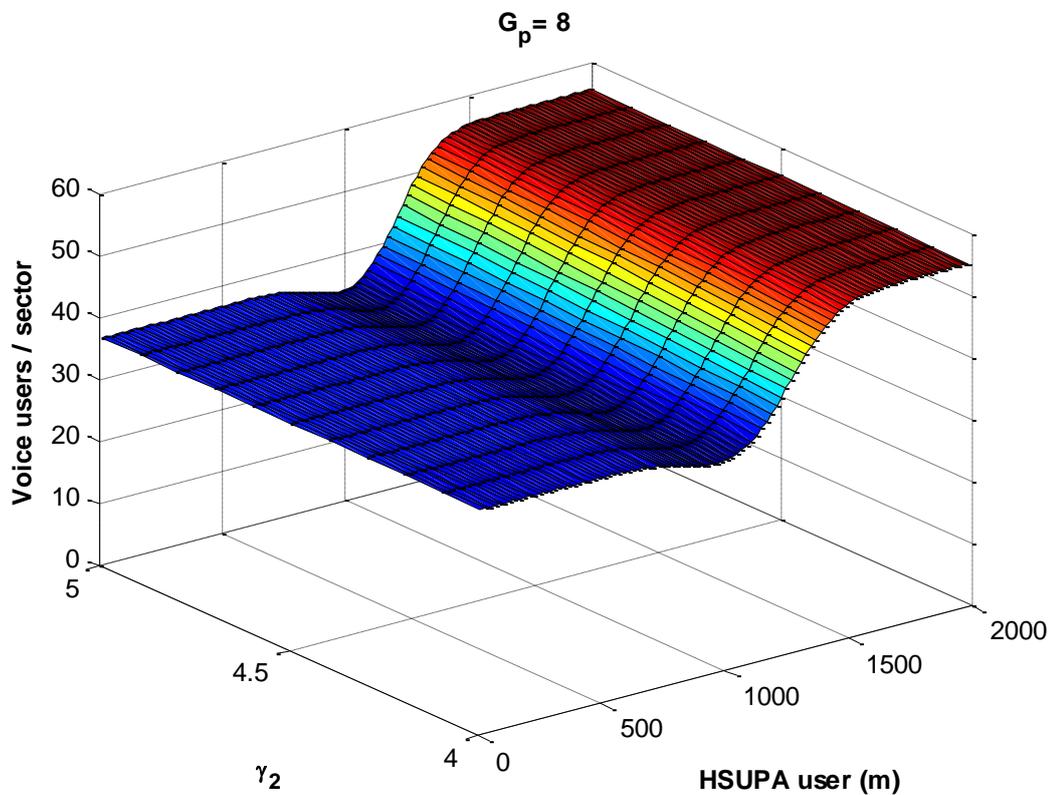


Figura 3.22 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice  $\gamma_2$

Puede apreciarse como el índice de propagación  $\gamma_2$  tampoco presenta una incidencia significativa sobre la capacidad soportada. En este caso, se obtienen capacidades ligeramente superiores para los valores más altos de  $\gamma_2$ , que incrementan el aislamiento disminuyendo la interferencia intercelular.

Sí observamos un ligero cambio en la pendiente de la curva, debido a que los índices mayores atenúan en mayor medida la interferencia generada por el usuario HSUPA y permiten un crecimiento más rápido de la capacidad a medida que el usuario se aleja. Recordemos a que a distancias alejadas de la base, cercanas al borde de la región S0, el peso de  $\gamma_2$  sobre las pérdidas de propagación es mucho mayor que la de  $\gamma_1$ .

Las Figuras 3.23 y 3.24 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  y de la desviación típica  $\sigma_1$  de la variable aleatoria que modela el efecto shadowing.

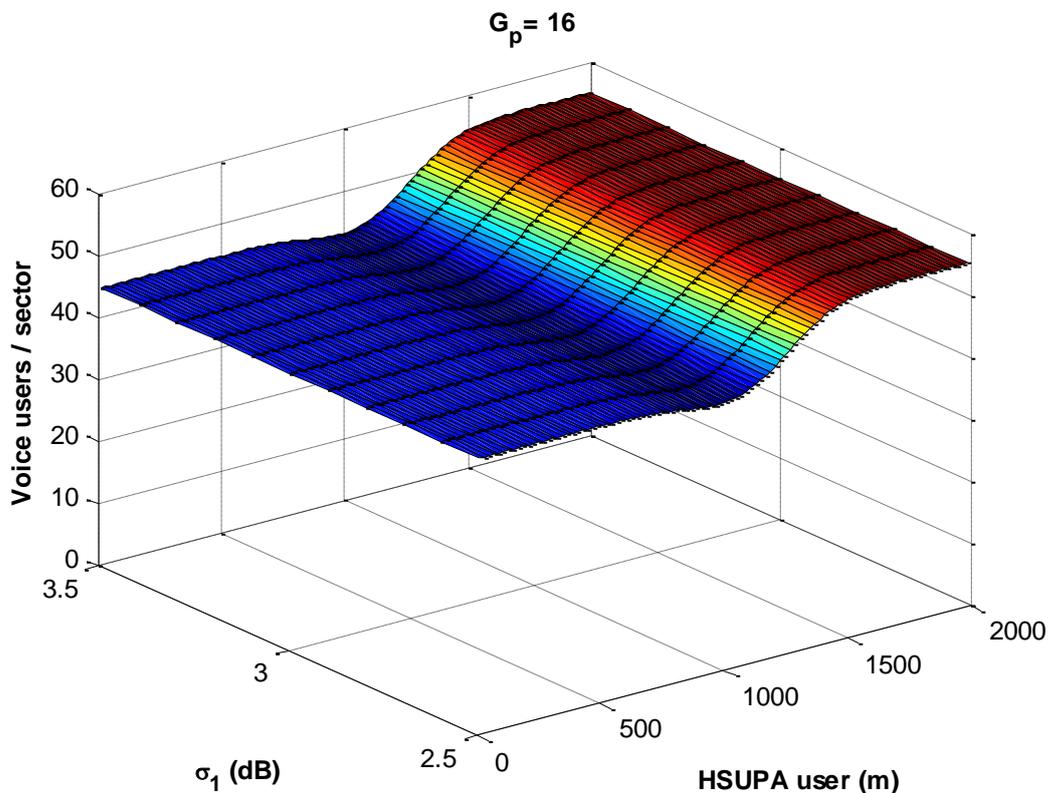


Figura 3.23 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación  $\sigma_1$

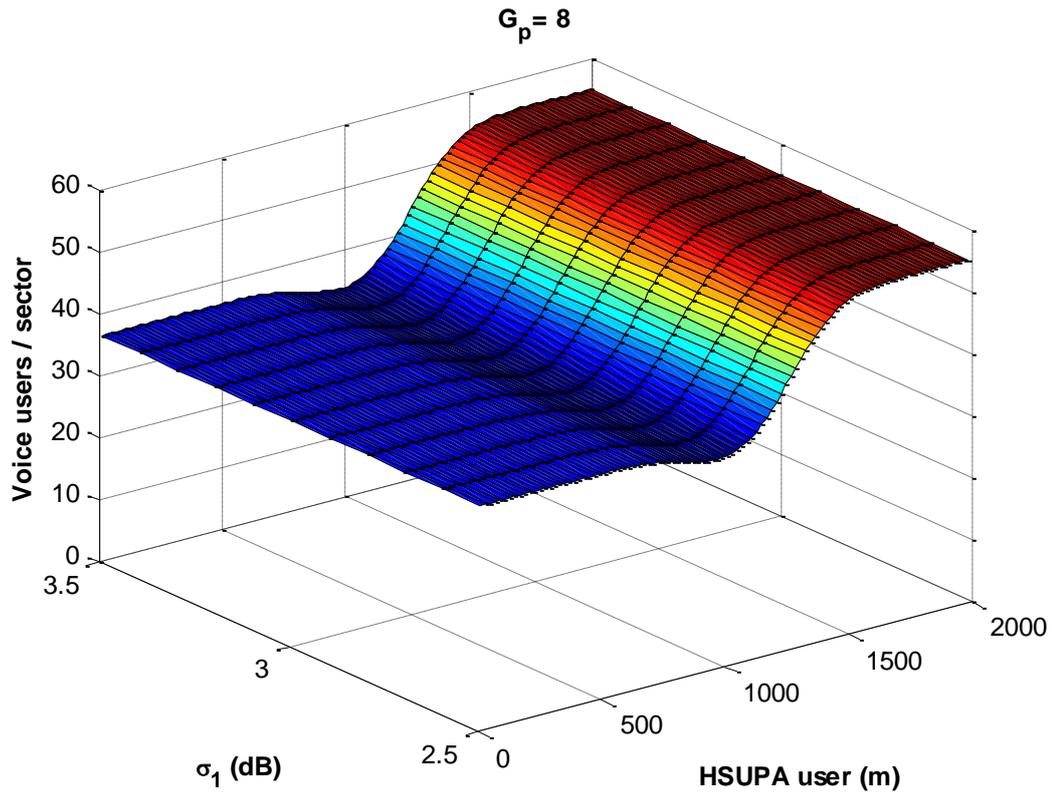


Figura 3.24 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación  $\sigma_1$

A la vista de los resultados obtenidos, las variaciones del parámetro  $\sigma_1$  no han mostrado una influencia significativa sobre la capacidad del sector, obteniéndose valores prácticamente idénticos para cada uno de los valores simulados.

Las Figuras 3.25 y 3.26 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  y de la desviación típica  $\sigma_2$  de la variable aleatoria que modela el efecto shadowing.

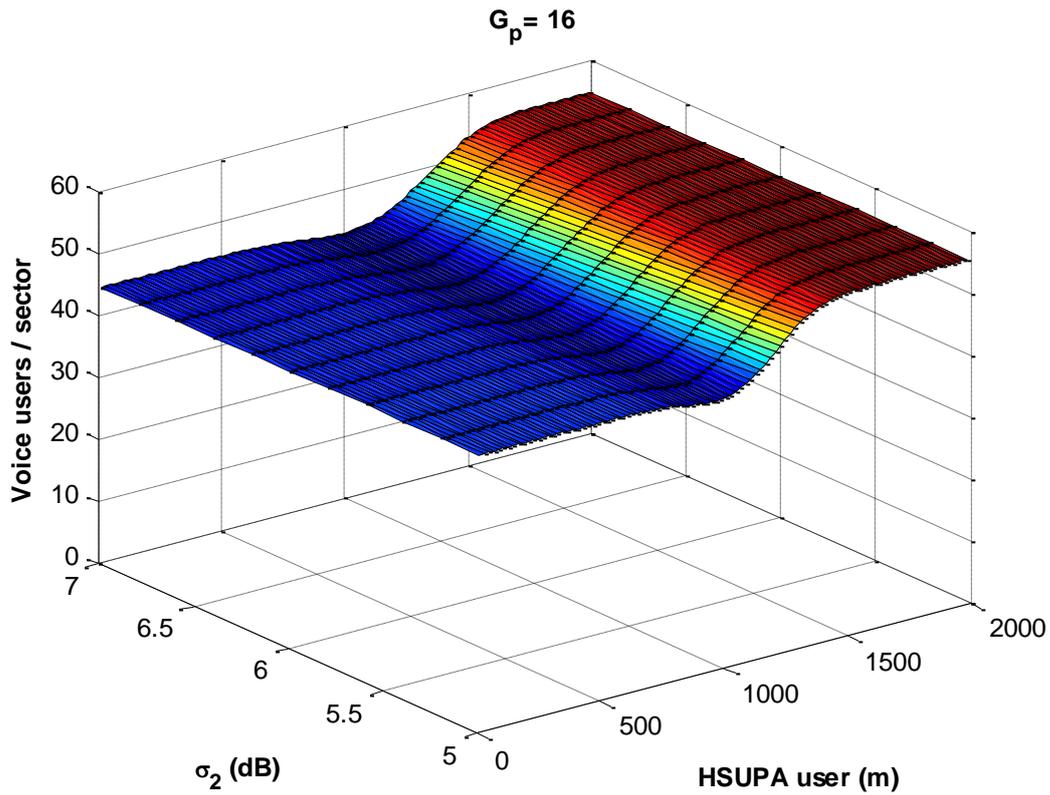


Figura 3.25 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación  $\sigma_2$

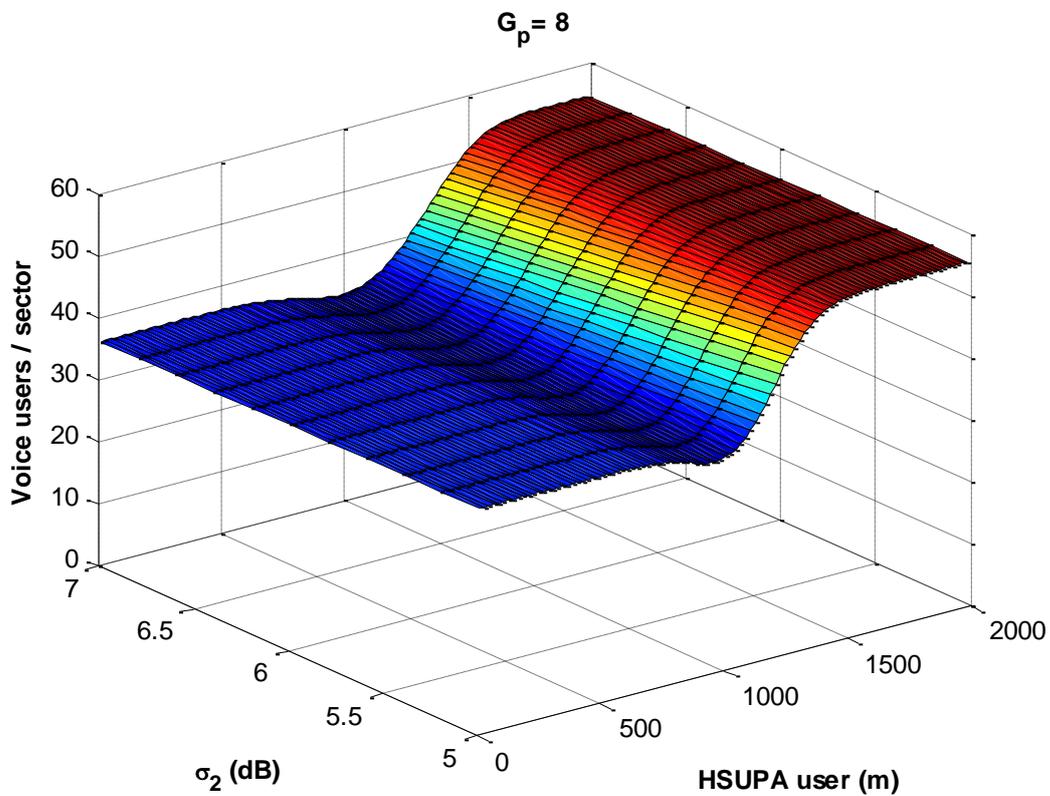


Figura 3.26 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación  $\sigma_2$

Aunque inapreciable a simple vista, se ha obtenido una diferencia en la capacidad del sector de 1 usuario a favor de los valores más bajos de  $\sigma_2$  cuando el usuario interferente se encuentra a una distancia de la estación base superior a  $R_b$ . Para localizaciones más próximas a la estación base bajo estudio no se aprecian diferencias para los distintos valores de  $\sigma_2$ .

Las Figuras 3.27 y 3.28 muestran la capacidad del sector en función de la distancia  $R_b$  escogida. Aquí volvemos a encontrar una situación parecida a la de la figura anterior. Al modificar la distancia, variamos la incidencia de cada uno de los índices de propagación. A medida que aumentamos  $R_b$ , aumentamos las pérdidas de propagación, lo que disminuye la interferencia generada en la base y modifica ligeramente la curva de capacidad. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento 16 y 8.

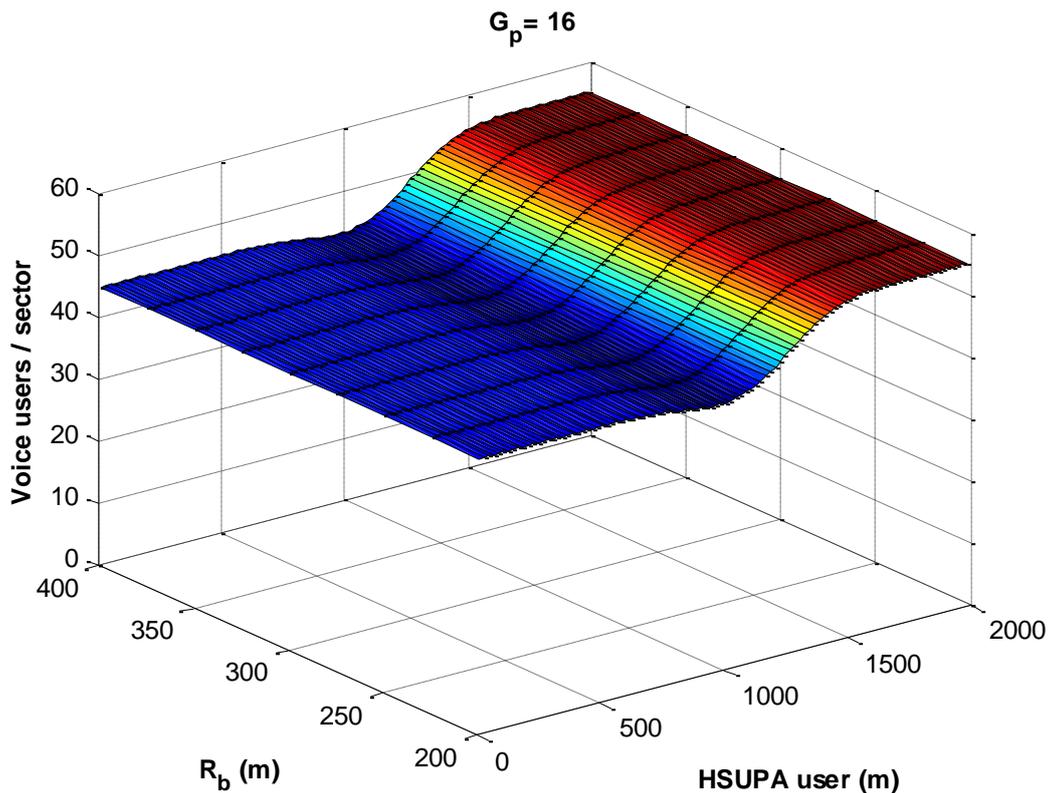


Figura 3.27 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - distancia  $R_b$

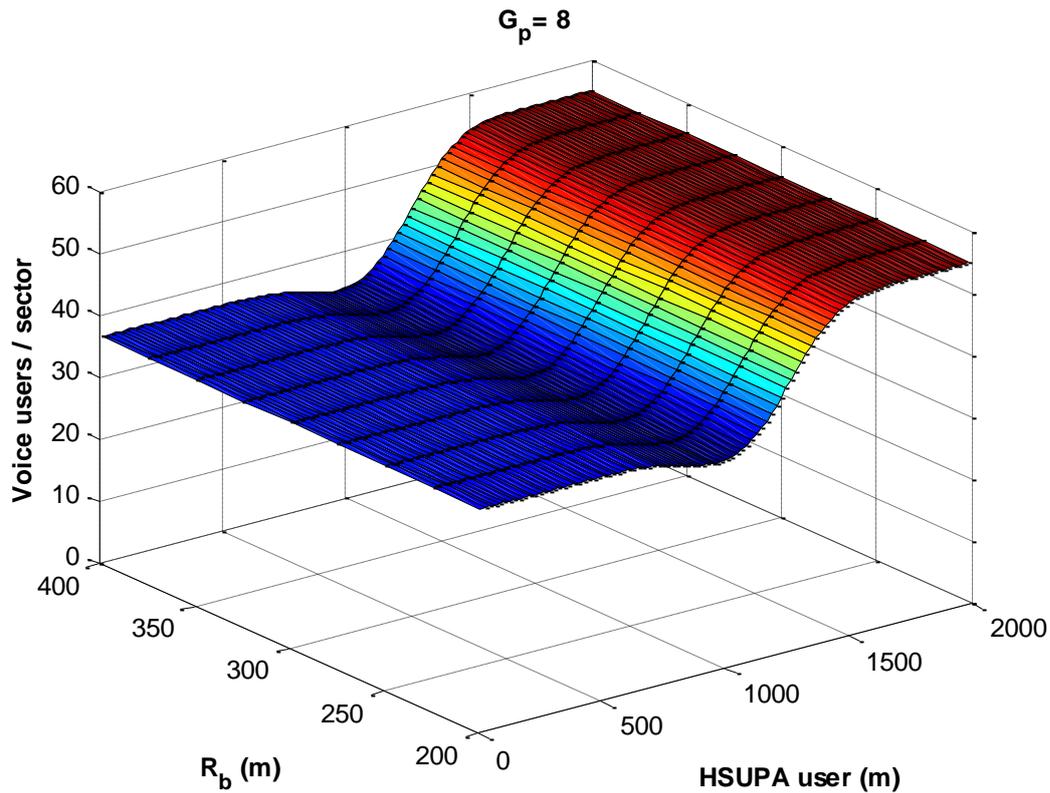


Figura 3.28 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - distancia  $R_b$

Al modificar este parámetro no se aprecian un impacto significativo sobre la capacidad del sector.

Las Figuras 3.29 y 3.30 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  y del coeficiente de correlación inter-sites  $C_{dm}$ . Aunque de forma inapreciable a simple vista, se observa un leve aumento de la capacidad del sector para valores más altos de correlación, que disminuyen la incertidumbre al estimar la estación base a la que está conectado un terminal en función de su localización.

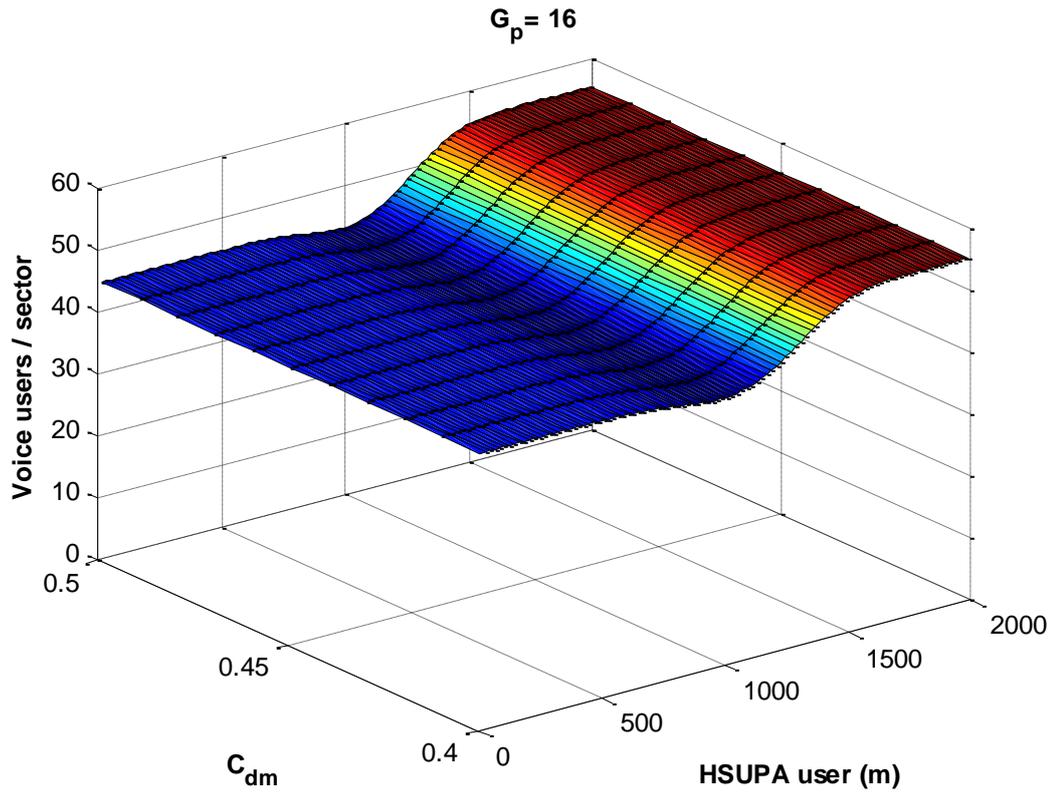


Figura 3.29 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) -  $C_{dm}$

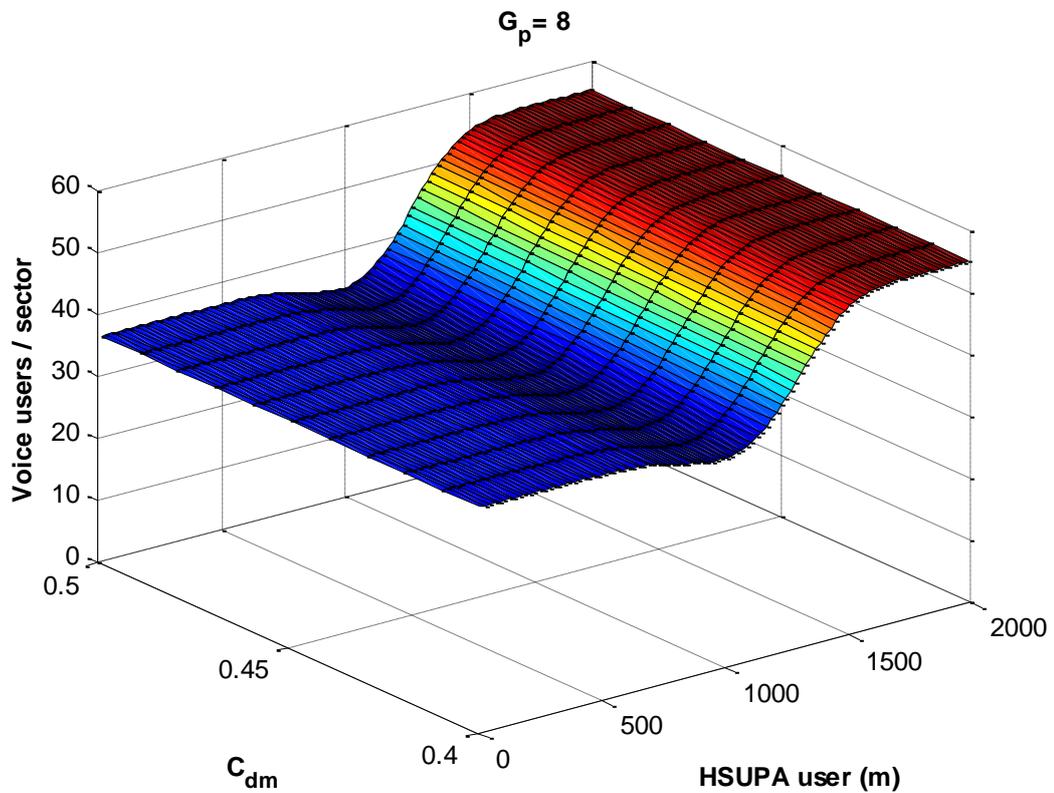


Figura 3.30 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) -  $C_{dm}$

Por último, veamos a continuación la incidencia que tiene sobre la capacidad del servicio el radio del sector. Las Figuras 3.31 y 3.32 muestran el máximo de usuarios de voz soportados con un usuario HSUPA dentro de la parte derecha de la región  $S_0$  para valores de  $R$  comprendidos entre 1000 y 1500m. En todos los casos, los valores de capacidad se muestran con el usuario HSUPA localizado entre  $0$  y  $2R$ .

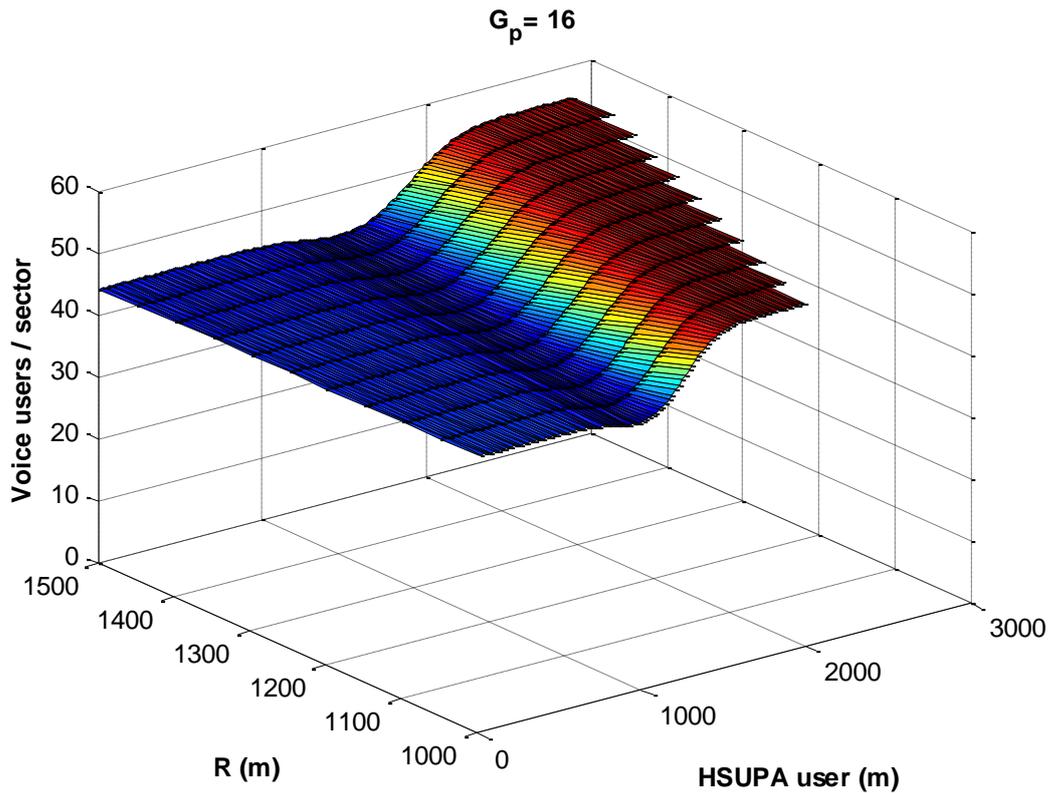


Figura 3.31 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) -  $R$

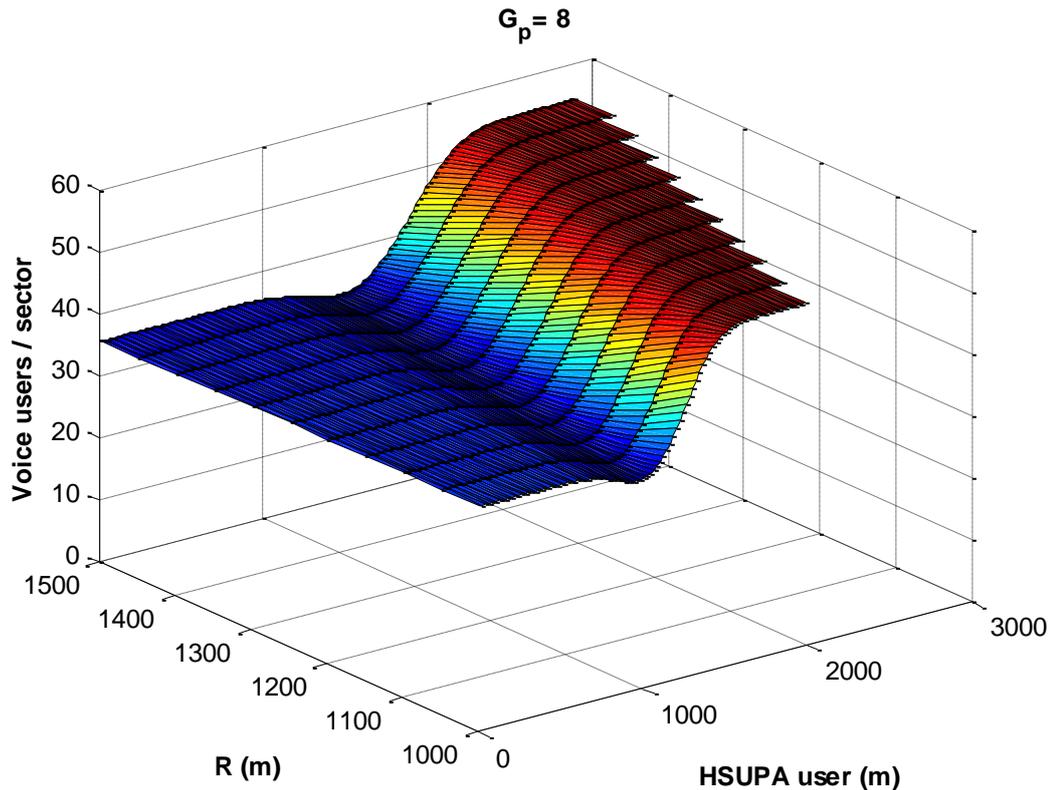


Figura 3.32 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - R

Los valores absolutos de capacidad obtenidos son similares con una diferencia de 1 usuario a favor del radio menor. Si bien la utilización de un radio mas extenso disminuye la interferencia intercelular por el mayor aislamiento entre sectores, lo que debería favorecer la capacidad, la menor potencia recibida en la estación base, como consecuencia de unas pérdidas de propagación mayores, tiene el efecto contrario.

Las diferencias surgen en la forma de la curva. Si para  $R=1000m$  la zona en la que se apreciaba un descenso notable de la capacidad estaba localizada alrededor de los 1000 mt, para  $R=1500m$  esta zona se ve desplazada unos 100m y es ligeramente más extensa...

### 3.3.3 Servicio de datos

Pasemos ahora al servicio de datos y veamos de qué forma se ve afectado por la presencia de usuarios HSUPA. Suponemos nuevamente una distribución uniforme de los usuarios de datos con una densidad de usuarios por unidad de longitud.

La Figura 3.33 muestra la capacidad de un sector para el servicio de datos cuando este es el único servicio utilizado. Comprobamos que para una probabilidad de desbordamiento del 1% la capacidad máxima estimada es de 9 usuarios simultáneos.

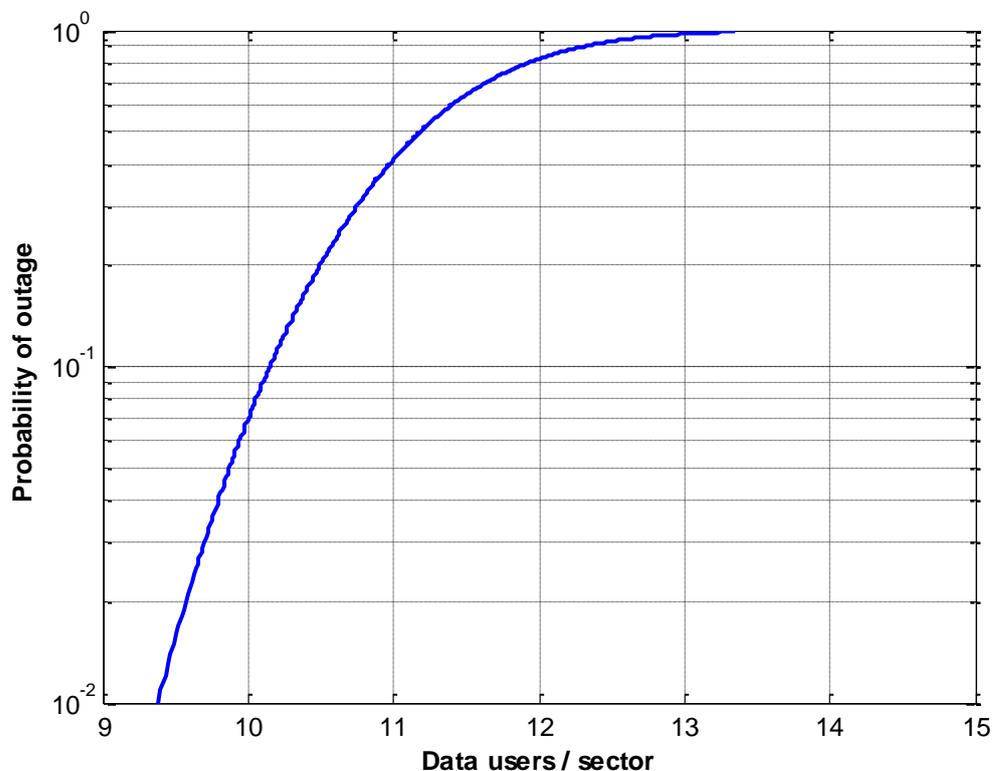


Figura 3.33 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos

Al incluir un usuario del servicio HSUPA comprobaremos como la capacidad se ve reducida significativamente. La Figura 3.34 muestra la capacidad del sector para el servicio de datos con un usuario HSUPA presente a una distancia  $d$  de la estación base de referencia. Se ha realizado la simulación para distintos valores de la ganancia de procesamiento de 16 y 8.

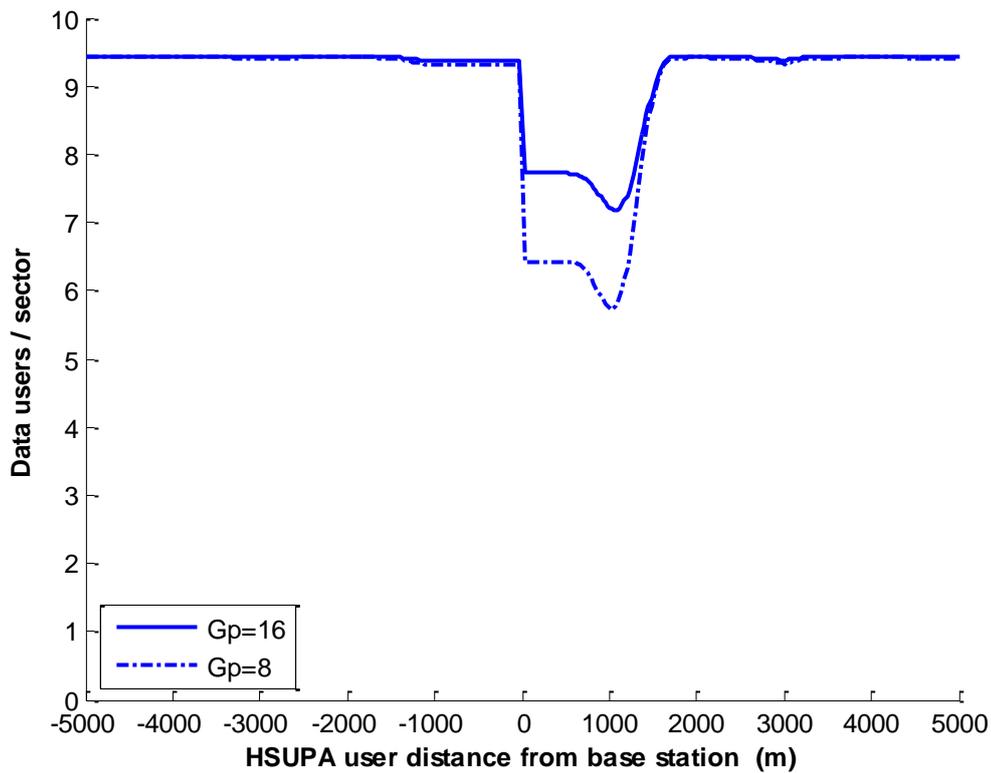


Figura 3.34 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA

Por las mismas razones expuestas anteriormente para el servicio de voz, la interferencia generada por nuestro usuario únicamente afectará significativamente al servicio de datos cuando este se encuentre entre los 0 y 2.000m, por lo que centraremos nuestro estudio en esta región.

La Figura 3.35 muestra con mayor detalle la capacidad del sector para el servicio de datos con un usuario HSUPA presente en la parte derecha de la región S0. Se ha realizado la simulación para valores de la ganancia de procesamiento de 16 y 8.

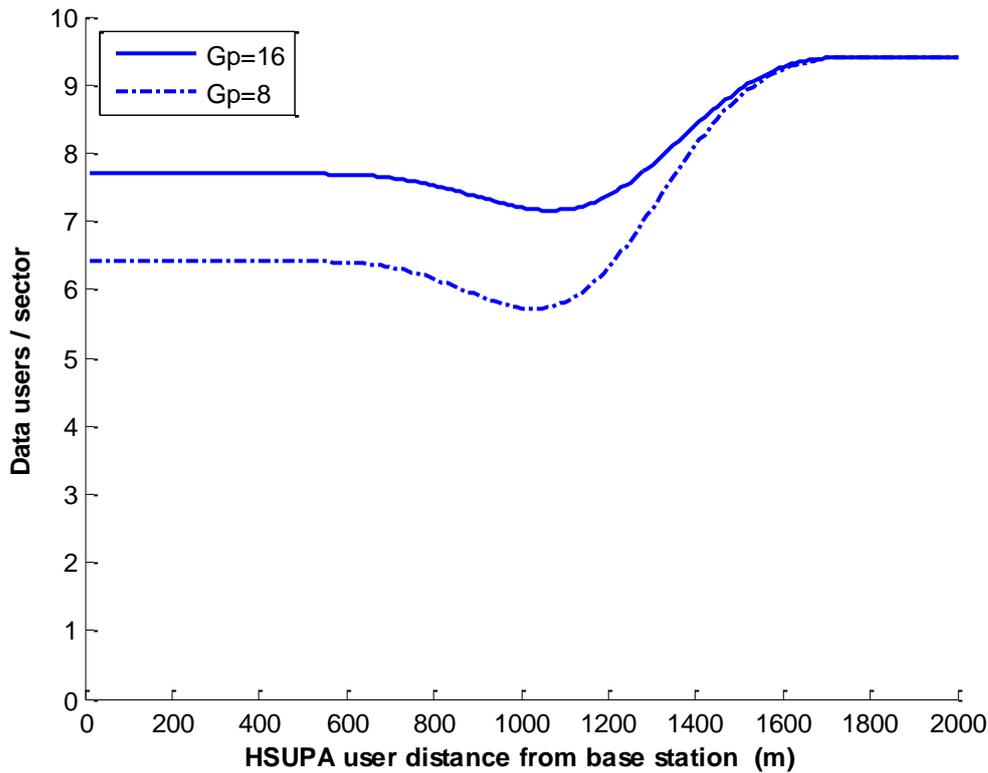


Figura 3.35 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA

Para el servicio de datos se obtienen capacidades de 7 usuarios para  $G_p=16$  y 6 usuarios para  $G_p=8$ , cuando el usuario interferente se encuentra en localizaciones próximas a la estación base de referencia. Aproximadamente a partir de los 700 mt, la capacidad comienza a disminuir significativamente para  $G_p=8$ , alcanzando un valor mínimo de 5 usuarios cuando el usuario HSUPA se encuentra a 1050 mt. Para  $G_p=16$  la capacidad no disminuye en la misma medida, manteniéndose los 7 usuarios incluso en esas circunstancias. A medida que el usuario interferente se aleja de la estación base bajo estudio la capacidad crece hasta llegar, a partir de los 1700mt, a los valores calculados en ausencia de otros servicios que causen interferencia.

A continuación añadiremos un segundo usuario del servicio HSUPA, también moviéndose dentro de la parte derecha de la región S0. Las Figuras 6.36 y 6.37 muestran la capacidad del sector para el servicio de datos en función de la distancia de la estación base a la que se encuentran los dos usuarios HSUPA. Para la ganancia de procesamiento se han utilizado valores de 16 y 8 respectivamente.

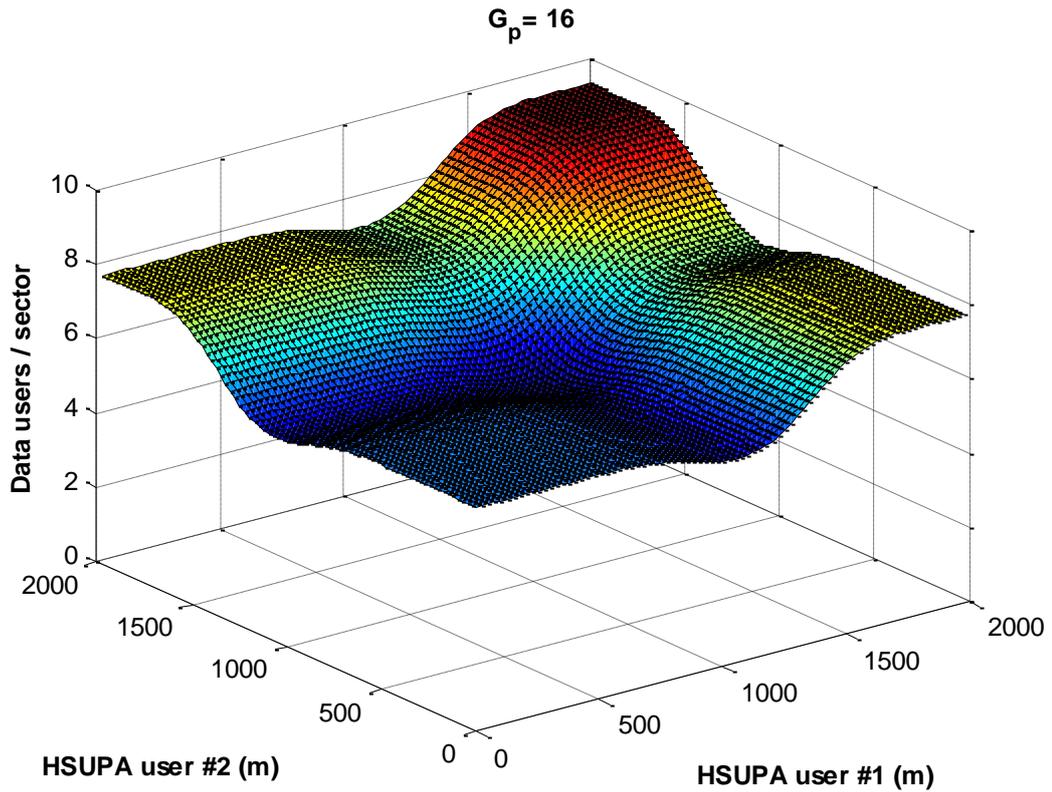


Figura 3.36 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ )

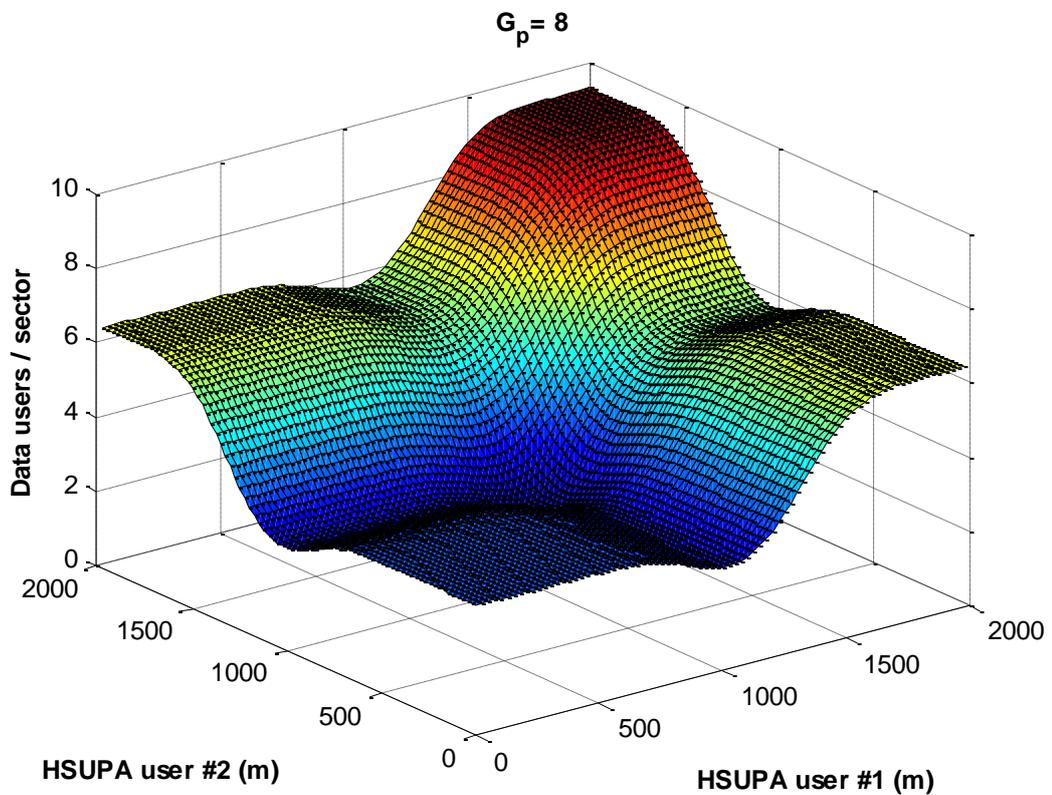


Figura 3.37 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ )

Observamos como estando uno de los usuarios en el borde de la región S0 y siendo la interferencia generada casi nula, la gráfica presenta perfiles de capacidad similares a los mostrados en la Figura 3.35.

Con ambos usuarios situados a más de 1700m, en el borde de la región S0, se obtiene la capacidad máxima de 9 usuarios. Este valor coincide con el que se obtuvo para la capacidad del servicio de datos en ausencia de otros servicios, lo que indica que la interferencia generada por ambos usuarios es casi mínima para la antena de referencia, aunque sí estará siendo importante para el sector contiguo cuya estación base de encuentra muy próxima.

A partir de ahí, la capacidad decrece a medida que ambos usuarios se mueven a distancias intermedias, obteniéndose valores mínimos de 5 y 2 usuarios para cada una de las dos ganancias de procesamiento simuladas, cuando ambos usuarios se encuentran alrededor de los 1000 mt, generando la máxima interferencia sobre la estación base de referencia.

Una vez comprobada la forma en que nuestros usuarios HSUPA afectarán la capacidad del servicio de datos, estudiaremos como el resto de parámetros del modelo de propagación presentado afectan a este valor.

Las Figuras 3.38 y 3.39 muestran la capacidad del servicio de datos en función de la distancia  $d$  que separe nuestro usuario HSUPA de la estación base de referencia y del índice de propagación  $\gamma_1$ . Recordemos que en el modelo de propagación de doble pendiente propuesto, el índice  $\gamma_1$  se aplica hasta una distancia  $R_b$ .

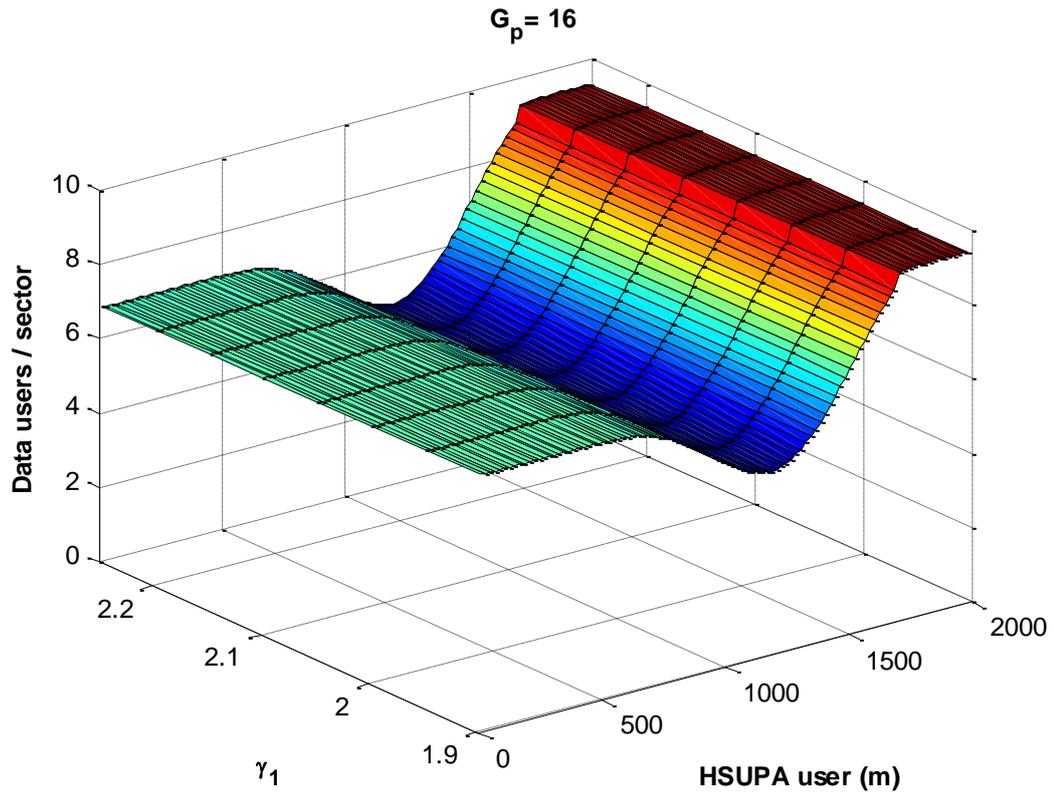


Figura 3.38 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice  $\gamma_1$

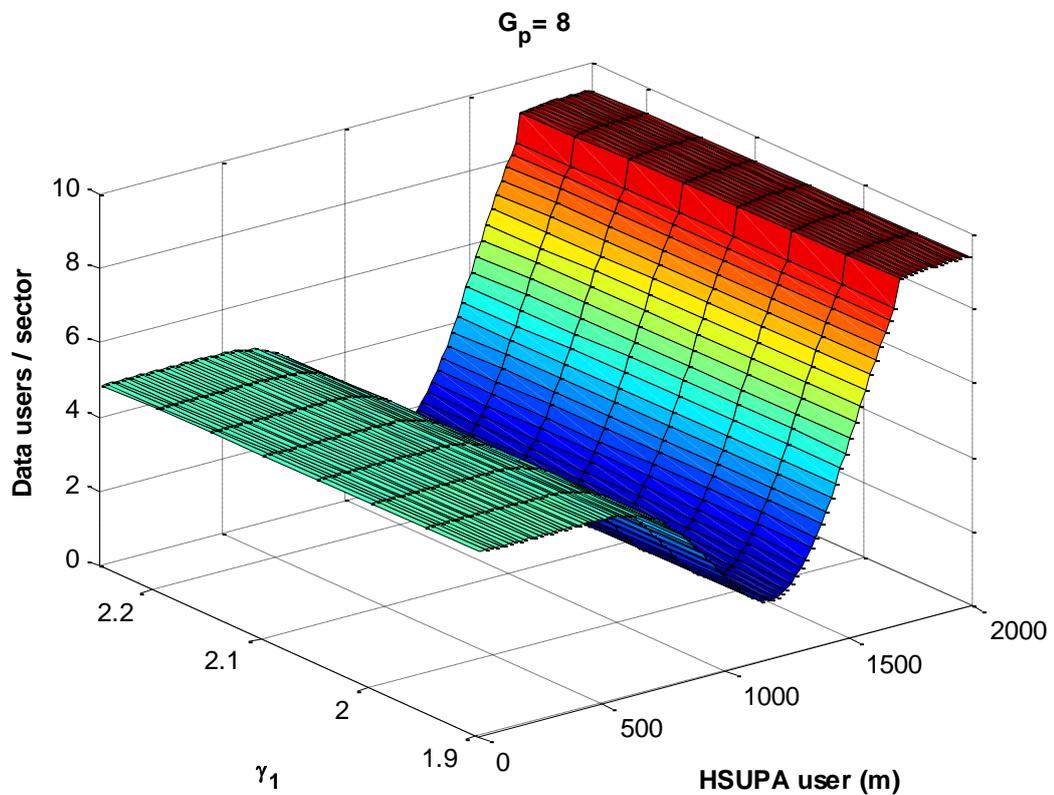


Figura 3.39 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice  $\gamma_1$

Puede apreciarse a simple vista como el índice de propagación  $\gamma_1$  apenas tiene incidencia sobre la capacidad soportada.

Las Figuras 3.40 y 3.41 muestran la capacidad del servicio de datos en función de la distancia  $d$  que separe nuestro usuario HSUPA de la estación base de referencia y del índice de propagación  $\gamma_2$ . Recordemos que en el modelo de propagación de doble pendiente propuesto, el índice  $\gamma_2$  se aplica a partir de una distancia  $R_b$ .

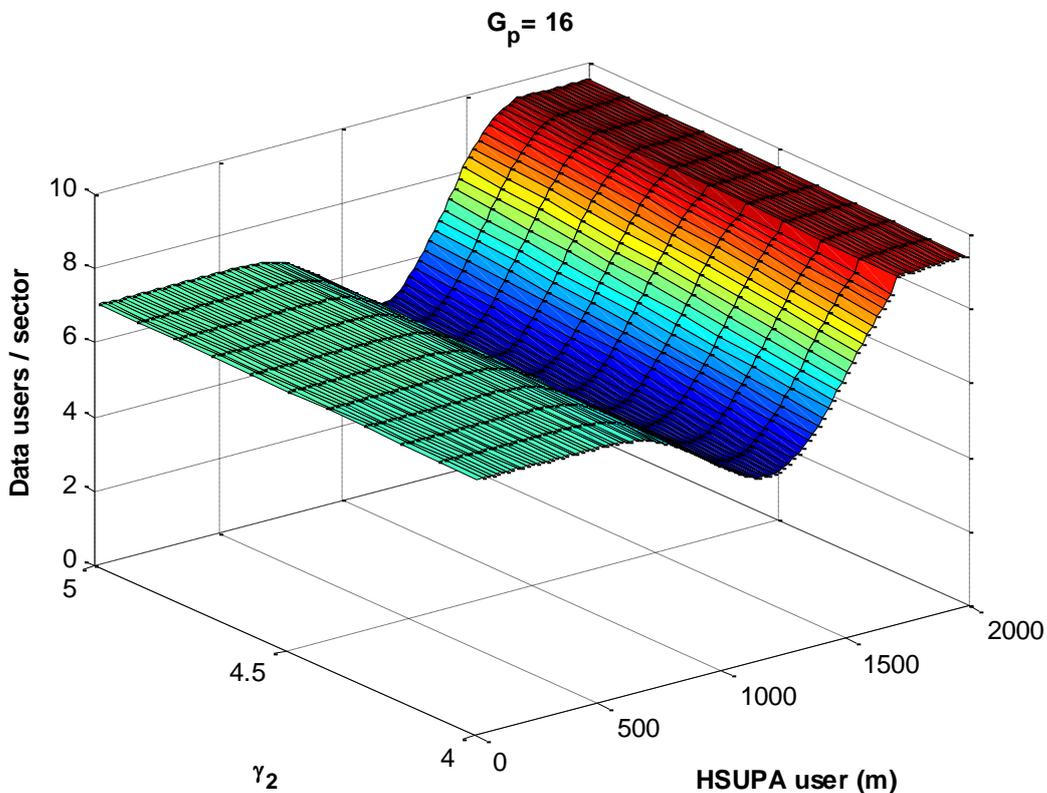


Figura 3.40 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice  $\gamma_2$

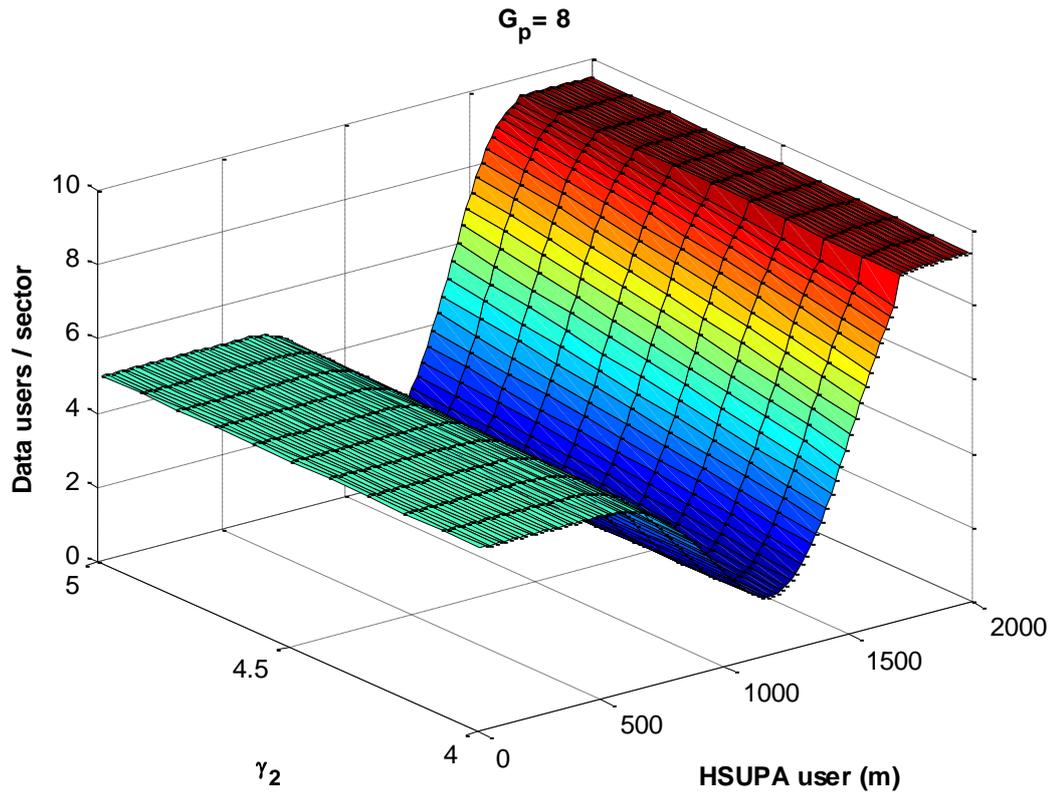


Figura 3.41 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice  $\gamma_2$

Puede apreciarse como el índice de propagación  $\gamma_2$  tampoco presenta una incidencia significativa sobre la capacidad soportada. En este caso, se obtienen capacidades ligeramente superiores para los valores más altos de  $\gamma_2$ , que incrementan el aislamiento disminuyendo la interferencia intercelular.

Sí observamos un ligero cambio en la pendiente de la curva, debido a que los índices mayores atenúan en mayor medida la interferencia generada por el usuario HSUPA y permiten un crecimiento más rápido de la capacidad a medida que el usuario se aleja. Recordemos a que a distancias alejadas de la base, cercanas al borde de la región S0, el peso de  $\gamma_2$  sobre las pérdidas de propagación es mucho mayor que la de  $\gamma_1$ .

Las Figuras 3.42 y 3.43 muestran la capacidad del servicio de datos en función de la distancia  $d$  y de la desviación típica  $\sigma_1$  de la variable aleatoria que modela el efecto shadowing.

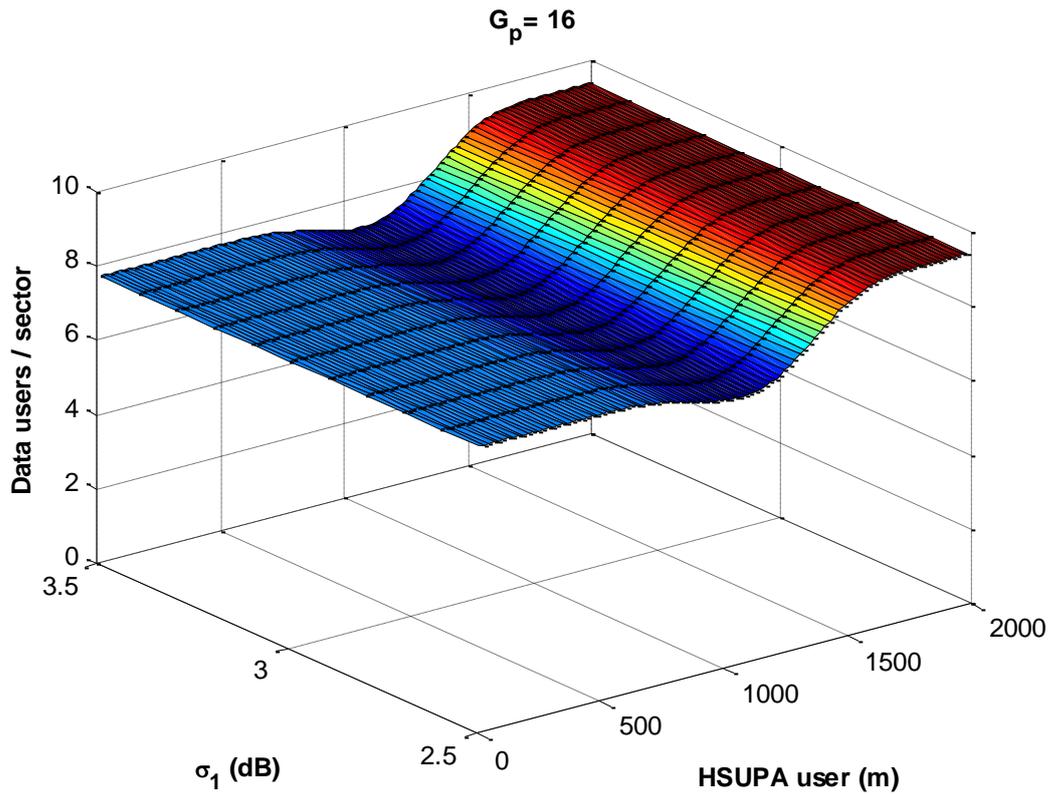


Figura 3.42 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación  $\sigma_1$

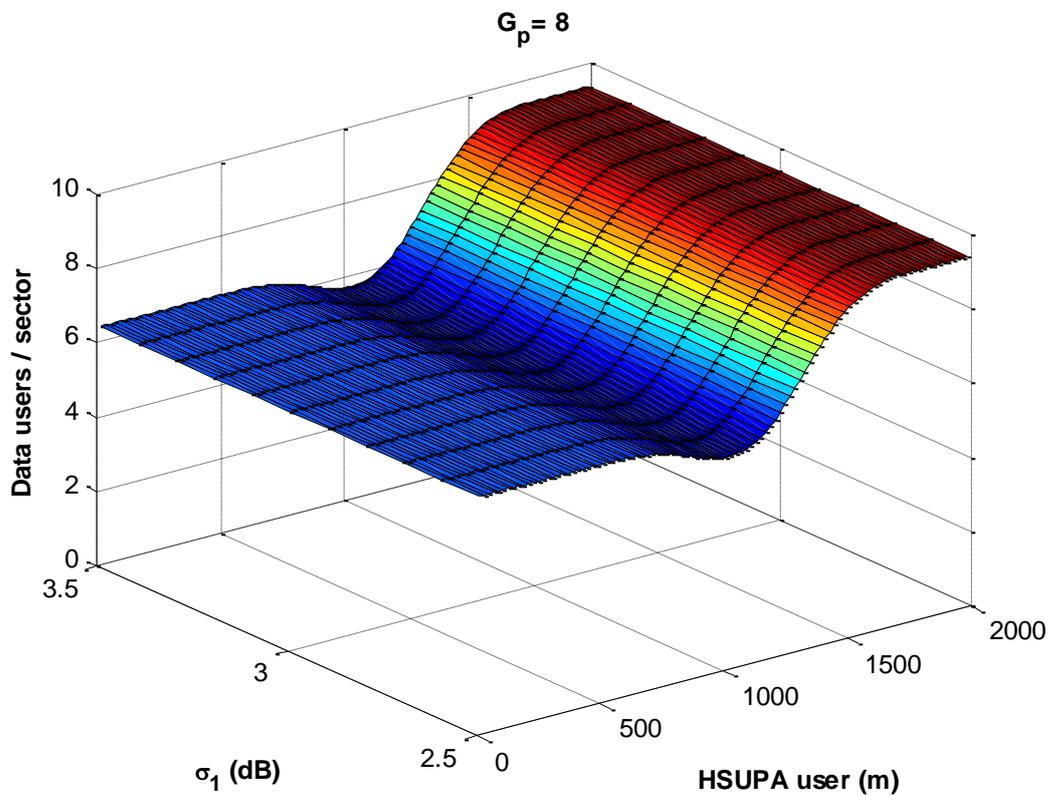


Figura 3.43 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación  $\sigma_1$

A la vista de los resultados obtenidos, las variaciones del parámetro  $\sigma_1$  no han mostrado una influencia significativa sobre la capacidad del sector, obteniéndose valores prácticamente idénticos para cada uno de los valores simulados.

Las Figuras 3.44 y 3.45 muestran la capacidad del servicio de datos en función de la distancia  $d$  y de la desviación típica  $\sigma_2$  de la variable aleatoria que modela el efecto shadowing.

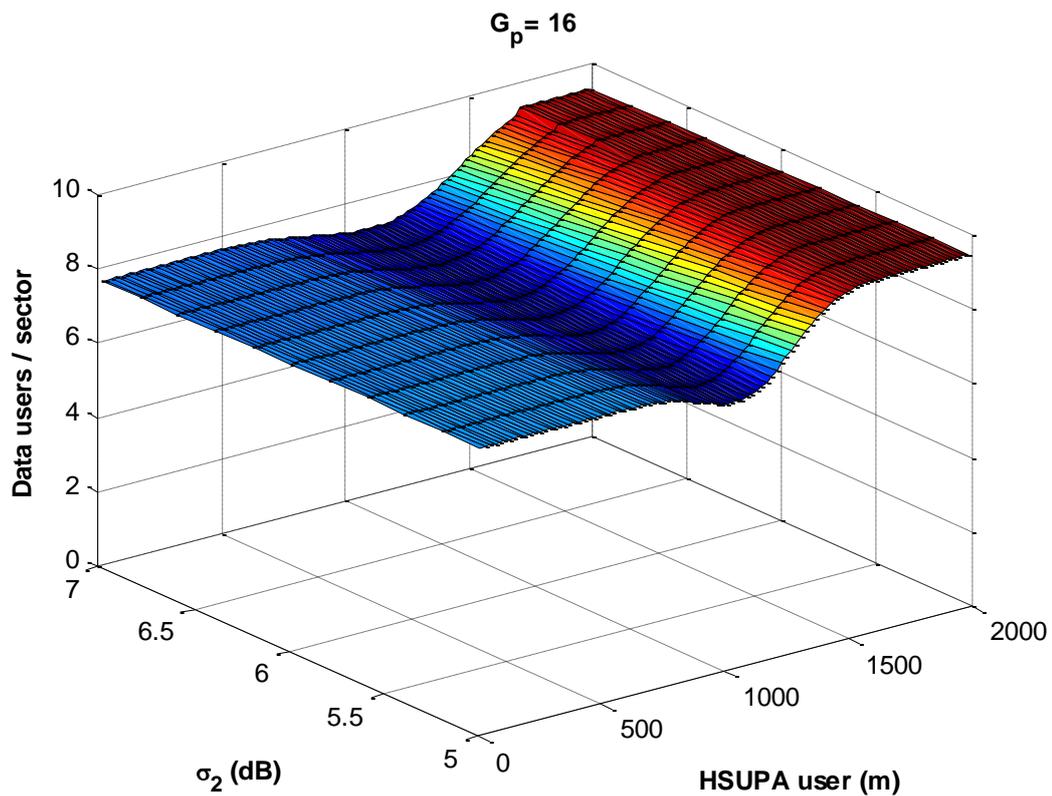


Figura 3.44 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación  $\sigma_2$

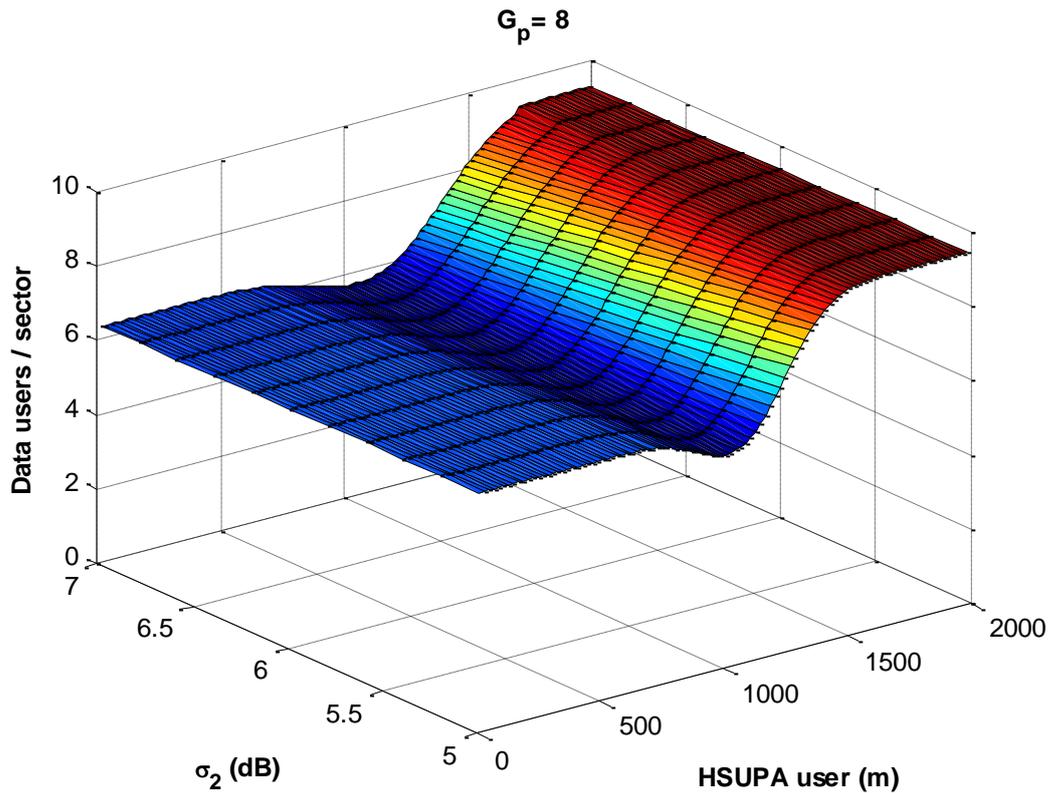


Figura 3.45 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación  $\sigma_2$

A la vista de los resultados obtenidos, las variaciones del parámetro  $\sigma_2$  no han mostrado una influencia significativa sobre la capacidad del sector, obteniéndose valores prácticamente idénticos para cada uno de los valores simulados

Las Figuras 3.46 y 3.47 muestran la capacidad del sector en función de la distancia  $R_b$  escogida. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento 16 y 8.

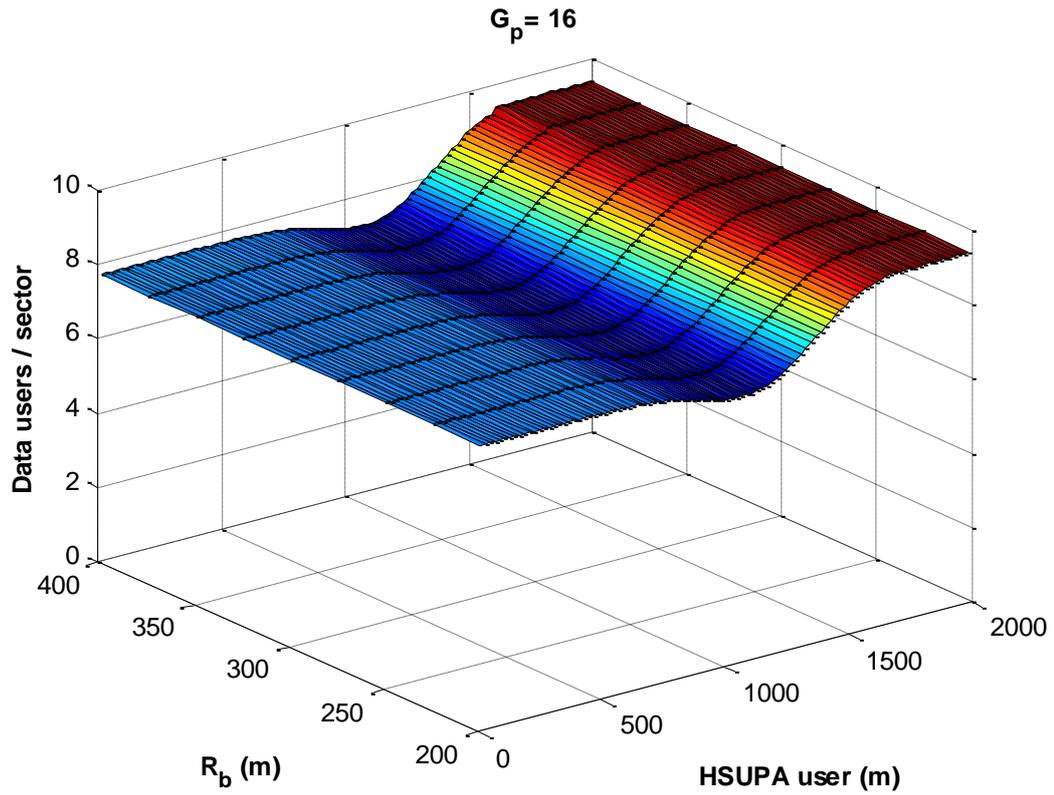


Figura 3.46 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - distancia  $R_b$

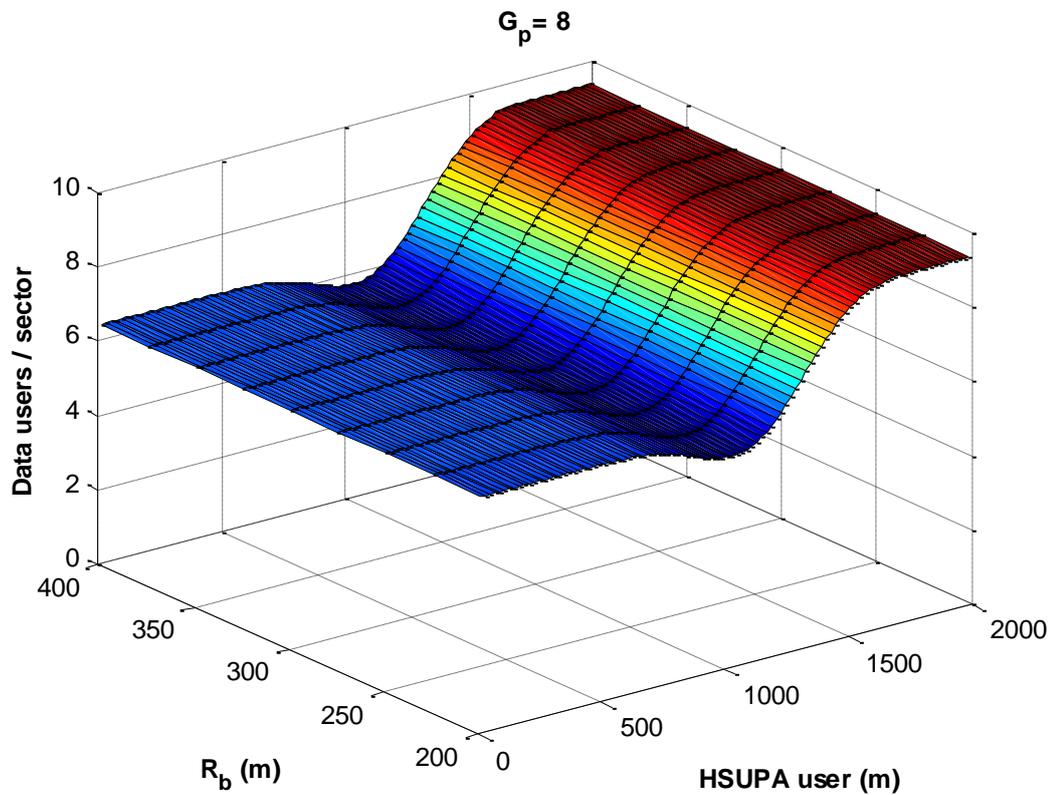


Figura 3.47 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - distancia  $R_b$

Al modificar este parámetro no se aprecia un impacto significativo sobre la capacidad del sector. A medida que aumenta  $R_b$ , aumentan las pérdidas de propagación, lo que disminuye la interferencia generada en la base y modifica ligeramente la curva de capacidad.

Las Figuras 3.48 y 3.49 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  y del coeficiente de correlación inter-sites  $C_{dm}$ . Aunque de forma inapreciable a simple vista, se observa un leve aumento de la capacidad del sector para valores más altos de correlación, que disminuyen la incertidumbre al estimar la estación base a la que está conectado un terminal en función de su localización.

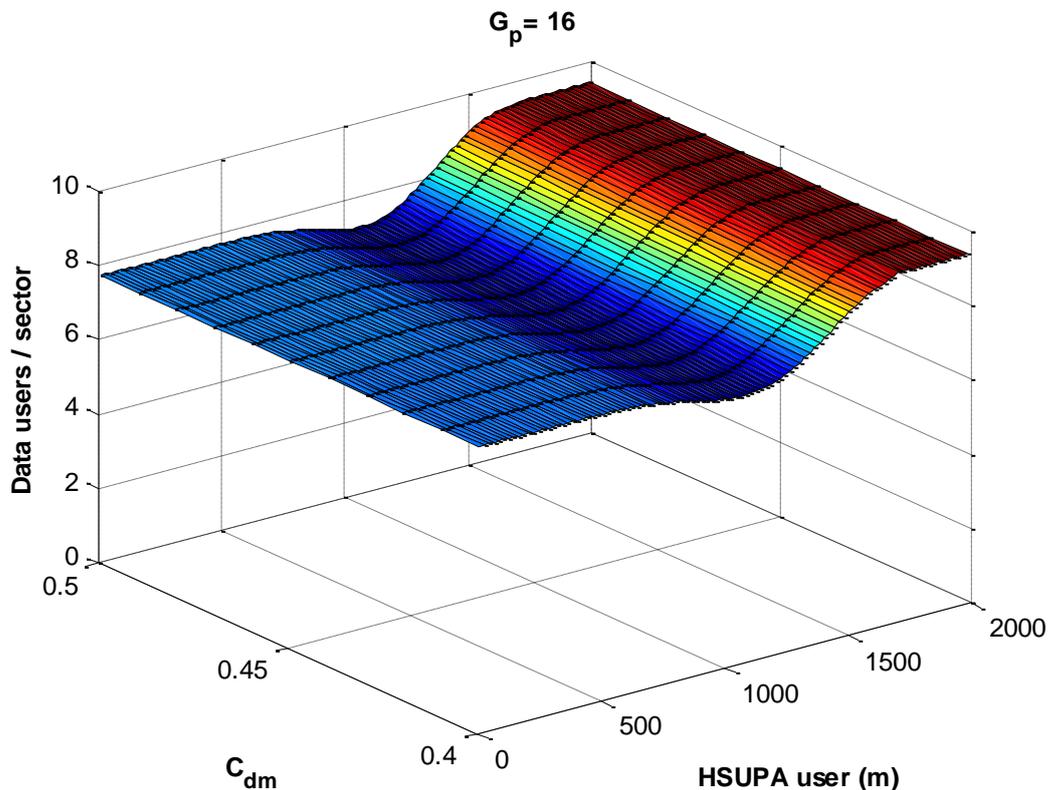


Figura 3.48 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) -  $C_{dm}$ .

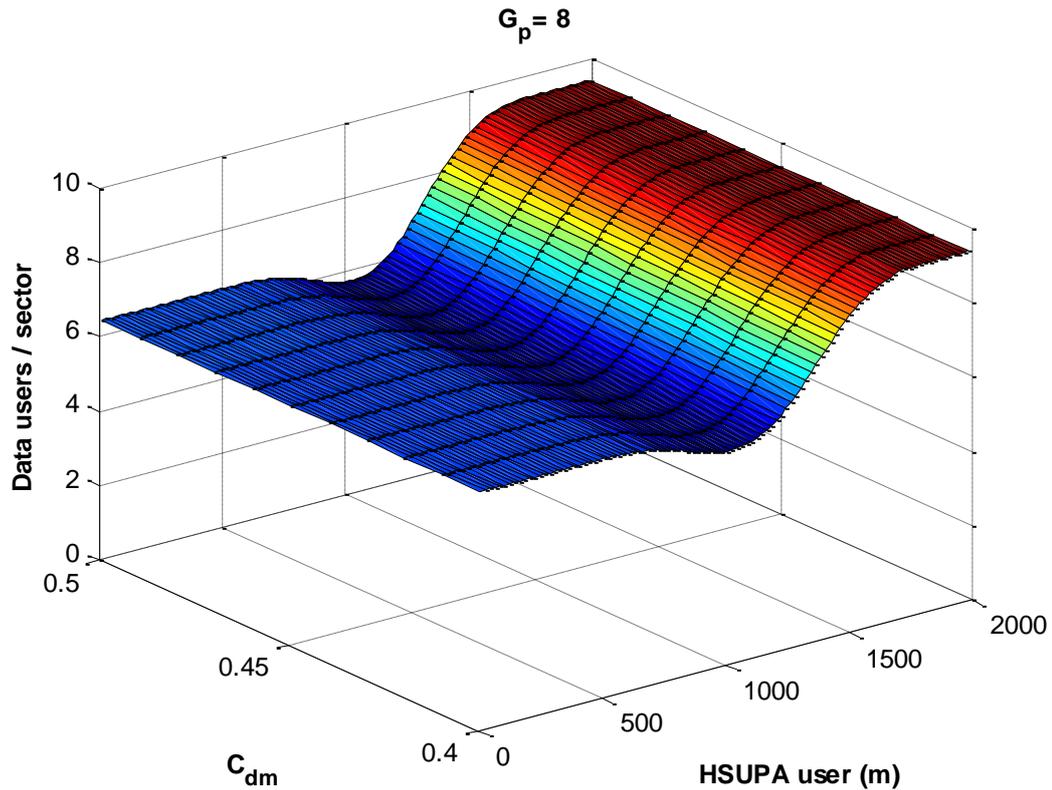


Figura 3.49 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) -  $C_{dm}$ .

Por último, veamos a continuación la incidencia que tiene sobre la capacidad del servicio el radio del sector. Las Figuras 3.50 y 3.51 muestran el máximo de usuarios de datos soportados con un usuario HSUPA dentro de la parte derecha de la región  $S_0$  para valores de  $R$  comprendidos entre 1000 y 1500m. En todos los casos, los valores de capacidad se muestran con el usuario HSUPA moviéndose entre  $0$  y  $2R$ .

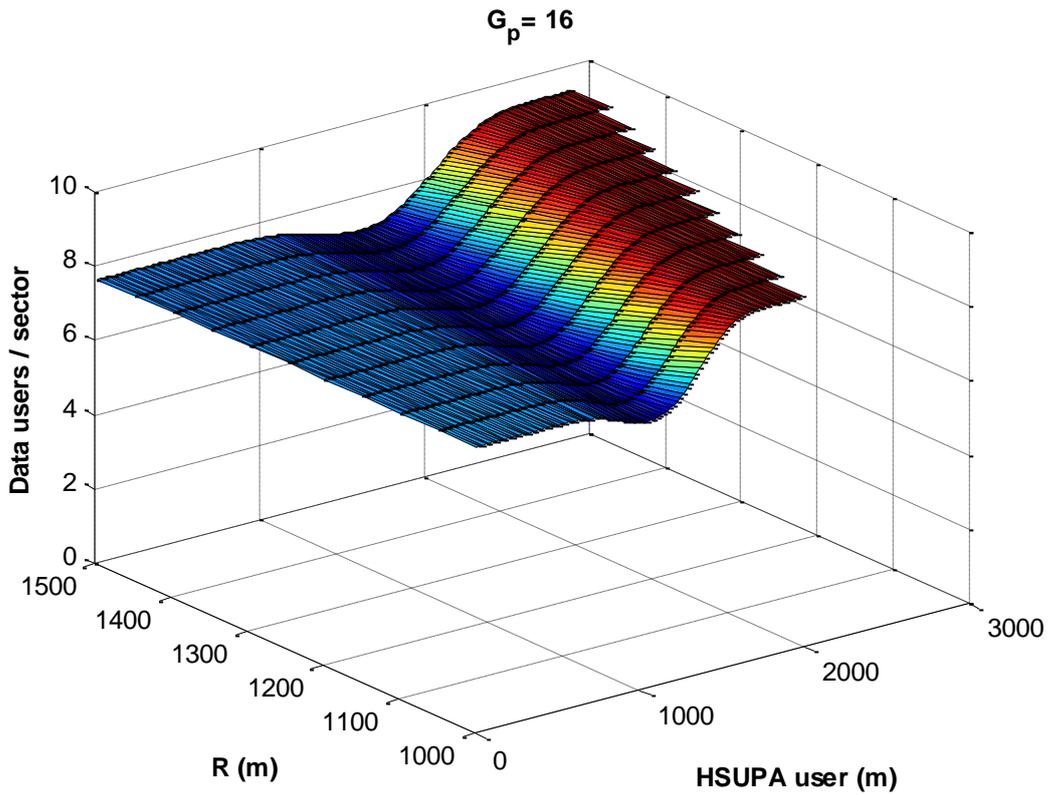


Figura 3.50 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - R

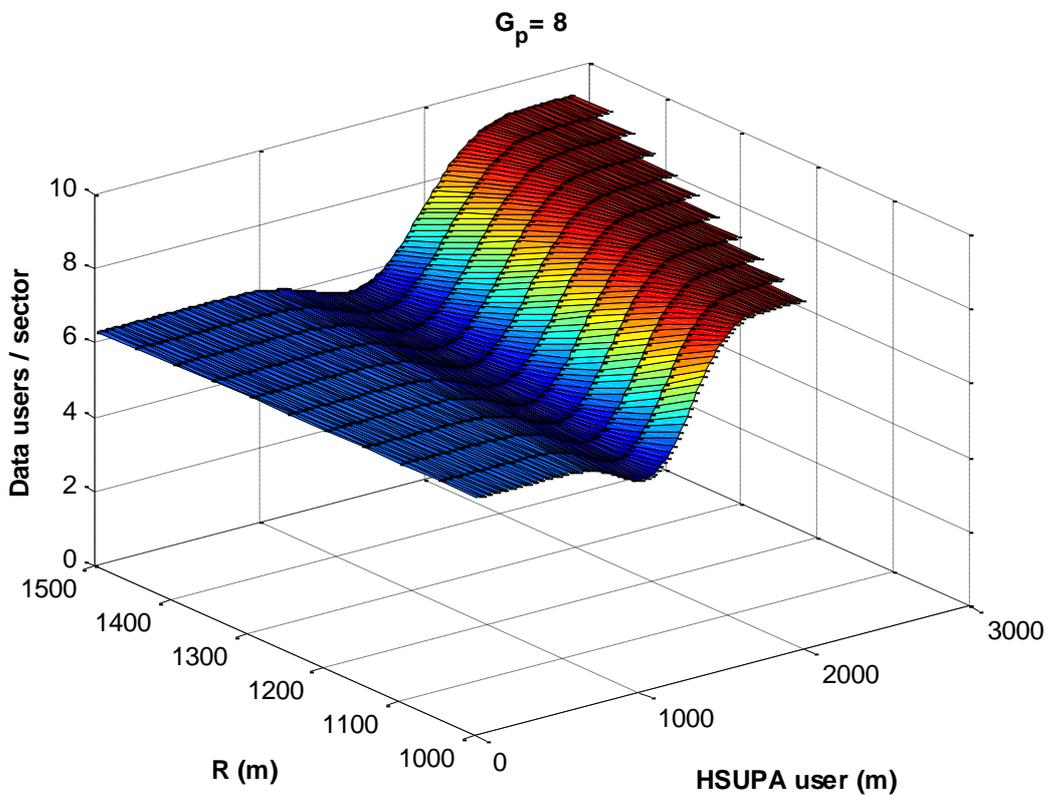


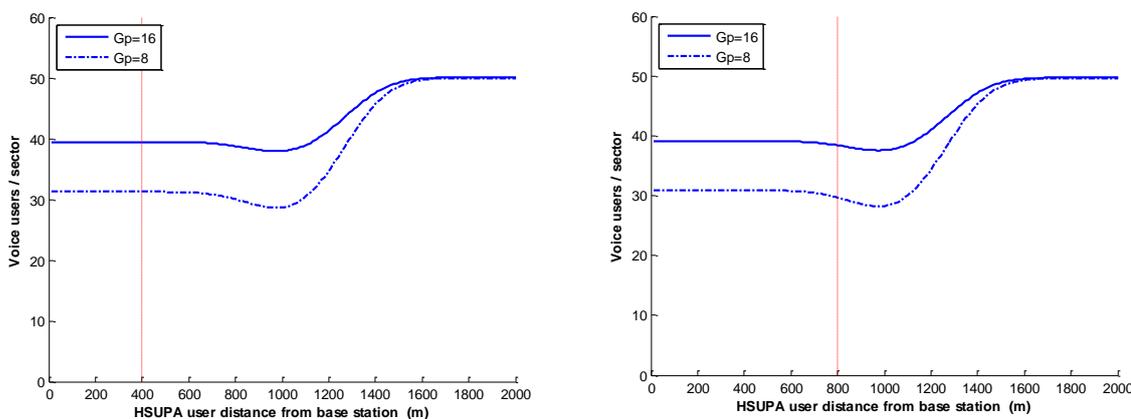
Figura 3.51 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - R

Los valores absolutos de capacidad obtenidos han sido prácticamente idénticos. Las diferencias surgen en la forma de la curva. Si para  $R=1000m$  la zona en la que se apreciaba un descenso notable de la capacidad estaba localizada alrededor de los 1000 mt de la estación base, para  $R=1500m$  esta zona se ve desplazada unos 100m y es ligeramente más extensa..

### 3.3.3 Voz, datos y HSUPA.

En los apartados anteriores se ha estudiado de qué forma el servicio HSUPA afecta a los servicios de voz y datos. A continuación estudiaremos un caso más aproximado a lo que encontraremos en la realidad que mezcla usuarios de voz, datos y datos de alta velocidad.

Para comenzar, nuestro sector tendrá 1 usuario HSUPA, 1 usuarios de datos R99 en 4 localizaciones distintas (identificadas mediante las líneas verticales rojas) y un número indeterminado de usuarios del servicio de voz cuya capacidad se desea calcular. Las gráficas de la Figura 3.52 presentan los resultados obtenidos para la capacidad del servicio de voz.



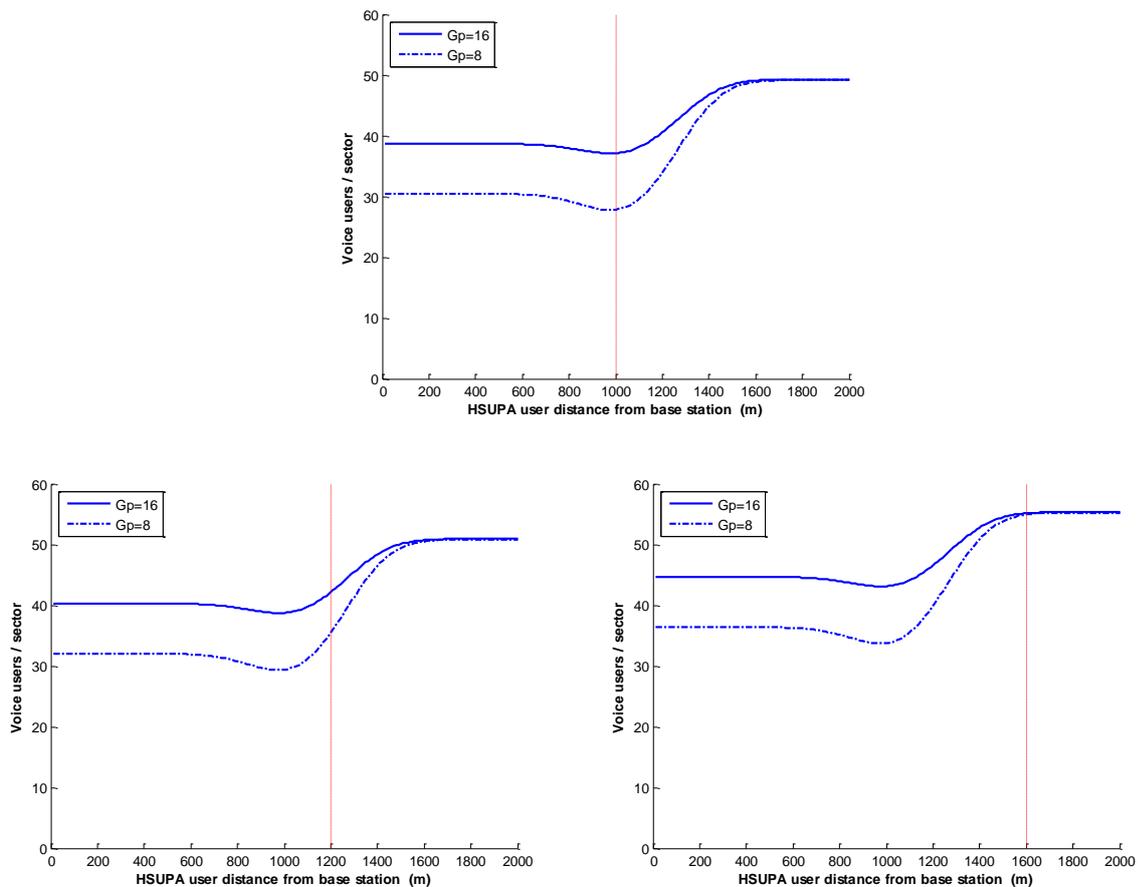


Figura 3.52 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 1 usuario datos R99

Los gráficos presentan una forma parecida a la Figura 3.16, donde no se tenía en cuenta la presencia del usuario de datos R99. Cuando este usuario se encuentra cercano a la estación base bajo estudio, a 400 mt, los resultados obtenidos han sido de 39 usuarios de voz para  $G_p=16$  y 31 usuarios para  $G_p=8$ , estando el usuario del servicio HSUPA a una distancia de menos de 600 mt de la antena receptora. A partir de ese punto la capacidad disminuye, obteniéndose los valores mínimos de 37 usuarios para  $G_p=16$  y 28 usuarios para  $G_p=8$  cuando el usuario HSUPA se encuentra a 980 mt, casi en el borde del sector. Cuando el usuario del servicio de datos de alta velocidad se aleja, los valores de capacidad crecen hasta alcanzar un máximo de 49 usuarios. Las capacidades descritas suponen una reducción de 5-6 usuarios con respecto a las calculadas en ausencia del usuario de datos R99.

El caso peor es aquel en el que el usuario de datos R99 se encuentra distanciado 800 mt de la estación base con valores ligeramente inferiores a los descritos anteriormente.

En la tercera figura, el usuario se encuentra a 1.200 mt y las capacidades obtenidas son ya significativamente mayores. Con este usuario situado a 1.600 mt, la interferencia generada por el sobre la antena receptora es mínima en comparación con la generada por otros usuarios, y los valores obtenidos calcan los calculados previamente en ausencia de este usuario.

A continuación, añadiremos dentro de la región S0 un usuario adicional del servicio de datos R99. Las gráficas de la Figura 3.53 presentan los resultados obtenidos para la capacidad del servicio de voz.

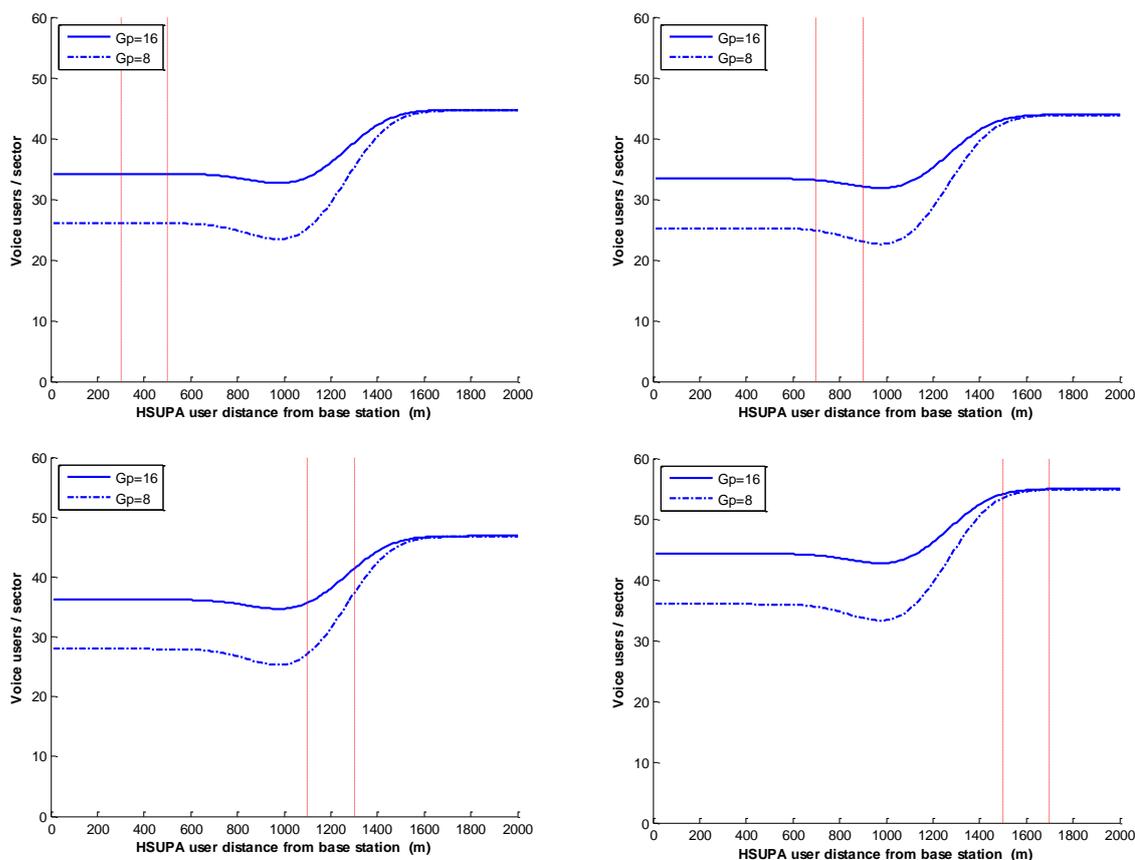


Figura 3.53 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 2 usuarios datos R99

Cuando los usuarios del servicio de datos tradicional se encuentran próximos a la estación base bajo estudio, alrededor de los 400 mt, la capacidad para el servicio de voz se ve reducida entorno a 10 usuarios con respecto a los resultados presentados en la Figura 3.16.

Al igual que sucedía anteriormente, los peores resultados se obtienen cuando los usuarios de datos R99 están alejados alrededor de 800 mt de la antena receptora.

En la tercera gráfica, los usuarios se encuentran alrededor de 1.200 mt y las capacidades obtenidas son ya significativamente mayores. Con estos usuarios situados alrededor de 1.600 mt, la interferencia generada por el sobre la antena receptora es mínima en comparación con la generada por otros usuarios, y los resultados obtenidos son inferiores en 1 usuario a los calculados previamente sin usuarios de datos R99 interfiriendo.

A continuación, añadiremos dentro de la región S0 un tercer usuario del servicio de datos R99. Las gráficas de la Figura 3.54 presentan los resultados obtenidos para la capacidad del servicio de voz.

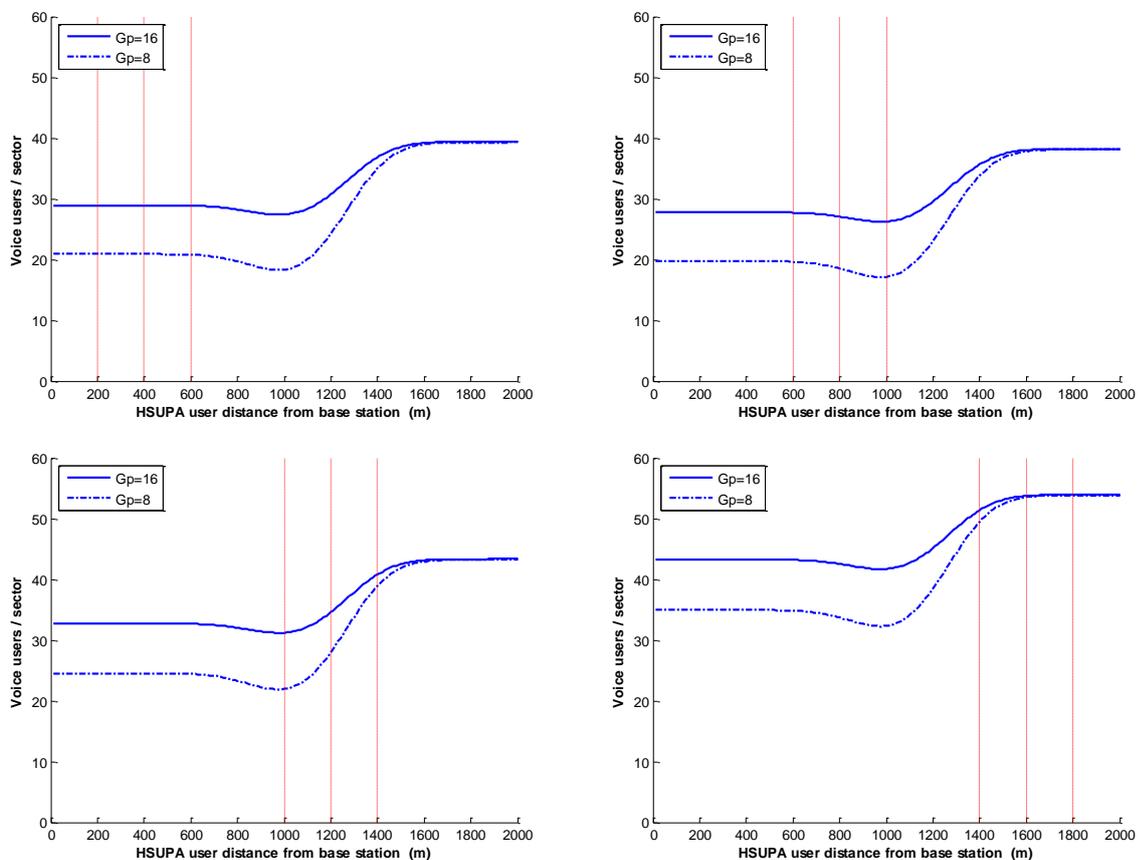


Figura 3.54 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 3 usuarios datos R99

Cuando los 3 usuarios del servicio de datos tradicional se encuentran próximos a la antena receptora, la interferencia que generan supone una reducción en la capacidad del servicio de voz de aproximadamente 16 usuarios con respecto a los resultados obtenidos en ausencia de estos.

A distancias más alejadas la reducción de la capacidad es menor, siendo esta de aproximadamente 2 usuarios cuando los usuarios de datos se encuentra alrededor de los 1.600 mt de la estación base bajo estudio.

Por último, se ha realizado la misma simulación con 4 usuarios del servicio de datos R99 dentro de la región S0. Las gráficas de la Figura 3.55 presentan los resultados obtenidos para la capacidad del servicio de voz.

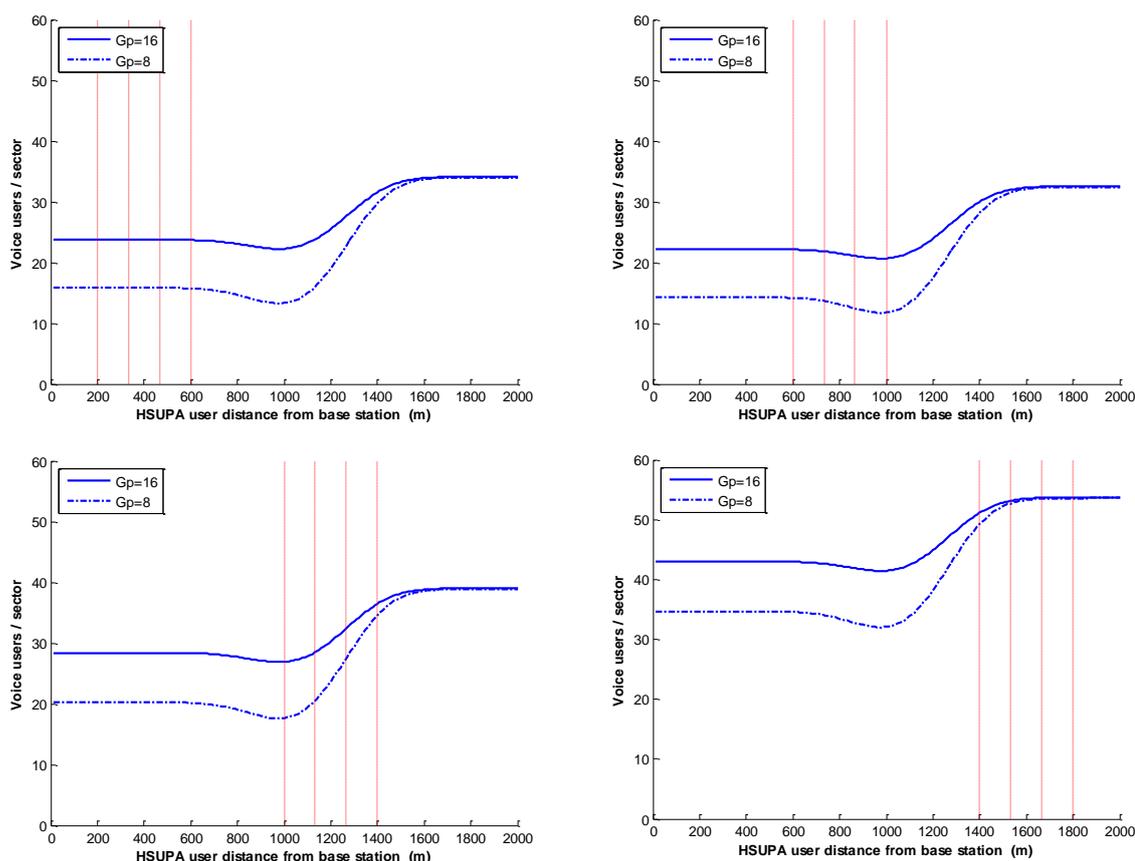


Figura 3.55 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 4 usuarios datos R99

Como cabía esperar, la inclusión del cuarto usuario del servicio de datos R99 supone una disminución adicional en la capacidad para el servicio de voz.

Los peores resultados se obtienen cuando los 4 usuarios se encuentran localizados alrededor de 800 mt de la antena receptora, obteniéndose una disminución en la capacidad de unos 22 usuarios con respecto a los calculados en la Figura 3.16, independientemente de la localización del usuario HSUPA.

Cuando los usuarios se encuentran situados alrededor de unos 1.600 mt de la estación base bajo estudio, los resultados obtenidos apenas se diferencian de los calculados en ausencia del servicio de datos R99, siendo la capacidad inferior en 2 usuarios.

## 4. Estudio de HSUPA en microceldas – Túneles

Los túneles son obras subterráneas, normalmente artificiales, creadas para comunicar dos puntos para distintos fines: canalización de cableado, transporte de agua, o, como en el caso que presentamos, permitir la circulación de vehículos.

Debido a su construcción, las ondas de radio de los sistemas de comunicaciones móviles habituales no pueden atravesar su estructura y para garantizar la cobertura en ellos se requieren despliegues en el interior.



Figura 4.1 – Túnel de la circunvalación M-30 - Madrid

En estos escenarios, al igual que sucede en calles o autopistas, encontraremos una estructura *cigar-shaped*, en la que cada una de las células presenta una forma alargada que recuerda a la de un cigarro, tal y como puede verse en la Figura 4.2.

Como ya se vio en capítulos anteriores, estas células están divididas en 2 sectores a los que se ofrece cobertura desde un único emplazamiento con 2 antenas directivas.

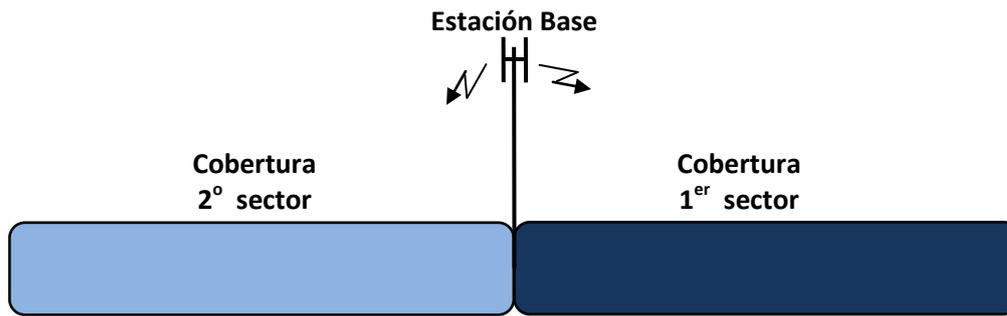


Figura 4.2 - Célula cigar-shaped

El radio de cobertura de cada uno de los sectores estará comprendido entre 1 – 1,5km, dependiendo del número de terminales a los que deba ofrecerse servicio.

Los usuarios que utilizaran este servicio viajarán en el interior de vehículos y se estarán moviendo a velocidades generalmente elevadas que podrán llegar a los 120 km/h.



Figura 4.3- Patrón de radiación azimuth

El presente capítulo está basado en [5], donde se analiza para este tipo de escenarios la capacidad del uplink de UMTS sin tener en cuenta el efecto de los usuarios del servicio HSUPA. Se presentará el modelo de propagación que mejor aproxima las condiciones de este escenario y se realizará un estudio matemático de la capacidad del uplink mezclando distintos tipos de servicio. Por último, a partir de estos modelos, se mostrarán los resultados obtenidos para diversas simulaciones en las que se estudia la capacidad de los servicios tradicionales de voz y datos y el impacto que supone sobre estos la prestación de un servicio de datos de alta velocidad como HSUPA.

## 4.1 Modelo de propagación

Para calcular las pérdidas de propagación sufridas en un escenario como este se utilizará un modelo híbrido, añadiendo un efecto shadowing con distribución log-normal y pérdidas debidas a la curvatura del túnel.

La propagación se aproximará con un modelo de casi espacio libre con exponente de propagación  $\gamma$  hasta una distancia  $R_b$  y un modelo de guía de onda con una atenuación específica de  $n$  dB/m a partir de dicha distancia.

La distancia  $R_b$  deberá definirse con un valor aproximado de:

$$R_b \approx \min\left(\frac{a^2}{\lambda}, \frac{b^2}{\lambda}\right) \quad (4.1)$$

Siendo

- $\lambda$  la longitud de onda
- $a$  la anchura del túnel
- $b$  la altura del túnel

De esta forma, las pérdidas de propagación en el uplink de un usuario situado a una distancia  $r$  de la estación base seguirán la siguiente expresión:

$$L_p(dB) \approx L_o + 10\log_{10}r^\gamma + L_1 + \xi_1 \quad \text{para } r \leq R_b \quad (4.2)$$

$$L_p(dB) \approx L_o + 10\log_{10}R_b^\gamma + n(r - R_b) + L_2 + \xi_2 \quad \text{para } r > R_b \quad (4.3)$$

Siendo:

- $L_o$  la atenuación sufrida a una distancia de 1m.
- $L_1$  y  $L_2$  las pérdidas debidas a la curvatura del túnel.

El efecto de shadowing provoca en la práctica una desviación de las pérdidas frente al valor esperado. Esta desviación vendrá dada por las variables aleatorias  $\xi_1$  y  $\xi_2$  con distribución gaussiana de media cero y desviación estándar  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  de respectivamente.

## 4.2 Análisis del uplink

Para el cálculo de los estadísticos de interferencia y la capacidad del sector, se utilizará un modelo formado por 5 microceldas de 2 sectores de radio  $R$ . La Figura 4.4 ilustra este modelo.

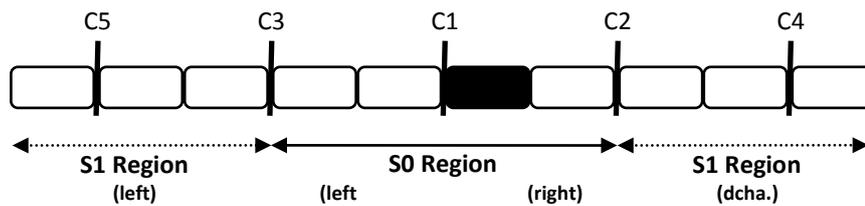


Figura 4.4 - Modelo de microceldas cigar-shaped

Supongamos un usuario interferente situado a una distancia  $r_{im}$  de la estación base a la que está conectado y a una distancia  $r_{id}$  de la estación base bajo estudio, tal y como se muestra en la Figura 4.5.

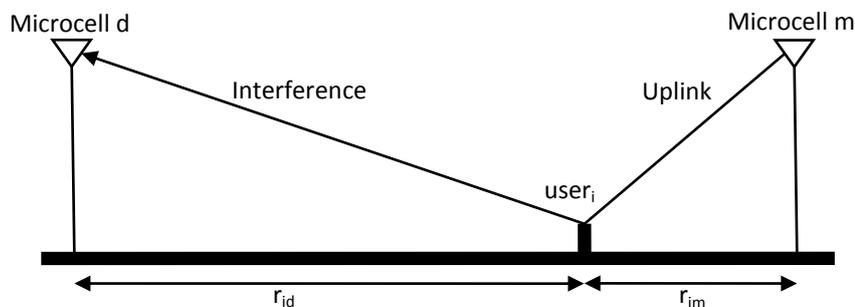


Figura 4.5 - Modelo de microcelda

La relación entre las señales de interferencia  $L(r_{id}, r_{im})$  debida exclusivamente a las pérdidas por distancia vendrá dada por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$L(r_{id}, r_{im}) = \frac{10^{\frac{10 \log_{10} r_{im}^S + L_{bim}}{10}}}{10^{\frac{10 \log_{10} R_b^S + n(r_{id} - R_b) + L_{bid}}{10}}} \quad \text{para } r_{id} > R_b \text{ y } r_{im} < R_b \quad (4.4)$$

$$L(r_{id}, r_{im}) = \frac{10^{\frac{10 \log_{10} R_b^S + n(r_{im} - R_b) + L_{bim}}{10}}}{10^{\frac{10 \log_{10} r_{id}^S + L_{bid}}{10}}} \quad \text{para } r_{id} < R_b \text{ y } r_{im} > R_b \quad (4.5)$$

$$L(r_{id}, r_{im}) = \frac{10^{\frac{n(r_{im} - R_b) + L_{bim}}{10}}}{10^{\frac{n(r_{id} - R_b) + L_{bid}}{10}}} \quad \text{para } r_{id} > R_b \text{ y } r_{im} > R_b \quad (4.6)$$

Si además incluimos el efecto del shadowing, la relación entre las señales de interferencia  $L_{shd}(r_{id}, r_{im})$  debida a la distancia y al efecto shadowing vendrá dada por la ecuación:

$$L_{shd}(r_{id}, r_{im}) = 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} L(r_{id}, r_{im}) \quad (4.7)$$

Los estadísticos de interferencia intercelular e intracelular para cada uno de los servicios se calcularán de la misma forma que ya se hizo en el capítulo 6 para despliegues en autopistas.

### 4.2.1 Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos

Dada la penetración en el mercado de estos servicios, supondremos una distribución uniforme de usuarios con una densidad  $\rho_s = N_{u,s}/R$  en cada uno de los sectores.

En la parte derecha de la región  $S_0$ , la esperanza de interferencia intercelular vendrá dada por:

$$E[I_{S_0}]_{r,s} = \alpha_s \rho_s \int_{S_0,r} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \partial r \quad (4.8)$$

Donde el factor  $f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right)$  modela el efecto de shadowing, estando definido por la siguiente ecuación:

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{\frac{(\sigma\beta)^2}{2}} Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left\{\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right\}\right] \quad (4.9)$$

donde  $\beta = \frac{\ln 10}{10}$  y  $Q(x)$  la función de distribución complementaria de la distribución gaussiana, definida como:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-v^2/2} dv \quad (4.10)$$

Utilizaremos  $\sigma^2$  como valor general para la desviación típica de las variables aleatorias que representan el efecto shadowing. Para su cálculo utilizaremos la siguiente expresión:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_1^2 \quad \text{para } r_{id} < R_b \text{ y } r_{im} < R_b \quad (4.11)$$

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_1^2 \quad \text{para } r_{id} > R_b \text{ y } r_{im} > R_b \quad (4.12)$$

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{dm})\sigma_1\sigma_2 \quad \text{en el resto de casos} \quad (4.13)$$

Siendo  $C_{dm}$  el coeficiente de correlación intersites.

En la parte derecha de la región S1, la esperanza de interferencia intercelular vendrá dada por:

$$E[I_{S1}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{S1_r} L(r_{id}, r_{im}) E \left[ 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} \right] \partial r \quad (4.14)$$

Resultando el valor esperado de potencia de interferencia intercelular:

$$E[P]_{inter,s} = P_{r,s} E[I]_{inter,s} = P_{r,s} (E[I_{S0}]_{r,s} + E[I_{S1}]_{r,s})(1 + sll) \quad (4.15)$$

Calculamos el valor esperado de potencia de interferencia intracelular como:

$$E[P]_{intra,s} = P_{r,s} E[I]_{intra,s} \approx P_{r,s} \alpha_s N_{u,s} (1 + sll) \quad (4.16)$$

Si consideramos un control de potencia imperfecto con un error con desviación estándar  $\sigma_c$ , la esperanza de potencia de interferencia total generada por el servicio s vendrá dada por la ecuación:

$$E[P_{int}]_s = e^{\frac{\beta^2 \sigma_c^2}{2}} (E[P]_{intra,s} + E[P]_{inter,s}) \quad (4.17)$$

### 4.2.2 Esperanza de interferencia para el servicio HSUPA

A día de hoy, servicios como HSUPA aún no están tan extendidos entre el gran público, además de no poder ofrecer la misma capacidad por el elevado nivel de interferencia que se genera entre usuarios.

Así pues, el número de usuarios que utilizarán este servicio concurrentemente dentro del mismo sector es mucho más limitado. Por ello, a la hora de calcular los estadísticos de interferencia para HSUPA lo haremos para un único usuario en lugar de integrar a lo largo de toda la región.

Calcularemos la relación entre las señales de interferencia  $L(r_{id}, r_{im})$  utilizando las ecuaciones (4.4) (4.5) y (4.6), y la desviación típica del efecto shadowing  $\sigma$  mediante las ecuaciones (4.11) (4.12) y (4.13), del mismo modo que se hizo previamente para los servicios de datos y voz.

Asumimos que el usuario HSUPA objeto de estudio se encuentra en la parte derecha de la región S0 por lo que esta será la única interferencia generada, no generándose ninguna en la región S1 ni en la parte izquierda de la región S0.

De esta forma, el valor esperado para la potencia de interferencia intercelular generada por el servicio HSUPA vendrá dado por la expresión:

$$E[P]_{inter,HSUPA} = P_{r,HSUPA} E[I]_{inter,HSUPA} = P_{r,HSUPA} \alpha_{HSUPA} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \quad (4.18)$$

En adelante los valores  $l$  y  $m$  representarán la probabilidad de que el terminal se encuentre conectado a otra estación base distinta de la que estamos estudiando.

$$l = Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left(\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right)\right] \quad (4.19)$$

$$m = Q\left[2\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left(\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right)\right] \quad (4.20)$$

El valor esperado para la potencia de interferencia intracelular generada por el servicio HSUPA se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$E[P]_{intra,HSUPA} = P_{r,HSUPA} E[I]_{intra,HSUPA} \approx P_{r,HSUPA} \alpha_{HSUPA} (1 - l) \quad (4.21)$$

Considerando nuevamente un control de potencia imperfecto con desviación típica y sumando ambos valores, obtendremos la esperanza de potencia de interferencia total:

$$E[P_{int}]_{HSUPA} = e^{\frac{\beta^2 \sigma_c^2}{2}} (E[P]_{intra,HSUPA} + E[P]_{inter,HSUPA}) \quad (4.22)$$

### 4.2.3 Varianza de interferencia para los servicios de voz y datos

Al igual que hicimos previamente para calcular el valor esperado, supondremos una distribución uniforme de usuarios con una densidad  $\rho_s = N_{u,s}/R$  en cada uno de los sectores.

De esta forma, la varianza de potencia de interferencia intercelular generada en la parte derecha de la región S0 vendrá dada por:

$$Var[P_{S0}]_{r,s} = \rho_s P_{r,s}^2 \int_{S0_r} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) - q \alpha_s^2 f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \right\} \partial r \quad (4.23)$$

Donde los factores  $f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right)$  y  $g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right)$  modelan el efecto de shadowing, estando definidos de la siguiente forma:

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{\frac{(\beta\sigma)^2}{2}} l = e^{\frac{(\beta\sigma)^2}{2}} Q \left[ \beta \sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10} \left( \frac{1}{L(r_{id}, r_{im})} \right) \right] \quad (4.24)$$

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{2(\beta\sigma)^2} m = e^{2(\beta\sigma)^2} Q \left[ 2\beta \sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10} \left( \frac{1}{L(r_{id}, r_{im})} \right) \right] \quad (4.25)$$

Siendo

$$p = e^{2\beta^2 \sigma_c^2} \quad (4.26)$$

$$q = e^{\beta^2 \sigma_c^2} \quad (4.27)$$

La varianza de potencia intercelular generada por los usuarios situados en la parte derecha de la región S1 vendrá dada por:

$$Var[P_{S1}]_{r,s} \approx \rho_s P_{r,s}^2 \int_{S1_r} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s E \left[ \left( 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} \right)^2 \right] - q \alpha_s^2 E^2 \left[ 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} \right] \right\} \partial r \quad (4.28)$$

Siendo la varianza de potencia intercelular total:

$$Var[P]_{inter,s} = (Var[P_{S0}]_{r,s} + Var[P_{S1}]_{r,s})(1 + sl^2) \quad (4.29)$$

Para el cálculo de la varianza de potencia intracelular utilizaremos la siguiente expresión:

$$Var[P]_{intra,s} = N_{u,s} P_{r,s}^2 (p\alpha_s - q\alpha_s^2)(1 + sl^2) \quad (4.30)$$

Sumando ambos valores, obtendremos la varianza de potencia de interferencia total:

$$Var[P_{int}]_s = Var[P]_{intra,s} + Var[P]_{inter,s} \quad (4.31)$$

#### 4.2.4 Varianza de interferencia para el servicio HSUPA

Nuevamente, a la hora de calcular los estadísticos de interferencia para el servicio HSUPA lo haremos para un único usuario en lugar de integrar a lo largo de toda la región.

De esta forma, el valor esperado para la potencia de interferencia intercelular generada por el servicio HSUPA vendrá dado por la expresión:

$$\begin{aligned} Var[P]_{inter,HSUPA} &= P_{r,HSUPA}^2 Var[I]_{inter,HSUPA} \\ &= P_{r,HSUPA}^2 [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p\alpha_{HSUPA} g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) - q\alpha_{HSUPA}^2 f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (4.32)$$

El valor esperado para la potencia de interferencia intracelular generada por el servicio HSUPA se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$Var[P]_{intra,HSUPA} = N_{u,HSUPA} P_{r,HSUPA}^2 (p\alpha_{HSUPA} - q\alpha_{HSUPA}^2) \quad (4.33)$$

Sumando ambos valores, obtendremos la varianza de potencia de interferencia total:

$$Var[P_{int}]_{HSUPA} = Var[P]_{intra,HSUPA} + Var[P]_{inter,HSUPA} \quad (4.34)$$

## 4.2.5 Capacidad del sistema multiservicio

Así pues, aplicando unas u otras ecuaciones según corresponda, habremos obtenido los valores de los estadísticos de potencia de interferencia para cada uno de los servicios. Los estadísticos de interferencia totales se calcularán como la suma de los resultados para cada uno de los servicios.

$$E[P_{int}] = \sum_s E[P_{int}]_s \quad (4.35)$$

$$Var[P_{int}] = \sum_s Var[P_{int}]_s \quad (4.36)$$

Así pues, para una probabilidad de desbordamiento determinada, podemos calcular la SIR del servicio  $s$  como:

$$\left[\frac{C}{I}\right]_s = \frac{\varepsilon P_{r,s}}{E[P_{int}] + P_N + \gamma \sqrt{var[P_{int}]}} \quad (4.37)$$

La relación entre la  $SNR_{bit}$  viene definida por la siguiente expresión:

$$\frac{E_b}{N_o} = G_p \left[\frac{C}{I}\right] \quad (4.38)$$

Cuando ofrecemos distintos servicios en nuestro sistema, las potencias máximas transmitidas guardan la siguiente relación (en dB):

$$\left(\frac{P_{tx,HSUPA}}{P_{tx,datos}}\right)_{dB} = (1 + \delta_1) \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{G_{p,datos} / \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{datos}}{G_{p,HSUPA} / \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{HSUPA}} \right) \right] \quad (4.39)$$

$$\left(\frac{P_{tx,HSUPA}}{P_{tx,voz}}\right)_{dB} = (1 + \delta_2) \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{G_{p,voz} / \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{voz}}{G_{p,HSUPA} / \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{HSUPA}} \right) \right] \quad (4.40)$$

Siendo  $\delta_1$  y  $\delta_2$  factores de corrección con valor dentro el intervalo  $[-0,1 - 0,1]$ .

### 4.3 Resultados de las simulaciones

Aplicando el modelo descrito para redes desplegadas a lo largo de túneles, se han realizado simulaciones para estudiar en qué medida la capacidad del uplink de los servicios tradicionales de voz y datos se ve afectada por los nuevos servicios de datos de alta velocidad.

Los cálculos descritos con anterioridad se han implementado con ayuda de la herramienta Matlab y las simulaciones se han realizado con los siguientes valores que se consideran ajustados a los que razonablemente encontraremos en la realidad.

- Radio del sector
  - $R = 1000m$
  
- Distancia del punto de ruptura entre las dos pendientes
  - $R_b = 300m$
  
- Propagación
  - $\gamma = 2$
  - $n = 0,01 \text{ dB/m}$
  
- Shadowing
  - $\sigma_1 = 3dB$
  - $\sigma_2 = 6dB$
  - $C_{dm} = 0,5$

- Ganancias de procesado
  - o 256 para el servicio de voz
  - o 32 para el servicio de datos
  - o 16 (240kbps) y 8 (480kbps) para el servicio HSUPA
  
- Potencia máxima transmitida
  - o 30dBm para el servicio HSUPA
  - o Los valores para los servicios de voz y datos ha sido calculado utilizando las ecuaciones (4.39) y (4.40).

	HSUPA $G_p=16$	HSUPA $G_p=8$
Voice	20,9 dBm	18,4 dBm
Data	27,4 dBm	24,7 dBm

Tabla 4.1 - Potencias máximas de transmisión

- $E_b/N_o$  requerida
  - o 7dB para el servicio de voz
  - o 4dB para el servicio de datos
  - o Los valores para el servicio HSUPA se han extraído de [12]. Dichos valores están calculados para peatones moviéndose a una velocidad de 3km/h, mientras que nuestros usuarios viajarán en vehículos a velocidades del orden de 120km/h. Para compensar esta diferencia se han añadido 0,8dB extra a los valores originales.

	HSUPA $G_p=16$	HSUPA $G_p=8$
$E_b/N_o$	4.8dB	4.8dB

Tabla 4.2 -  $E_b/N_o$  requerida por el servicio HSUPA

- Potencia de ruido en el receptor de  $P_n = -100dBm$ .
- Ganancia de la antena de la estación base de 12dB con un  $SLL$  de -15dB.

Para la probabilidad de desbordamiento se considera aceptable un valor del 1% y las capacidades mostradas a continuación han sido calculadas de acuerdo a este porcentaje.

### 4.3.1 Servicio HSUPA

Analizaremos en primer lugar las prestaciones del servicio HSUPA en autopistas en ausencia de otros servicios.

La Figura 4.6 muestra la capacidad del sector para el servicio HSUPA cuando este es el único servicio ofrecido, no existiendo ningún otro usuario que pueda generar interferencia. Es decir, sin usuarios de otros servicios dentro o fuera del sector bajo estudio, ni otros usuarios HSUPA en sectores próximos al nuestro. Evidentemente, esta situación es completamente irreal pero su estudio teórico nos permitirá hacer algunas conclusiones.

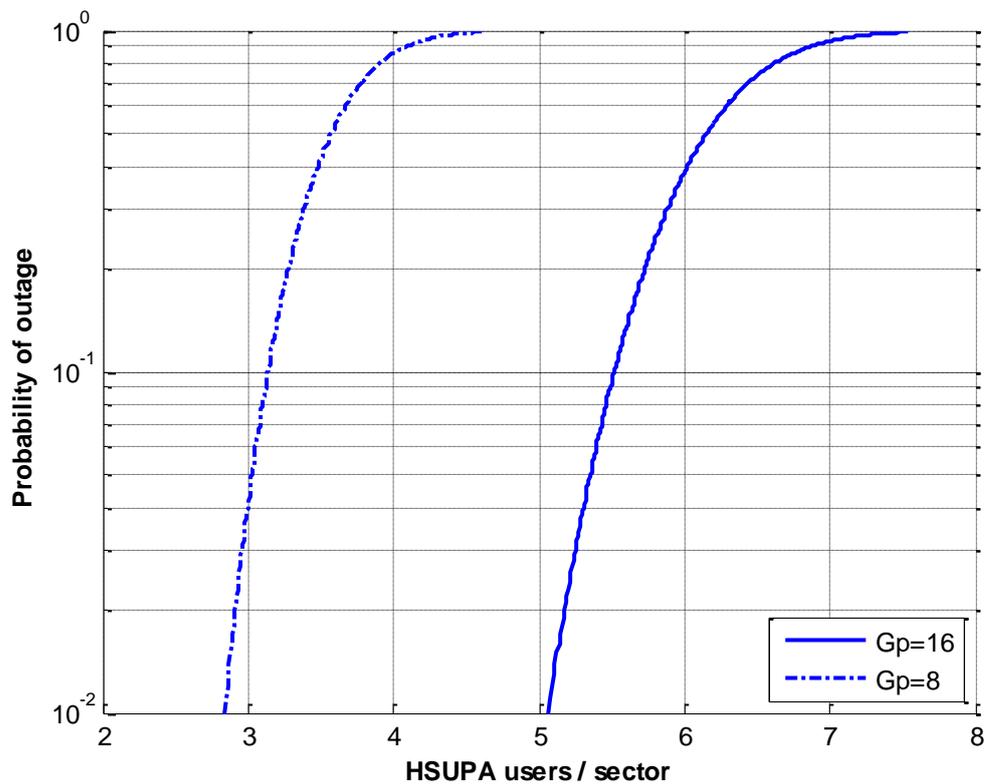


Figura 4.6 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA

Para una probabilidad de desbordamiento del 1%, observamos una capacidad máxima de 5 usuarios utilizando una ganancia de procesamiento de 16, y 2 usuarios (casi 3) para una ganancia de procesamiento de 8.

Analizaremos ahora la importancia de realizar un buen control de potencia, minimizando los errores, para obtener la mayor capacidad. Las Figuras 4.7 y 4.8 muestran la capacidad del sector para el servicio HSUPA para distintos valores del parámetro  $\sigma_c$ .

Las variaciones de este parámetro dentro de las simulaciones corresponden, en la realidad, a variaciones en el paso de control de potencia. Establecer un paso más fino permite cometer un menor error residual pero en canales con variaciones rápidas (*fading*) será necesario un paso mayor para permitir correcciones de forma más rápida.

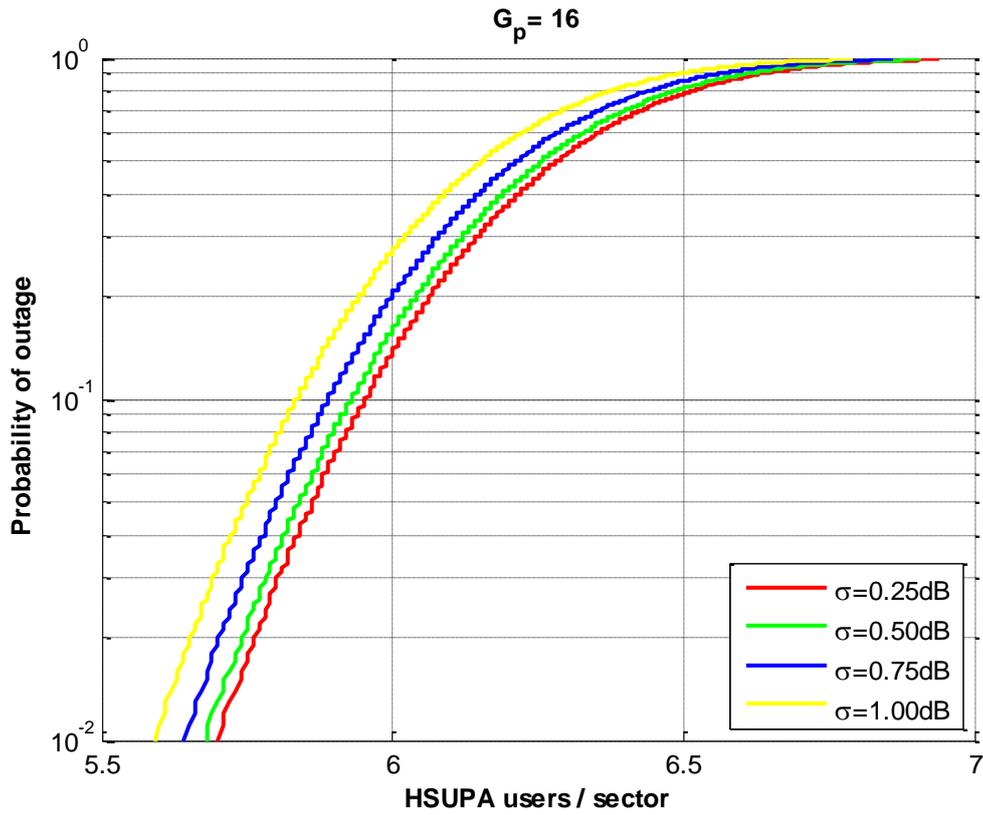


Figura 4.7 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=16$ ) - Control de potencia

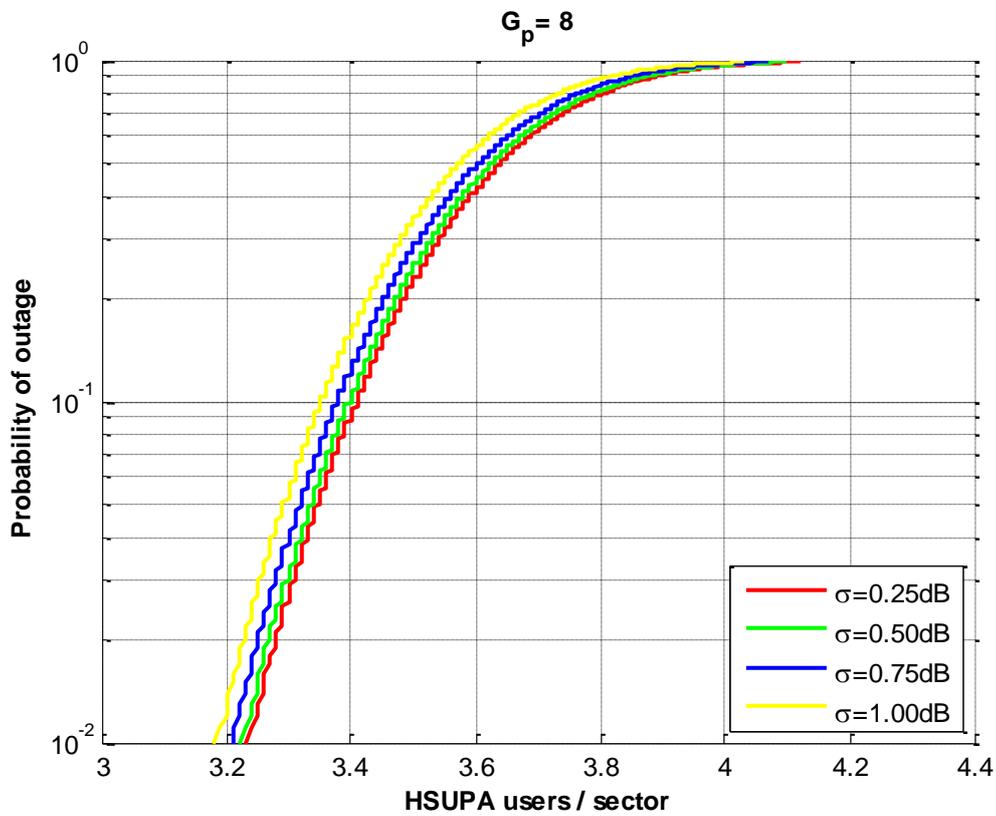


Figura 4.8 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=8$ ) - Control de potencia

Podemos observar como para valores menores del parámetro  $\sigma_c$  se comenten menores errores en el control de potencia, lo que beneficia la capacidad del sector.

En los siguientes apartados se estudiará el efecto que los usuarios del servicio HSUPA tienen sobre la capacidad de otros servicios. Para ello, comenzaremos calculando los estadísticos de interferencia del servicio HSUPA. Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran el valor medio esperado y la varianza de la potencia de interferencia generada por un usuario situado a una distancia  $d$  de la estación base bajo estudio. Estas gráficas ya nos adelantan de que forma la localización del usuario afectará al resto de servicios.

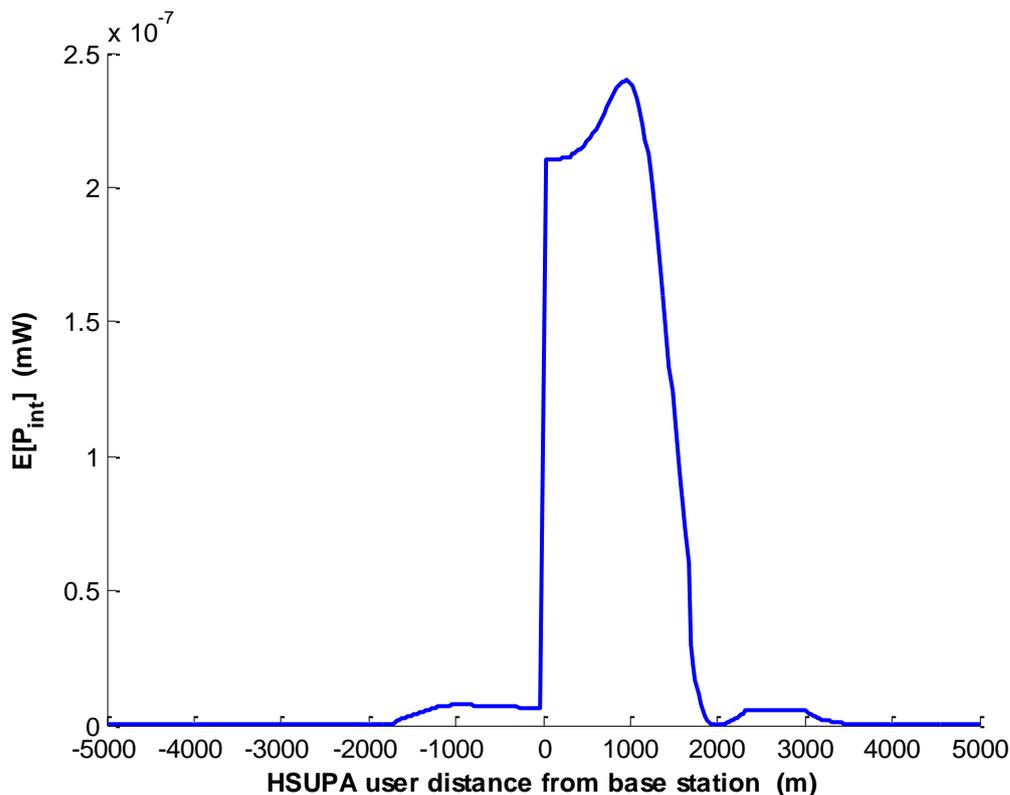


Figura 4.9 - Esperanza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA

Para la esperanza de potencia de interferencia se ha obtenido un valor máximo de  $2,4 \times 10^{-7}$  mW cuando el usuario interferente se encuentra situado a una distancia de 950 mt de la estación base. A partir de esa distancia la potencia de interferencia disminuye con un mínimo en los 2000mt, anulándose completamente a partir de los 3500mt.

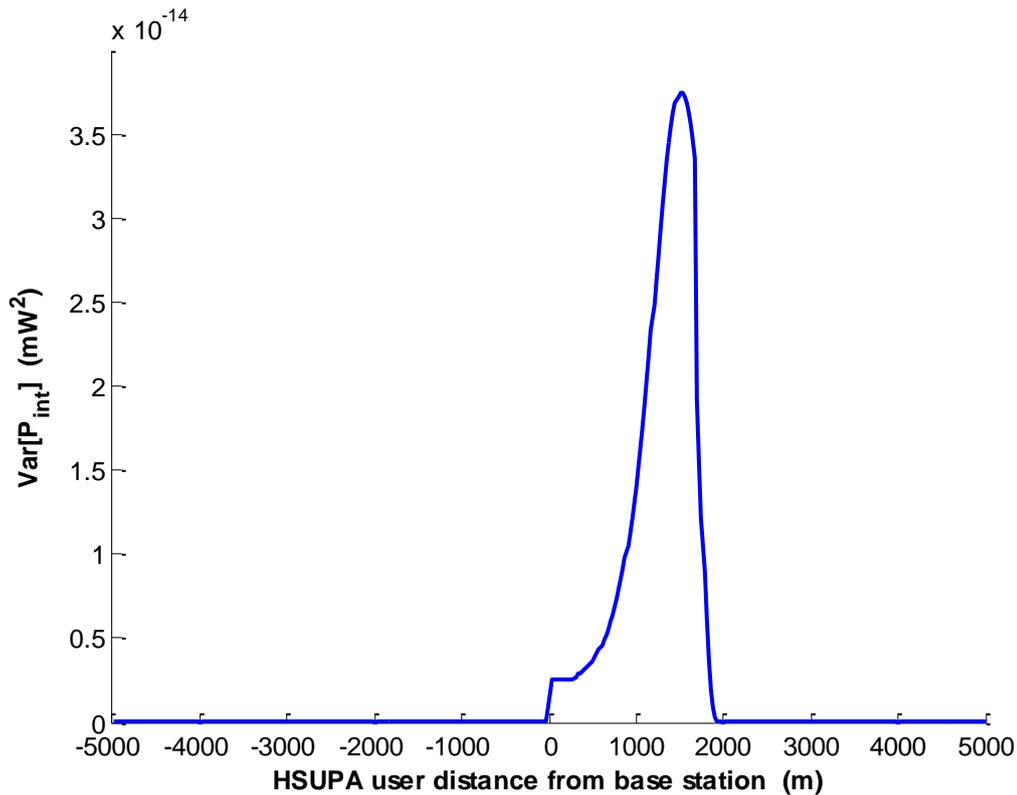


Figura 4.10 - Varianza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA

Para la varianza de potencia de interferencia se ha obtenido un valor máximo de  $3,75 \times 10^{-14} \text{ mW}^2$  cuando el usuario interferente se encuentra situado a una distancia de 1525 mt de la estación base.

En ambas gráficas puede apreciarse como la interferencia generada por el usuario HSUPA es prácticamente nula fuera de la región S0. Esta situación no debe confundirnos, ya que si tenemos en cuenta el sistema celular completo, será a partir de este punto donde el usuario comience a generar mayor potencia de interferencia sobre la estación base del sector colindante.

Las Figuras 4.11 y 4.12 muestran en detalle los estadísticos de potencia de interferencia generada por un usuario del servicio localizado en la parte derecha de la región S0.

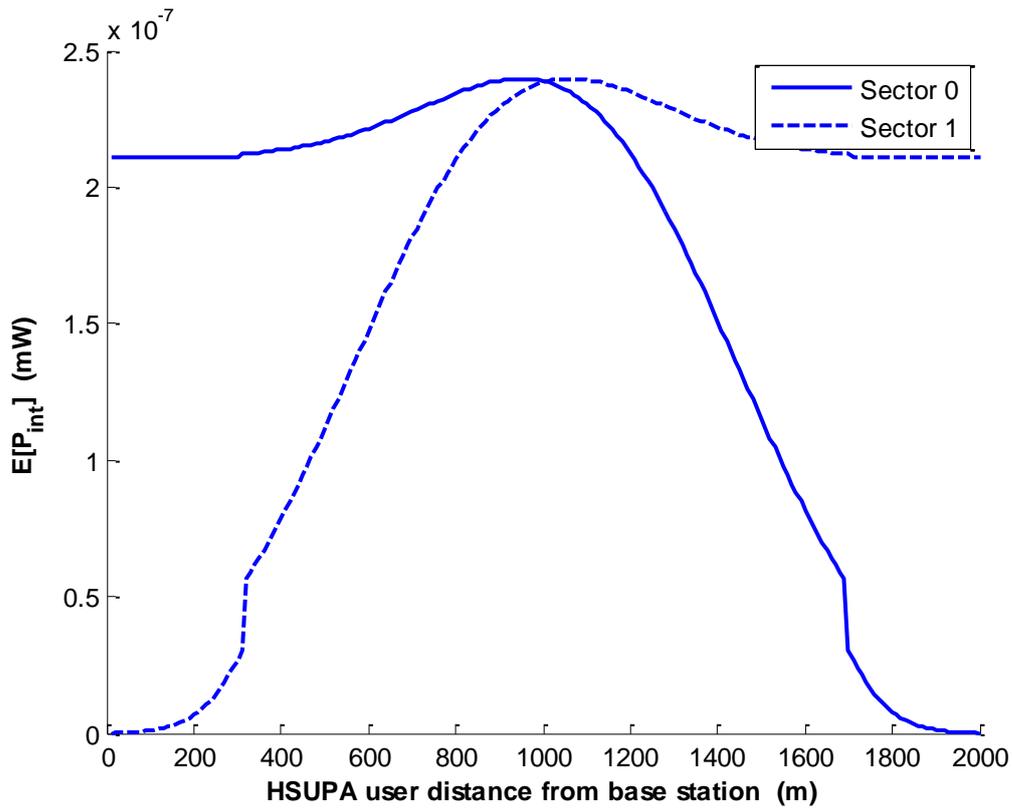


Figura 4.11 - Esperanza de potencia de interferencia sobre dos sectores vecinos

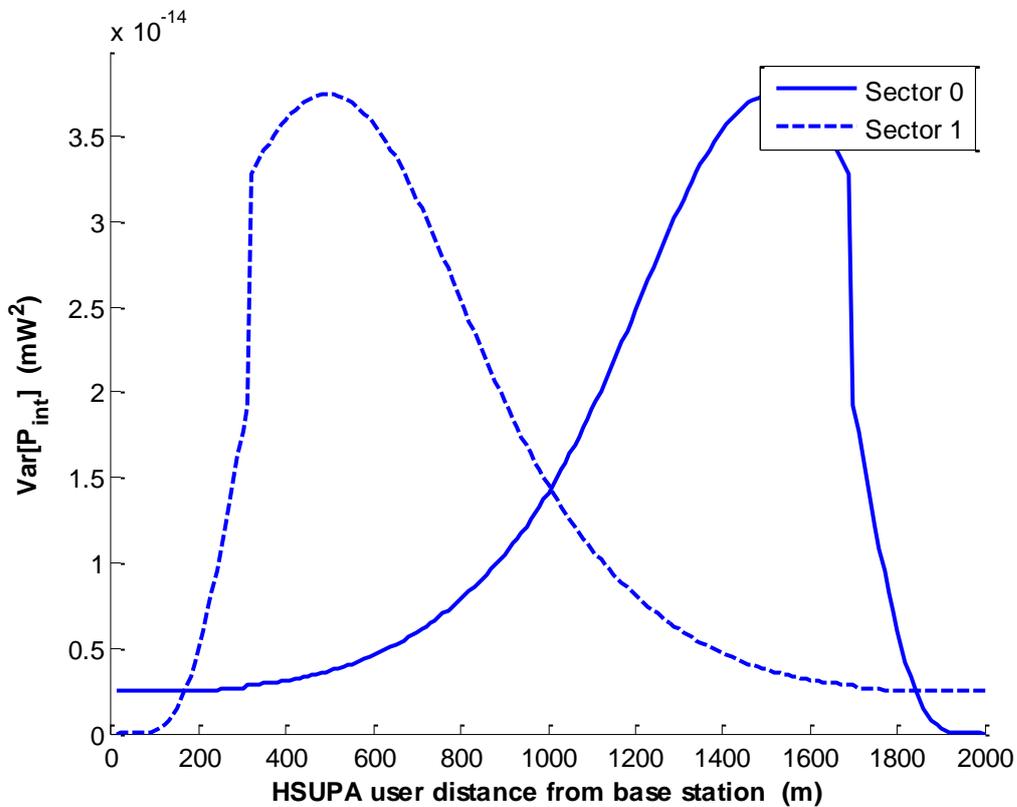


Figura 4.12 - Varianza de potencia de interferencia sobre dos sectores vecinos

Como se comentó anteriormente, todas estas simulaciones se han realizado suponiendo la ausencia total de usuarios de este u otros servicios en cualquiera de los sectores próximos desde los que la interferencia generada fuera suficiente para afectar a la capacidad. Se trata por tanto de un caso ideal. Veamos a continuación como un usuario del servicio HSUPA fuera del sector bajo estudio afecta a la prestación del servicio dentro de este.

Situaremos el nuevo usuario interferente a una distancia  $r$  de la estación base de referencia, siempre en el exterior del sector bajo estudio. La Figura 4.13 muestra la capacidad de la célula para el servicio HSUPA con un usuario adicional del servicio. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

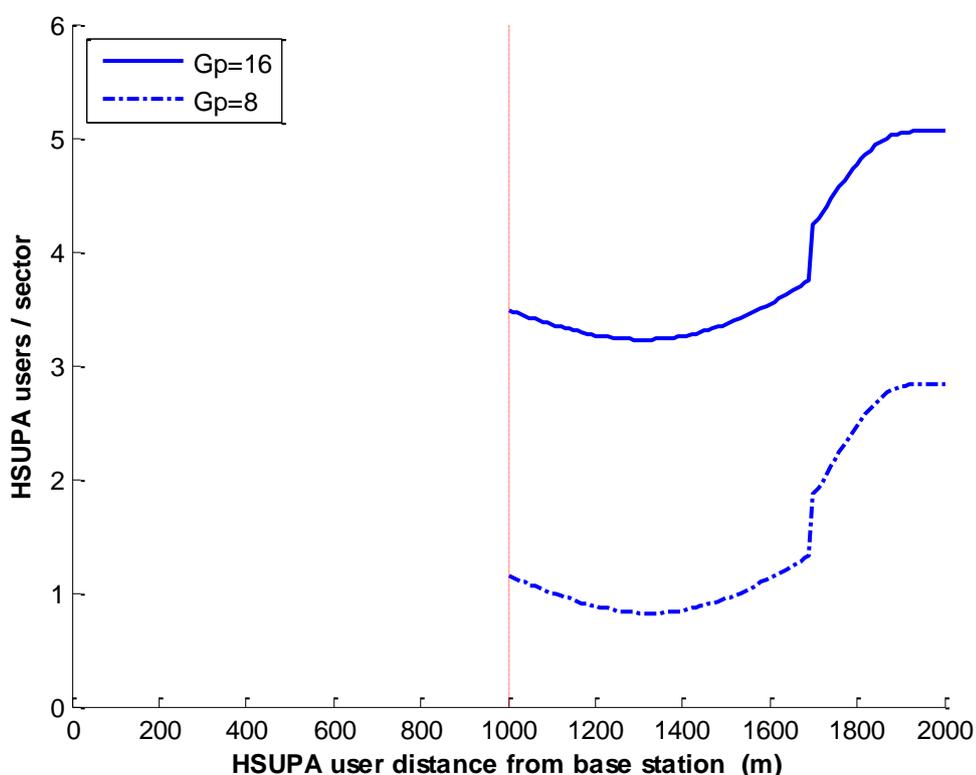


Figura 4.13 - Capacidad del servicio HSUPA- 1 usuario externo

Para  $G_p=16$  ha obtenido una capacidad mínima de 3 usuarios cuando el usuario interferente se encuentra a una distancia de 1320 mt. En estas circunstancias, para  $G_p=8$ , la capacidad alcanza valores por debajo de 1. A medida que el usuario interferente se aleja de la estación base bajo estudio la capacidad crece hasta llegar a los valores calculados en ausencia de otros servicios que causen interferencia.

Puede apreciarse una discontinuidad entorno a los 1700 mt, a una distancia  $R_b$  de la segunda estación base, fruto del salto de una zona de propagación a otra.

### 4.3.2 Servicio de voz

Una vez hemos caracterizado la interferencia generada por el usuario HSUPA, veamos de qué forma afecta a esta al servicio de voz, suponiendo que la densidad de usuarios en cada uno de los sectores es por unidad de longitud.

La Figura 4.14 muestra la capacidad de un sector par el servicio de voz cuando este es el único servicio utilizado. Comprobamos que para una probabilidad de desbordamiento del 1% la capacidad máxima estimada es de 52 usuarios simultáneos (casi 53), ligeramente inferior a la calculada para el caso de autopistas.

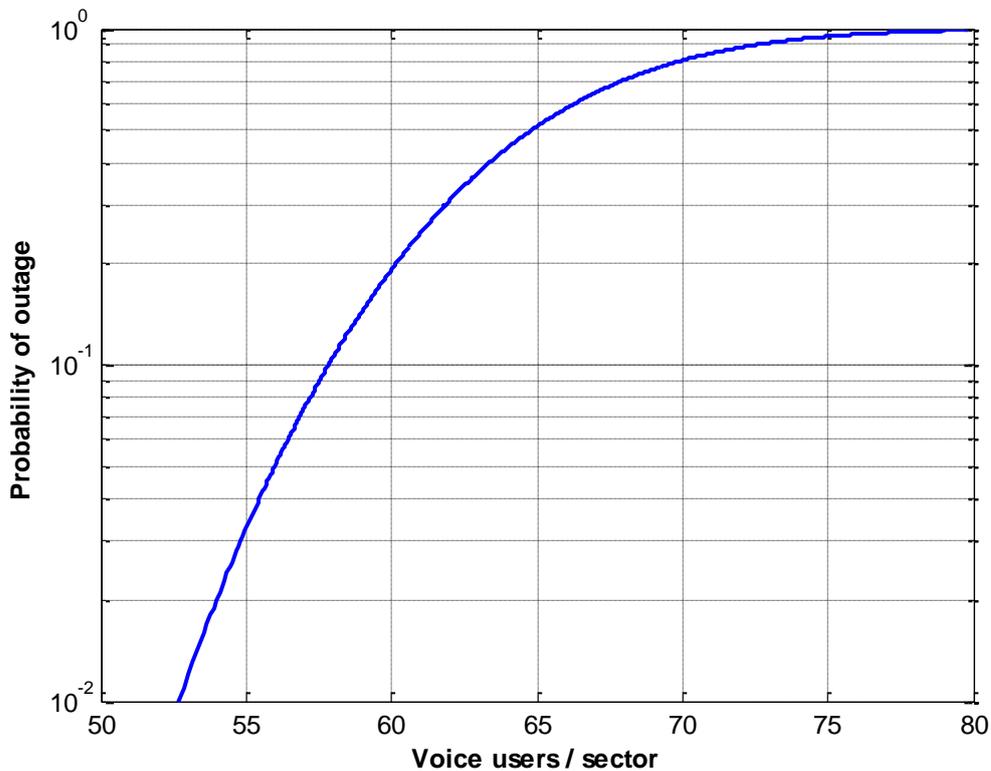


Figura 4.14 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz

Veamos ahora en qué medida esta capacidad se ve afectada por la presencia de un usuario HSUPA. La Figura 4.15 muestra la capacidad del sector para el servicio de voz con un usuario HSUPA presente a una distancia  $d$  de la estación base de referencia. Se ha realizado la simulación para valores de la ganancia de procesamiento de 16 y 8.

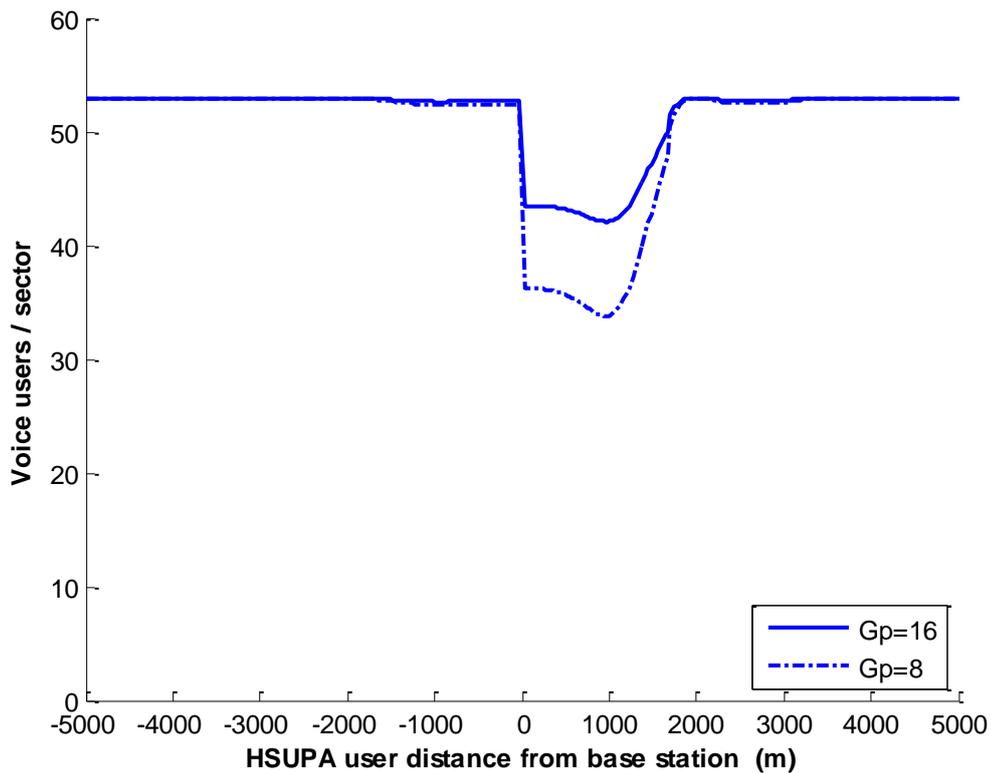


Figura 4.15 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA

Puede comprobarse como la capacidad del servicio de voz se ve drásticamente reducida cuando el usuario HSUPA se encuentra en la parte derecha de la región S0, coincidiendo con la distancia a la que los valores de potencia de interferencia mostrados en la Figura 4.9 son mayores.

Cuando el usuario HSUPA se mueve fuera de esta zona, la potencia de interferencia captada por la antena de la estación base de referencia es muy reducida, debido a dos razones:

- la región S1 se encuentra por encima de los 2km de distancia en cuyo recorrido la señal sufre unas pérdidas de propagación elevadas.
- en la parte izquierda de ambas regiones, la baja ganancia del lóbulo secundario de la antena receptora hace que las señales procedentes de este área se reciban de forma mucho más débil.

Por estos motivos, el valor obtenido para la capacidad del servicio de voz en esos casos se aproxima a los 52 usuarios calculados previamente en ausencia de otros servicios.

Así pues, dado que la interferencia generada por nuestro usuario únicamente afectará significativamente al servicio de voz cuando este se encuentre entre los 0 y 2.000m, centraremos nuestro estudio en esta región. La Figura 4.16 muestra con mayor detalle la capacidad del sector para el servicio de voz con un usuario HSUPA presente en la parte derecha de la región S0. Se ha realizado la simulación para valores de la ganancia de procesamiento de 16 y 8.

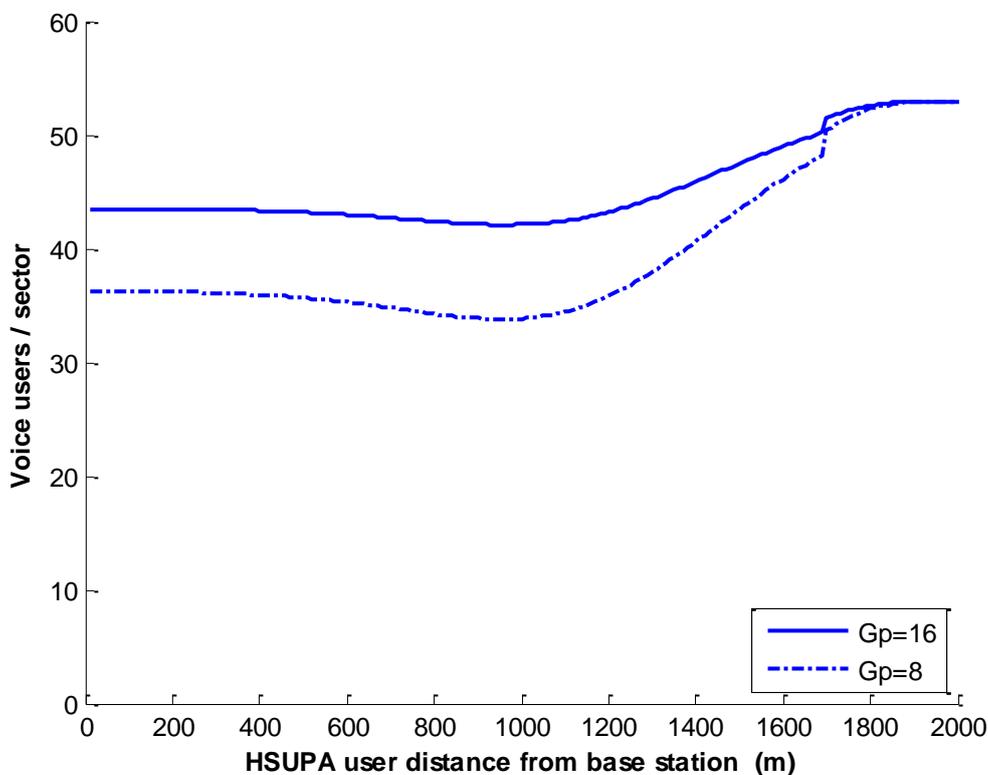


Figura 4.16 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA

Para el servicio de voz se obtienen capacidades de 43 usuarios para  $G_p=16$  y 36 usuarios para  $G_p=8$ , cuando el usuario interferente se encuentra en localizaciones próximas a la estación base de referencia. Aproximadamente a partir de los 600 mt, la capacidad comienza a disminuir significativamente, alcanzando sus valores mínimos cuando la distancia del usuario HSUPA a la estación base es de 980 mt. Las capacidades calculadas en estas circunstancias son de 42 usuarios para  $G_p=16$  y 33 usuarios para  $G_p=8$ .

A medida que el usuario interferente se aleja de la estación base bajo estudio la capacidad crece hasta llegar a los valores calculados en ausencia de otros servicios que causen interferencia.

Al igual que en otras simulaciones para túneles, puede apreciarse una discontinuidad entorno a los 1700 mt, a una distancia  $R_b$  de la segunda estación base, fruto del salto de una zona de propagación a otra.

A continuación añadiremos un segundo usuario del servicio HSUPA, también moviéndose dentro de la parte derecha de la región S0. Las Figuras 4.17 y 4.18 muestran la capacidad del sector para el servicio de voz en función de la distancia de la estación base a la que se encuentran los dos usuarios HSUPA. Para la ganancia de procesamiento se han utilizado valores de 16 y 8 respectivamente.

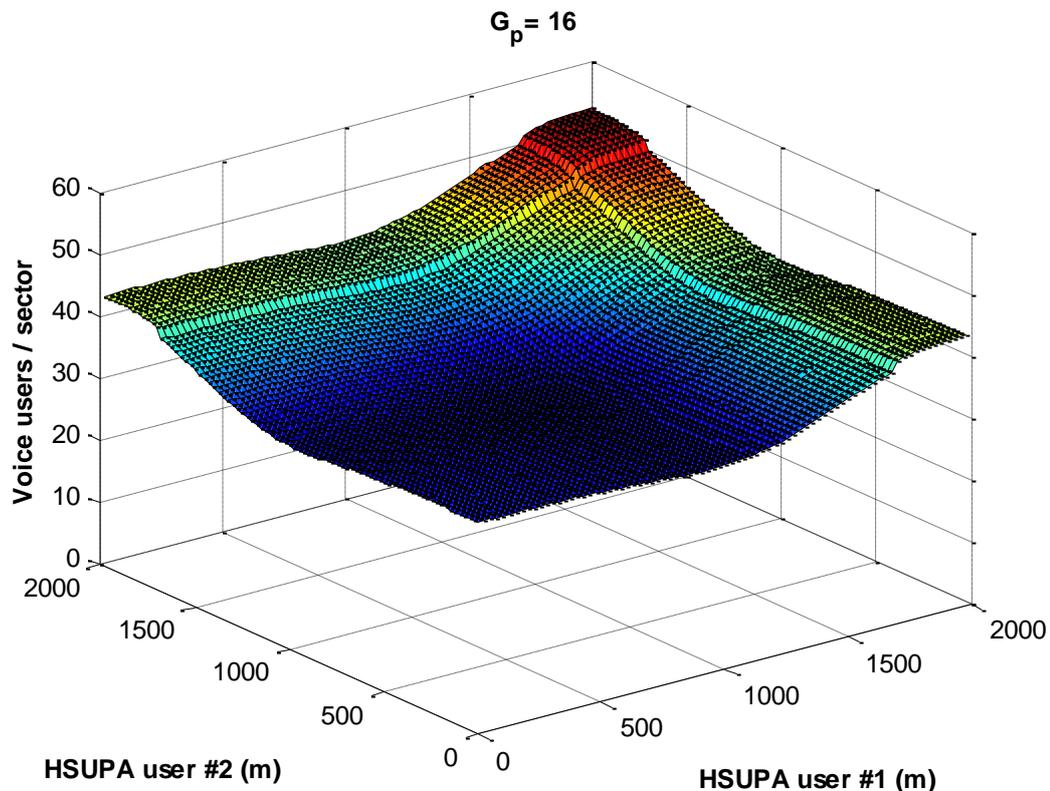


Figura 4.17 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ )

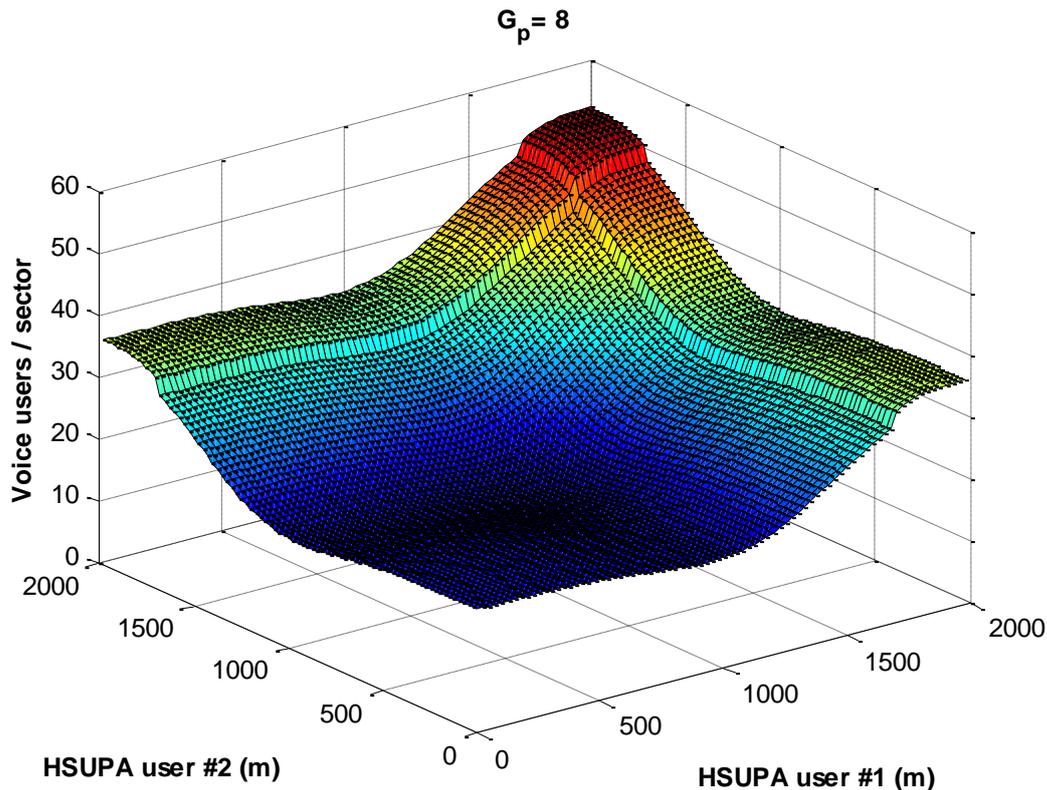


Figura 4.18 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ )

Observamos como estando uno de los usuarios en el borde de la región S0 y siendo la interferencia generada casi nula, la gráfica presenta perfiles de capacidad similares a los mostrados en la Figura 4.16.

Con ambos usuarios situados a más de 1800m, en el borde de la región S0, se obtiene la capacidad máxima de 52 usuarios. Este valor coincide con el que se obtuvo para la capacidad del servicio de voz en ausencia de otros servicios, lo que indica que la interferencia generada por ambos usuarios es mínima para la antena de referencia, aunque sí estará siendo importante para el sector contiguo cuya estación base de encuentra muy próxima.

A partir de ahí la capacidad decrece a medida que los usuarios se mueven a distancias intermedias, obteniendo, cuando ambos se encuentra alrededor de 1000 mt de distancia, los valores mínimos de 31 usuarios para la ganancia de procesado 16, y 15 usuarios para la ganancia de procesado 8.

Una vez comprobada la forma en que nuestros usuarios HSUPA afectarán la capacidad del servicio de voz, estudiaremos como el resto de parámetros del modelo de propagación presentado afectan a este valor.

Las Figuras 4.19 y 4.20 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  que separe nuestro usuario HSUPA de la estación base de referencia y del parámetro  $\gamma$ . Recordemos que en el modelo de propagación híbrido propuesto utilizamos un modelo de casi espacio libre con índice de propagación  $\gamma$  hasta una distancia  $R_b$ .

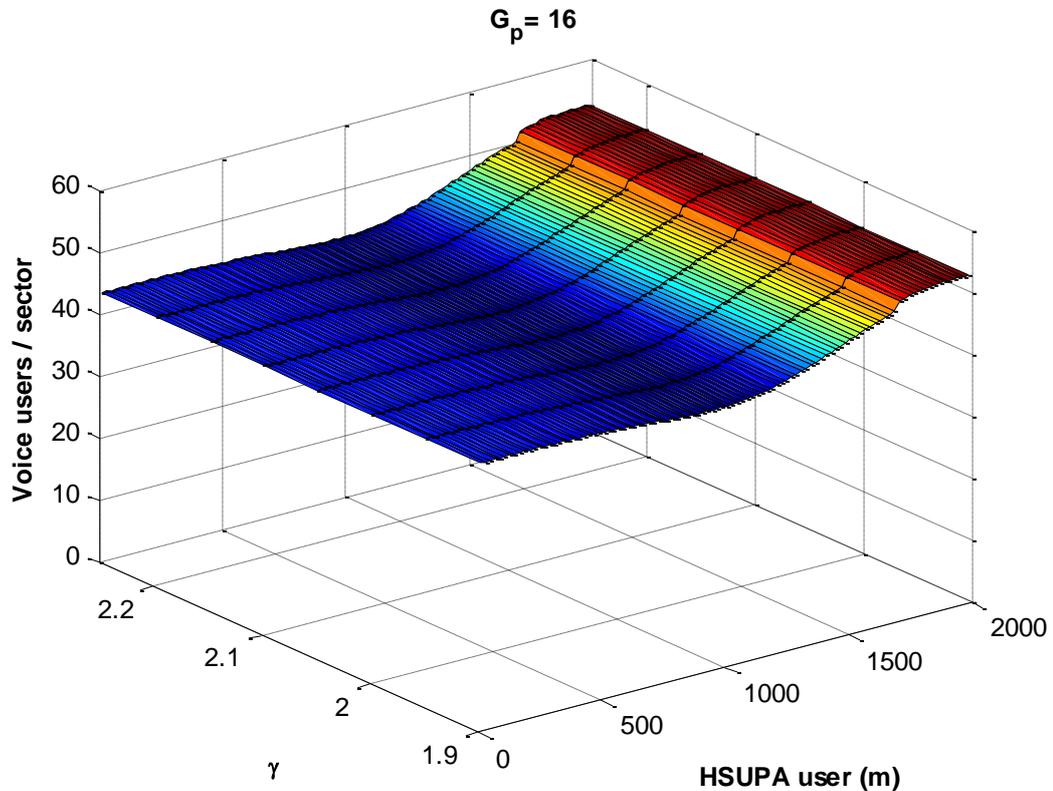


Figura 4.19 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice  $\gamma$

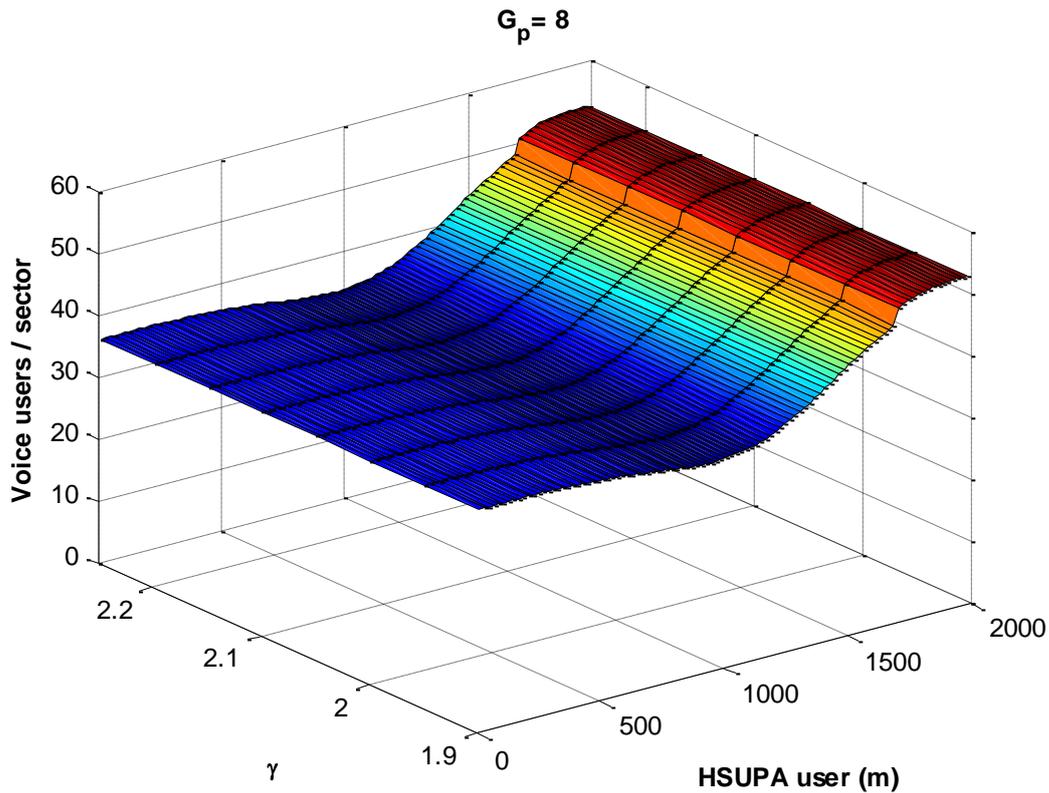


Figura 4.20 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice  $\gamma$

Como puede observarse, las variaciones del índice de propagación  $\gamma$  aplicado en el primer tramo no tienen incidencia apreciable sobre la capacidad del sector. Recordemos que en estas simulaciones se ha utilizado un valor  $R_b=300mt$ .

Analicemos a continuación la incidencia del otro parámetro de propagación. Las Figuras 4.21 y 4.22 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  que separe nuestro usuario HSUPA de la estación base de referencia y del parámetro  $n$ . Recordemos que en el modelo de propagación híbrido propuesto utilizamos un modelo de guía de onda con una atenuación específica de  $n$  dB/m a partir de una distancia  $R_b$ .

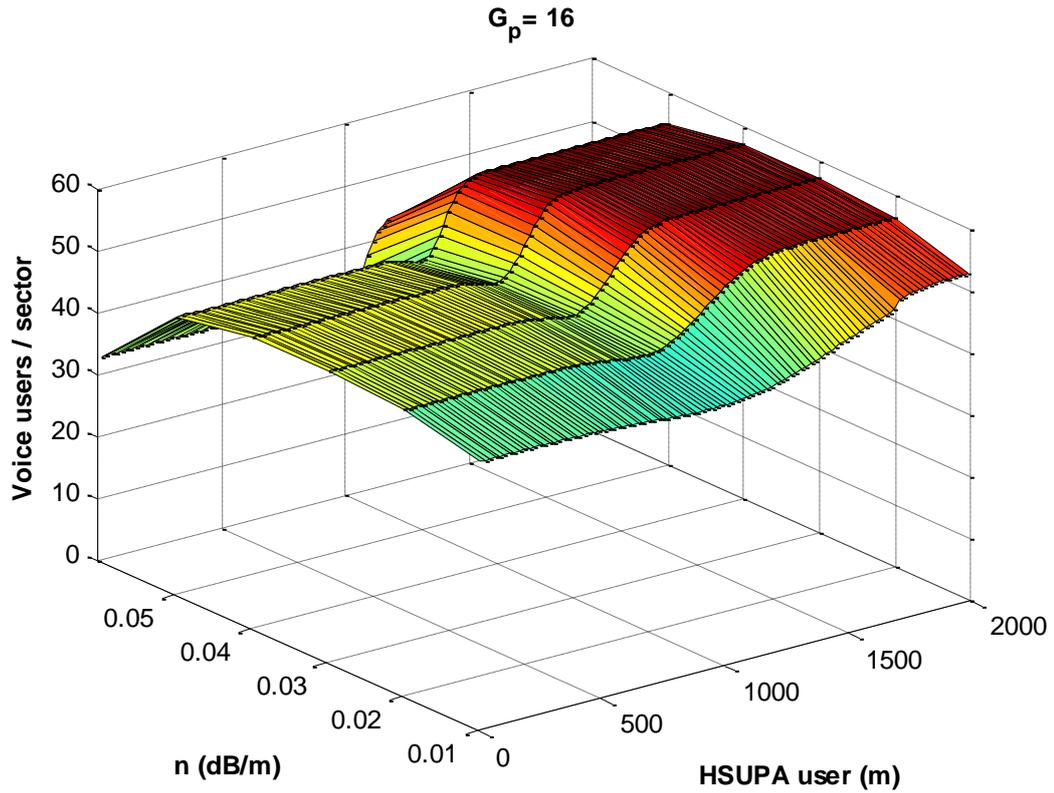


Figura 4.21 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - atenuación  $n$

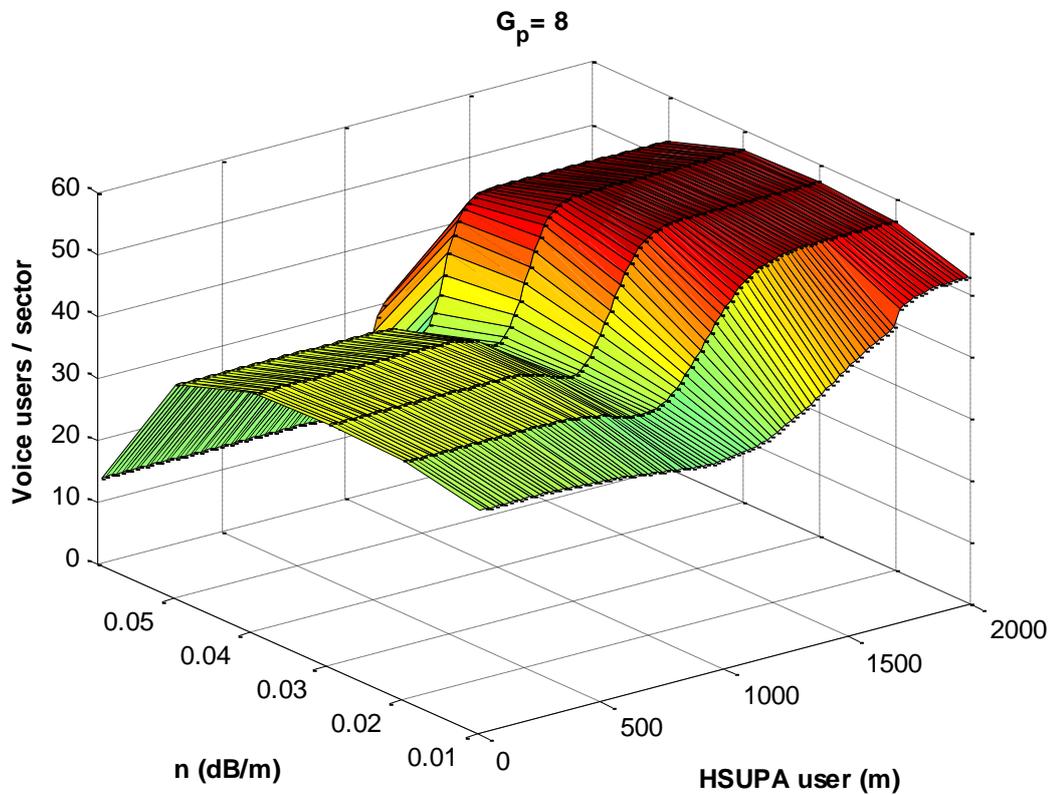


Figura 4.22 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - atenuación  $n$

Para las variaciones de la atenuación específica de la guía de onda imaginaria, los valores mayores permiten un mayor aislamiento, disminuyendo la interferencia intercelular generada y beneficiando así la capacidad del servicio de voz.

En general, esto se cumplirá para los valores que habitualmente encontraremos en la realidad. Más allá, cuando este parámetro sobrepasa los  $0,04\text{dB/m}$ , las elevadas pérdidas de propagación en el uplink provocan una importante disminución de la potencia recibida en la estación base bajo estudio. Como consecuencia de esto, a pesar de la importante disminución de la interferencia intercelular, se produce una caída drástica de la capacidad. Tomando como referencia los valores máximos obtenidos, que se obtienen cuando el usuario HSUPA se encuentra más alejado, encontramos capacidades de hasta 57 usuarios con  $n=0,03\text{dB/m}$ , decreciendo a partir de ese valor hasta los 39 usuarios calculados para  $n=0,06\text{dB/m}$ .

Las Figuras 4.23 y 4.24 muestran la capacidad del sector en función de la distancia  $R_b$  escogida. Aquí volvemos a encontrar una situación parecida a la de la figura anterior. Al modificar la distancia, variamos la incidencia de cada uno de los índices de propagación. A medida que aumentamos  $R_b$ , aumentamos las pérdidas de propagación, lo que disminuye la interferencia generada en la base y modifica ligeramente la curva de capacidad. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento 16 y 8.

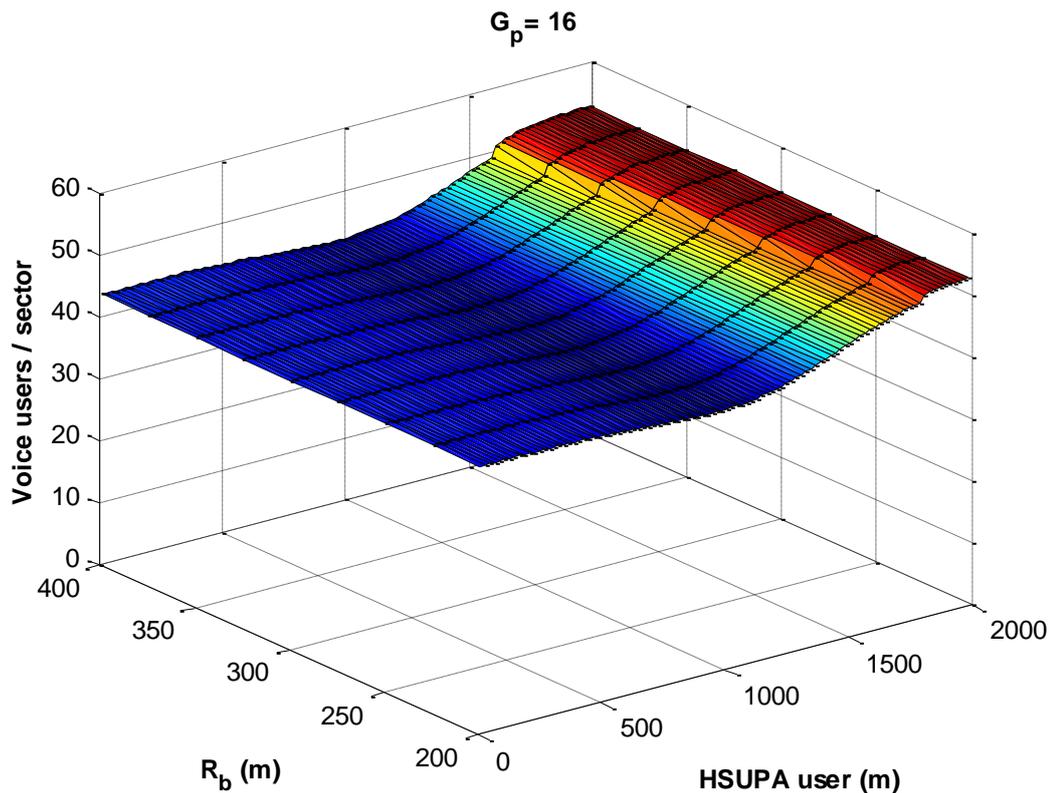


Figura 4.23 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - distancia  $R_b$

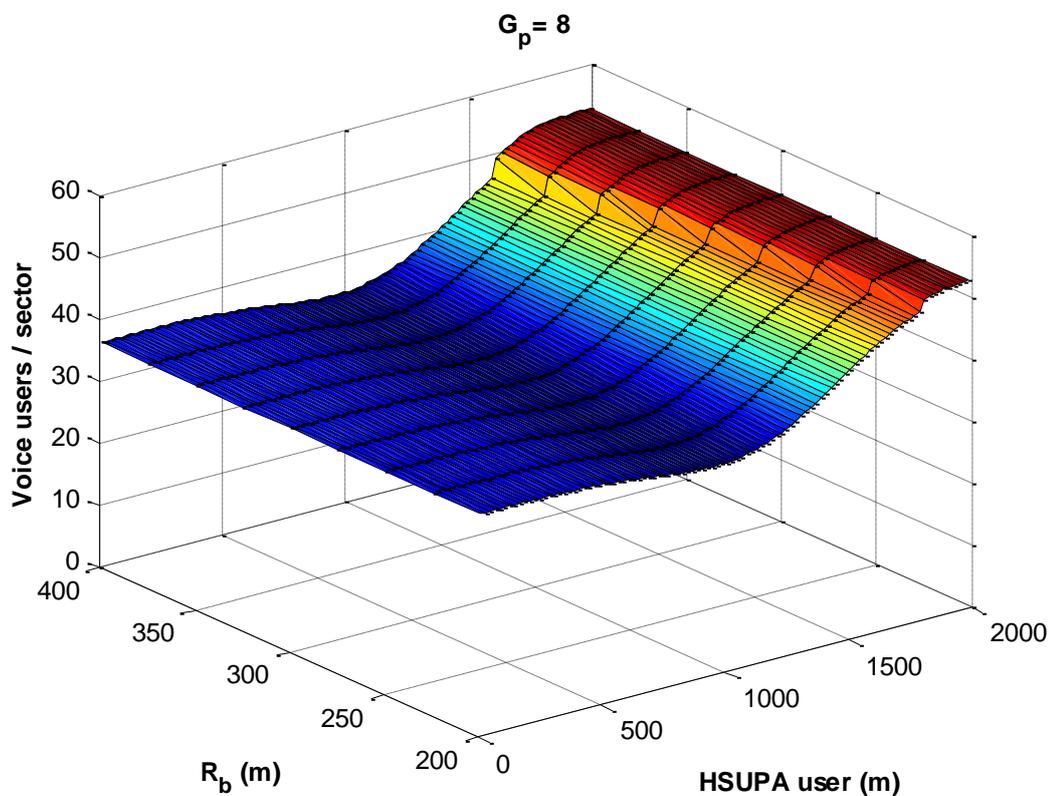


Figura 4.24 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - distancia  $R_b$

Al modificar este parámetro no se aprecia un impacto significativo sobre la capacidad del sector. A medida que aumenta  $R_b$ , aumentan las pérdidas de propagación, lo que disminuye la interferencia generada en la base y modifica ligeramente la curva de capacidad.

Las Figuras 4.25 y 4.26 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  y de la desviación típica  $\sigma_1$  de la variable aleatoria que modela el efecto shadowing.

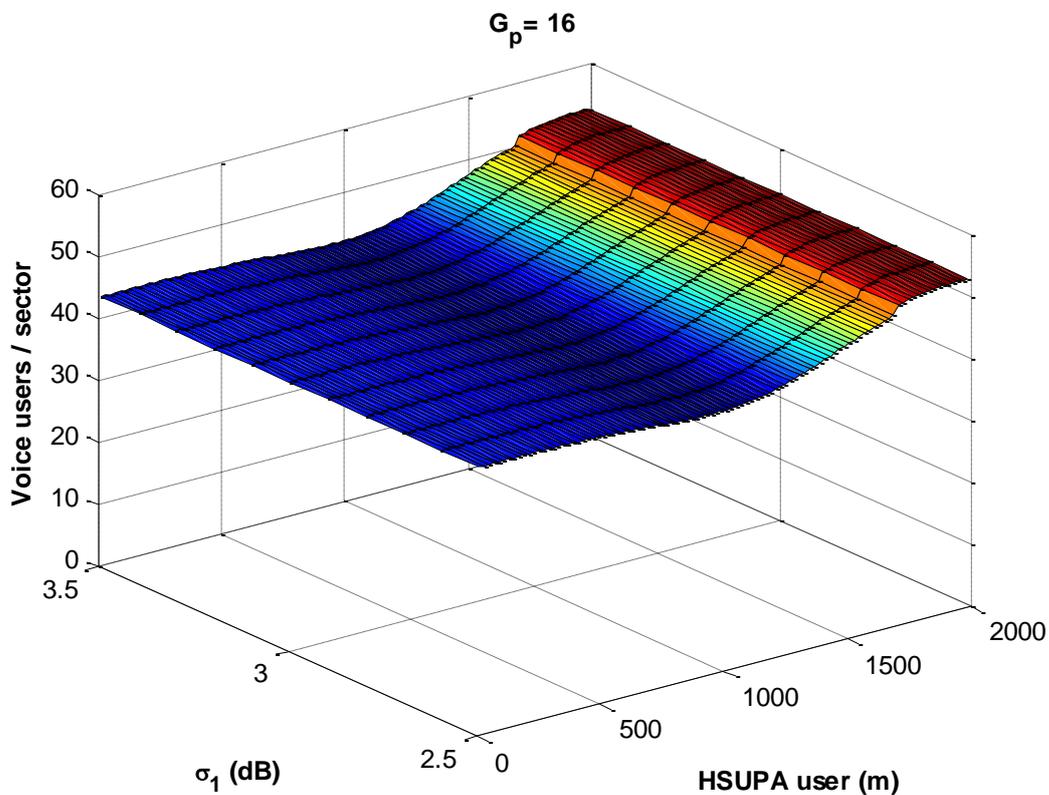


Figura 4.25 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación  $\sigma_1$

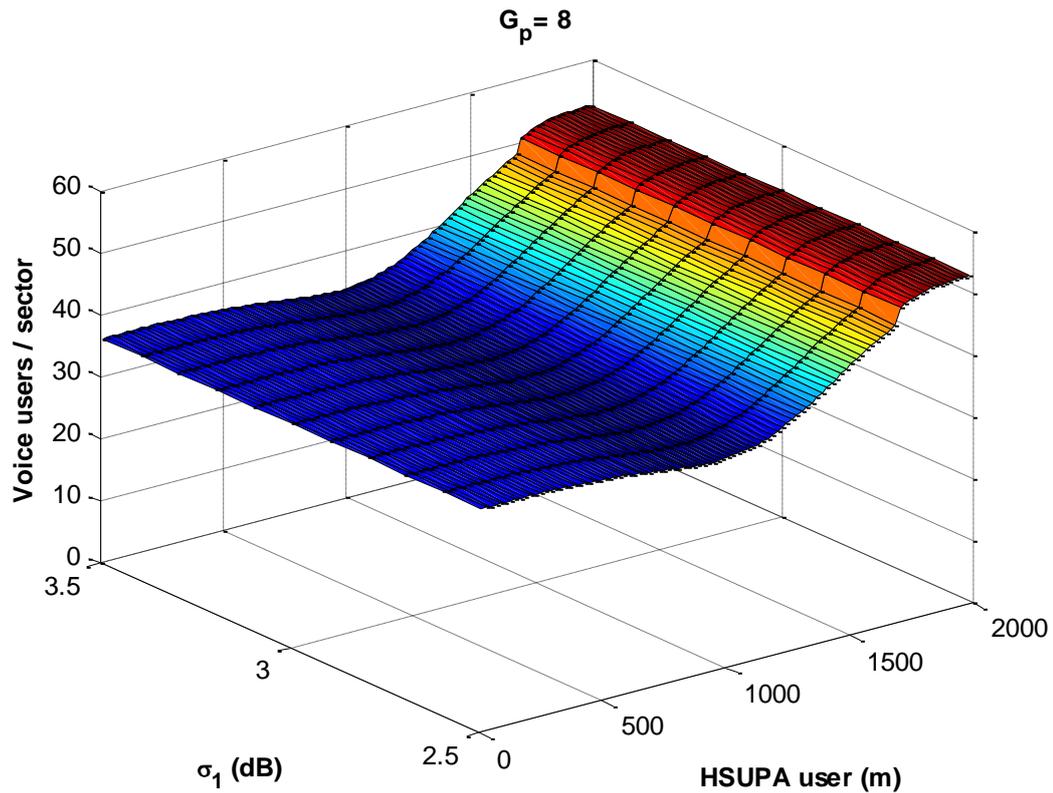


Figura 4.26 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación  $\sigma_1$

Puede apreciarse a simple vista como la desviación típica  $\sigma_1$  apenas tiene incidencia sobre la capacidad soportada.

Las Figuras 4.27 y 4.28 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  y de la desviación típica  $\sigma_2$  de la variable aleatoria que modela el efecto shadowing.

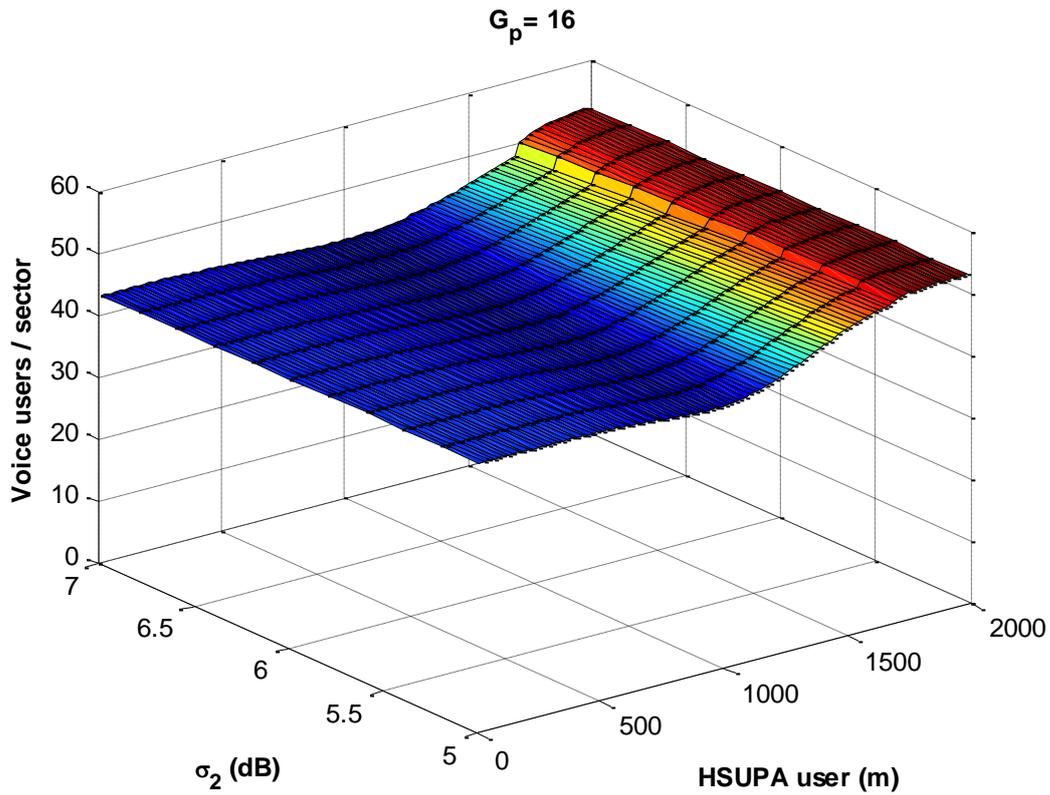


Figura 4.27 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación  $\sigma_2$

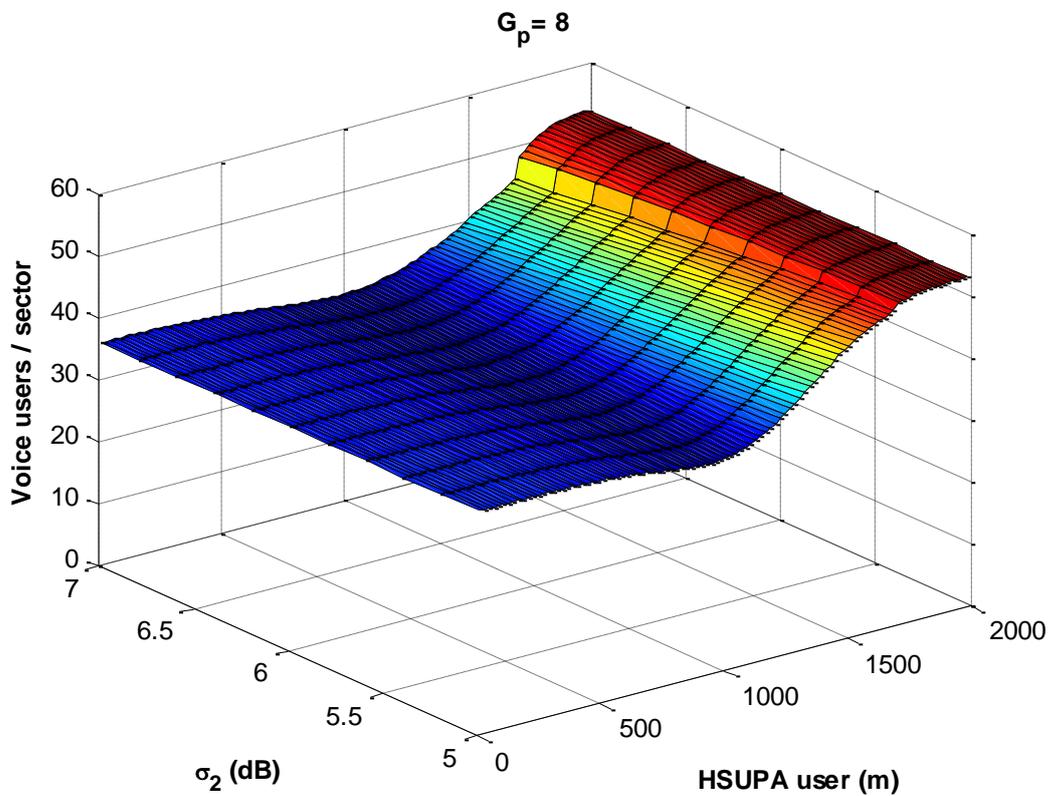


Figura 4.28 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación  $\sigma_2$

Puede apreciarse como el índice de propagación  $\sigma_2$  tampoco presenta una incidencia significativa sobre la capacidad soportada. En este caso, se obtienen capacidades ligeramente superiores para los valores más altos de  $\sigma_2$ , que incrementan el aislamiento disminuyendo la interferencia intercelular.

Sí observamos un ligero cambio en la pendiente de la curva, debido a que los índices mayores atenúan en mayor medida la interferencia generada por el usuario HSUPA y permiten un crecimiento más rápido de la capacidad a medida que el usuario se aleja.

Las Figuras 4.29 y 4.30 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  y del coeficiente de correlación inter-sites  $C_{dm}$ . Aunque de forma inapreciable a simple vista, se observa un leve aumento de la capacidad del sector para valores más altos de correlación, que disminuyen la incertidumbre al estimar la estación base a la que está conectado un terminal en función de su localización.

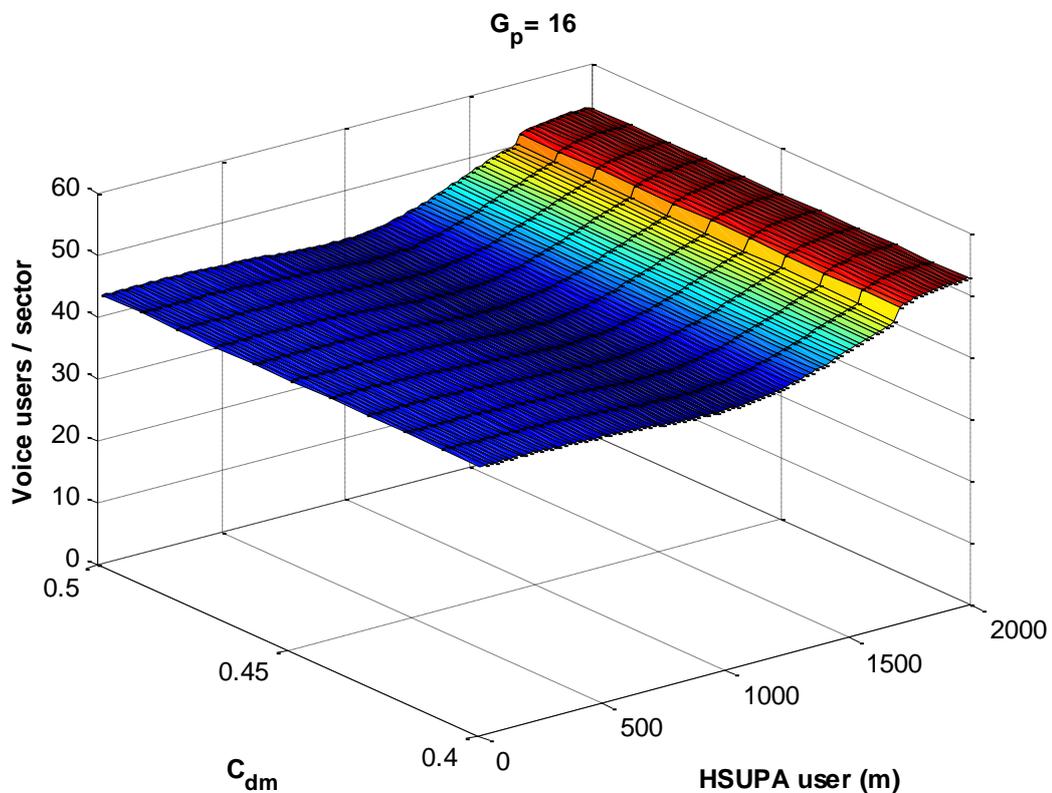


Figura 4.29 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) -  $C_{dm}$

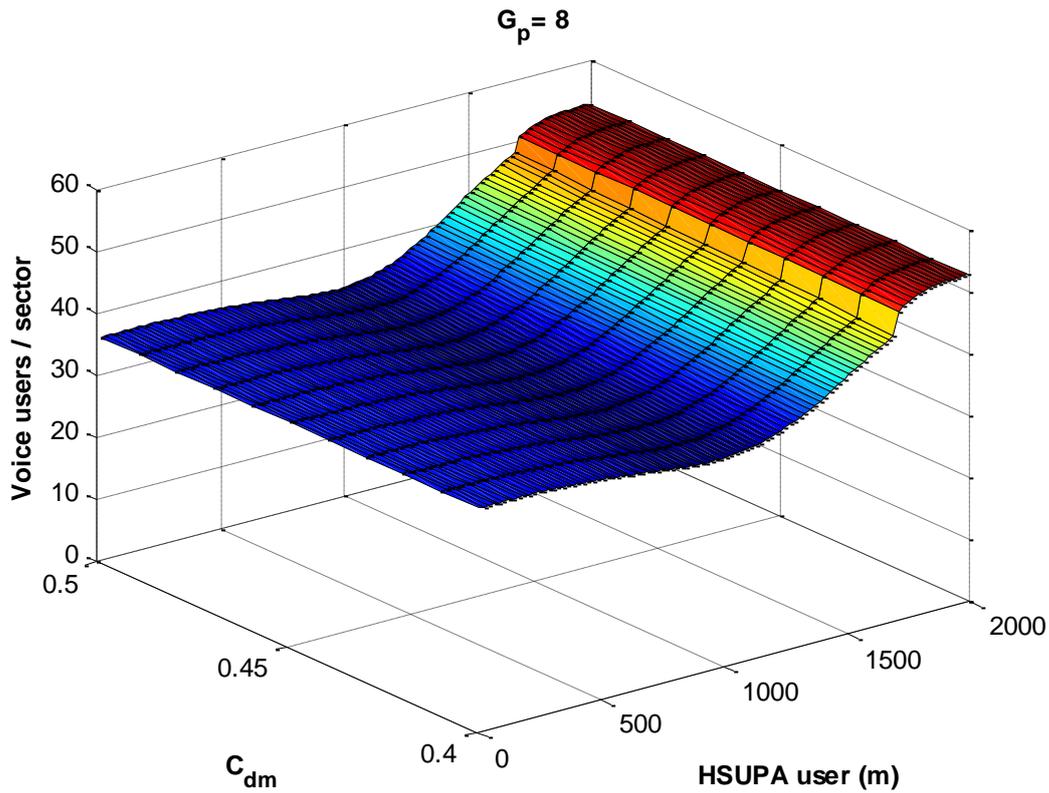


Figura 4.30 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) -  $C_{dm}$

Por último, veamos a continuación la incidencia que tiene sobre la capacidad del servicio el radio del sector. Las Figuras 4.31 y 4.32 muestran el máximo de usuarios de voz soportados con un usuario HSUPA dentro de la parte derecha de la región S0 para valores de  $R$  comprendidos entre 1000 y 1500m. En todos los casos, los valores de capacidad se muestran con el usuario HSUPA moviéndose entre  $0$  y  $2R$ .

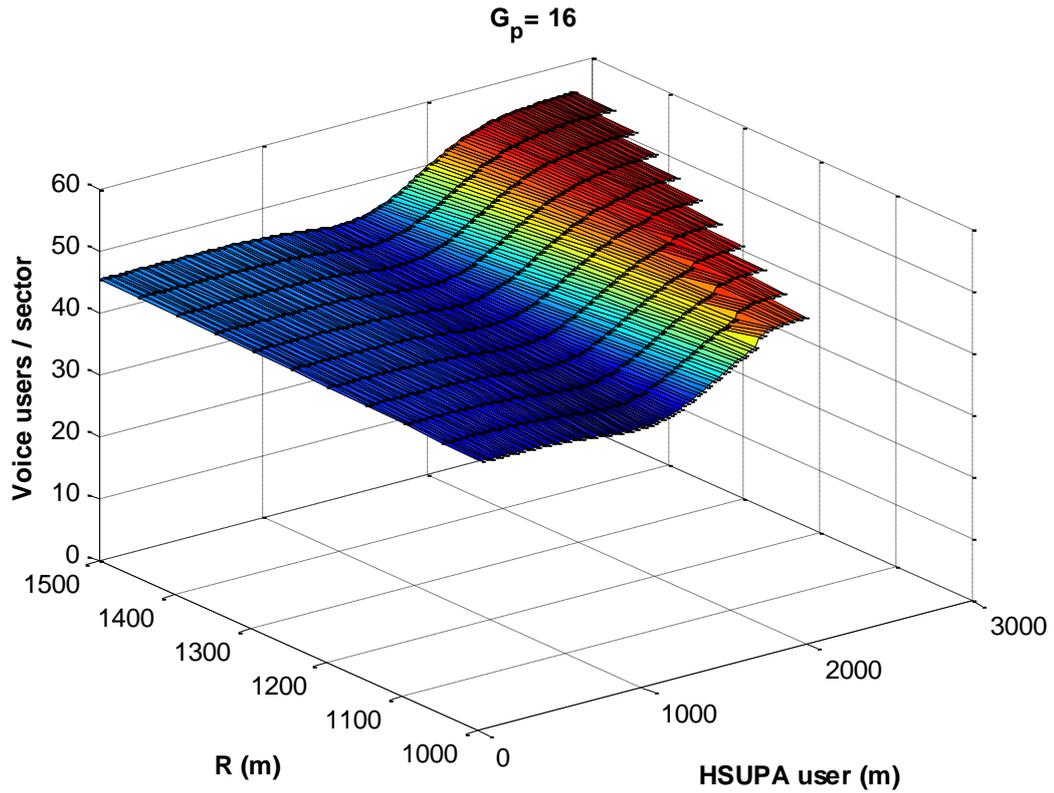


Figura 4.31 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - R

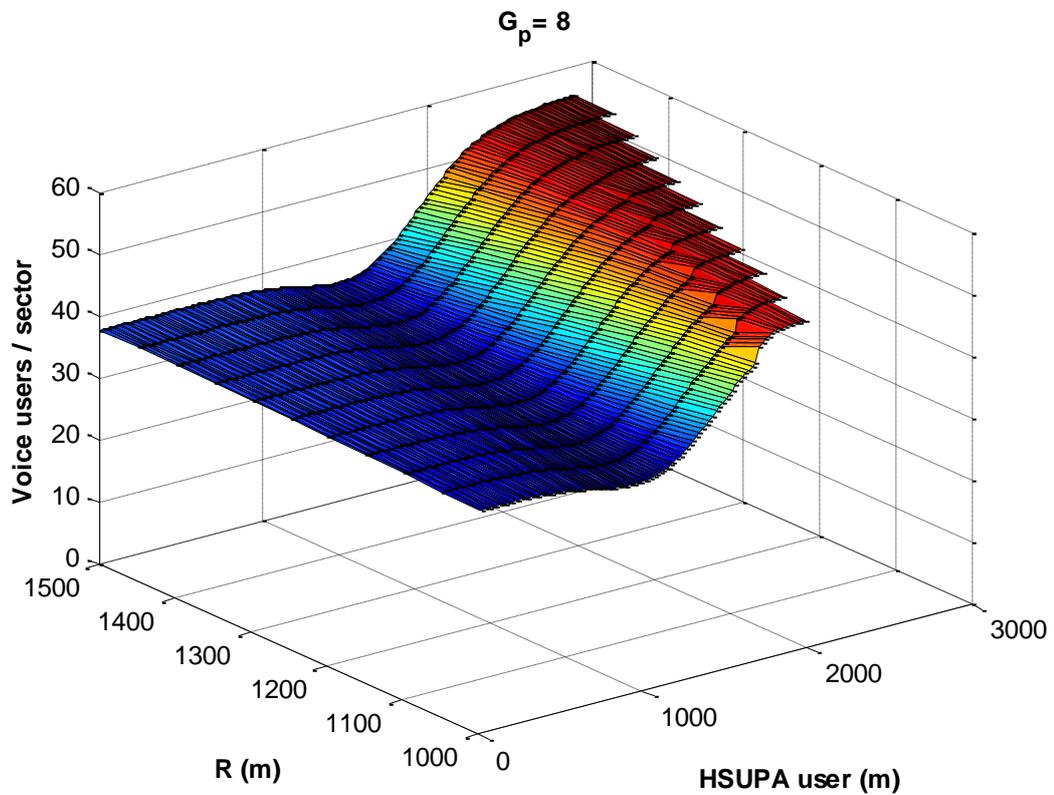


Figura 4.32 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - R

En este tipo de escenarios, debido al modelo de propagación utilizado, el radio del sector ha resultado tener mayor influencia sobre la capacidad que en el caso de autopistas. Se han realizado simulaciones para valores de  $R$  entre 1000mt y 1500mt, obteniéndose una diferencia de casi 3 usuarios a favor del mayor de los radios que, como es lógico, aumenta el aislamiento entre sectores disminuyendo la interferencia intercelular.

### 4.3.3 Servicio de datos

Pasemos ahora al servicio de datos y veamos de qué forma se ve afectado por la presencia de usuarios HSUPA. Suponemos nuevamente una distribución uniforme de los usuarios de datos con una densidad de usuarios por unidad de longitud.

La Figura 4.33 muestra la capacidad de un sector para el servicio de datos cuando este es el único servicio utilizado. Comprobamos que para una probabilidad de desbordamiento del 1% la capacidad máxima estimada es de 8 usuarios simultáneos (casi 9), ligeramente inferior a la calculada previamente para el caso de autopistas.

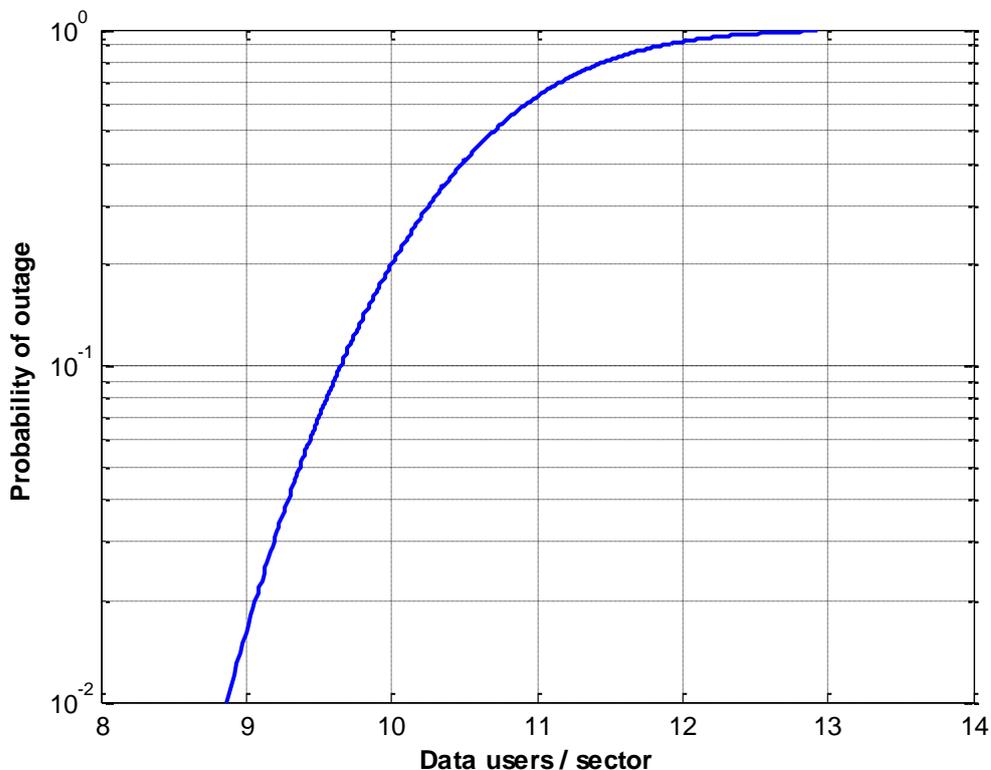


Figura 4.33 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos

Al incluir un usuario del servicio HSUPA comprobaremos como la capacidad se ve reducida significativamente. La Figura 4.34 muestra la capacidad del sector para el servicio de voz con un usuario HSUPA presente a una distancia  $d$  de la estación base de referencia. Se ha realizado la simulación para distintos valores de la ganancia de procesado.

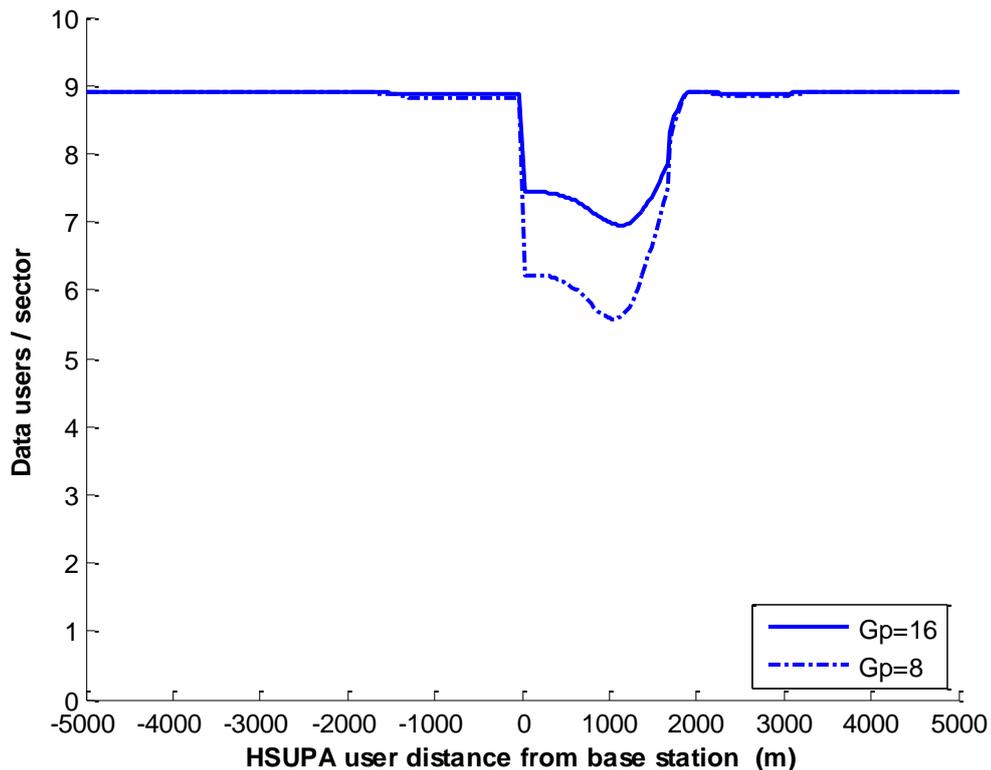


Figura 4.34 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA

Por las mismas razones expuestas anteriormente para el servicio de voz, la interferencia generada por nuestro usuario únicamente afectará significativamente al servicio de datos cuando este se encuentre entre los 0 y 2.000m, por lo que centraremos nuestro estudio en esta región. La Figura 4.35 muestra con mayor detalle la capacidad del sector para el servicio de voz con un usuario HSUPA presente en la parte derecha de la región S0. Se ha realizado la simulación para valores de la ganancia de procesado de 16 y 8.

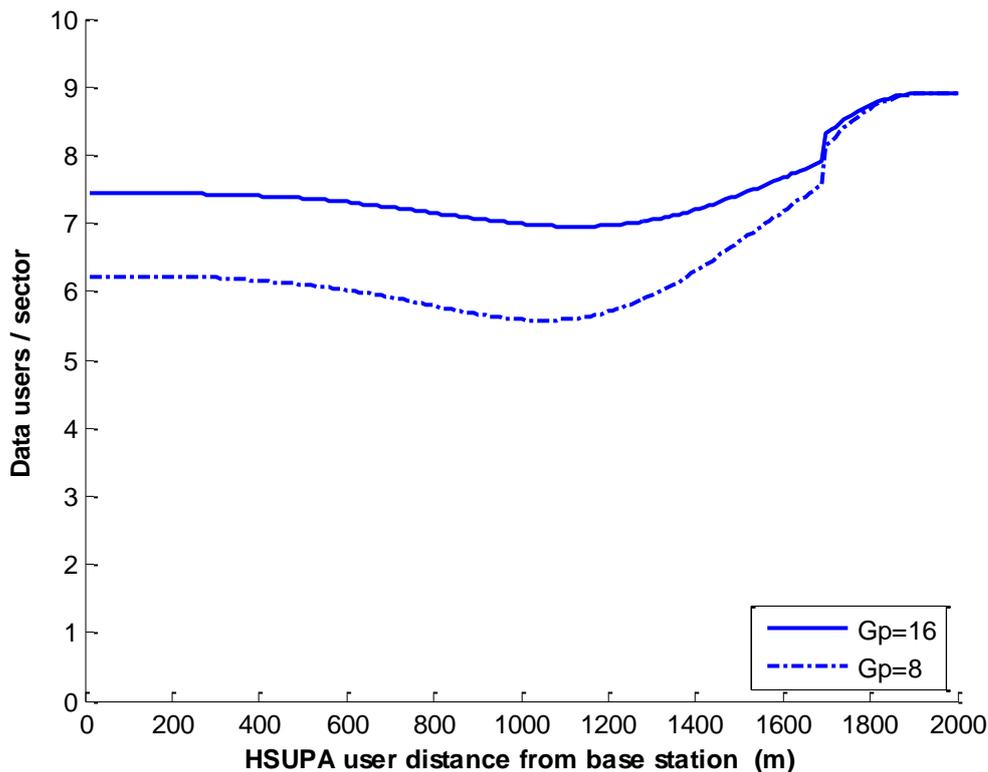


Figura 4.35 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA

Para el servicio de datos se obtienen capacidades de 7 usuarios para  $G_p=16$  y 6 usuarios para  $G_p=8$ , cuando el usuario interferente se encuentra en localizaciones próximas a la estación base de referencia. Aproximadamente a partir de los 600 mt, la capacidad comienza a disminuir de manera visible para  $G_p=8$ , alcanzando un valor mínimo de 5 usuarios cuando el usuario HSUPA se encuentra a 1050 mt. Para  $G_p=16$  la capacidad no disminuye en la misma medida, manteniéndose los 7 usuarios incluso en esas circunstancias.

A medida que el usuario interferente se aleja de la estación base bajo estudio la capacidad crece hasta llegar a los valores calculados en ausencia de otros servicios que causen interferencia.

Al igual que en otras simulaciones para túneles, puede apreciarse una discontinuidad entorno a los 1700 mt, a una distancia  $R_b$  de la segunda estación base, fruto del salto de una zona de propagación a otra.

A continuación añadiremos un segundo usuario del servicio HSUPA, también moviéndose dentro de la parte derecha de la región S0. Las Figuras 4.36 y 4.37 muestran la capacidad del sector para el servicio de datos en función de la distancia de la estación base a la que se encuentran los dos usuarios HSUPA. Para la ganancia de procesamiento se han utilizado valores de 16 y 8 respectivamente.

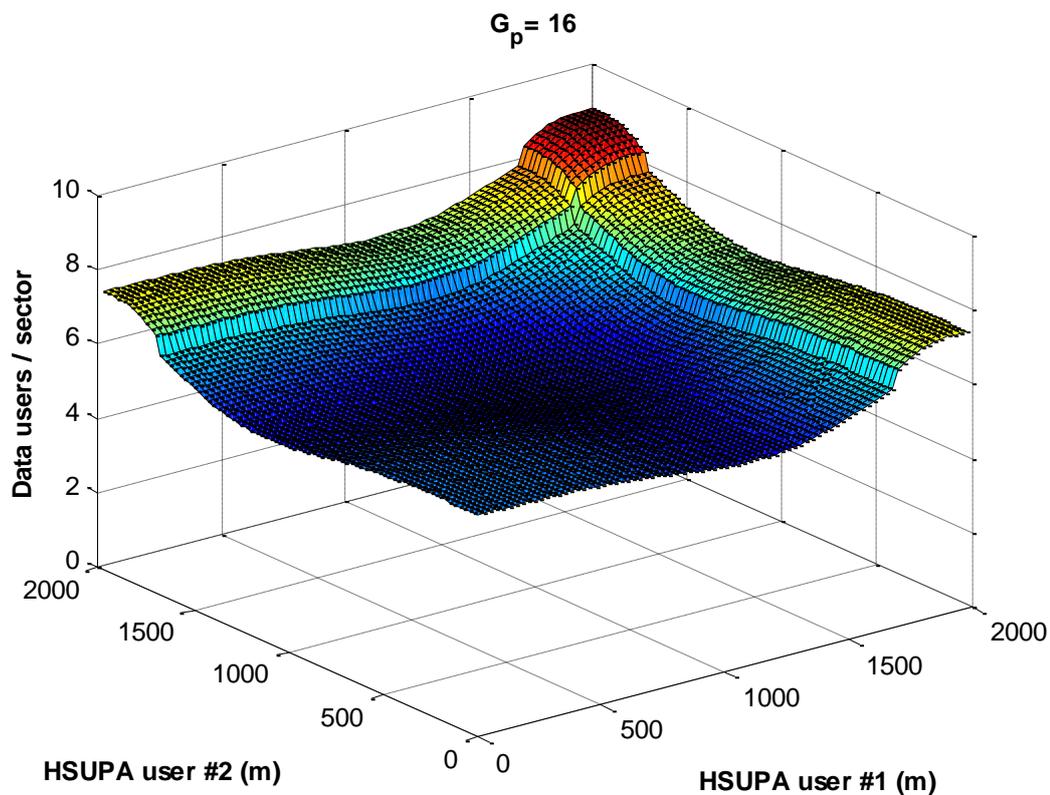


Figura 4.36 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ )

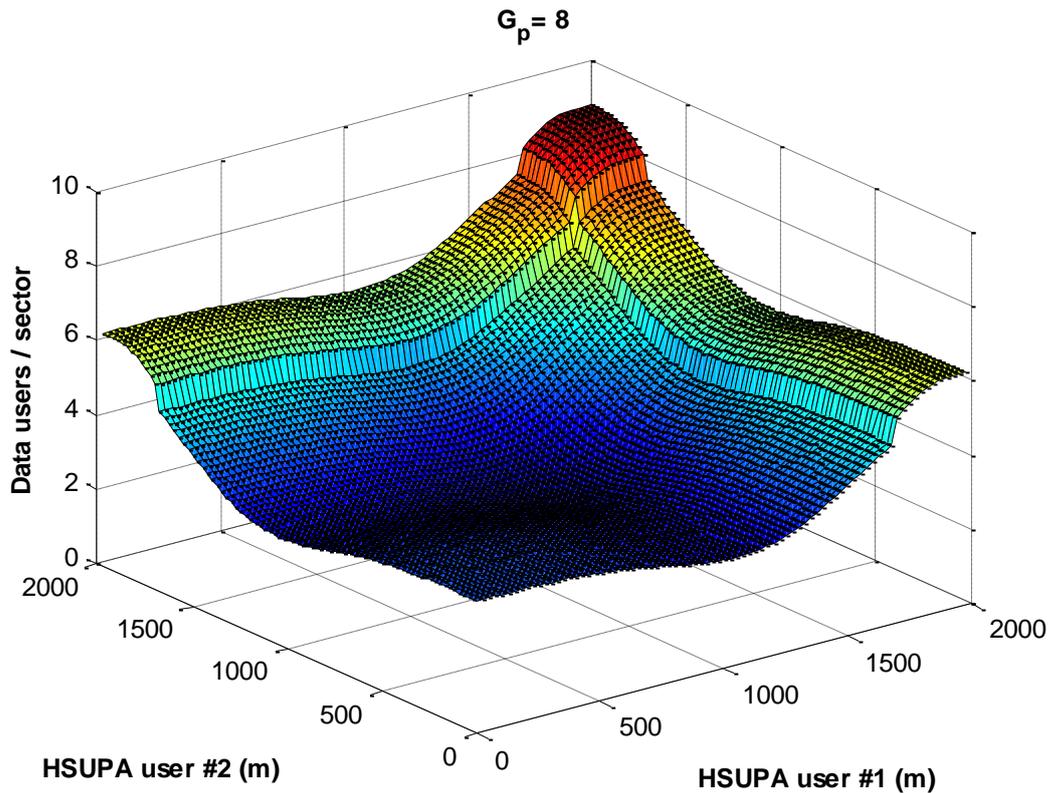


Figura 4.37 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ )

Observamos como estando uno de los usuarios en el borde de la región S0 y siendo la interferencia generada casi nula, la gráfica presenta perfiles de capacidad similares a los mostrados en la Figura 4.35.

Con ambos usuarios situados a más de 1700m, en el borde de la región S0, se obtiene la capacidad máxima de 8 usuarios. Este valor es igual al que se obtuvo para la capacidad del servicio de datos en ausencia de otros servicios, lo que indica que la interferencia generada por ambos usuarios es mínima para la antena de referencia, aunque sí estará siendo importante para el sector contiguo cuya estación base de encuentra muy próxima.

A partir de ahí la capacidad decrece a medida que los usuarios se mueven a distancias intermedias, obteniendo, cuando ambos se encuentra alrededor de 1000 mt de distancia, los valores mínimos de 5 usuarios para la ganancia de procesado 16, y 2 usuarios para la ganancia de procesado 8.

Una vez comprobada la forma en que nuestros usuarios HSUPA afectarán la capacidad del servicio de datos, estudiaremos como el resto de parámetros del modelo de propagación presentado afectan a este valor.

Las Figuras 4.38 y 4.39 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  que separe nuestro usuario HSUPA de la estación base de referencia y del parámetro  $\gamma$ . Recordemos que en el modelo de propagación híbrido propuesto utilizamos un modelo de casi espacio libre con índice de propagación  $\gamma$  hasta una distancia  $R_b$ .

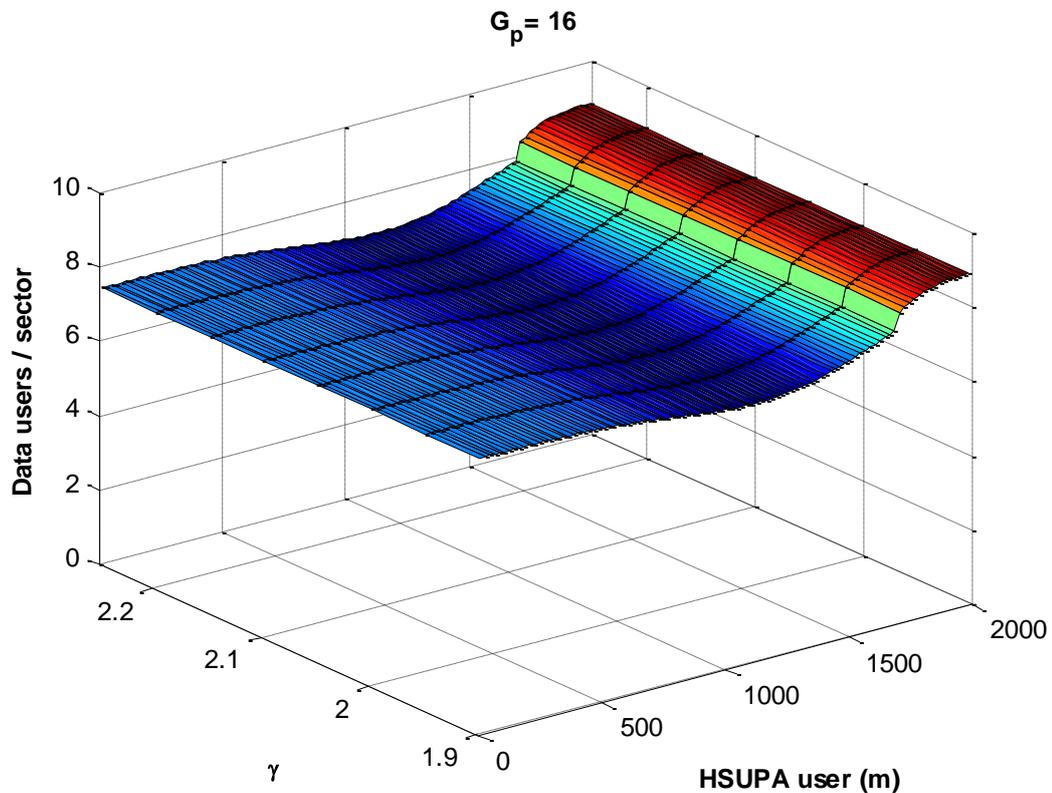


Figura 4.38 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - índice  $\gamma$

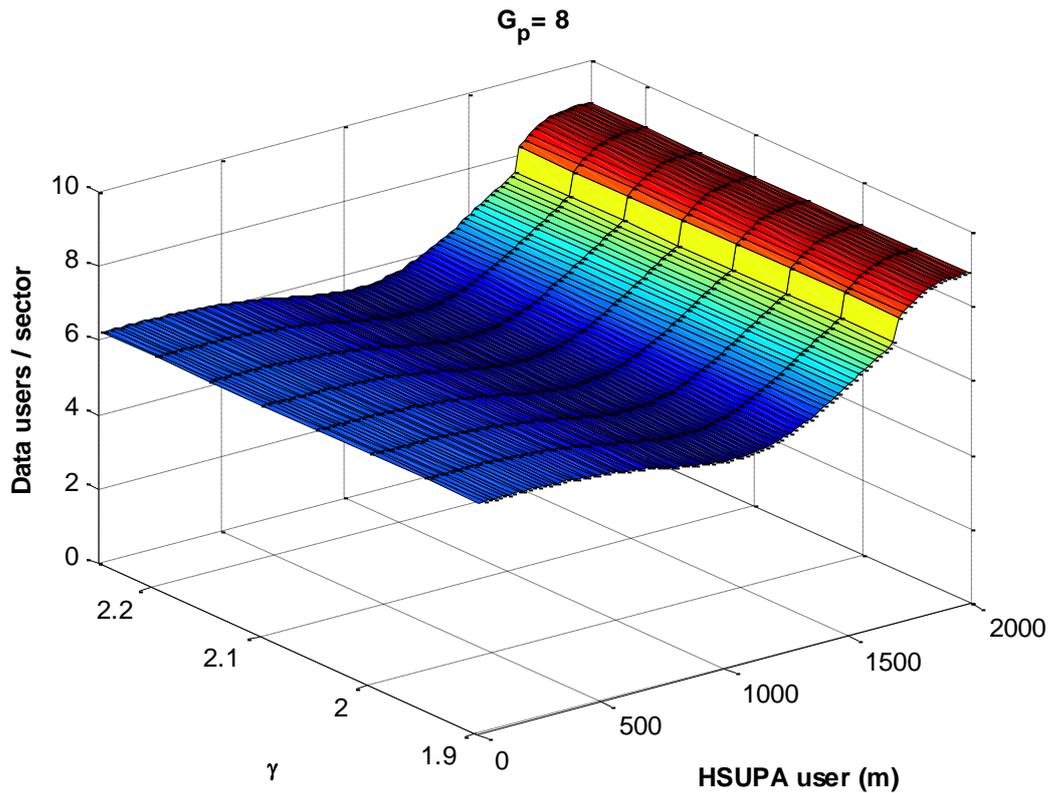


Figura 4.39 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - índice  $\gamma$

Las variaciones del índice de propagación  $\gamma$  aplicado en el primer tramo no parecen tener una incidencia apreciable sobre la capacidad del sector. Recordemos que en estas simulaciones se ha utilizado un valor  $R_b=300mt$ .

Analicemos a continuación la incidencia del otro parámetro de propagación. Las Figuras 4.40 y 4.41 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  que separe nuestro usuario HSUPA de la estación base de referencia y del parámetro  $n$ . Recordemos que en el modelo de propagación híbrido propuesto utilizamos un modelo de guía de onda con una atenuación específica de  $n$  dB/m a partir de una distancia  $R_b$ .

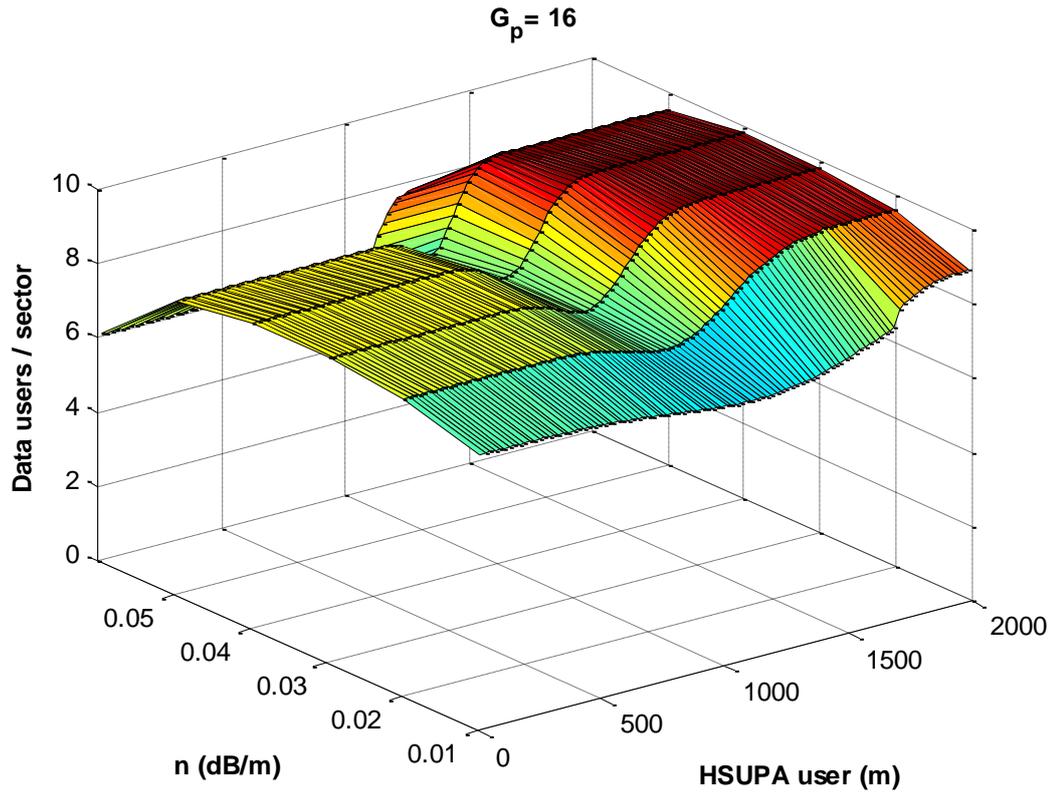


Figura 4.40 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - atenuación  $n$

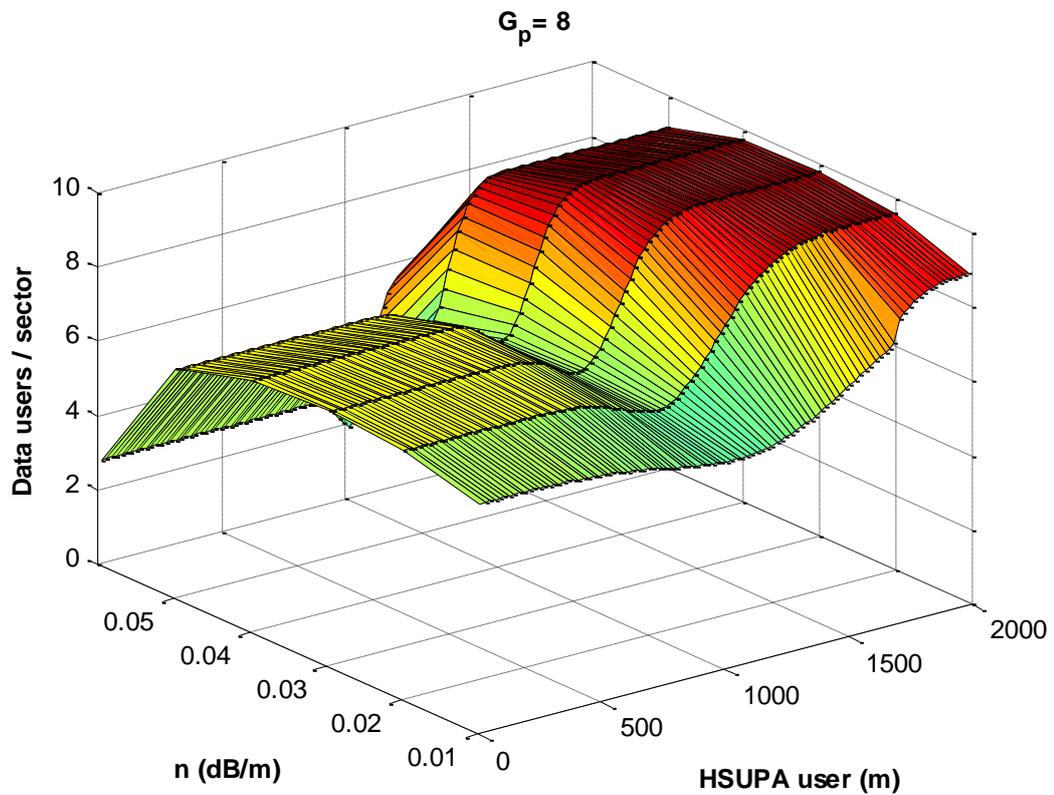


Figura 4.41 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - atenuación  $n$

Para las variaciones de la atenuación específica de la guía de onda imaginaria, los valores mayores permiten un mayor aislamiento de las dos zonas, disminuyendo la interferencia intracelular generada y beneficiando así la capacidad del servicio de datos.

En general, esto se cumplirá para los valores que habitualmente encontraremos en la realidad. Más allá, cuando este parámetro sobrepasa los  $0,04\text{dB/m}$ , las elevadas pérdidas de propagación en el uplink provocan una importante disminución de la potencia recibida en la estación base bajo estudio. Como consecuencia de esto, a pesar de la importante disminución de la interferencia intercelular, se produce una caída drástica de la capacidad. Tomando como referencia los valores máximos obtenidos, que se obtienen cuando el usuario HSUPA se encuentra más alejado, encontramos capacidades de hasta 9 usuarios con  $n=0,03\text{dB/m}$ , decreciendo a partir de ese valor hasta los 7 usuarios calculados para  $n=0,06\text{dB/m}$ .

Las Figuras 4.42 y 4.43 muestran la capacidad del sector en función de la distancia  $R_b$  escogida. Aquí volvemos a encontrar una situación parecida a la de la figura anterior. Al modificar la distancia, variamos la incidencia de cada uno de los índices de propagación. A medida que aumentamos  $R_b$ , aumentamos las pérdidas de propagación, lo que disminuye la interferencia intercelular generada en la base y modifica ligeramente la curva de capacidad. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento 16 y 8.

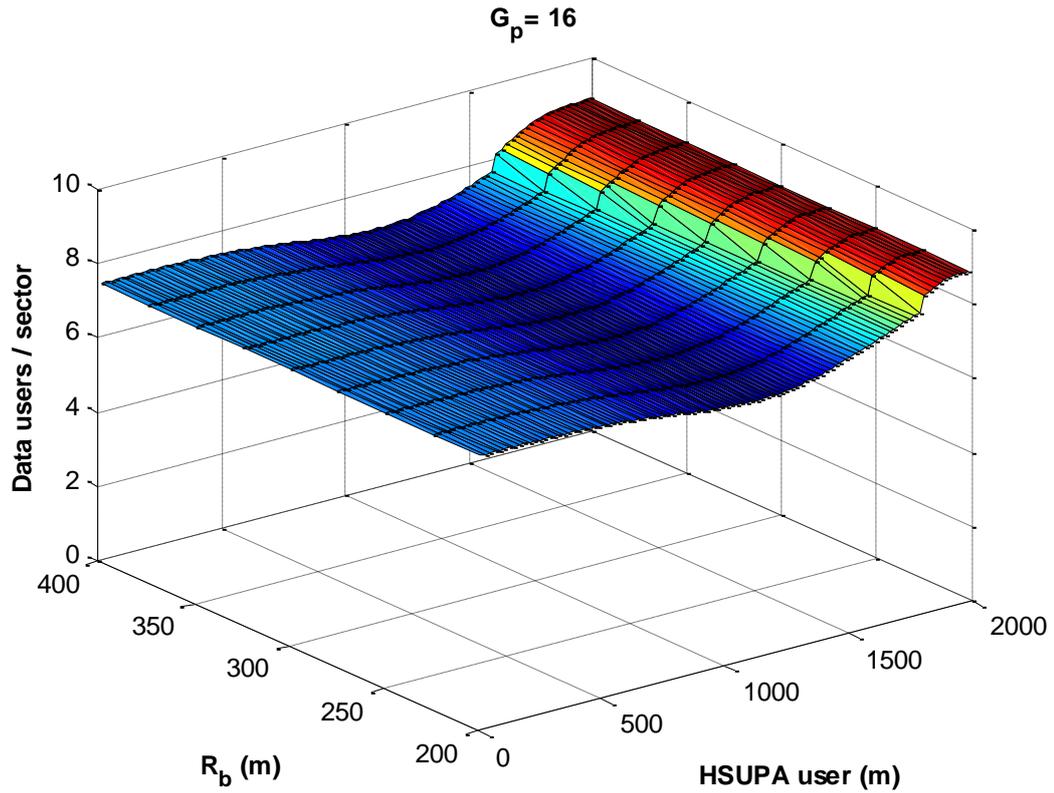


Figura 4.42 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - distancia  $R_b$

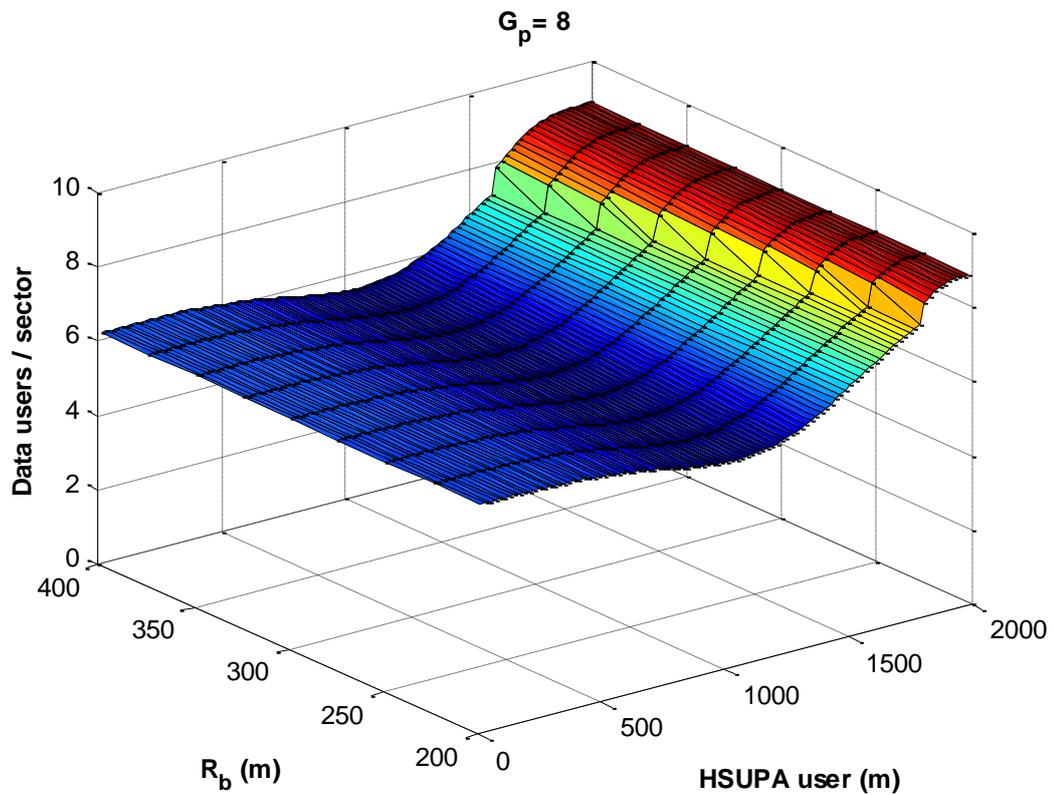


Figura 4.43 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - distancia  $R_b$

Al modificar este parámetro no se aprecia un impacto significativo sobre la capacidad del sector. A medida que aumenta  $R_b$ , aumentan las pérdidas de propagación, lo que disminuye la interferencia generada en la base y modifica ligeramente la curva de capacidad.

Las Figuras 4.44 y 4.45 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  y de la desviación típica  $\sigma_1$  de la variable aleatoria que modela el efecto shadowing.

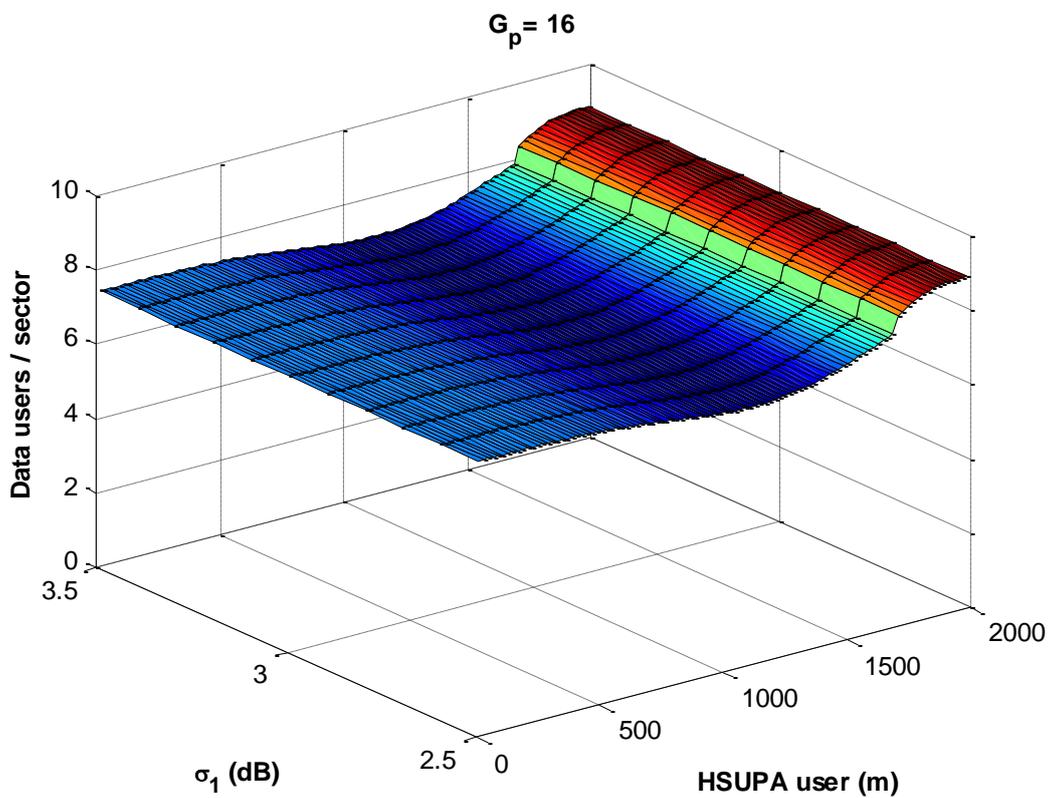


Figura 4.44 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación  $\sigma_1$

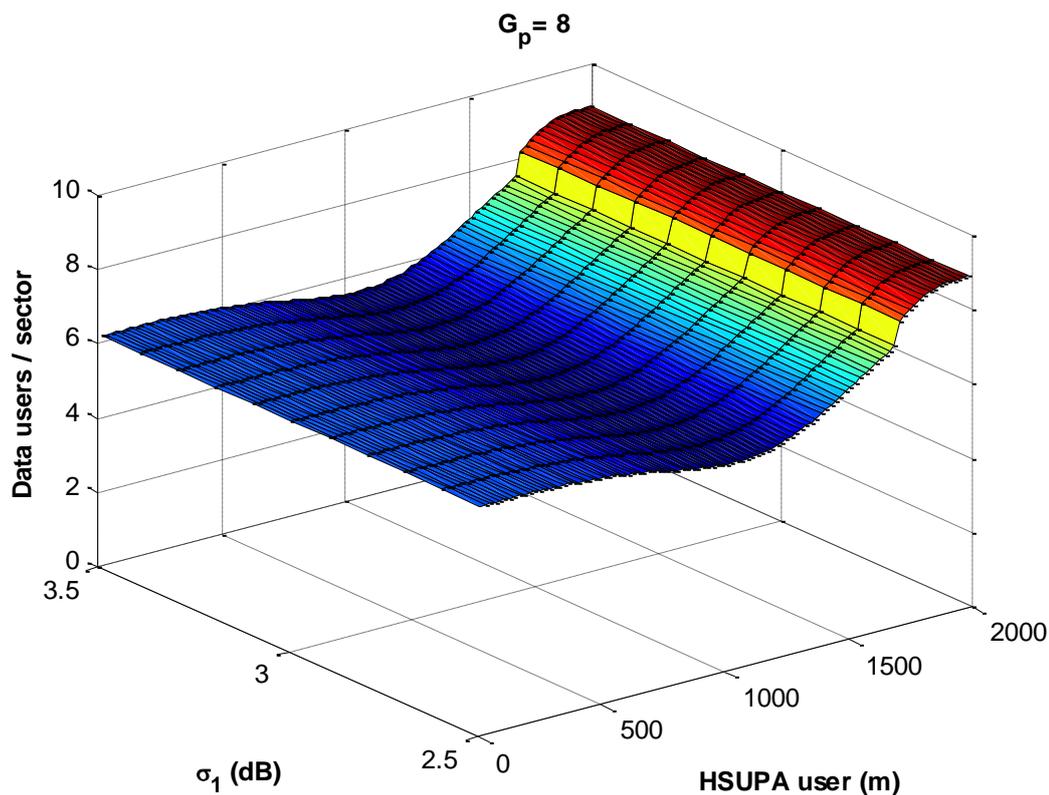


Figura 4.45 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación  $\sigma_1$

A la vista de los resultados obtenidos, las variaciones del parámetro  $\sigma_1$  no han mostrado una influencia significativa sobre la capacidad del sector, obteniéndose valores prácticamente idénticos para cada uno de los valores simulados.

Las Figuras 4.46 y 4.47 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la distancia  $d$  y de la desviación típica  $\sigma_2$  de la variable aleatoria que modela el efecto shadowing.

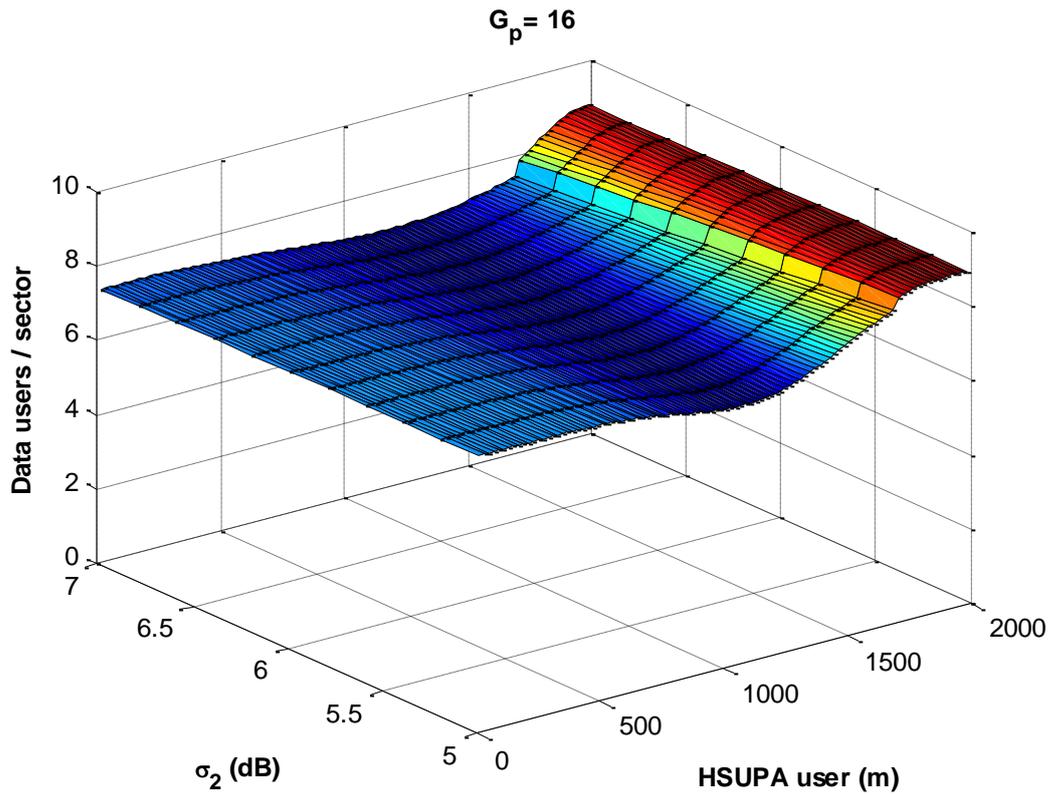


Figura 4.46 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) - desviación  $\sigma_2$

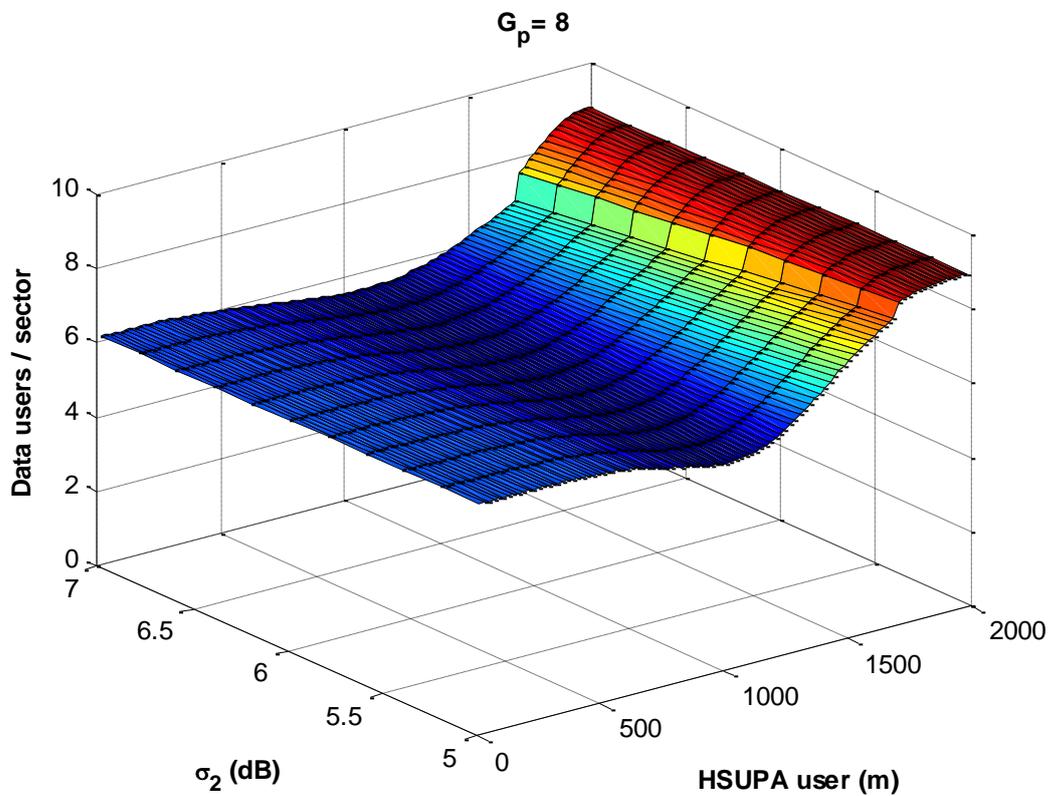


Figura 4.47 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) - desviación  $\sigma_2$

A la vista de los resultados obtenidos, las variaciones del parámetro  $\sigma_2$  no han mostrado una influencia significativa sobre la capacidad del sector, obteniéndose valores prácticamente idénticos para cada uno de los valores simulados.

Las Figuras 4.48 y 4.49 muestran la capacidad del servicio de datos en función de la distancia  $d$  y del coeficiente de correlación inter-sites  $C_{dm}$ . Aunque de forma inapreciable a simple vista, se observa un leve aumento de la capacidad del sector para valores más altos de correlación, que disminuyen la incertidumbre al estimar la estación base a la que está conectado un terminal en función de su localización.

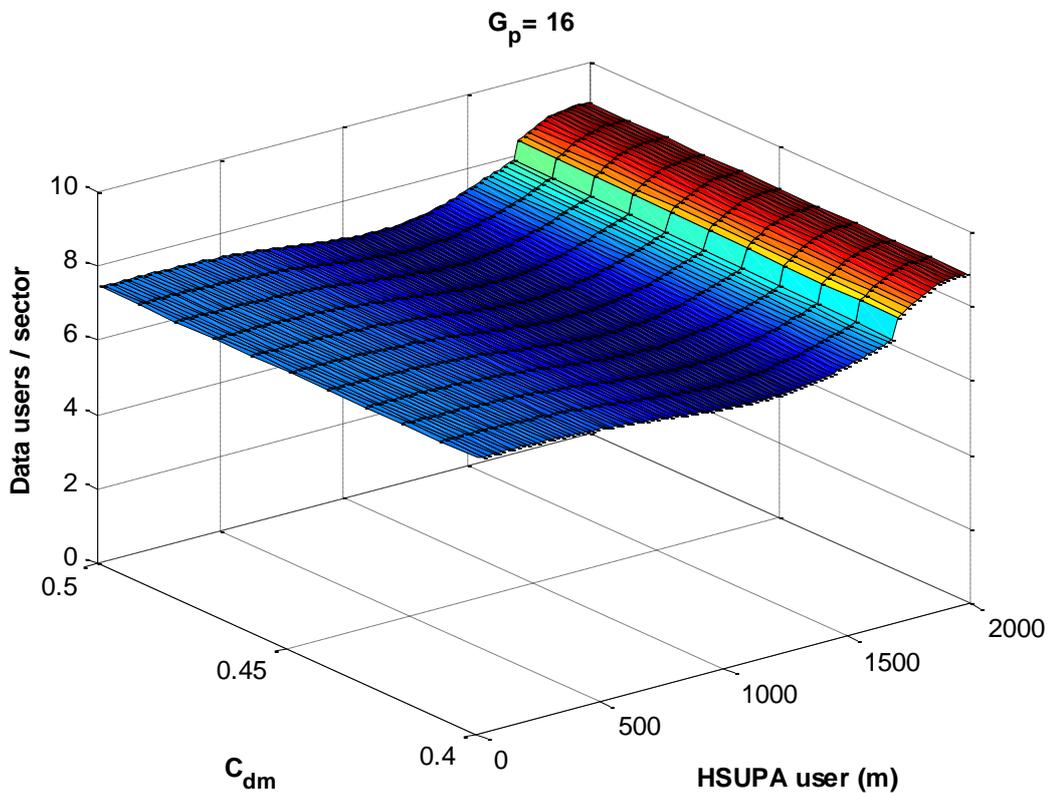


Figura 4.48 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) -  $C_{dm}$

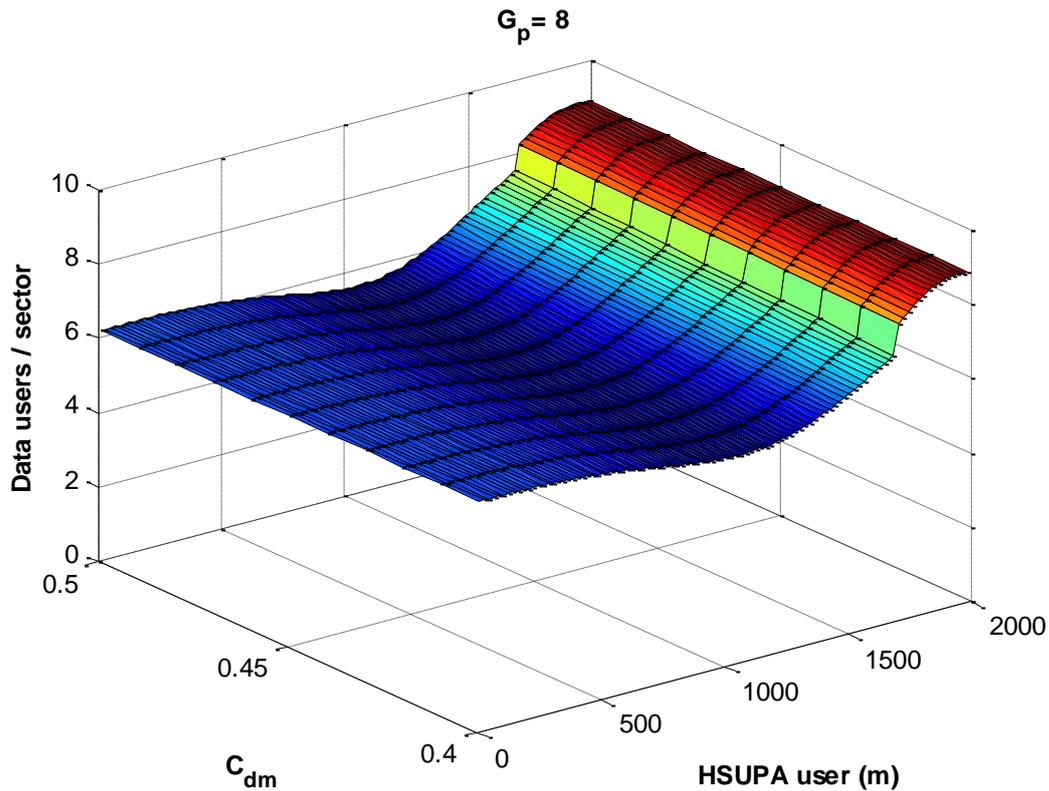


Figura 4.49 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) -  $C_{dm}$

Por último, veamos a continuación la incidencia que tiene sobre la capacidad del servicio el radio del sector. Las Figuras 4.50 y 4.51 muestran el máximo de usuarios de datos soportados con un usuario HSUPA dentro de la parte derecha de la región S0 para valores de  $R$  comprendidos entre 1000 y 1500m. En todos los casos, los valores de capacidad se muestran con el usuario HSUPA moviéndose entre 0 y  $2R$ .

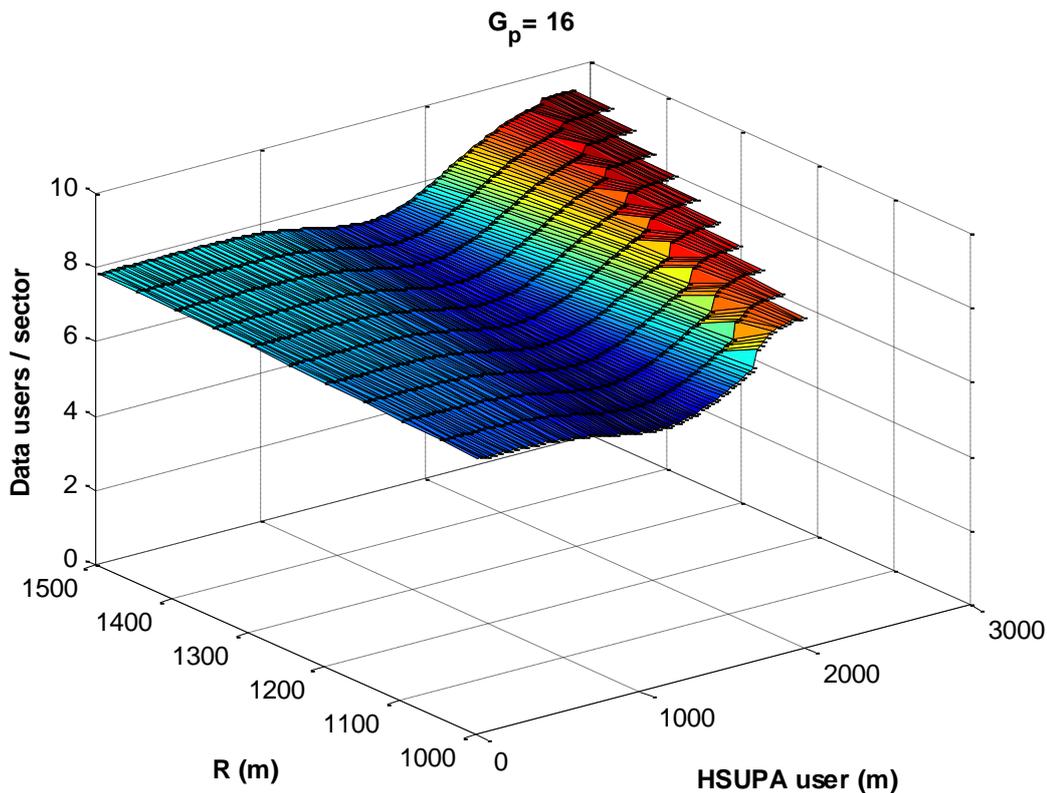


Figura 4.50 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) -  $R$

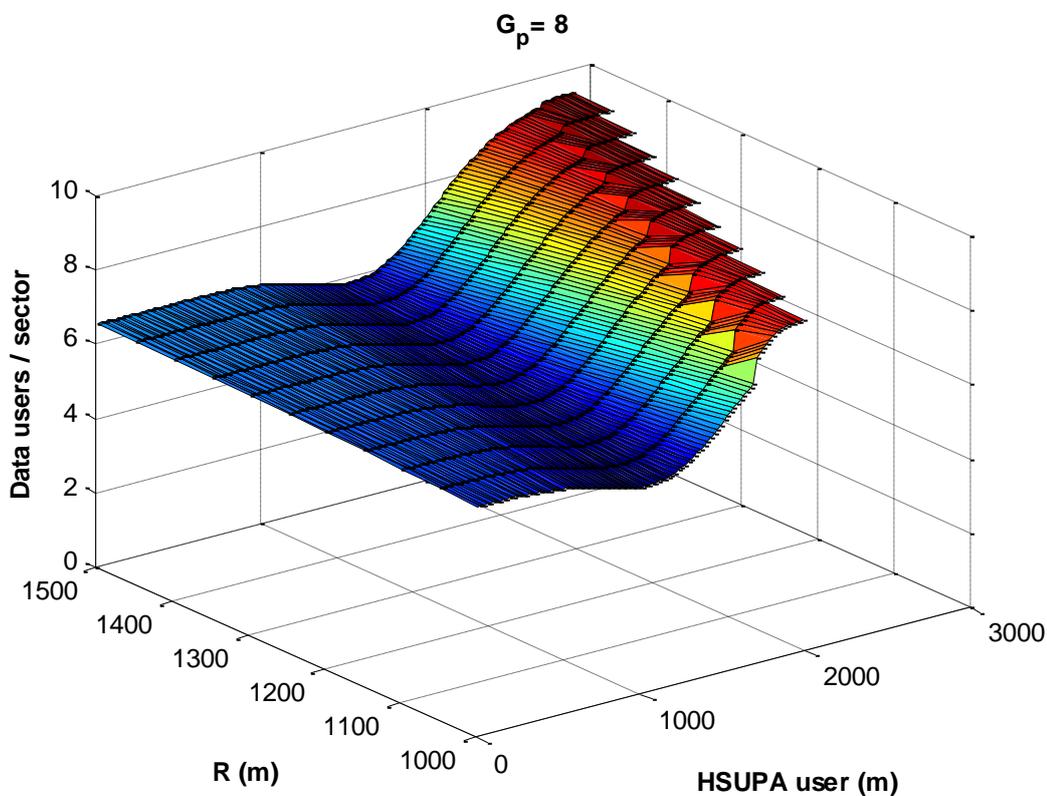


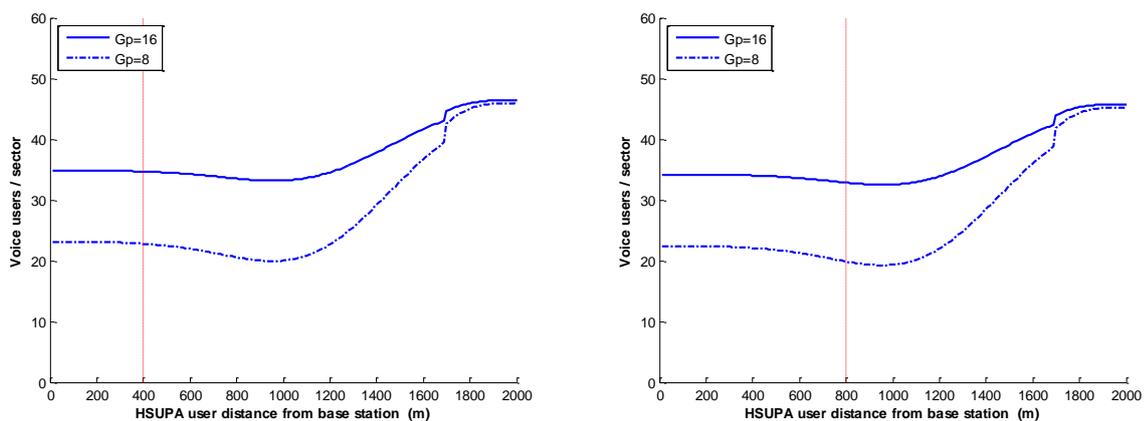
Figura 4.51 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) -  $R$

En este tipo de escenarios, debido al modelo de propagación utilizado, el radio del sector ha resultado tener mayor influencia sobre la capacidad que en el caso de autopistas. Se han realizado simulaciones para valores de  $R$  entre 1000m y 1500m, obteniéndose una diferencia de 1 usuario a favor del mayor de los radios que, como es lógico, aumenta el aislamiento entre sectores disminuyendo la interferencia intercelular.

### 4.3.4 Voz, datos y HSUPA

En los apartados anteriores se ha estudiado de qué forma el servicio HSUPA afecta a los servicios de voz y datos. A continuación estudiaremos un caso más aproximado a lo que encontraremos en la realidad que mezcla usuarios de voz, datos y datos de alta velocidad.

Para comenzar, nuestro sector tendrá 1 usuario HSUPA, 1 usuarios de datos R99 en 4 localizaciones distintas (identificadas mediante las líneas verticales rojas) y un número indeterminado de usuarios del servicio de voz cuya capacidad se desea calcular. Las gráficas de la Figura 4.52 presentan los resultados obtenidos para la capacidad del servicio de voz.



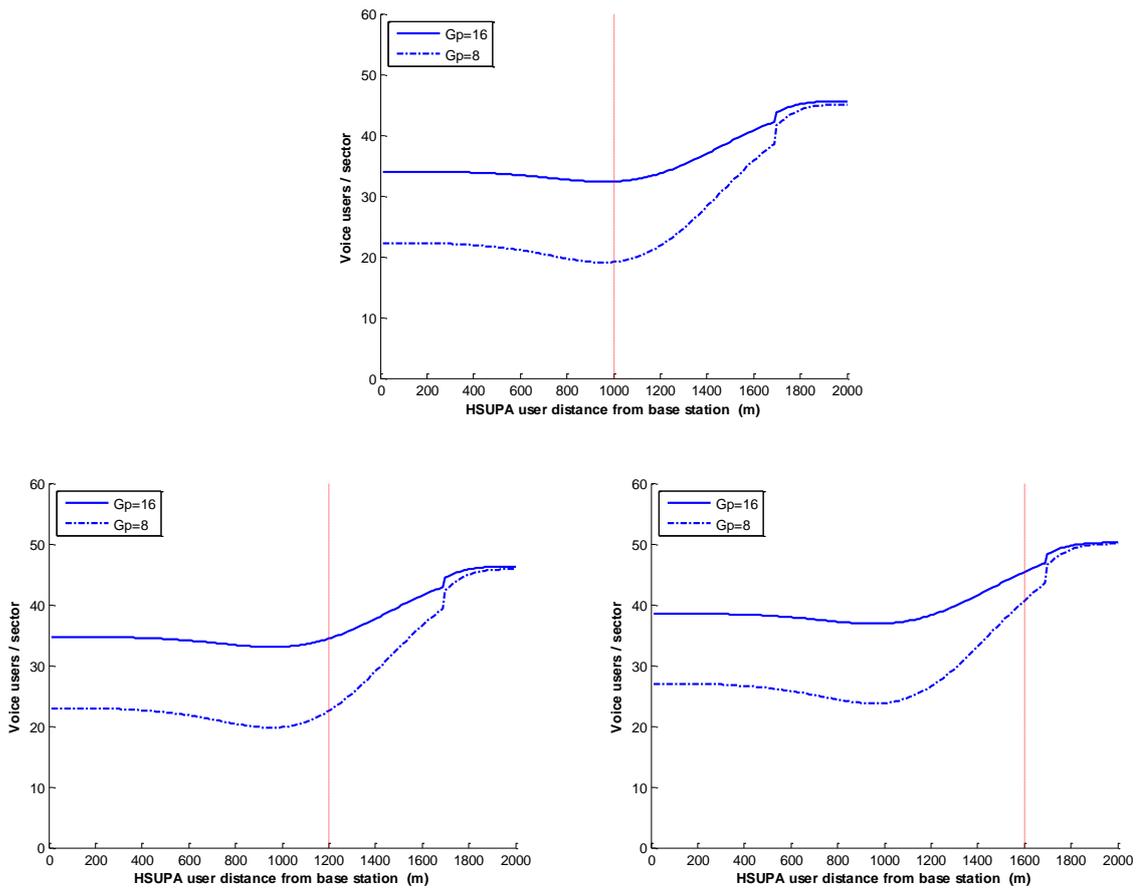


Figura 4.52 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 1 usuario datos R99

Los gráficos presentan una forma parecida a la Figura 4.16, donde no se tenía en cuenta la presencia del usuario de datos R99. Cuando este usuario se encuentra cercano a la estación base bajo estudio, a 400 mt, los resultados obtenidos han sido de 34 usuarios de voz para  $G_p=16$  y 23 usuarios para  $G_p=8$ , estando el usuario del servicio HSUPA a una distancia de menos de 400 mt de la antena receptora. A partir de ese punto la capacidad disminuye, obteniéndose los valores mínimos de 33 usuarios para  $G_p=16$  y 19 usuarios para  $G_p=8$  cuando el usuario HSUPA se encuentra a 980 mt, casi en el borde del sector. Cuando el usuario del servicio de datos de alta velocidad se aleja, los valores de capacidad crecen hasta alcanzar un máximo de 45 usuarios. Las capacidades descritas suponen una reducción de 7-8 usuarios con respecto a las calculadas en ausencia del usuario de datos R99.

El caso peor es aquel en el que el usuario de datos R99 se encuentra distanciado 800 mt de la estación base con valores ligeramente inferiores a los descritos anteriormente.

En la tercera figura, el usuario se encuentra a 1.200 mt y las capacidades obtenidas son ya significativamente mayores. Con este usuario situado a 1.600 mt, la interferencia generada por el sobre la antena receptora es menor en comparación con la generada por otros usuarios, y los valores obtenidos son 2 – 3 usuarios inferiores los calculados previamente en ausencia de este usuario.

A continuación, añadiremos dentro de la región S0 un usuario adicional del servicio de datos R99. Las gráficas de la Figura 4.53 presentan los resultados obtenidos para la capacidad del servicio de voz.

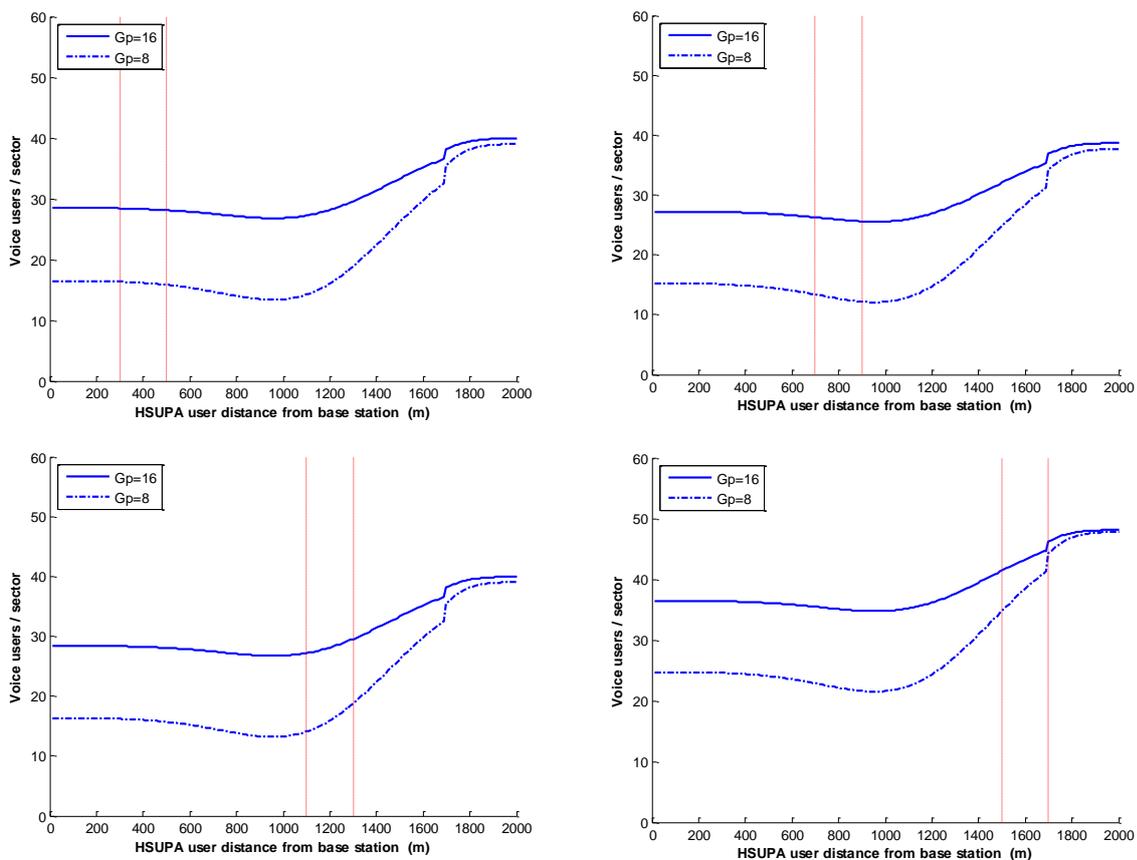


Figura 4.53 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 2 usuarios datos R99

Cuando los usuarios del servicio de datos tradicional se encuentran próximos a la estación base bajo estudio, alrededor de los 400 mt, la capacidad para el servicio de voz se ve reducida entorno a 8 usuarios con respecto a los resultados presentados en la Figura 4.16.

Al igual que sucedía anteriormente, los peores resultados se obtienen cuando los usuarios de datos R99 están alejados alrededor de 800 mt de la antena receptora.

En la tercera gráfica, los usuarios se encuentran alrededor de 1.200 mt y las capacidades obtenidas son ya significativamente mayores. Con estos usuarios situados alrededor de 1.600 mt, la interferencia generada por el sobre la antena receptora es mínima en comparación con la generada por otros usuarios, y los resultados obtenidos son inferiores en 6 usuarios a los calculados previamente sin usuarios de datos R99 interfiriendo.

A continuación, añadiremos dentro de la región S0 un tercer usuario del servicio de datos R99. Las gráficas de la Figura 4.54 presentan los resultados obtenidos para la capacidad del servicio de voz.

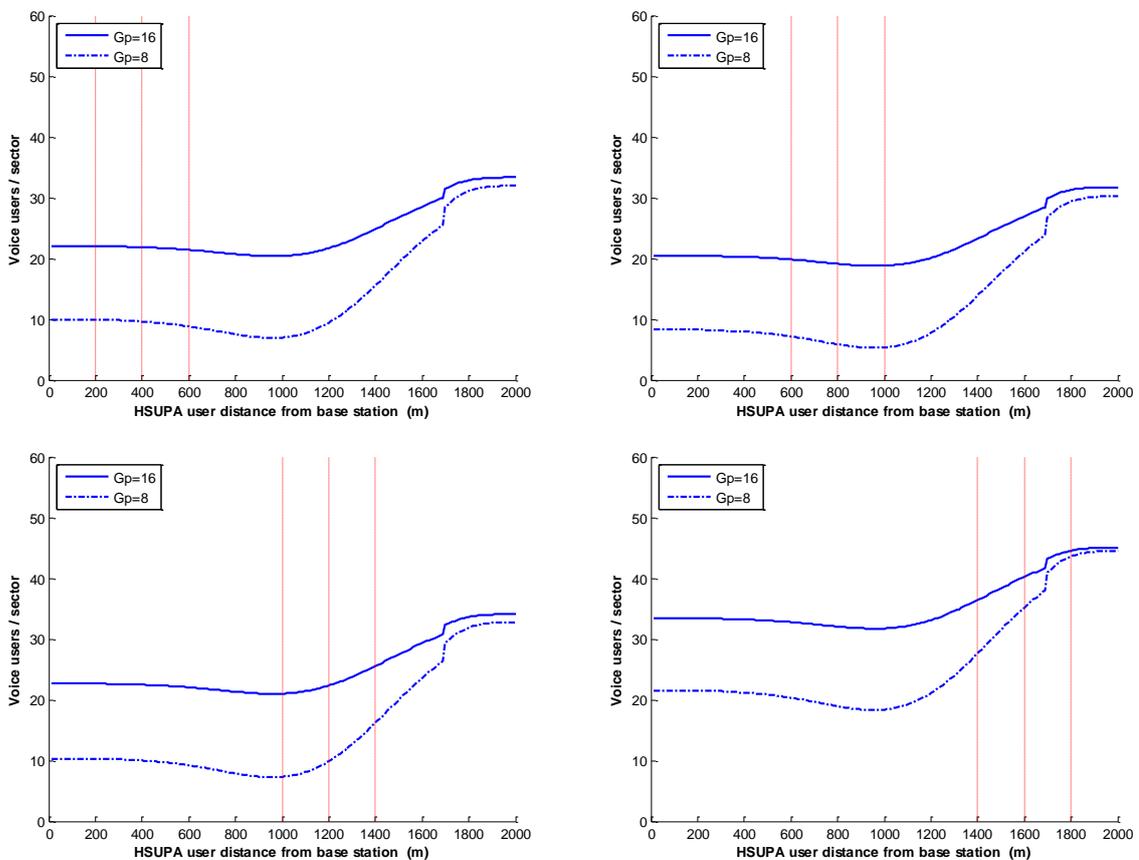


Figura 4.54 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 3 usuarios datos R99

Cuando los 3 usuarios del servicio de datos tradicional se encuentran próximos a la antena receptora, la interferencia que generan supone una reducción en la capacidad del servicio de voz de aproximadamente 20 usuarios con respecto a los resultados obtenidos en ausencia de estos.

A distancias más alejadas la reducción de la capacidad es menor, siendo esta de aproximadamente 8 usuarios cuando los usuarios de datos se encuentra alrededor de los 1.600 mt de la estación base bajo estudio.

Por último, se ha realizado la misma simulación con 4 usuarios del servicio de datos R99 dentro de la región S0. Las Figuras 4.55 presentan los resultados obtenidos para la capacidad del servicio de voz.

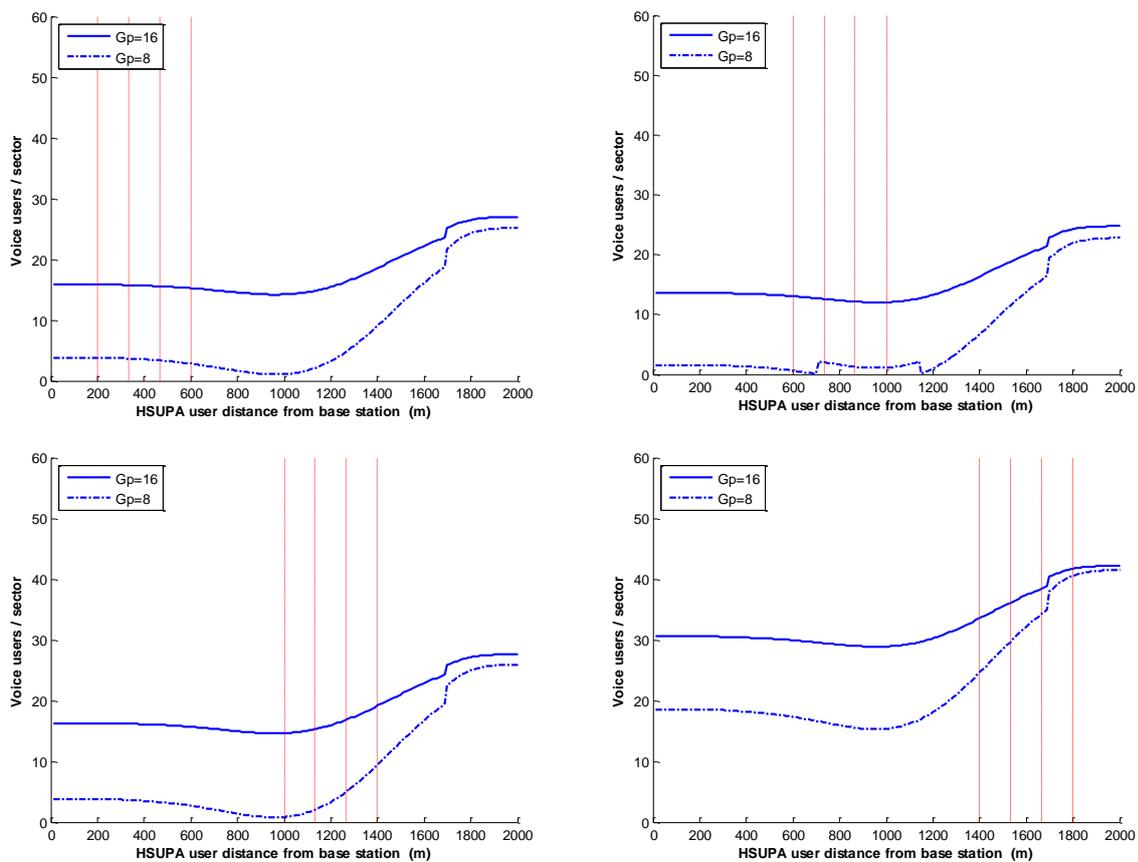


Figura 4.55 - Capacidad del servicio de voz – 1 usuario HSUPA – 4 usuarios datos R99

Como cabía esperar, la inclusión del cuarto usuario del servicio de datos R99 supone una disminución adicional en la capacidad para el servicio de voz.

Los peores resultados se obtienen cuando los 4 usuarios se encuentran localizados alrededor de 800 mt de la antena receptora, obteniéndose una disminución en la capacidad de unos 28 usuarios con respecto a los calculados en la Figura 3.16, independientemente de la localización del usuario HSUPA.

Puede observarse como, cuando los usuarios de datos R99 y HSUPA coinciden alrededor de los 1.000 mt, localización en que la potencia de interferencia generada sobre la antena receptora es máxima, la capacidad para el servicio de voz llega a anularse para  $G_p=8$ .

Cuando los usuarios se encuentran situados alrededor de unos 1.600 mt de la estación base bajo estudio, los resultados obtenidos apenas se diferencian de los calculados en ausencia del servicio de datos R99, siendo la capacidad inferior en 10 usuarios.



## 5. Estudio de HSUPA en macroceldas

Dentro del concepto celular clásico, consistente en la división de la zona de cobertura en zonas más pequeñas denominadas celdas o células, las macroceldas son el modelo más común permitiendo abarcar áreas más extensas (hasta varios kilómetros).

Tal y como se presenta en la Figura 5.1, idealmente consideraremos células de forma hexagonal con radio  $R$ , en cuyo centro estará el emplazamiento de la estación base.

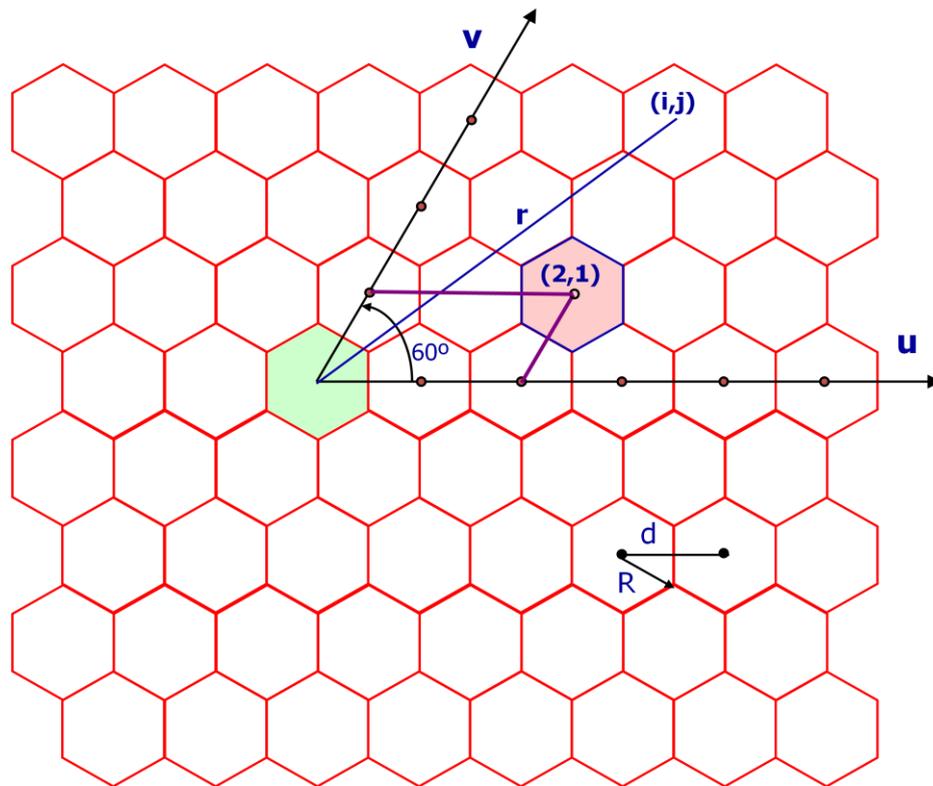


Figura 5.1 - Estructura de la red celular

De esta forma, la distancia entre dos estaciones base (el paso de la red) vendrá dada por:

$$d = \sqrt{3}R \quad (5.1)$$

La superficie de cobertura de cada una de estas células es sencilla de calcular una vez conocido el radio  $R$ :

$$S_{célula} = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2}d^2 \quad (5.2)$$

Si bien en los capítulos anteriores dedicados a autopistas y túneles, los usuarios viajaban en el interior de vehículos moviéndose a velocidades generalmente, una configuración de macroceldas puede estar presente en escenarios muy dispares, desde zonas rurales hasta grandes urbes, donde se mezclarán usuarios desplazándose a pie con otros viajando a velocidades elevadas.

El presente capítulo está basado en [6], donde se analiza para este tipo de escenarios la capacidad del uplink de UMTS sin tener en cuenta el efecto de los usuarios del servicio HSUPA. Se presentará el modelo de propagación que mejor aproxima las condiciones de este escenario y se realizará un estudio matemático de la capacidad del uplink mezclando distintos tipos de servicio. Por último, a partir de estos modelos, se mostrarán los resultados obtenidos para diversas simulaciones en las que se estudia la capacidad de los servicios tradicionales de voz y datos y el impacto que supone sobre estos la prestación de un servicio de datos de alta velocidad como HSUPA.

## 5.1 Modelo de propagación

Para calcular las pérdidas de propagación sufridas en un escenario como este se utilizará el modelo Hata-COST 231, válido hasta una frecuencia de 2000MHz, añadiendo un efecto shadowing con distribución log-normal.

Según este método, las pérdidas de propagación vendrán dadas por la siguiente ecuación:

$$L_b = 46,3 + 33,9 \log f_{MHz} - 13,82 \log h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d_{km} + c_m \quad (5.3)$$

Siendo

- $d$  la distancia del enlace (km)
- $a(h_r)$  el factor de corrección por la altura de la antena
- $c_m$

El factor de corrección para la altura de la antena viene definido por las siguientes expresiones, según corresponda:

$$a(h_r) = (1,1 \log f - 0,7)h_r - (1,56 \log f - 0,8) \text{ para ciudades pequeñas-medianas} \quad (5.4)$$

$$a(h_r) = 3,2(\log 11,75h_r)^2 - 4,97 \quad \text{para ciudades grandes} \quad (5.5)$$

Las pérdidas así calculadas llevarán una corrección adicional en el caso de tratarse de escenarios no urbanos:

$$L_{bs} = L_b - 2[\log(f/28)]^2 - 5,4 \quad \text{para zonas suburbanas} \quad (5.6)$$

$$L_{br} = L_b - 4,78(\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94 \quad \text{para zonas rurales} \quad (5.7)$$

El efecto de shadowing provoca en la práctica una desviación de las pérdidas frente al valor esperado:

$$L_p(\text{dB}) \approx L_p + 1,25\sigma \quad (5.8)$$

## 5.2 Análisis del uplink

Para el cálculo de los estadísticos de interferencia y la capacidad la célula, se utilizará un modelo formado por 3 coronas, llegando a calcular los valores para usuarios situados a una distancia de hasta  $5d$  de la estación base bajo estudio. La Figura 5.2 ilustra este modelo.

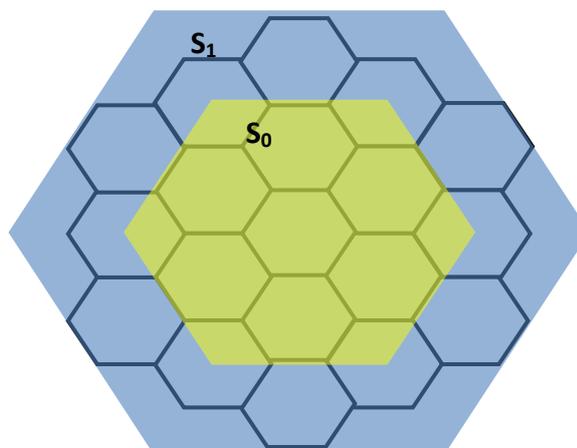


Figura 5.2 - Modelo de 5 coronas utilizado en el estudio

Supongamos un usuario interferente situado a una distancia  $r_{im}$  de la estación base a la que está conectado y a una distancia  $r_{id}$  de la estación base bajo estudio, tal y como se muestra en la Figura 5.3.

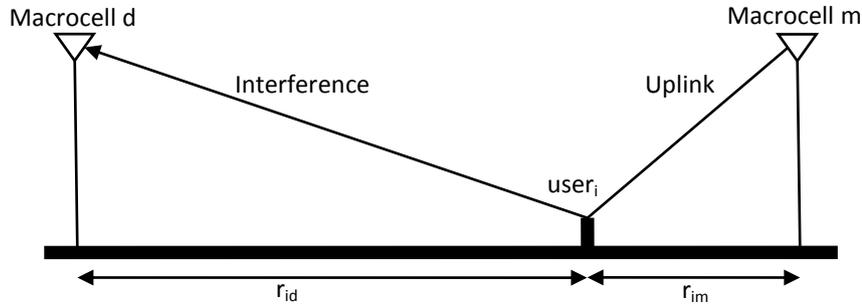


Figura 5.3 - Modelo de macroceldas

La relación entre las señales de interferencia  $L(r_{id}, r_{im})$  debida exclusivamente a las pérdidas por distancia vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left(\frac{r_{im}}{r_{id}}\right)^S \quad (5.9)$$

Si además incluimos el efecto del shadowing, la relación entre las señales de interferencia  $L_{shd}(r_{id}, r_{im})$  debida a la distancia y al efecto shadowing vendrá dada por la ecuación:

$$L_{shd}(r_{id}, r_{im}) = 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} L(r_{id}, r_{im}) \quad (5.10)$$

Los estadísticos de interferencia intercelular e intracelular para cada uno de los servicios se calcularán básicamente de la misma forma que se hizo en capítulos anteriores. La única diferencia vendrá dada porque área de la celda para esta configuración celular es distinta de los sectores lineales con que trabajábamos en el caso de autopistas o túneles, lo que nos obligará a integrar sobre superficies en 2 dimensiones.

### 5.2.1 Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos

Dada la penetración en el mercado de estos servicios, supondremos una distribución uniforme de usuarios con una densidad  $\rho_s = N_{u,s}/S$  en cada una de las células.

En la parte derecha de la región S0, la esperanza de interferencia intercelular vendrá dada por:

$$E[I_{S0}]_{r,s} = \alpha_s \rho_s \int_{S0_r} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \partial r \quad (5.11)$$

Donde el factor  $f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right)$  modela el efecto de shadowing, estando definido por la siguiente ecuación:

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{\frac{(\sigma\beta)^2}{2}} Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left\{\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right\}\right] \quad (5.12)$$

donde  $\beta = \frac{\ln 10}{10}$  y  $Q(x)$  la función de distribución complementaria de la distribución gaussiana, definida como:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-v^2/2} dv \quad (5.13)$$

Utilizaremos  $\sigma^2$  como valor general para la desviación típica de las variables aleatorias que representan el efecto shadowing. Para su cálculo utilizaremos la siguiente expresión:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma^2 \quad (5.14)$$

Siendo  $C_{dm}$  el coeficiente de correlación intersites.

En la parte derecha de la región S1, la esperanza de interferencia intercelular vendrá dada por:

$$E[I_{S1}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{S1_r} L(r_{id}, r_{im}) E\left[10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}}\right] \partial r \quad (5.15)$$

Resultando el valor esperado de potencia de interferencia intercelular:

$$E[P]_{inter,s} = P_{r,s} E[I]_{inter,s} = P_{r,s} (E[I_{S0}]_{r,s} + E[I_{S1}]_{r,s}) (1 + sll) \quad (5.16)$$

Calculamos el valor esperado de potencia de interferencia intracelular como:

$$E[P]_{intra,s} = P_{r,s} E[I]_{intra,s} \approx P_{r,s} \alpha_s N_{u,s} (1 + sll) \quad (5.17)$$

Si consideramos un control de potencia imperfecto con un error con desviación estándar  $\sigma_c$ , la esperanza de potencia de interferencia total generada por el servicio s vendrá dada por la ecuación:

$$E[P_{int}]_s = e^{\frac{\beta^2 \sigma_c^2}{2}} (E[P]_{intra,s} + E[P]_{inter,s}) \quad (5.18)$$

## 5.2.2 Esperanza de interferencia para el servicio HSUPA

A día de hoy, servicios como HSUPA aún no están tan extendidos entre el gran público, además de no poder ofrecer la misma capacidad por el elevado nivel de interferencia que se genera entre usuarios.

Así pues, el número de usuarios que utilizarán este servicio concurrentemente dentro de la misma celda es mucho más limitado. Por ello, a la hora de calcular los estadísticos de interferencia para HSUPA lo haremos para un único usuario en lugar de integrar a lo largo de toda la superficie.

Calcularemos la relación entre las señales de interferencia  $L(r_{id}, r_{im})$  utilizando la ecuación (5.9) y la desviación típica del efecto shadowing  $\sigma$  mediante la ecuación (5.14) del mismo modo que se hizo previamente para los servicios de datos y voz.

Asumimos que el usuario HSUPA objeto de estudio se encuentra en la parte derecha de la región S0 por lo que esta será la única interferencia generada, no generándose ninguna en la región S1 ni en la parte izquierda de la región S0.

De esta forma, el valor esperado para la potencia de interferencia intercelular generada por el servicio HSUPA vendrá dado por la expresión:

$$E[P]_{inter,HSUPA} = P_{r,HSUPA} E[I]_{inter,HSUPA} = P_{r,HSUPA} \alpha_{HSUPA} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \quad (5.19)$$

En adelante los valores  $l$  y  $m$  representarán la probabilidad de que el terminal se encuentre conectado a otra estación base distinta de la que estamos estudiando.

$$l = Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left(\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right)\right] \quad (5.20)$$

$$m = Q\left[2\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left(\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right)\right] \quad (5.21)$$

El valor esperado para la potencia de interferencia intracelular generada por el servicio HSUPA se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$E[P]_{intra,HSUPA} = P_{r,HSUPA} E[I]_{intra,HSUPA} \approx P_{r,HSUPA} \alpha_{HSUPA} (1 - l) \quad (5.22)$$

Considerando nuevamente un control de potencia imperfecto con desviación típica y sumando ambos valores, obtendremos la esperanza de potencia de interferencia total:

$$E[P_{int}]_{HSUPA} = e^{\frac{\beta^2 \sigma_c^2}{2}} (E[P]_{intra,HSUPA} + E[P]_{inter,HSUPA}) \quad (5.23)$$

### 5.2.3 Varianza de interferencia para los servicios de voz y datos

Al igual que hicimos previamente para calcular el valor esperado, supondremos una distribución uniforme de usuarios con una densidad  $\rho_s = N_{u,s}/S$  en cada una de las células.

De esta forma, la varianza de potencia de interferencia intercelular generada en la parte derecha de la región S0 vendrá dada por:

$$Var[P_{S0}]_{r,s} = \rho_s P_{r,s}^2 \int_{S0,r} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) - q \alpha_s^2 f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \right\} \partial r \quad (5.24)$$

Donde los factores  $f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right)$  y  $g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right)$  modelan el efecto de shadowing, estando definidos de la siguiente forma:

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{\frac{(\beta\sigma)^2}{2}} Q\left[\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left(\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right)\right] \quad (5.25)$$

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{2(\beta\sigma)^2} Q\left[2\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left(\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right)\right] \quad (5.26)$$

Siendo

$$p = e^{2\beta^2 \sigma_c^2} \quad (5.27)$$

$$q = e^{\beta^2 \sigma_c^2} \quad (5.28)$$

La varianza de potencia intercelular generada por los usuarios situados en la parte derecha de la región S1 vendrá dada por:

$$Var[P_{S1}]_{r,s} \approx \rho_s P_{r,s}^2 \int_{S1_r} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p\alpha_s E \left[ \left( 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} \right)^2 \right] - q\alpha_s^2 E^2 \left[ 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} \right] \right\} \partial r \quad (5.29)$$

Siendo la varianza de potencia intercelular total:

$$Var[P]_{inter,s} = (var[P_{SO}]_{r,s} + var[P_{S1}]_{r,s})(1 + sl^2) \quad (5.30)$$

Para el cálculo de la varianza de potencia intracelular utilizaremos la siguiente expresión:

$$Var[P]_{intra,s} = N_{u,s} P_{r,s}^2 (p\alpha_s - q\alpha_s^2)(1 + sl^2) \quad (5.31)$$

Sumando ambos valores, obtendremos la varianza de potencia de interferencia total:

$$Var[P]_{int,s} = Var[P]_{intra,s} + Var[P]_{inter,s} \quad (5.32)$$

## 5.2.4 Varianza de interferencia para el servicio HSUPA

Nuevamente, a la hora de calcular los estadísticos de interferencia para el servicio HSUPA lo haremos para un único usuario en lugar de integrar a lo largo de toda la región.

De esta forma, el valor esperado para la potencia de interferencia intercelular generada por el servicio HSUPA vendrá dado por la expresión:

$$\begin{aligned} Var[P]_{inter,HSUPA} &= P_{r,HSUPA}^2 Var[I]_{inter,HSUPA} \\ &= P_{r,HSUPA}^2 [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p\alpha_{HSUPA} g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) - q\alpha_{HSUPA}^2 f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (5.33)$$

El valor esperado para la potencia de interferencia intracelular generada por el servicio HSUPA se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$Var[P]_{intra,HSUPA} = N_{u,HSUPA} P_{r,s}^2 (p\alpha_s - q\alpha_s^2) \quad (5.34)$$

Sumando ambos valores, obtendremos la varianza de potencia de interferencia total:

$$Var[P]_{int,HSUPA} = Var[P]_{intra,HSUPA} + Var[P]_{inter,HSUPA} \quad (5.35)$$

### 5.2.5 Capacidad del sistema multiservicio

Así pues, aplicando unas u otras ecuaciones según corresponda, habremos obtenido los valores de los estadísticos de potencia de interferencia para cada uno de los servicios. Los estadísticos de interferencia totales se calcularán como la suma de los resultados para cada uno de los servicios.

$$Var[P_{int}] = \sum_s Var[P_{int}]_s \quad (5.36)$$

$$E[P_{int}] = \sum_s E[P_{int}]_s \quad (5.37)$$

Así pues, para una probabilidad de desbordamiento determinada, podemos calcular la SIR del servicio  $s$  como:

$$\left[\frac{C}{I}\right]_s = \frac{\varepsilon P_{r,s}}{E[P_{int}] + P_N + \gamma \sqrt{var[P_{int}]}} \quad (5.38)$$

La relación entre la  $SNR_{bit}$  viene definida por la siguiente expresión:

$$\frac{E_b}{N_o} = G_p \left[\frac{C}{I}\right] \quad (5.39)$$

Cuando ofrecemos distintos servicios en nuestro sistema, las potencias máximas transmitidas guardan la siguiente relación (en dB):

$$\left(\frac{P_{tx,HSUPA}}{P_{tx,datos}}\right)_{dB} = (1 + \delta_1) \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{G_{p,datos} / \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{datos}}{G_{p,HSUPA} / \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{HSUPA}} \right) \right] \quad (5.40)$$

$$\left(\frac{P_{tx,HSUPA}}{P_{tx,voz}}\right)_{dB} = (1 + \delta_2) \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{G_{p,voz} / \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{voz}}{G_{p,HSUPA} / \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{HSUPA}} \right) \right] \quad (5.41)$$

Siendo  $\delta_1$  y  $\delta_2$  factores de corrección con valor dentro el intervalo  $[-0,1 - 0,1]$ .

## 5.3 Resultados de las simulaciones

Aplicando el modelo descrito para macroceldas, se han realizado simulaciones para estudiar la capacidad del servicio HSUPA, la capacidad en el uplink de los servicios tradicionales de voz y datos, y en qué medida esta se ve afectada por los nuevos servicios de datos de alta velocidad.

Para la simulación de este tipo de escenarios, se supondrán antenas omnidireccionales en las estaciones base, lo que permite utilizar un modelo similar al que se utilizara anteriormente en los capítulos dedicados a autopistas y túneles.

Los cálculos descritos con anterioridad se han implementado con ayuda de la herramienta Matlab y las simulaciones se han realizado con los siguientes valores que se consideran ajustados a los que razonablemente encontraremos en la realidad.

- Frecuencia
  - $f_{uplink} = 1950 \text{ MHz}$
  
- Radio celular
  - $R = 300, 400 \text{ y } 500 \text{ mt.}$  para ciudades de cualquier tamaño.
  - $R = 400, 600 \text{ y } 800 \text{ mt.}$  para entornos suburbanos.
  - $R = 1000, 2000 \text{ y } 3000 \text{ mt.}$  para entornos rurales.
  
- Alturas de las antenas de la estación base y del terminal
  - $h_b = 30m$
  - $h_m = 1,5m$

- Shadowing
  - $\sigma = 10\text{dB}$  para ciudades grandes
  - $\sigma = 8\text{dB}$  para ciudades medianas
  - $\sigma = 6\text{dB}$  para entornos suburbanos
  - $\sigma = 4\text{dB}$  para entornos rurales
  - $C_{dm} = 0,5$
  
- Ganancias de procesamiento
  - 256 para el servicio de voz
  - 32 para el servicio de datos
  - 16 (240kbps) y 8 (480kbps) para el servicio HSUPA
  
- Potencia máxima transmitida
  - 30dBm para el servicio HSUPA
  - Los valores para el servicio de voz han sido calculados para cada uno de los distintos escenarios presentados utilizando las ecuaciones (5.40) y (5.41).

	HSUPA $G_p=16$	HSUPA $G_p=8$
GRANDES CIUDADES	20,8 dBm	18,4 dBm
CIUDADES MEDIAS	20,7 dBm	18,2 dBm
ENTORNOS SUBURBANOS	20,5 dBm	18,0 dBm
ENTORNOS RURALES	20,3 dBm	17,9 dBm

Tabla 5.1 - Potencias máximas de transmisión para el servicio de voz

- Los valores para el servicio de datos han sido calculados para cada uno de los distintos escenarios presentados utilizando las ecuaciones (5.40) y (5.41).

	HSUPA $G_p=16$	HSUPA $G_p=8$
GRANDES CIUDADES	27,0 dBm	24,6 dBm
CIUDADES MEDIAS	26,9 dBm	24,4 dBm
ENTORNOS SUBURBANOS	26,7 dBm	24,2 dBm
ENTORNOS RURALES	26,5 dBm	24,0 dBm

Tabla 5.2 - Potencias máximas de transmisión para el servicio de datos

- $E_b/N_0$  requerida
  - 7dB para el servicio de voz
  - 4dB para el servicio de datos
  - Los valores para el servicio HSUPA se han extraído de [12]. Dichos valores están calculados para peatones moviéndose a una velocidad de 3km/h. Se han simulado distintos escenarios en los que los usuarios viajaran a distintas velocidades. Para entornos urbanos, donde los usuarios no superarán los 60 km/h se han añadido 0,4dB extra a los valores originales. En entornos suburbanos, donde supondremos una velocidad máxima de 90 km/h se han añadido 0,6dB. Por último, para entornos rurales, donde los usuarios podrán alcanzar velocidades de 120km/h se han añadido 0,8dB como ya se hiciera en capítulos anteriores.

	HSUPA $G_p=16$	HSUPA $G_p=8$
60 km/h	4.4dB	4.4dB
90 km/h	4.6dB	4.6dB
120 km/h	4.8dB	4.8dB

Tabla 5.3 -  $E_b/N_o$  requerida por el servicio HSUPA

- Potencia de ruido en el receptor de  $P_n = -100dBm$ .

Para la probabilidad de desbordamiento se considera aceptable un valor del 1% y las capacidades mostradas a continuación han sido calculadas de acuerdo a este porcentaje.

### 5.3.1 Servicio HSUPA

Analizaremos en primer lugar las prestaciones del servicio HSUPA en entornos de macroceldas para distintos tipos de escenario.

Las Figuras 5.4 – 5.7 muestran la capacidad de la célula para el servicio HSUPA cuando este es el único servicio ofrecido, no existiendo ningún otro usuario que pueda generar interferencia. Es decir, sin usuarios de otros servicios dentro o fuera de la célula bajo estudio, ni otros usuarios HSUPA en celdas próximas a la nuestra. Evidentemente, esta situación es completamente irreal pero su estudio teórico nos permitirá hacer algunas conclusiones.

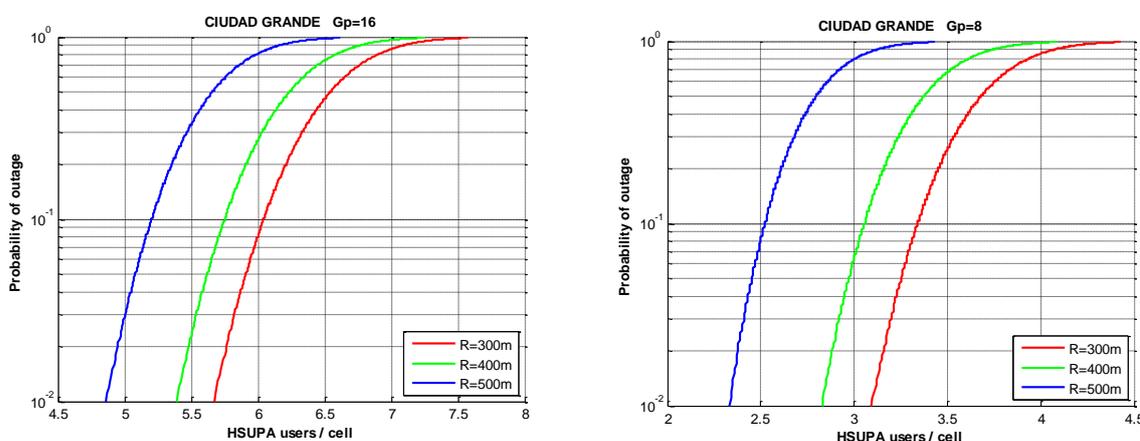


Figura 5.4 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Ciudad grande

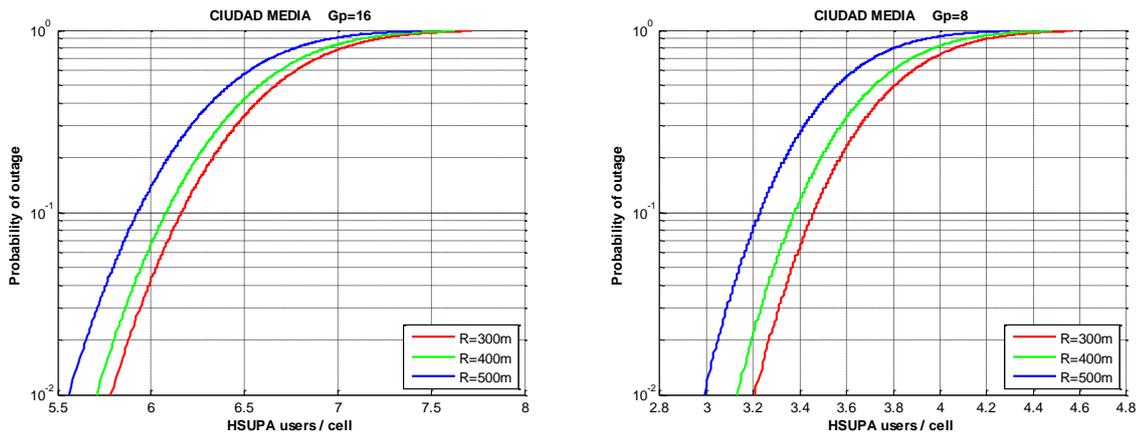


Figura 5.5 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Ciudad media

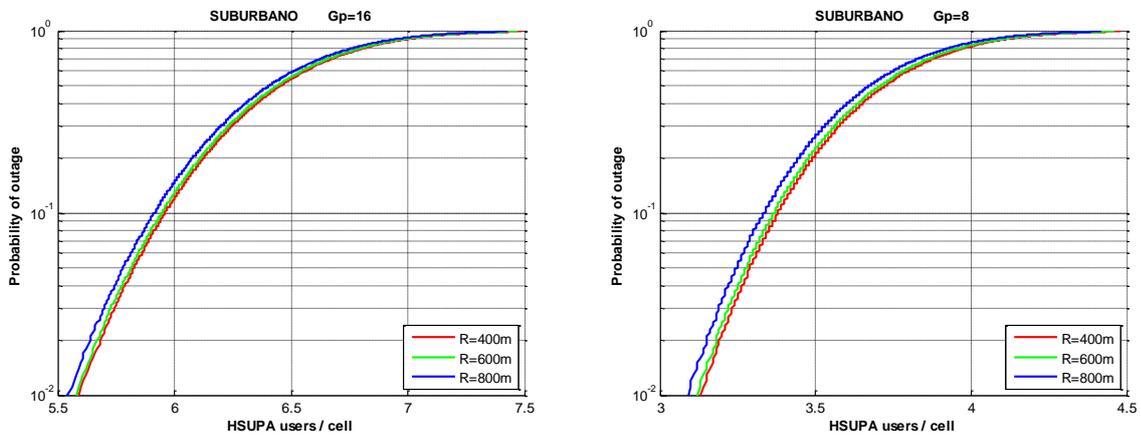


Figura 5.6 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA – Suburbano

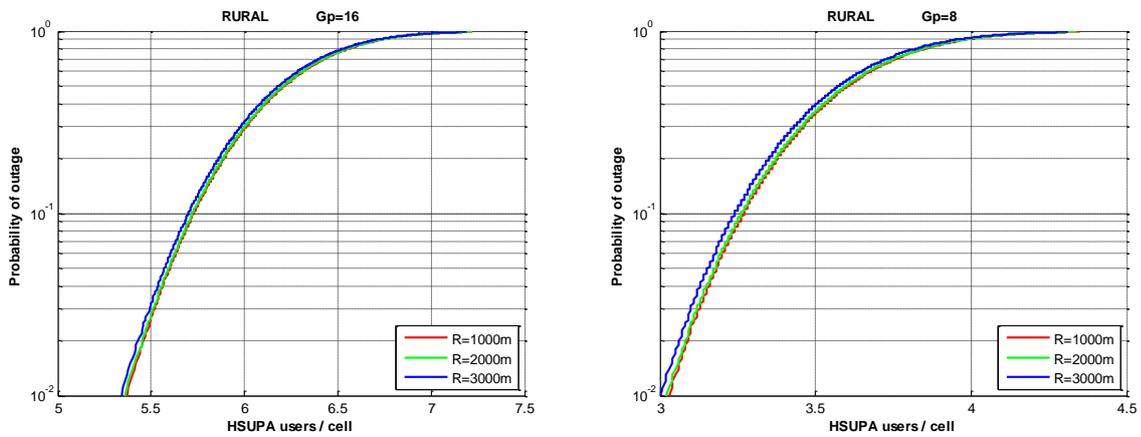


Figura 5.7 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Rural

Para una probabilidad de desbordamiento del 1% observamos distintas capacidades en función del tipo de escenario en que nos encontremos:

- $G_p = 16$ 
  - entre 4 y 5 usuarios para grandes ciudades, dependiendo del radio.
  - 5 usuarios para ciudades medias.
  - 5 usuarios para entornos suburbanos.
  - 5 usuarios para entornos rurales.
- $G_p = 8$ 
  - entre 2 y 3 usuarios para grandes ciudades, dependiendo del radio.
  - entre 2 y 3 usuarios para ciudades medias, dependiendo del radio.
  - 3 usuarios para entornos suburbanos.
  - 3 usuarios para entornos rurales.

Puede comprobarse como, en general, una radio celular mayor supone una menor capacidad para el servicio como consecuencia de la menor potencia recibida en la antena receptora de la base.

Estos valores de capacidad, en ausencia de cualquier otro tipo de usuario de este u otros servicios que pueda generar interferencia nos da una idea de su voracidad en cuanto a recursos de red.

Analizaremos ahora la importancia de realizar un buen control de potencia, minimizando los errores, para obtener la mayor capacidad. Las Figuras 5.8 – 5.11 muestran la capacidad de la celda para el servicio HSUPA para distintos valores del parámetro  $\sigma_c$ .

Las variaciones de este parámetro dentro de las simulaciones corresponden, en la realidad, a variaciones en el paso de control de potencia. Establecer un paso más fino permite cometer un menor error residual pero en canales con variaciones rápidas (*fading*) será necesario un paso mayor para permitir correcciones de forma más rápida.

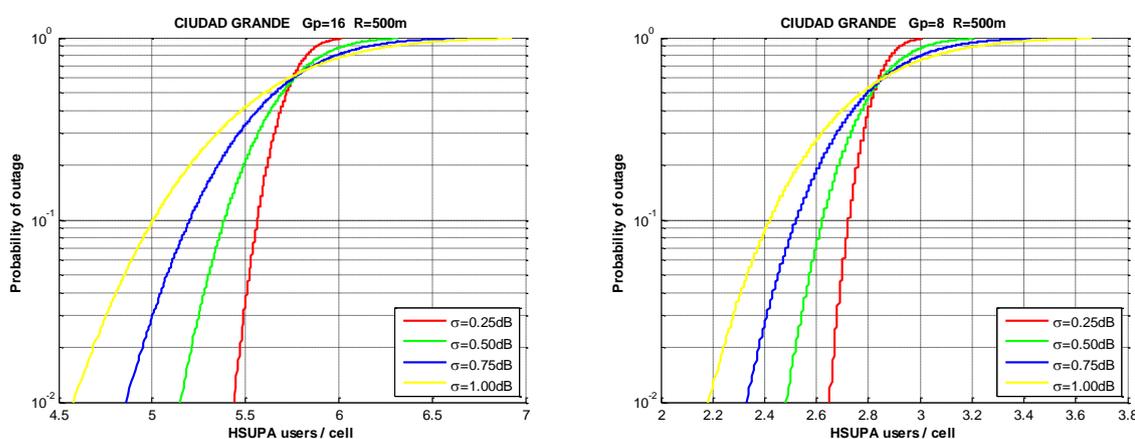


Figura 5.8 Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Control de potencia - Ciudad grande

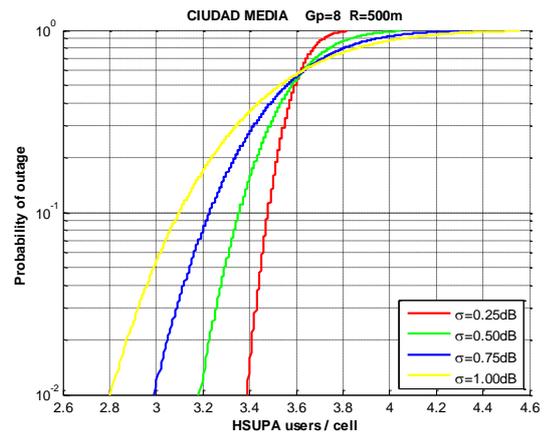
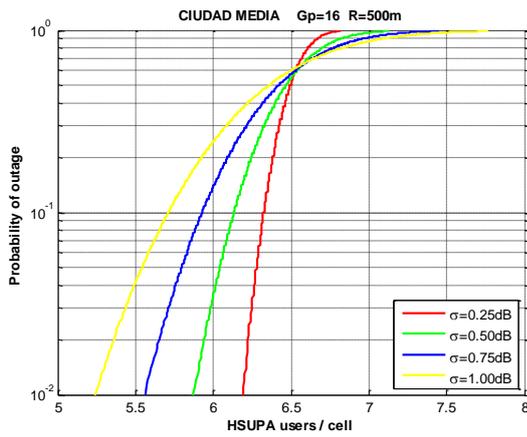


Figura 5.9 Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Control de potencia - Ciudad media

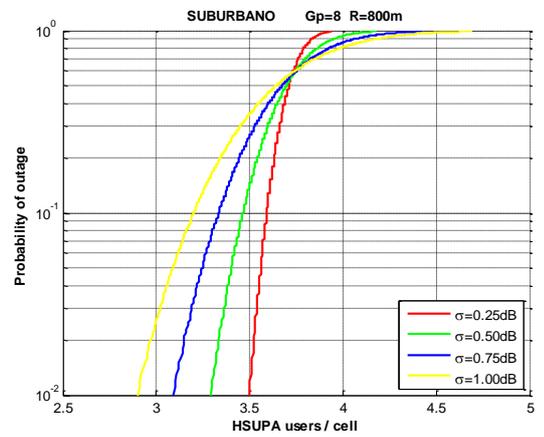
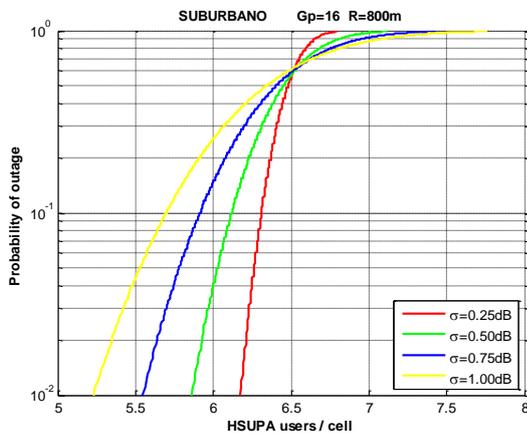


Figura 5.10 Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Control de potencia – Suburbano

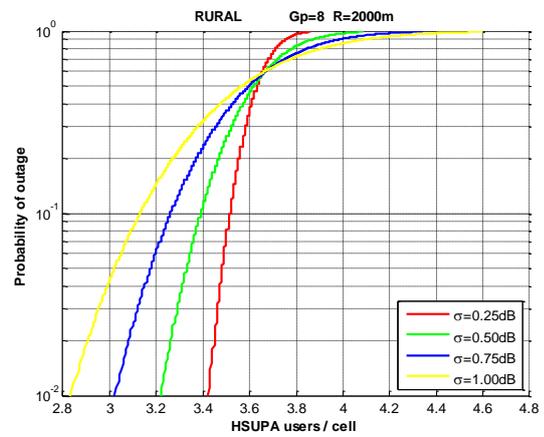
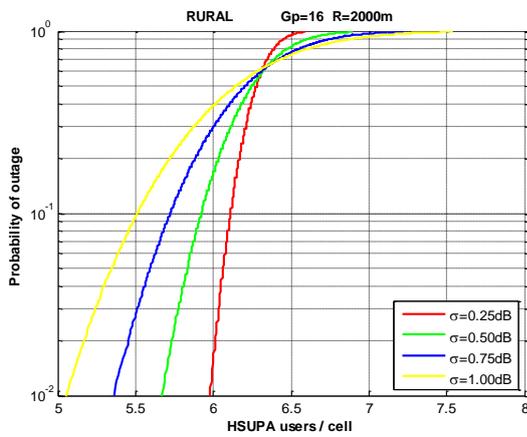


Figura 5.11 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA - Control de potencia - Rural

Podemos observar como para valores menores del parámetro  $\sigma_c$  se comenten menores errores en el control de potencia, lo que beneficia la capacidad celular. Para cada uno de los escenarios simulados, se presentan diferencias del orden de 1 usuario entre  $\sigma_c=0,25dB$  y  $\sigma_c=1dB$ , siendo estas diferencias superiores para los casos con ganancia de procesamiento 16.

Veamos por último la influencia de la altura de la antena de la estación base sobre la capacidad de la célula. De acuerdo con el modelo Hata-COST 231, presentado previamente, este parámetro incide directamente sobre las pérdidas en el trayecto entre el terminal y la base receptora. La Figura 5.12 muestra la evolución del exponente de propagación para valores de altura entre 30 y 50m.

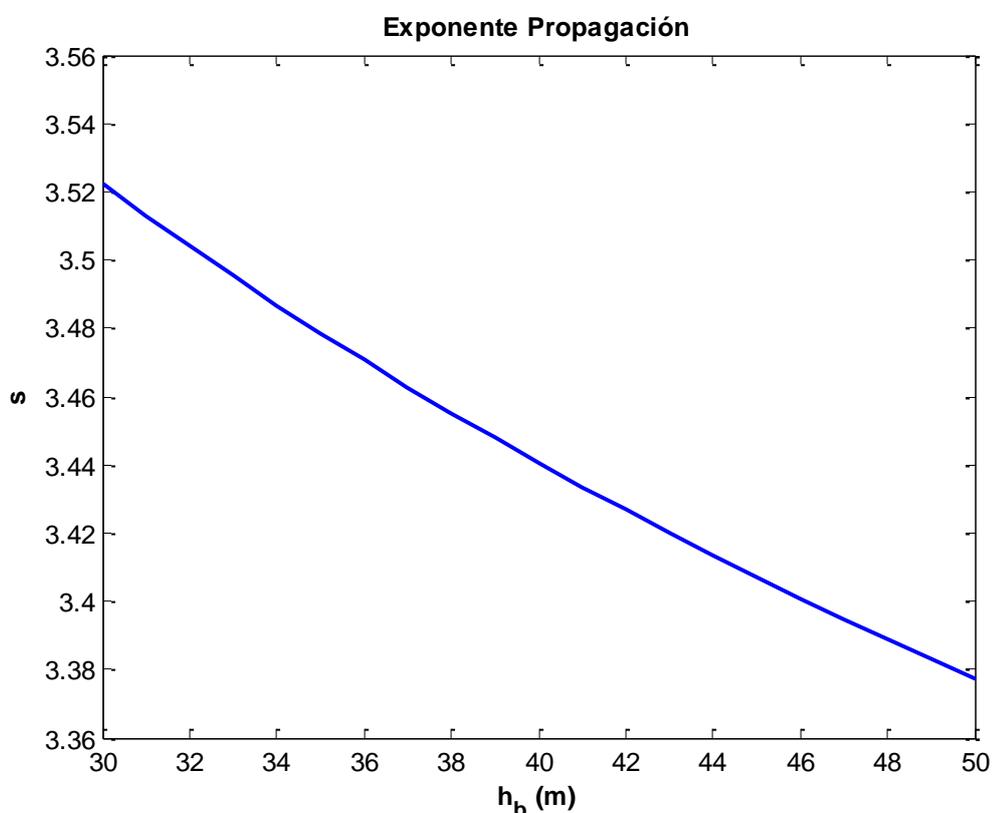


Figura 5.12 - Exponente de propagación en función de la altura de la estación base

Puede observarse como el exponente de propagación utilizado para calcular las pérdidas decrece a medida que aumenta la altura de la antena, variando aproximadamente 0,14 entre los 30m y los 50m. Dichas variaciones, como se verá a continuación, tienen una influencia directa sobre la capacidad celular. Las Figuras 5.13 – 5.16 muestran la capacidad de la célula para usuarios del servicio HSUPA en distintos escenarios en función de la altura de la estación base.

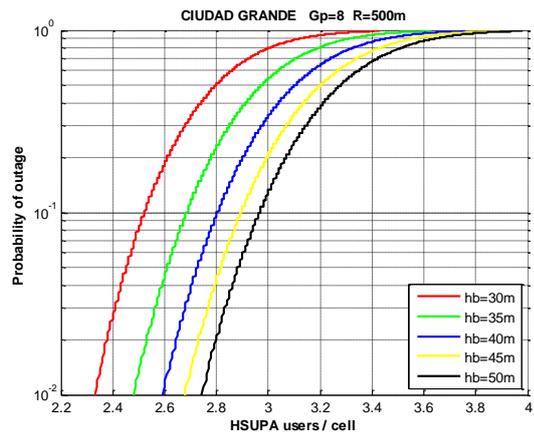
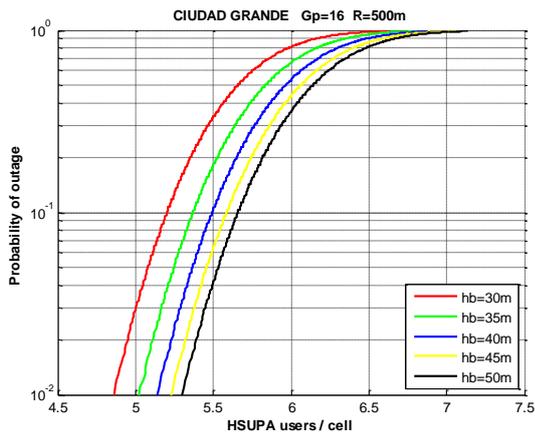


Figura 5.13 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA - Altura de la base - Ciudad grande

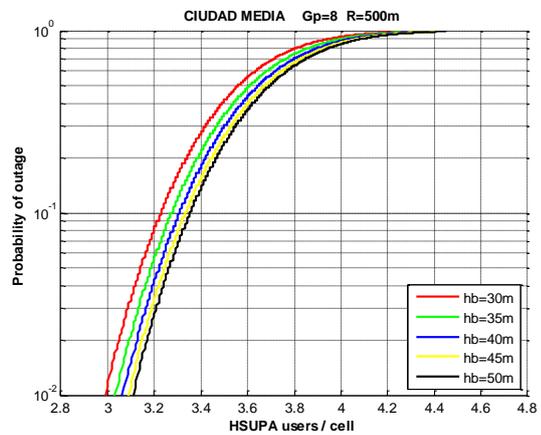
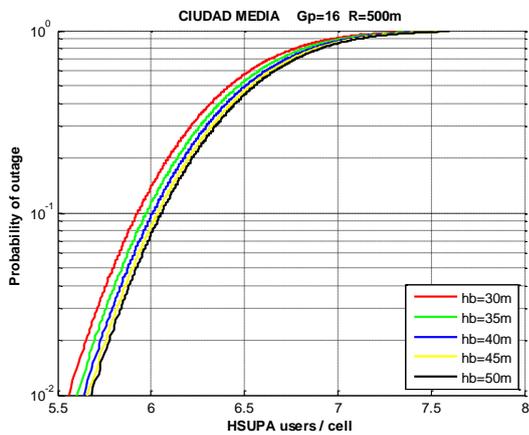


Figura 5.14 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA - Altura de la base - Ciudad media

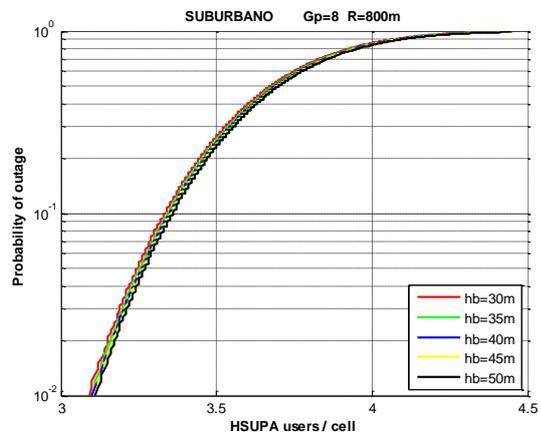
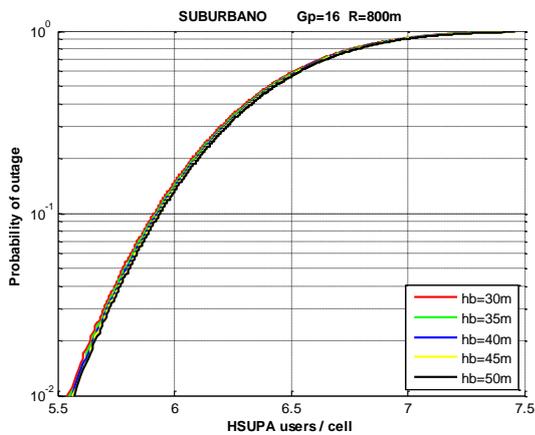


Figura 5.15 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA - Altura de la base - Suburbano

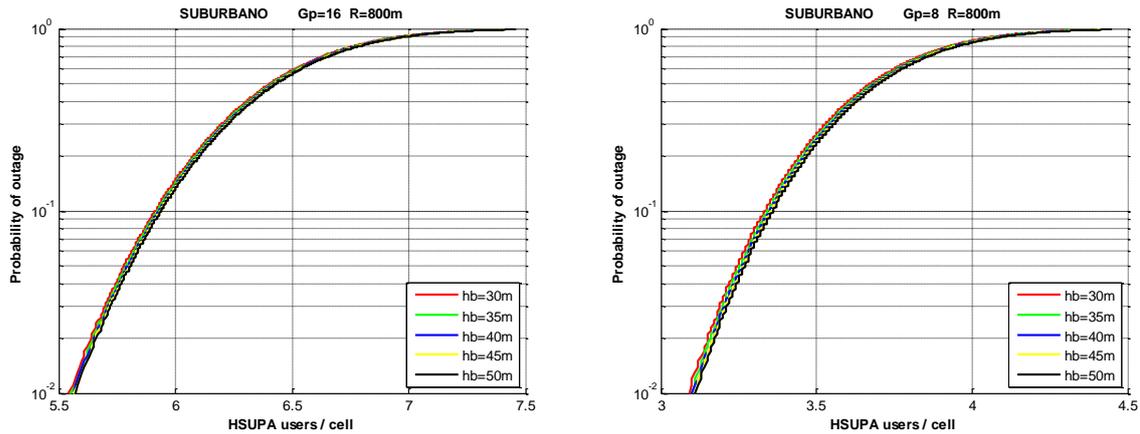


Figura 5.16 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA - Altura de la base - Rural

Podemos observar la importancia de este parámetro en entornos urbanos donde encontramos diferencias de aproximadamente 1 usuario. Sin embargo, para entornos rurales, donde habitualmente existe visibilidad entre el terminal y la base, la incidencia de este parámetro es mínima y las gráficas de capacidad para cada una de las alturas se solapan.

En los siguientes apartados se estudiará el efecto que los usuarios del servicio HSUPA tienen sobre la capacidad de otros servicios. Para ello, comenzaremos calculando los estadísticos de interferencia del servicio HSUPA. Las Figuras 5.17 – 5.20 muestran el valor medio esperado y la varianza de la potencia de interferencia generada por un usuario situado a una distancia  $d$  de la estación base bajo estudio.

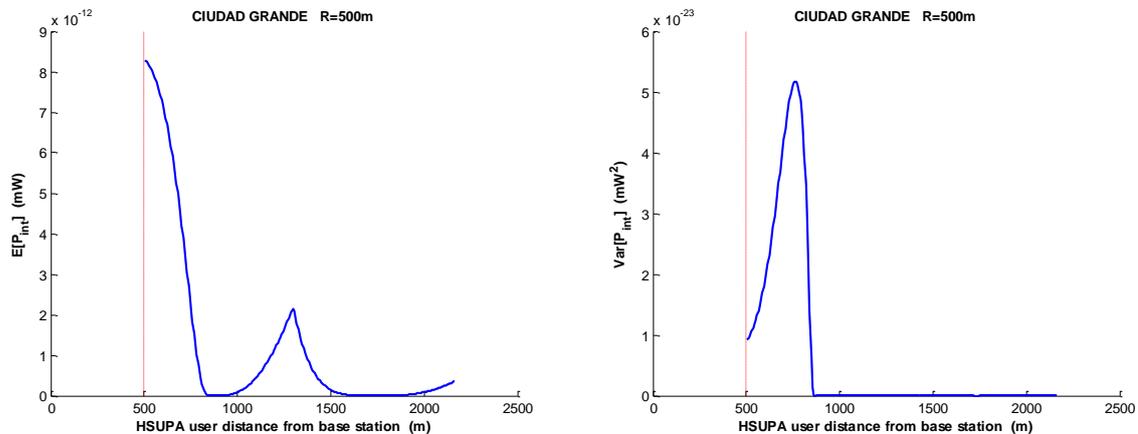


Figura 5.17 – Estadísticos de potencia de interferencia - Ciudad grande

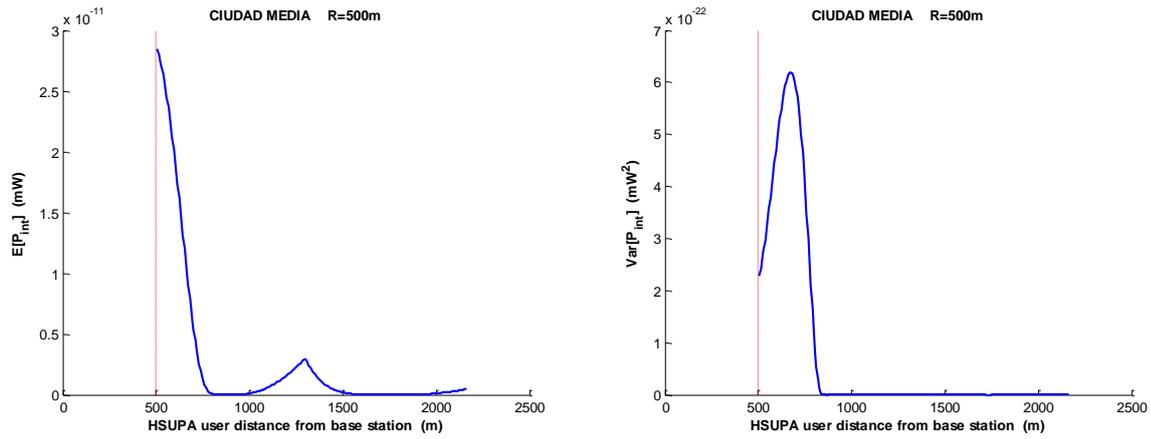


Figura 5.18 - Estadísticos de potencia de interferencia - Ciudad media

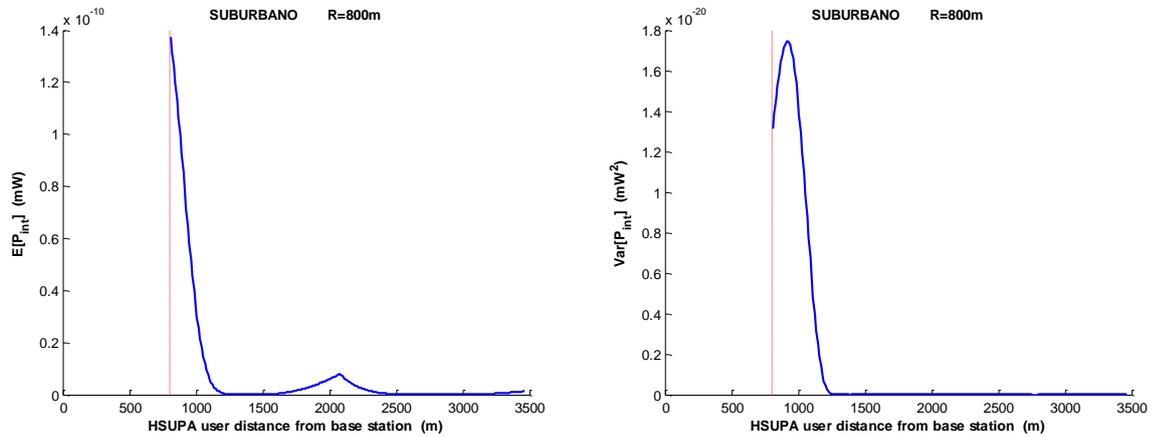


Figura 5.19 - Estadísticos de potencia de interferencia – Suburbano

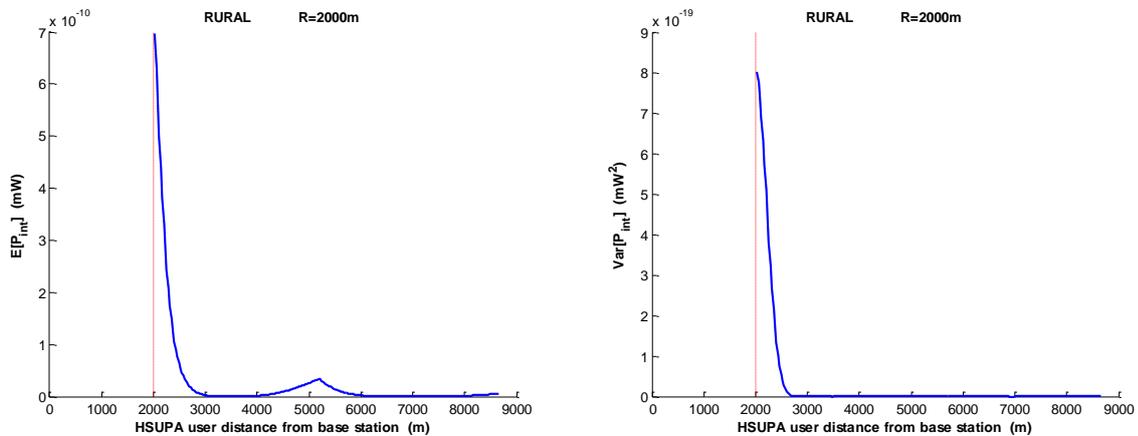


Figura 5.20 - Estadísticos de potencia de interferencia - Rural

Estas gráficas ya nos adelantan de que forma la localización del usuario afectará al resto de servicios. Puede observarse como la interferencia generada presenta valores máximos cuando el usuario se encuentra en los bordes entre dos celdas, allí donde la relación entre las señales de interferencia  $L(r_{id}, r_{im})$  es máxima. Cuando el usuario se sitúa a distancias múltiplo de la distancia  $d$ , en los centros de las células, la relación entre las señales de interferencia  $L(r_{id}, r_{im})$  es mínima y la interferencia generada sobre la estación de referencia es prácticamente nula.

Como se comentó anteriormente, todas estas simulaciones se han realizado suponiendo la ausencia total de usuarios de este u otros servicios en cualquiera de las celdas próximas desde las que la interferencia generada fuera suficiente para afectar a la capacidad. Se trata por tanto de un caso ideal. Veamos a continuación como un usuario del servicio HSUPA fuera de la celda bajo estudio afecta a la prestación del servicio dentro de este.

En primer lugar, comprobaremos la reducción en la capacidad de la célula que se produce cuando 1 usuario HSUPA se encuentra a una distancia  $r_1$  de la estación base, fuera de la celda bajo estudio. Las Figuras 5.21 – 5.24 muestran la capacidad celular para el servicio HSUPA en distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

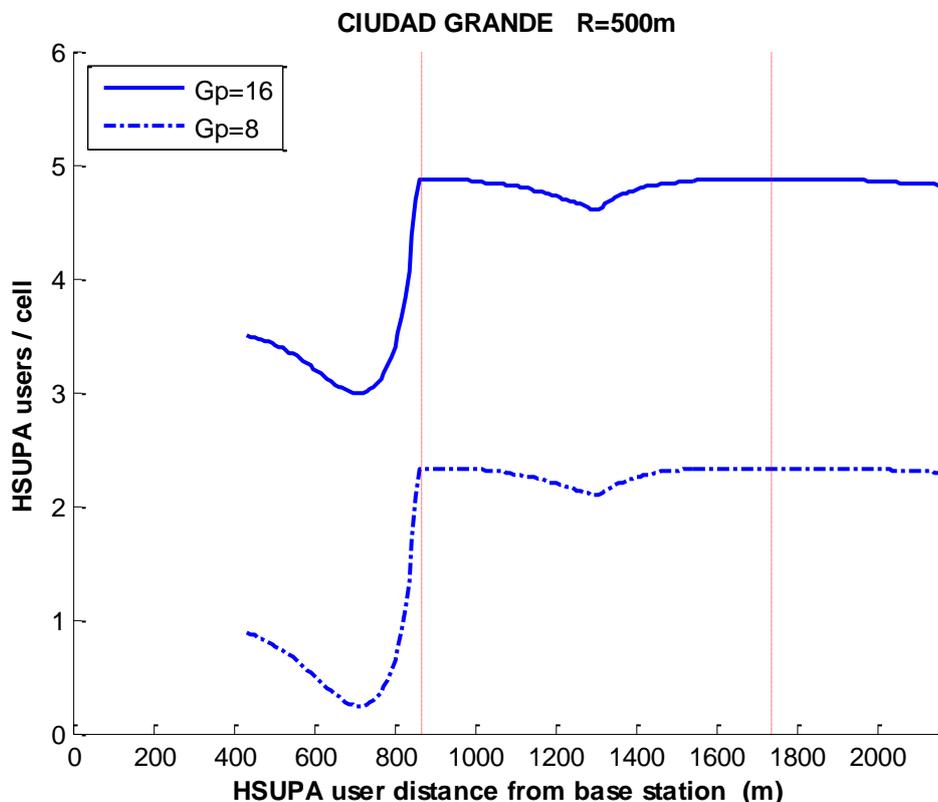


Figura 5.21 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo - Ciudad grande

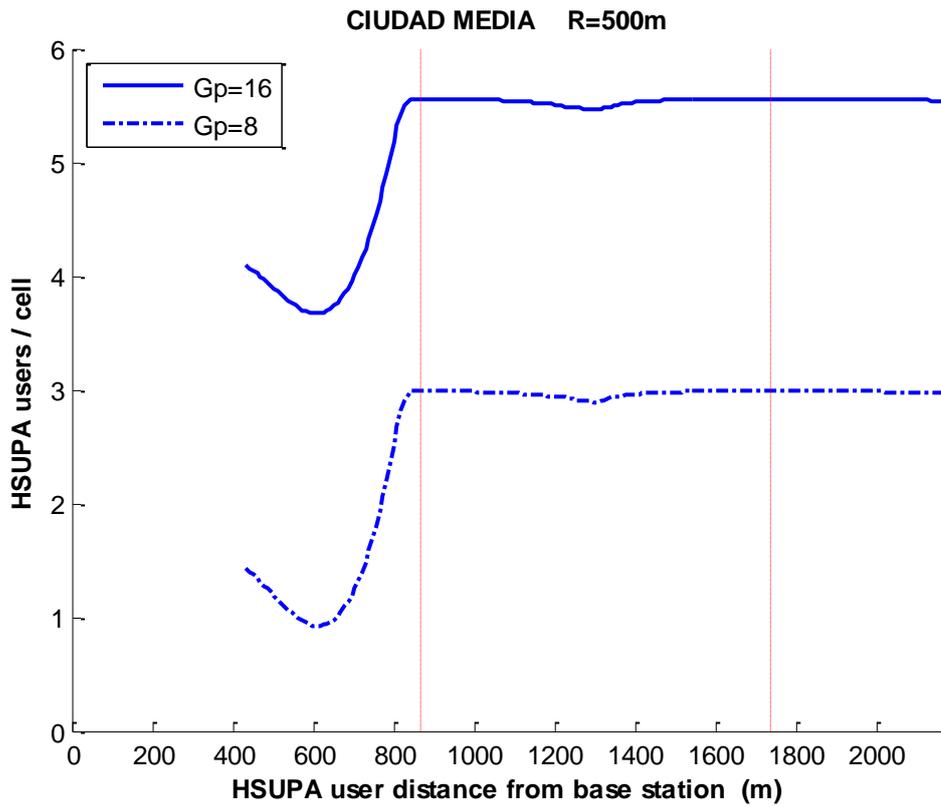


Figura 5.22 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo - Ciudad media

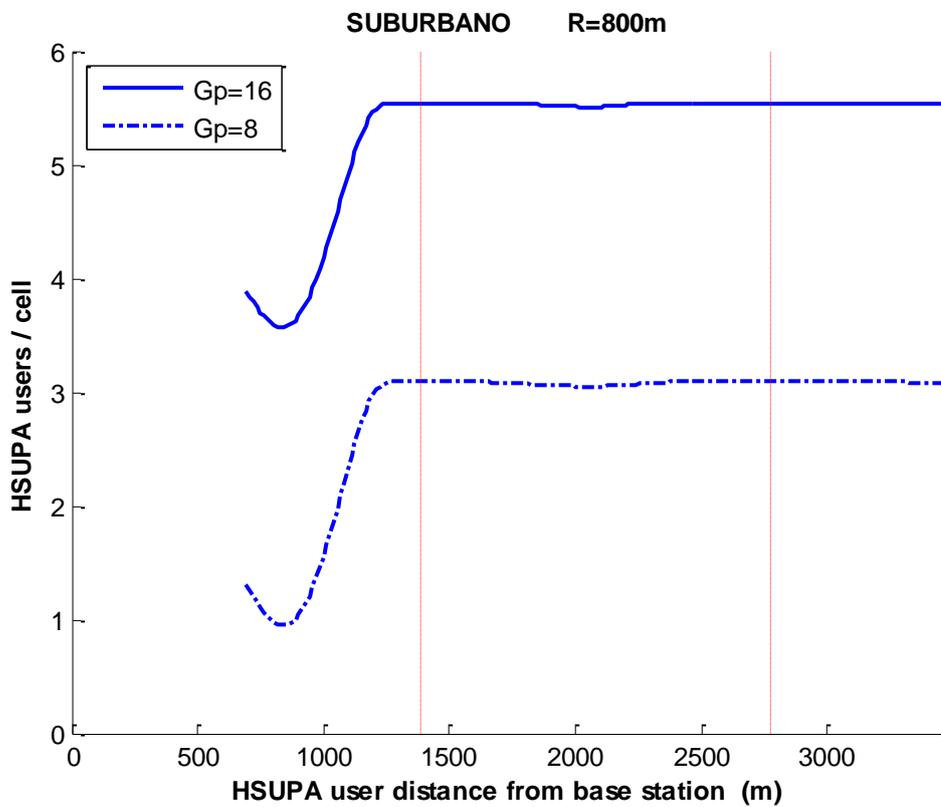


Figura 5.23 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo - Suburbano

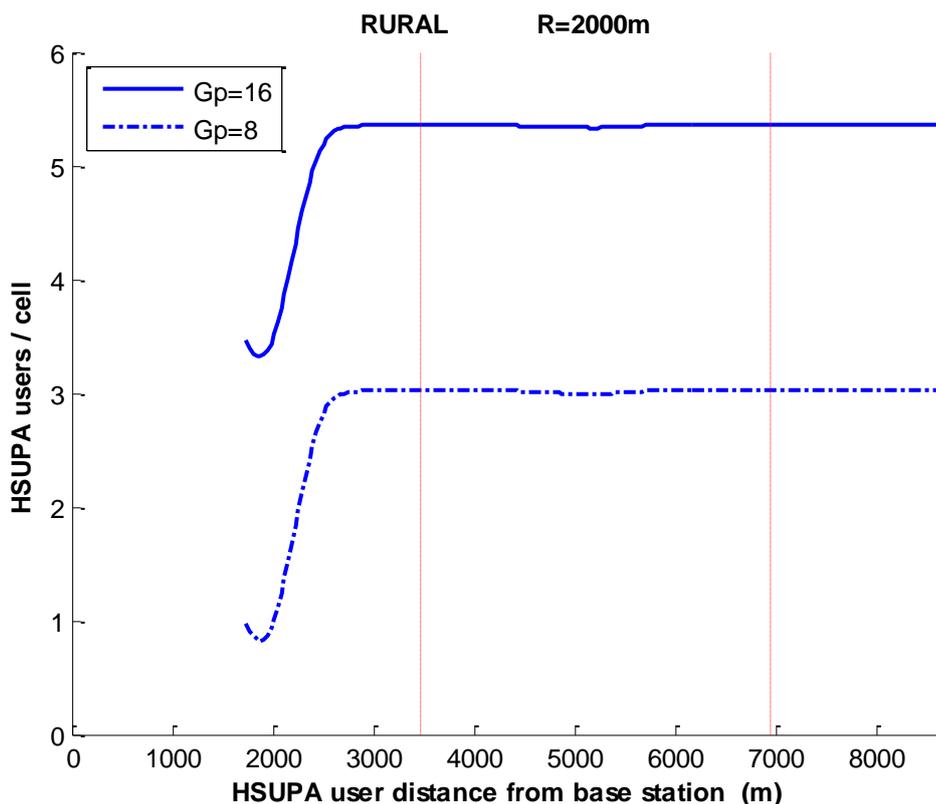


Figura 5.24 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo - Rural

Las marcas rojas verticales, separadas una distancia  $d$ , identifican los centros de las células contiguas de la red celular, donde se sitúan las estaciones base. Para todos los entornos simulados, observamos como a menor distancia del usuario HSUPA a la estación base bajo estudio, la interferencia generada en esta es mayor y, por lo tanto, nuestra célula tendrá una menor capacidad para ofrecer servicio de voz a los usuarios.

Esta capacidad se ve drásticamente reducida cuando el usuario del servicio de datos de alta velocidad se encuentra justo en el borde de la célula bajo estudio, a una distancia  $d$  de la antena. Comprobamos una disminución de aproximadamente 2 usuarios en todos los escenarios simulados, lo que representa una reducción de entre el 40% y el 50% en la capacidad de la celda.

En el otro extremo, observamos cómo aproximadamente a partir la estación base contigua, un poco antes en los entornos donde el radio de célula utilizado es mayor, la interferencia generada sobre nuestra celda es ya mínima y se alcanzan los valores de capacidad calculados previamente en ausencia de usuarios externos.

A continuación añadiremos un segundo usuario HSUPA a una distancia  $r_2$  de la estación base, también fuera de la celda bajo estudio. Las Figuras 5.25 – 5.28 muestran la capacidad celular para el servicio HSUPA en distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

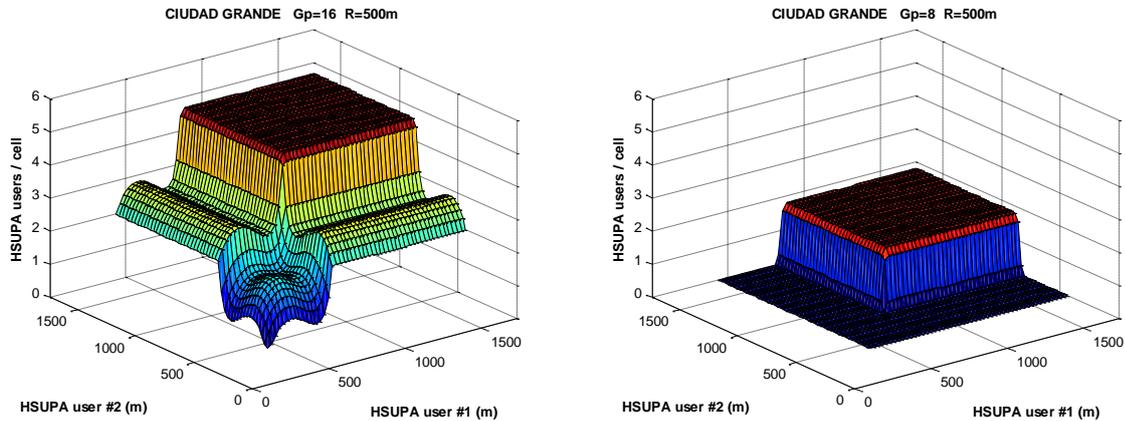


Figura 5.25 - Capacidad del servicio HSUPA - 2 usuarios externos - Ciudad grande

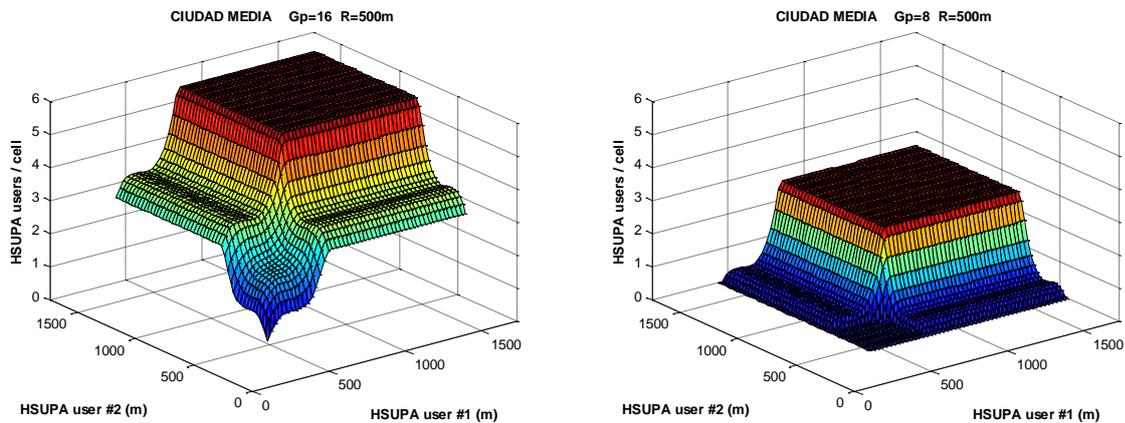


Figura 5.26 - Capacidad del servicio HSUPA - 2 usuarios externos - Ciudad media

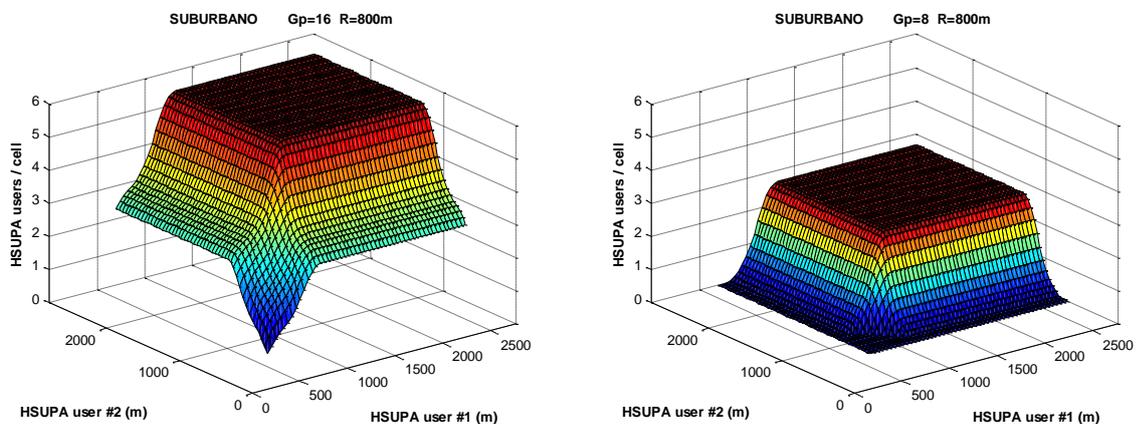


Figura 5.27 - Capacidad del servicio HSUPA - 2 usuarios externos – Suburbano

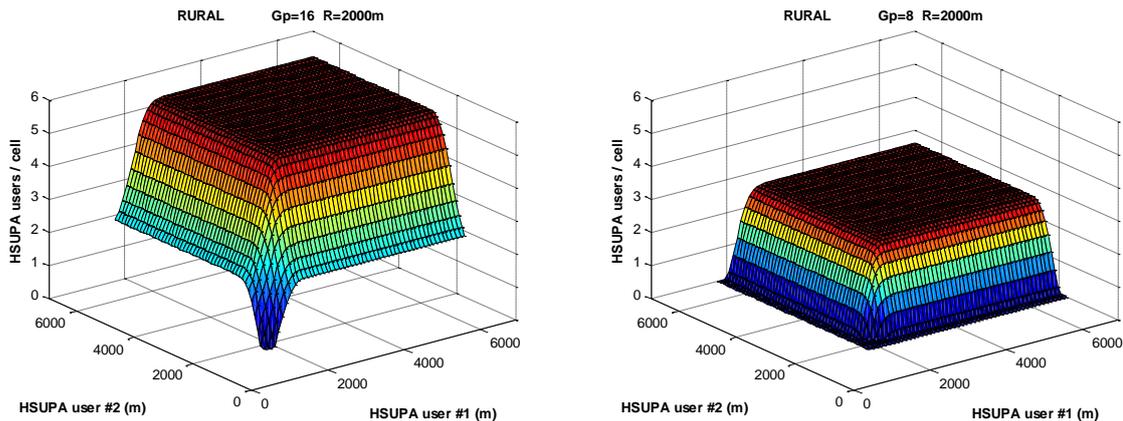


Figura 5.28 - - Capacidad del servicio HSUPA - 2 usuarios externos – Rural

Observamos en estas gráficas un comportamiento similar al descrito cuando incluíamos el primer usuario HSUPA. Cuando ambos usuarios se encuentran próximos al borde de la célula, la capacidad para el servicio de datos es mínima, llegando a anularse para ambas ganancias de procesamiento. A partir aproximadamente de la estación base contigua, la interferencia generada es ya mínima, y vuelven a alcanzarse los valores de capacidad máxima calculada en ausencia de usuarios de otros servicios.

### 5.3.2 Servicio de voz

Una vez caracterizadas las prestaciones que los usuarios pueden esperar del servicio HSUPA en entornos de macroceldas, veamos de qué forma la interferencia generada por estos afecta al servicio de voz, suponiendo una densidad uniforme de usuarios de este servicio dentro de cada célula.

Las Figuras 5.29 – 5.32 muestran la capacidad de una célula para el servicio de voz en distintos escenarios cuando este es el único servicio utilizado.

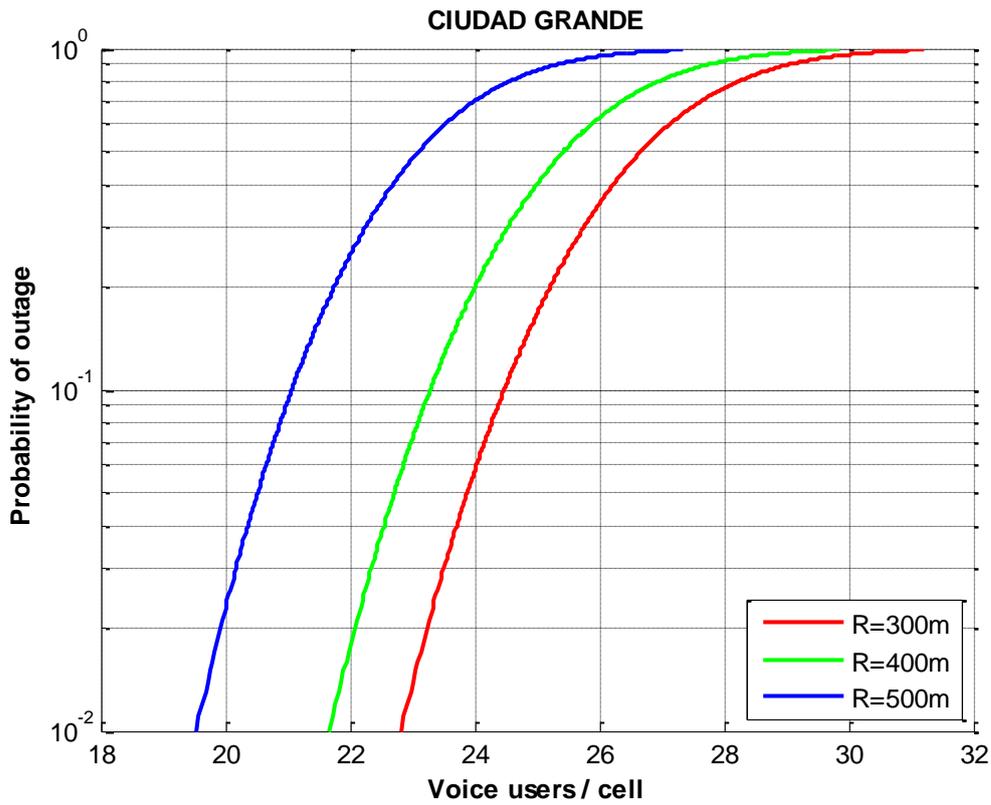


Figura 5.29 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz - Ciudad grande

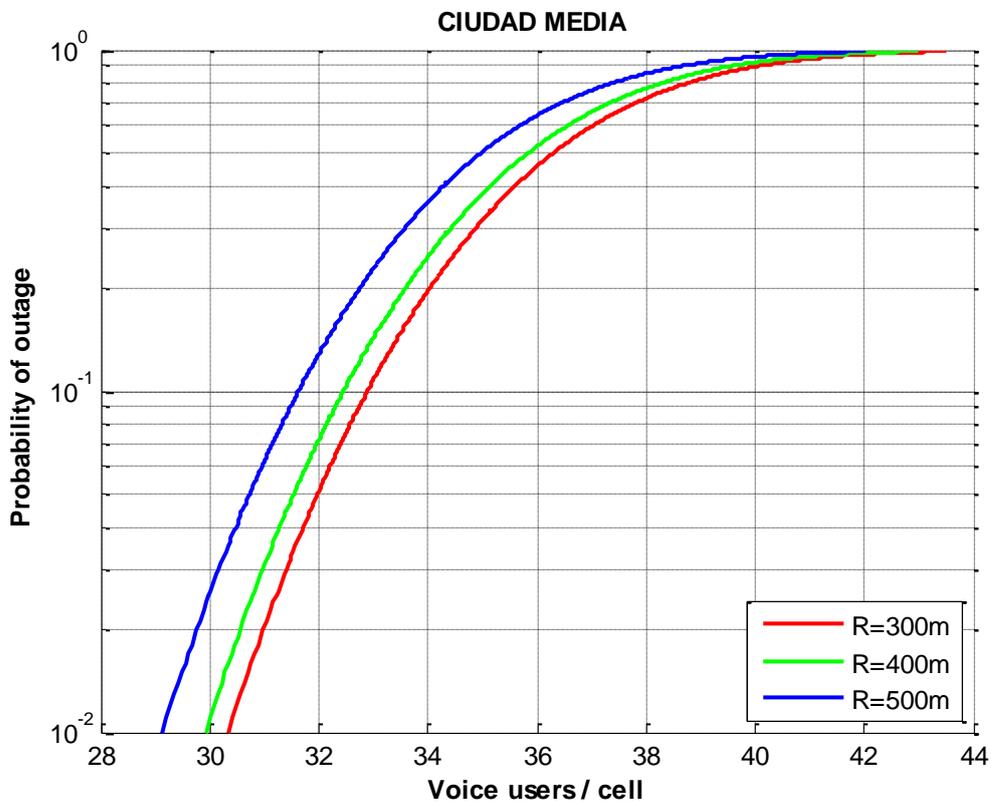


Figura 5.30 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz - Ciudad media

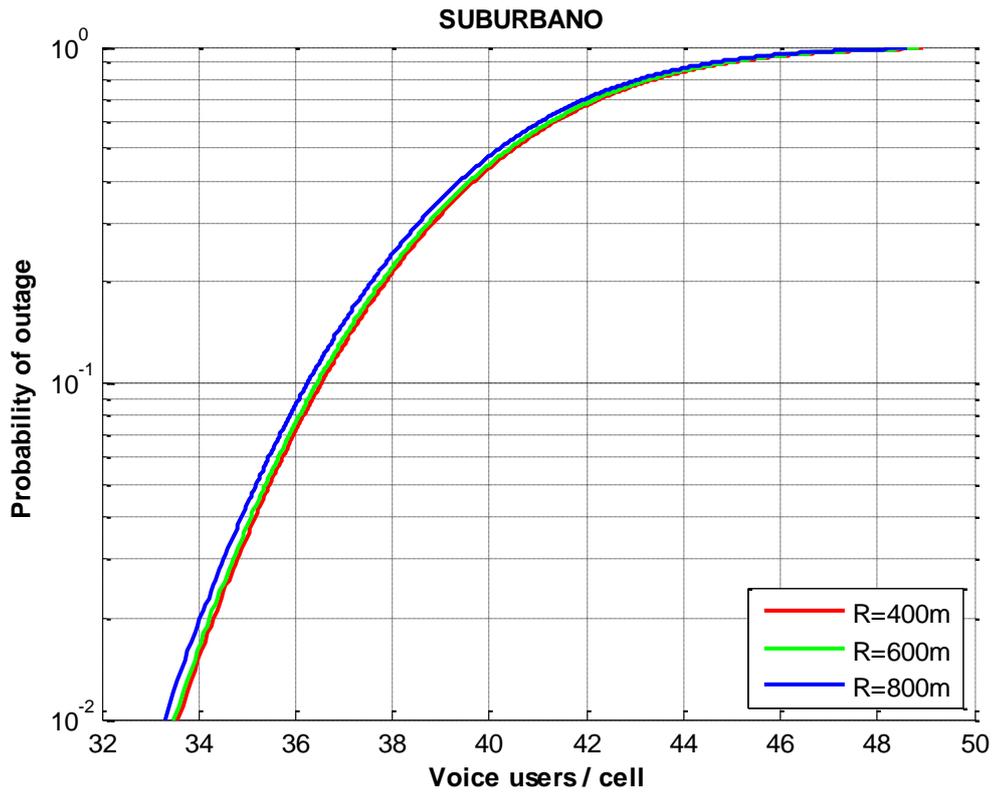


Figura 5.31 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz - Suburbano

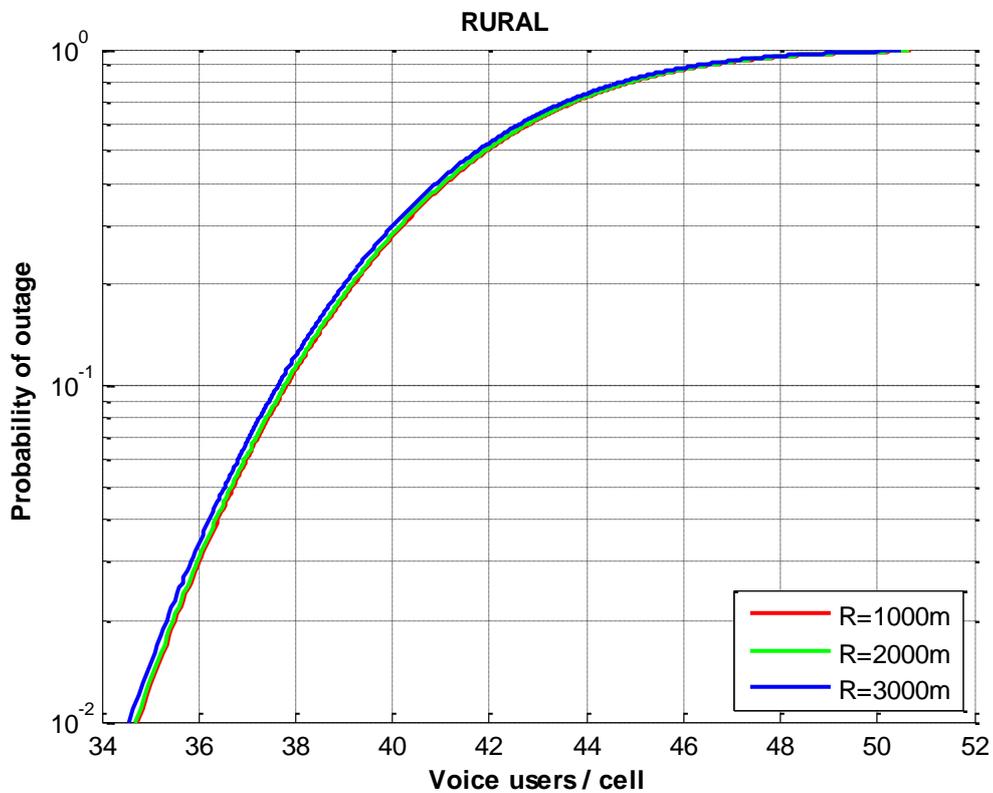


Figura 5.32 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz - Rural

Para una probabilidad de desbordamiento del 1% observamos distintas capacidades en función del tipo de escenario en que nos encontremos:

- entre 19 y 22 usuarios para grandes ciudades, según el radio de la célula.
- entre 29 y 30 usuarios para ciudades medias, según el radio de la célula.
- 33 usuarios para entornos suburbanos
- 34 usuarios para entornos rurales

Observamos como el radio de la célula tiene una incidencia significativa sobre la capacidad máxima en entornos urbanos, mientras que en otros casos la influencia es mucho menor, especialmente en entornos rurales

En todos los casos, la capacidad se ve reducida a medida que aumenta el radio celular, aunque observamos como las diferencias son verdaderamente apreciables en entornos urbanos, teniendo este parámetro una influencia mucho menor en entornos suburbanos y rurales, donde se han obtenido prácticamente los mismos resultados para radios de entre 1000m y 3000m.

A pesar del gran tamaño de las celdas, es en entornos rurales donde la capacidad es sensiblemente superior. En entornos urbanos, donde las pérdidas de propagación son mayores y el efecto shadowing mucho más acusado, los valores de capacidad obtenidos han sido significativamente inferiores.

En general, observamos cómo, independientemente del tipo de escenario, la capacidad celular con esta distribución celular es inferior a la que se observaba en autopistas y túneles. Esto es debido a que con esta configuración la interferencia intercelular generada es mucho mayor dado que cada célula se encuentra rodeada por otras 6 en su primera corona, 12 en la segunda ..., mientras que en las simulaciones anteriores cada célula únicamente tenía 2 celdas contiguas, otras 2 a continuación y así sucesivamente ....

Para analizar el efecto de la interferencia generada por el servicio HSUPA, diferenciaremos claramente cuando los usuarios del servicio de datos de alta velocidad se encuentran en la misma celda y cuando se encuentran en celdas contiguas.

Veamos en primer lugar la reducción en la capacidad de la célula que se produce cuando debemos ofrecer servicio simultáneamente a 1 usuario HSUPA. Las Figuras 5.33 – 5.36 muestran la capacidad de la célula para el servicio de voz en distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

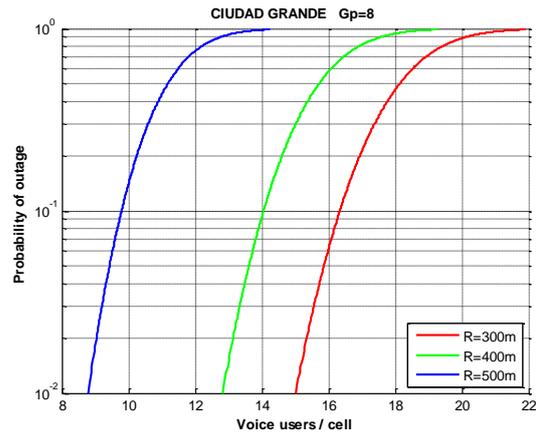
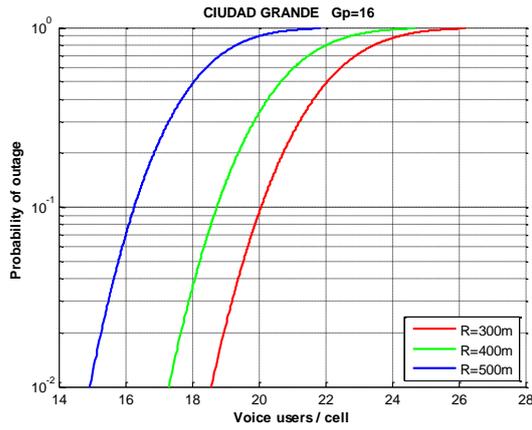


Figura 5.33 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA interno - Ciudad grande

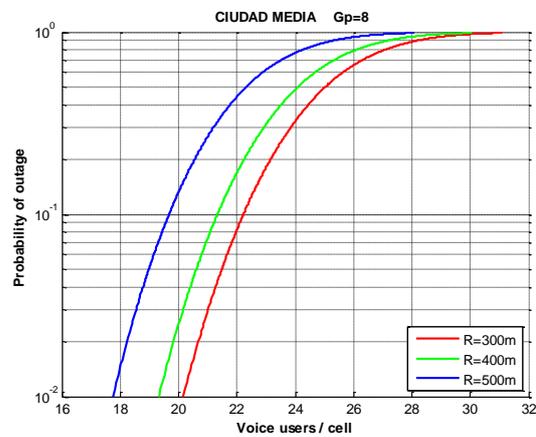
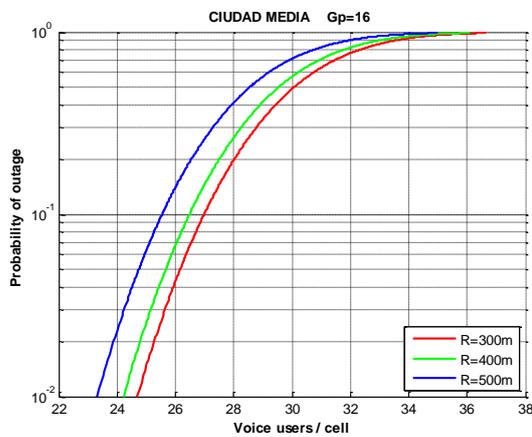


Figura 5.34 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA interno - Ciudad media

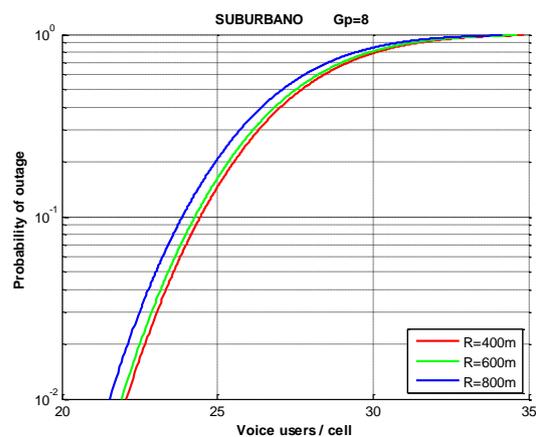
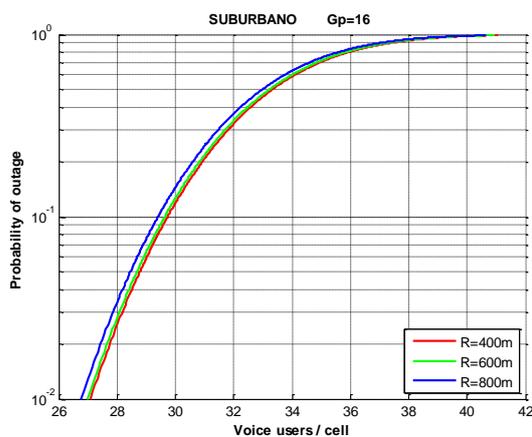


Figura 5.35 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA interno - Suburbano

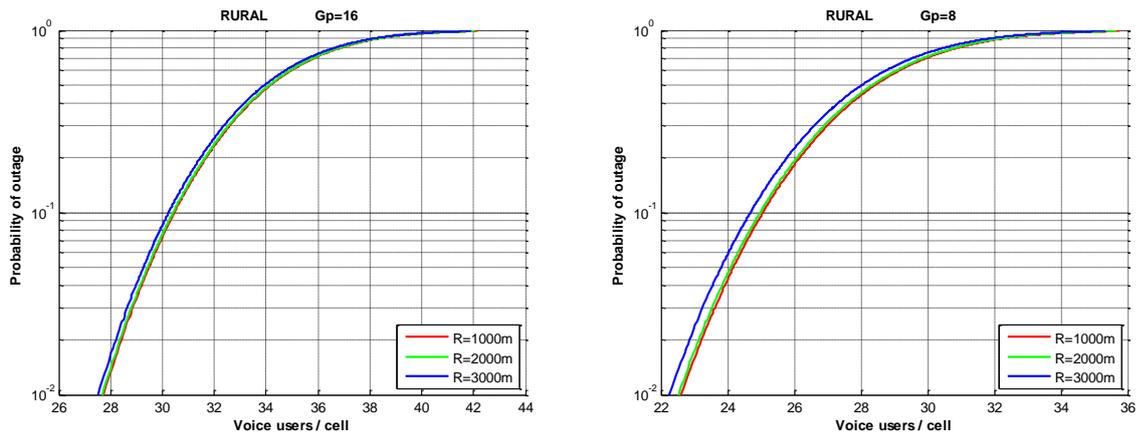


Figura 5.36 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA interno - Rural

Puede observarse en estas gráficas como la inclusión de 1 usuario HSUPA en nuestra célula supone la disminución de su capacidad para ofrecer servicio a usuarios de voz. Dicha disminución dependerá de la máxima potencia de transmisión. En escenarios de tipo urbano encontramos disminuciones de 5 y 10 para ganancias de procesamiento de 16 y 8 respectivamente. Para entornos rurales se pierden entre 7 y 12 usuarios dependiendo de la ganancia de procesamiento utilizada para el servicio HSUPA.

A continuación añadiremos un segundo usuario HSUPA también dentro de la célula bajo estudio. Las Figuras 5.37 – 5.40 muestran la capacidad celular para el servicio de voz en distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

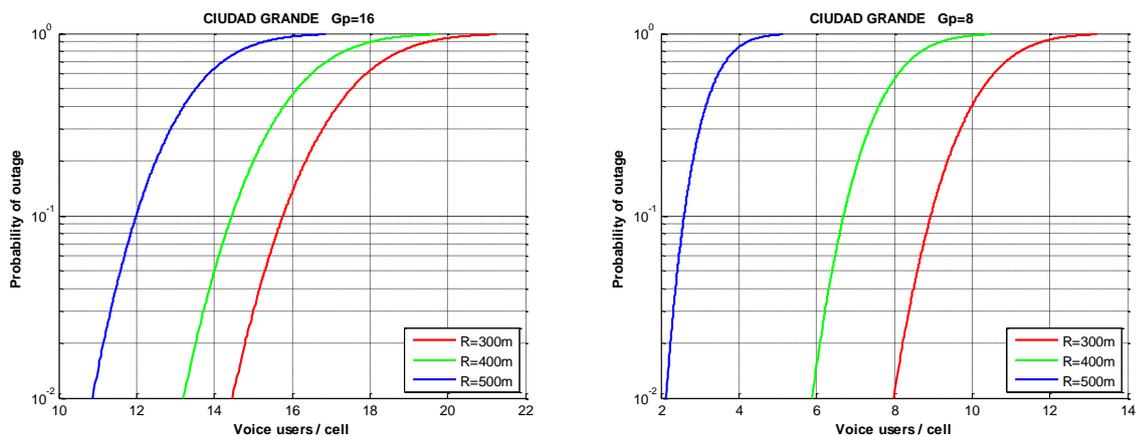


Figura 5.37 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA internos - Ciudad grande

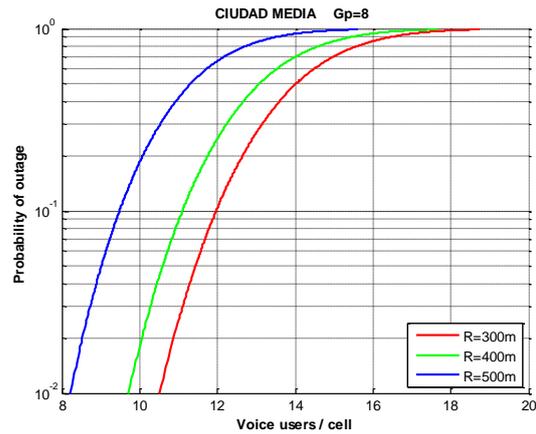
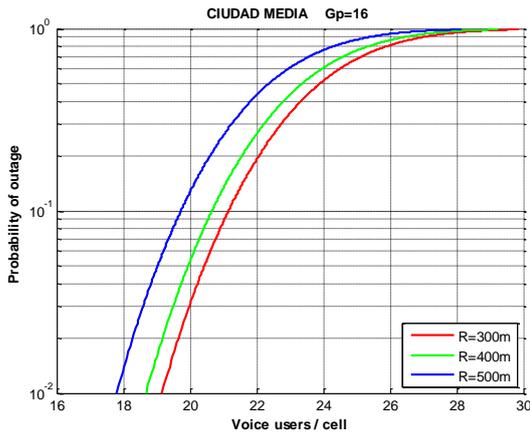


Figura 5.38 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA internos - Ciudad media

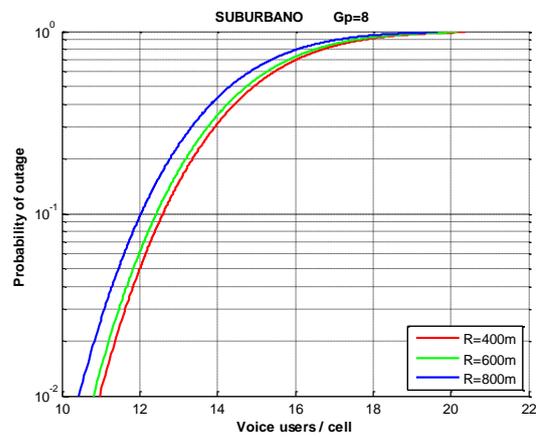
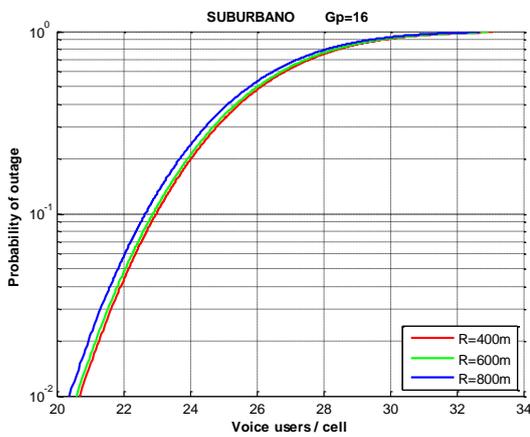


Figura 5.39 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA internos – Suburbano

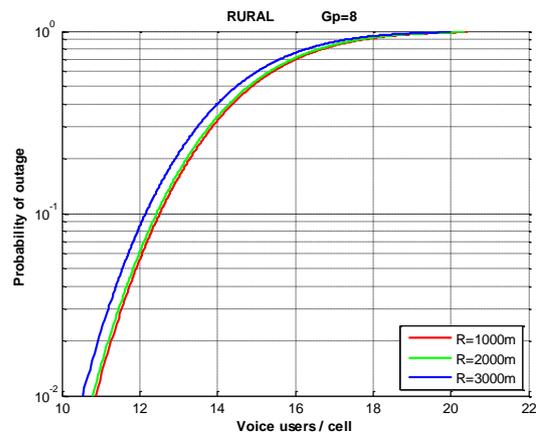
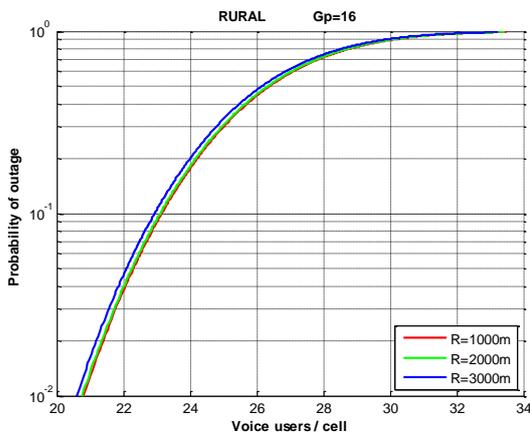


Figura 5.40 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA internos - Rural

Al incluir un segundo usuario del servicio HSUPA dentro de la celda bajo estudio, comprobamos nuevamente un efecto similar al que producía el primero. Se observa una disminución adicional de la capacidad para el servicio de voz desde los 5-10 usuarios en entornos urbanos hasta los 7-12 usuarios en entornos rurales.

Pasemos ahora a nuestro segundo caso en el que los usuarios HSUPA se encuentran fuera de la celda bajo estudio. Comenzaremos situándolos en el borde de nuestra célula, a una distancia  $d/2$  de la estación base, y los alejaremos hasta una distancia  $2,5d$ . Dado que se ha supuesto el uso de antenas omnidireccionales, la dirección desde la que se aproxime el usuario interferente carece de importancia. De este modo la simulación se ha realizado en una única dimensión.

Veamos en primer lugar la reducción en la capacidad de la célula que se produce cuando 1 usuario HSUPA se encuentra a una distancia  $r_1$  de la estación base, fuera de la celda bajo estudio. Las Figuras 5.41 – 5.44 muestran la capacidad celular para el servicio de voz en distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

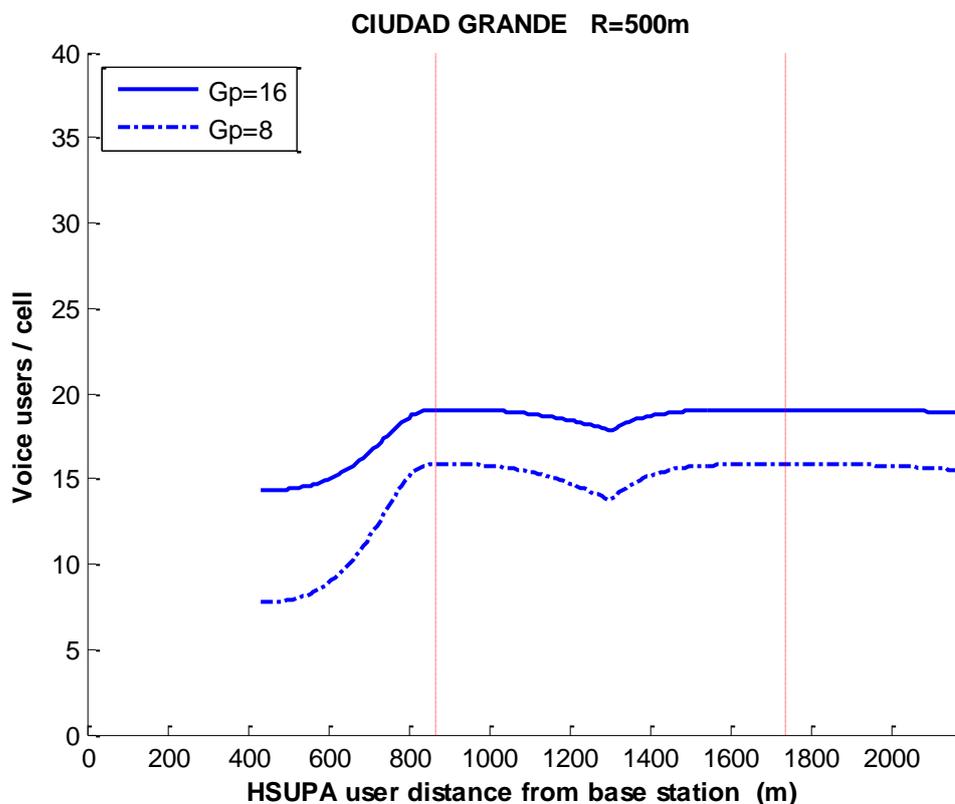


Figura 5.41 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo - Ciudad grande

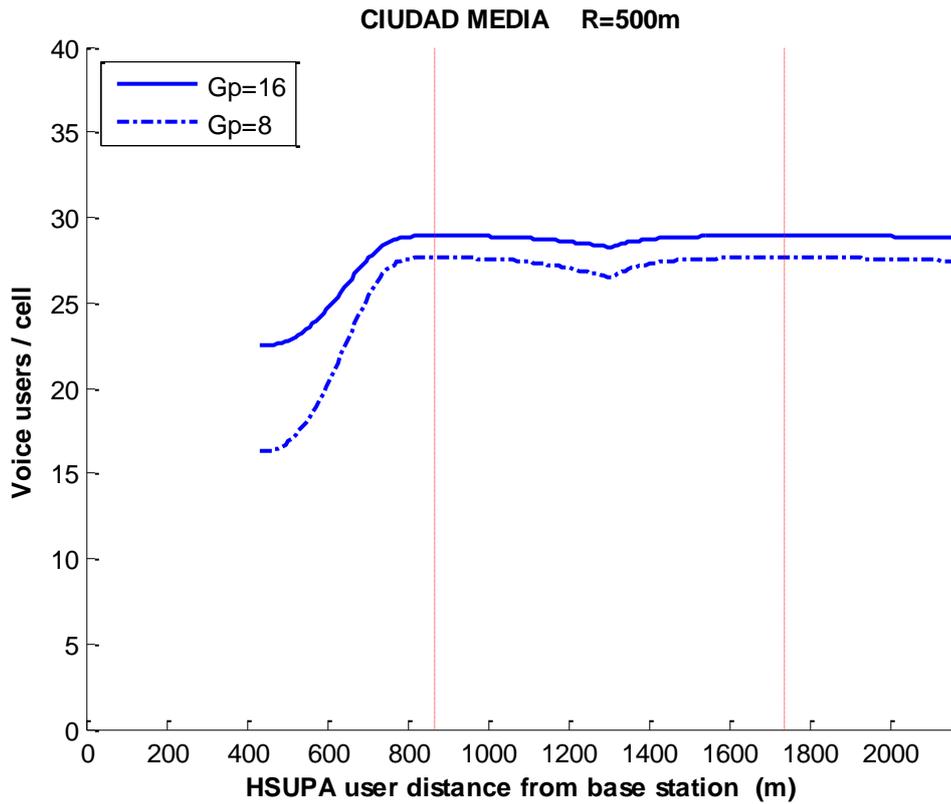


Figura 5.42 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo - Ciudad media

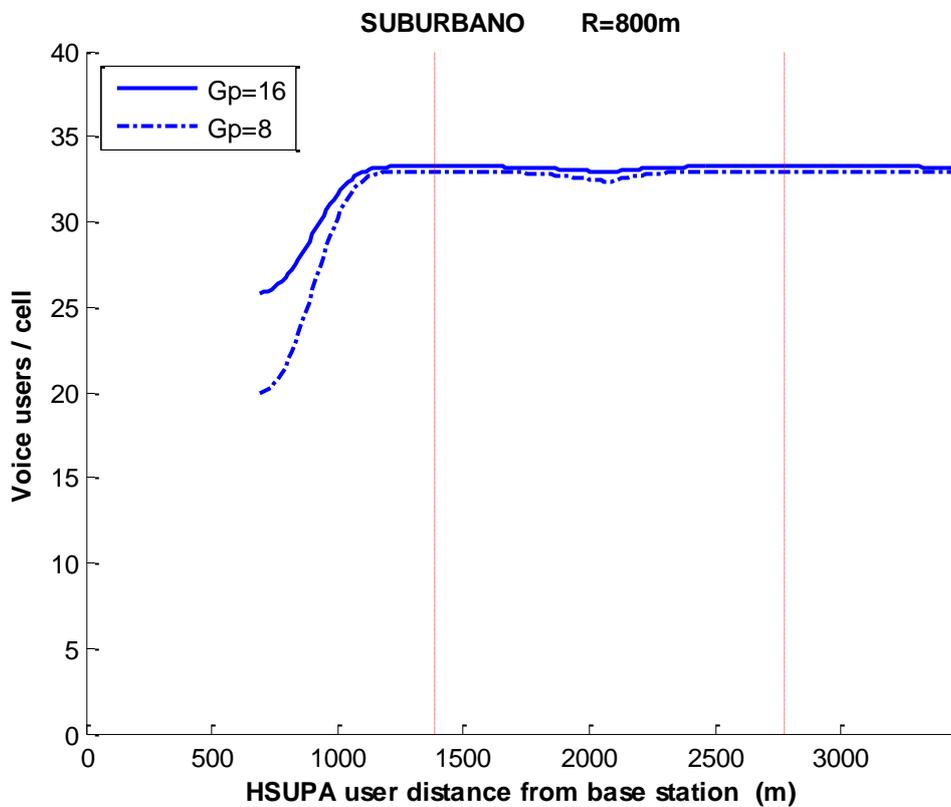


Figura 5.43 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo - Suburbano

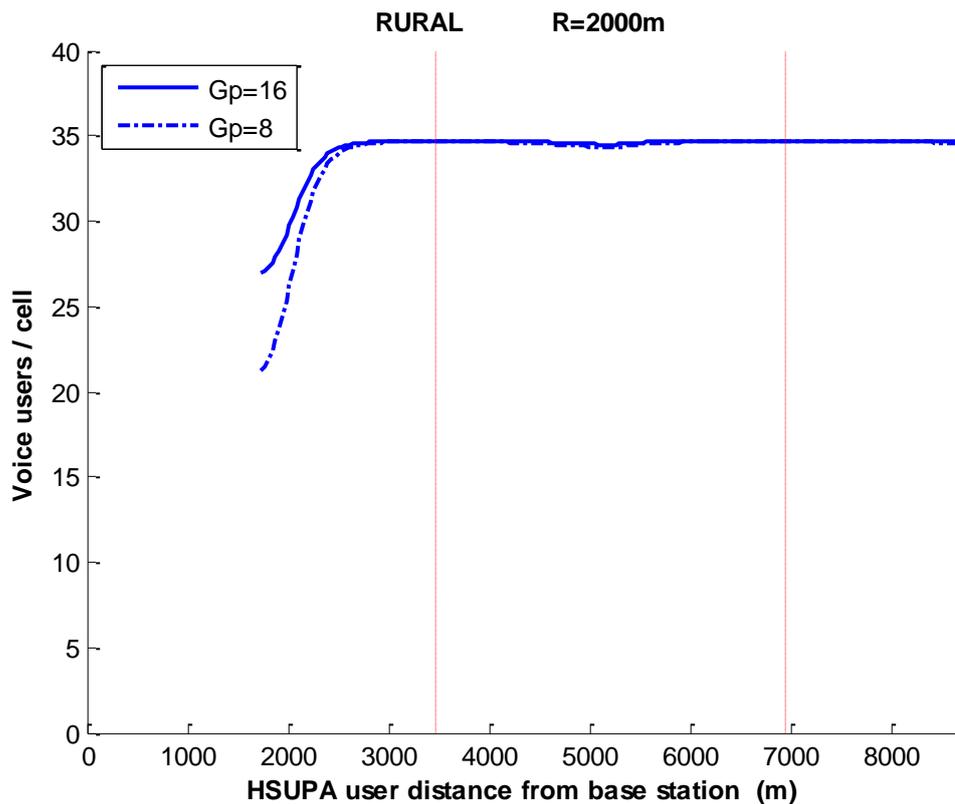


Figura 5.44 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo - Rural

Las marcas rojas verticales, separadas una distancia  $d$ , identifican los centros de las células contiguas de la red celular, donde se sitúan las estaciones base. Para todos los entornos simulados, observamos como a menor distancia del usuario HSUPA a la estación base bajo estudio, la interferencia generada en esta es mayor y, por lo tanto, nuestra célula tendrá una menor capacidad para ofrecer servicio de voz a los usuarios.

Esta capacidad se ve drásticamente reducida cuando el usuario del servicio de datos de alta velocidad se encuentra justo en el borde de la célula bajo estudio, a una distancia  $d$  de la antena. Para la simulación con  $G_p=8$ , comprobamos una disminución superior al 50% en la capacidad del servicio, siendo esta más acusada en entornos rurales que en entornos urbanos.

En el otro extremo, observamos cómo aproximadamente a partir la estación base contigua, un poco antes en los entornos donde el radio de célula utilizado es mayor, la interferencia generada sobre nuestra celda es ya mínima y se alcanzan los valores de capacidad calculados previamente en ausencia de usuarios de otros servicios.

A continuación añadiremos un segundo usuario HSUPA a una distancia  $r_2$  de la estación base, también fuera de la celda bajo estudio. Las Figuras 5.45 – 5.48 muestran la capacidad celular para el servicio de voz en distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

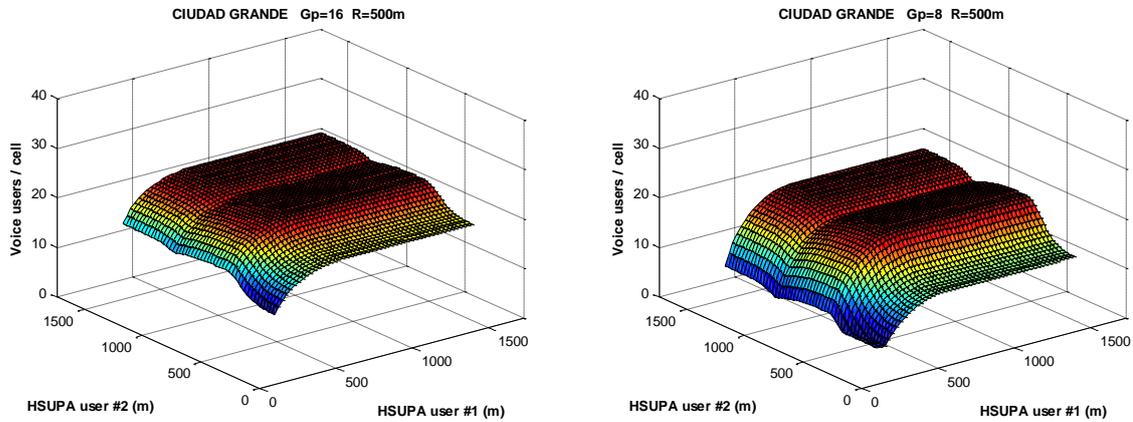


Figura 5.45 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA externos - Ciudad grande

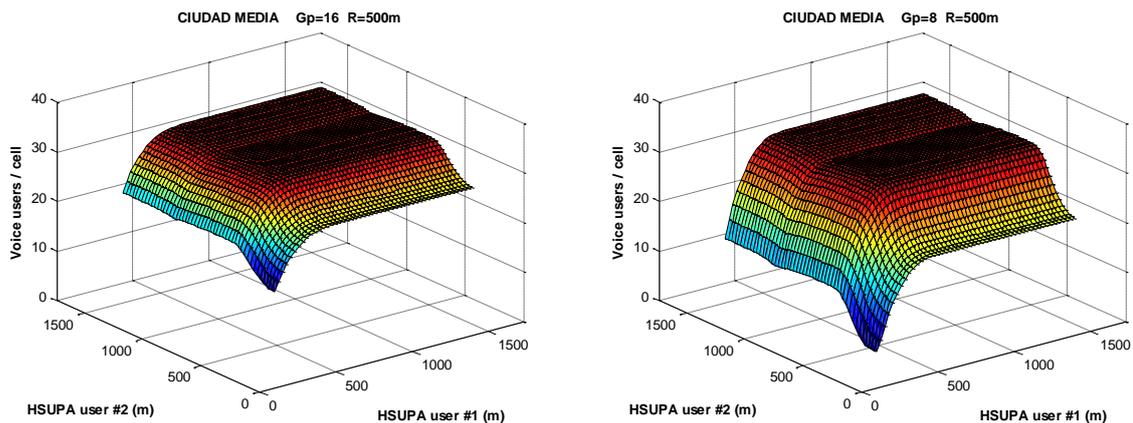


Figura 5.46 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA externos - Ciudad media

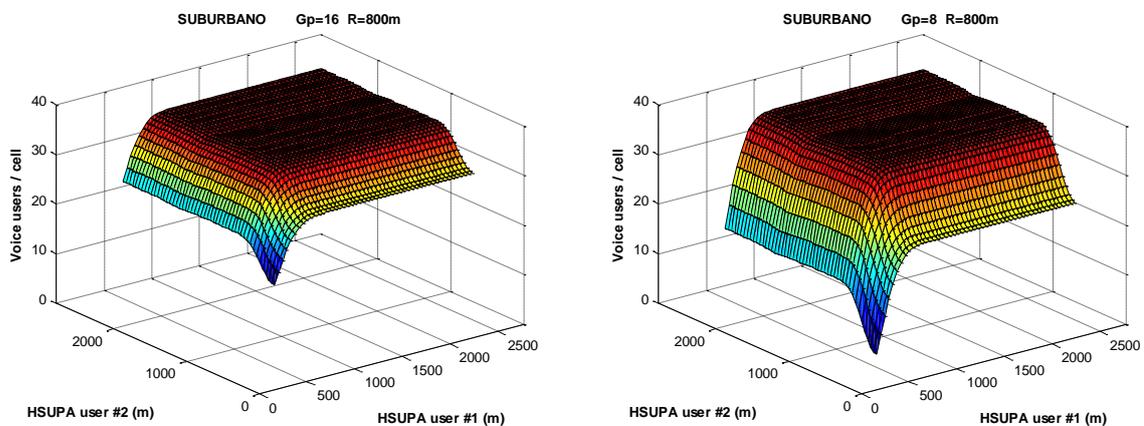


Figura 5.47 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA externos – Suburbano

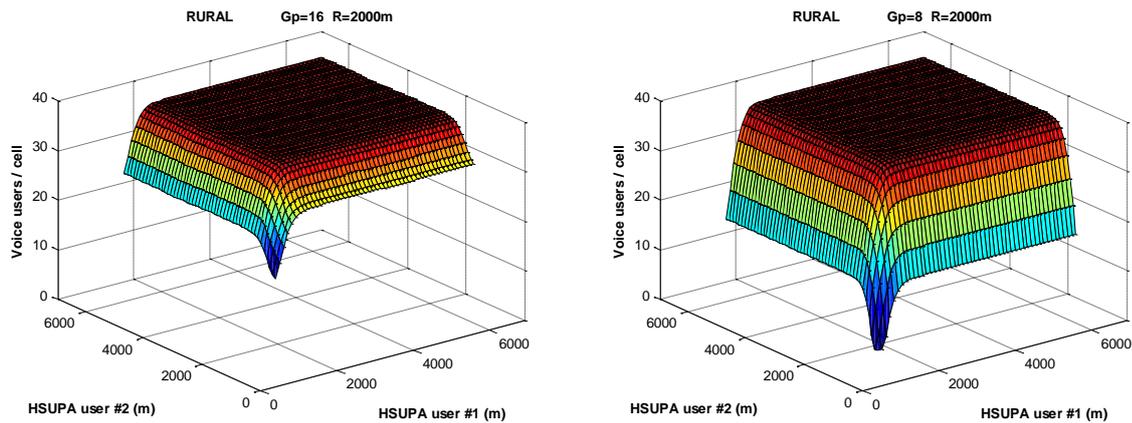


Figura 5.48 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA externos - Rural

Observamos en estas gráficas un comportamiento similar al descrito cuando incluíamos el primer usuario HSUPA. Cuando ambos usuarios se encuentran próximos al borde de la célula, la capacidad para el servicio de voz se anula para ambas ganancias de procesamiento (ahora también en el caso de  $G_p=16$ ). A partir aproximadamente de la estación base contigua, la interferencia generada es ya mínima, y vuelven a alcanzarse los valores de capacidad máxima calculada en ausencia de usuarios de otros servicios.

En estas simulaciones se ha visto la incidencia sobre la capacidad del servicio de voz de uno o dos usuarios del servicio de datos de alta velocidad fuera de la célula bajo estudio. Sin embargo, dado que suponemos una distribución uniforme de usuarios, cada una de las 6 celdas vecinas tendrá un número similar de usuarios HSUPA. En las siguientes simulaciones supondremos la presencia de un usuario interferente en cada una de estas celdas localizados cada uno de ellos a una distancia  $r$  de la estación base bajo estudio. La Figura 5.49 muestra las posibles localizaciones dentro de la simulación de estos 6 usuarios interferentes.

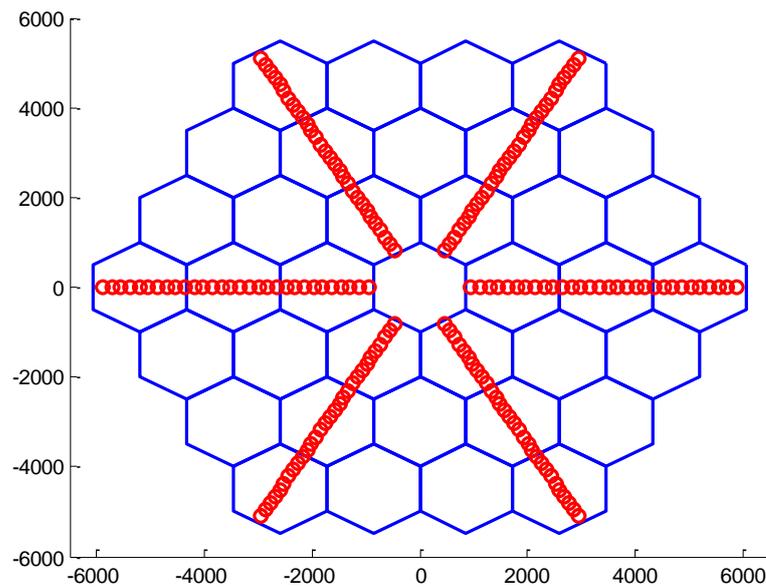


Figura 5.49 - Posibles localizaciones de los 6 usuarios interferentes

Las Figuras 5.50 – 5.53 muestran la capacidad de la célula para el servicio de voz en las circunstancias descritas para distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

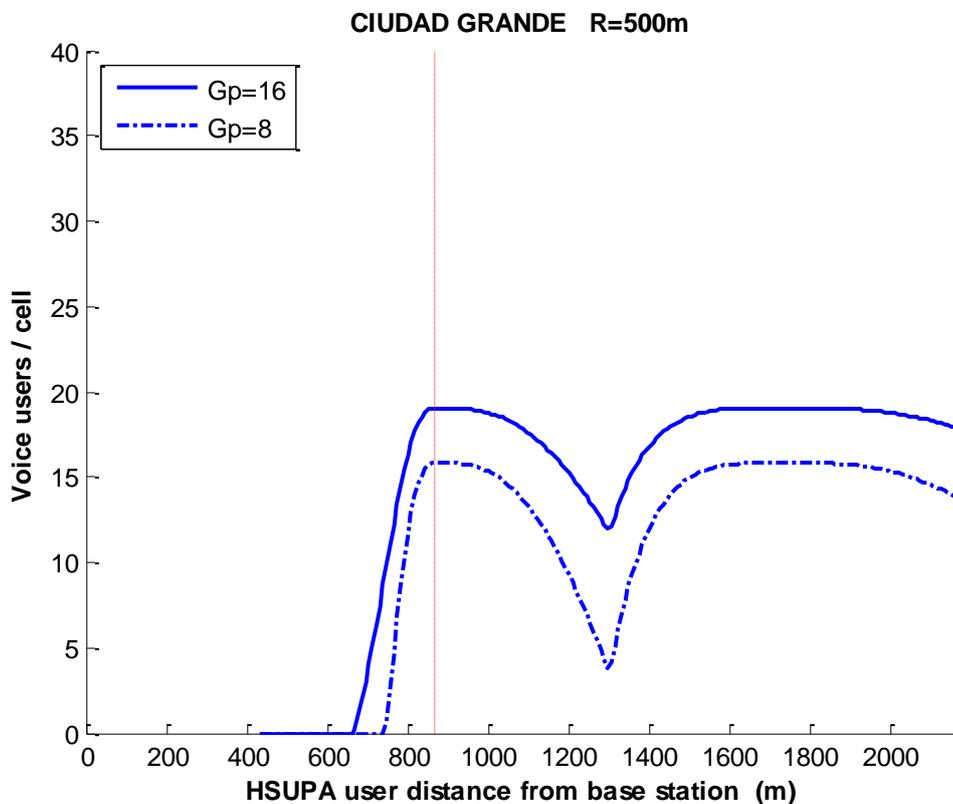


Figura 5.50 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos - Ciudad grande

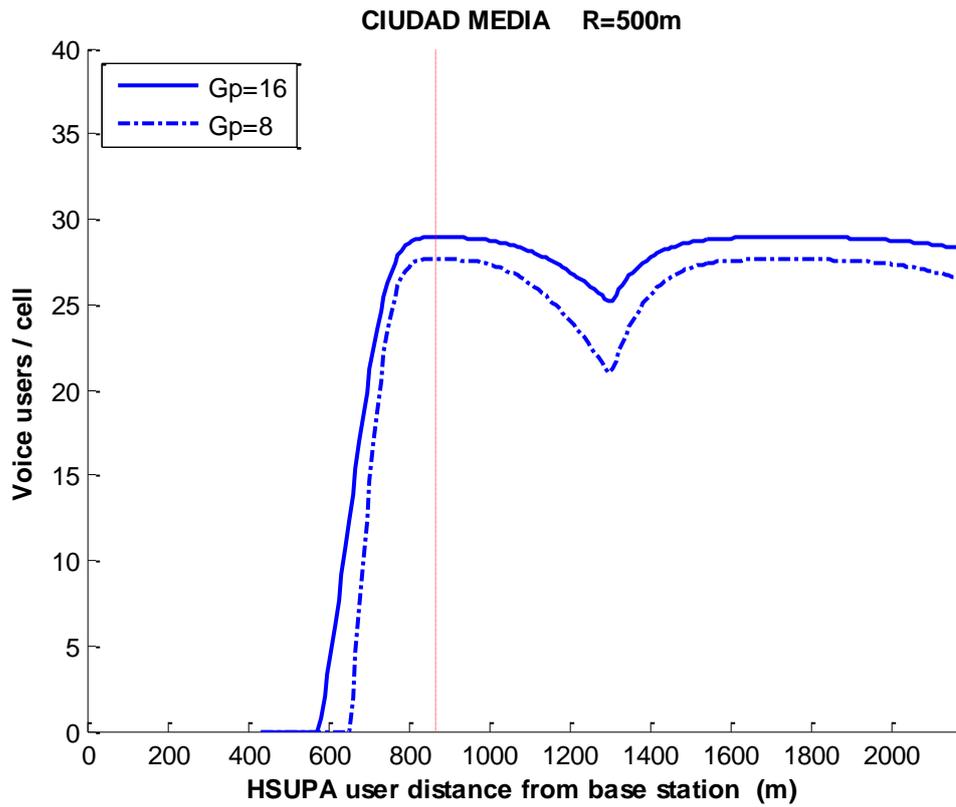


Figura 5.51 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos - Ciudad media

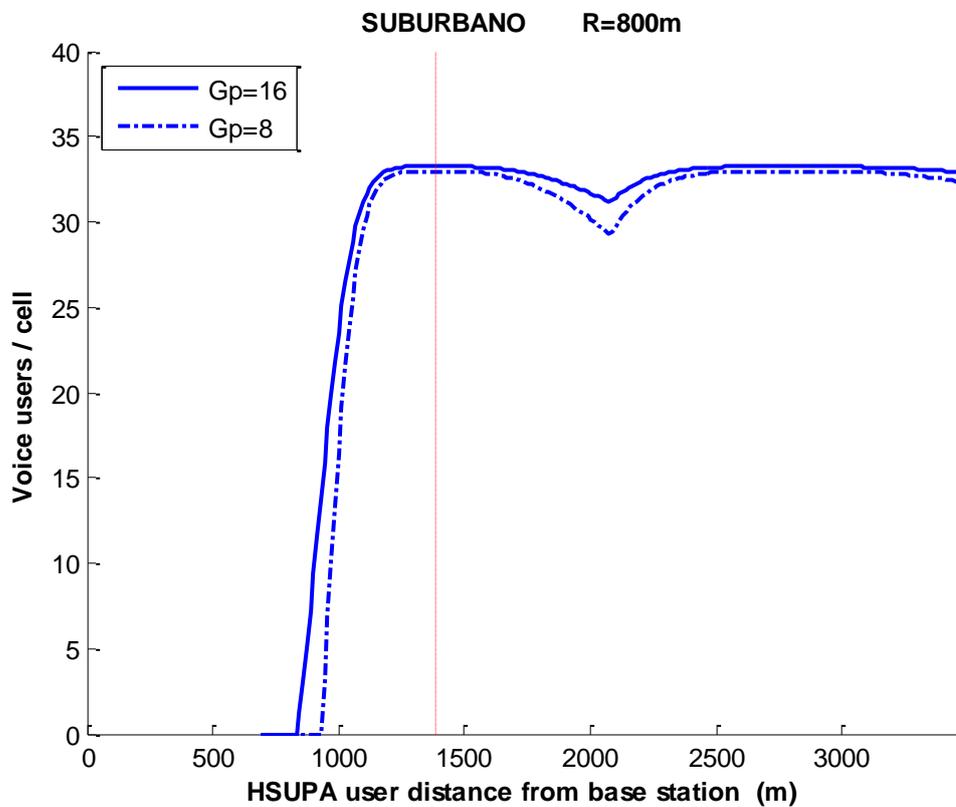


Figura 5.52 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos - Suburbano

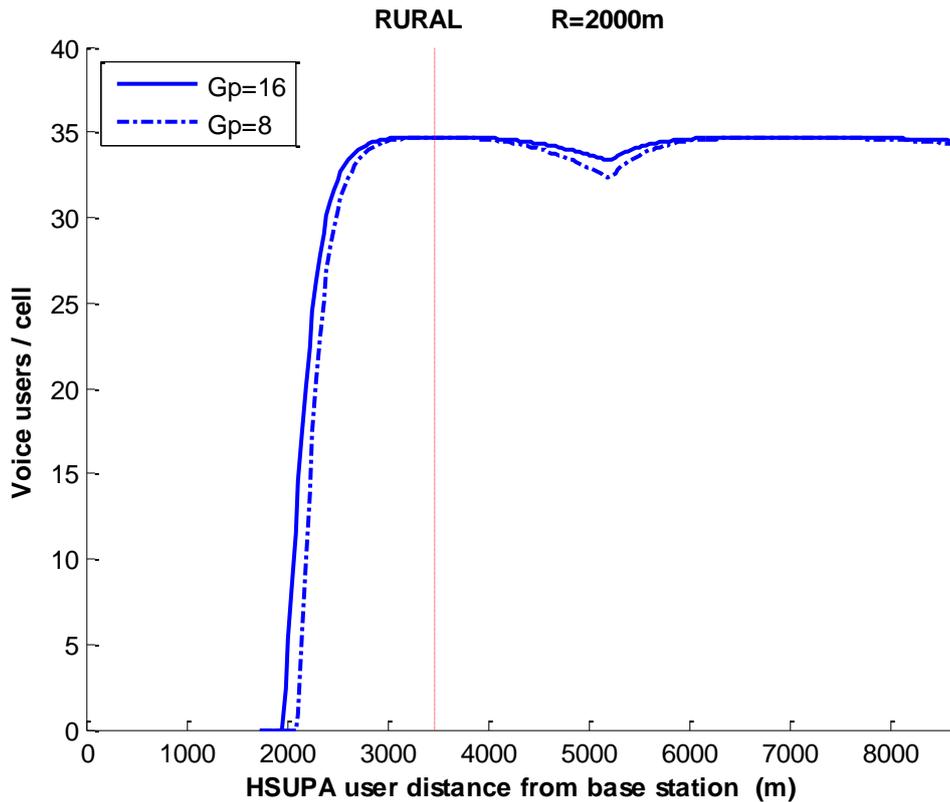


Figura 5.53 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos - Rural

Debido a la mayor interferencia generada por los 6 usuarios, podemos observar una caída más abrupta de la capacidad del servicio, que llega incluso a anularse cuando los usuarios se encuentran próximos al borde de la celda. Cuando los usuarios se encuentran más allá de las estaciones base de las células contiguas, incluso un poco antes en algunos entornos, la interferencia generada es mínima y llegan a obtenerse las capacidades máximas calculadas anteriormente en ausencia de usuarios de otros servicios.

### 5.3.3 Servicio de datos

Una vez caracterizadas las prestaciones que los usuarios pueden esperar del servicio HSUPA en entornos de macroceldas, veamos de qué forma la interferencia generada por estos afecta al servicio de datos, suponiendo una densidad uniforme de usuarios de este servicio dentro de cada célula.

Las Figuras 5.54 – 5.57 muestran la capacidad de una célula para el servicio de datos en distintos escenarios cuando este es el único servicio utilizado.

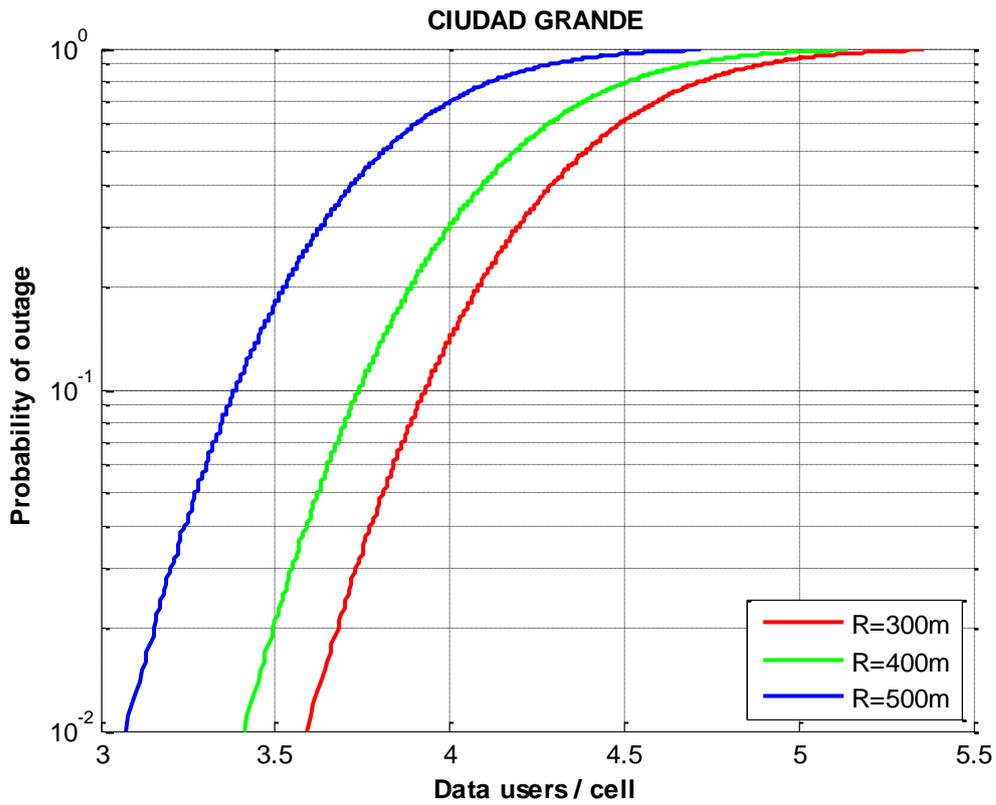


Figura 5.54 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos - Ciudad grande

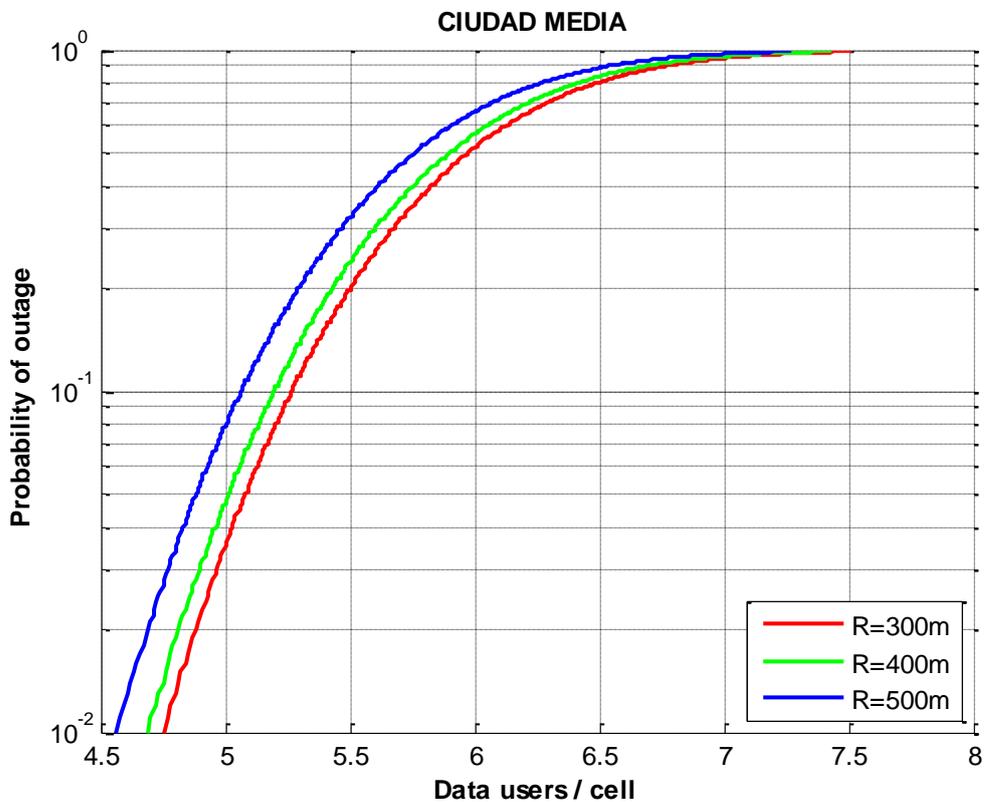


Figura 5.55 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos - Ciudad media

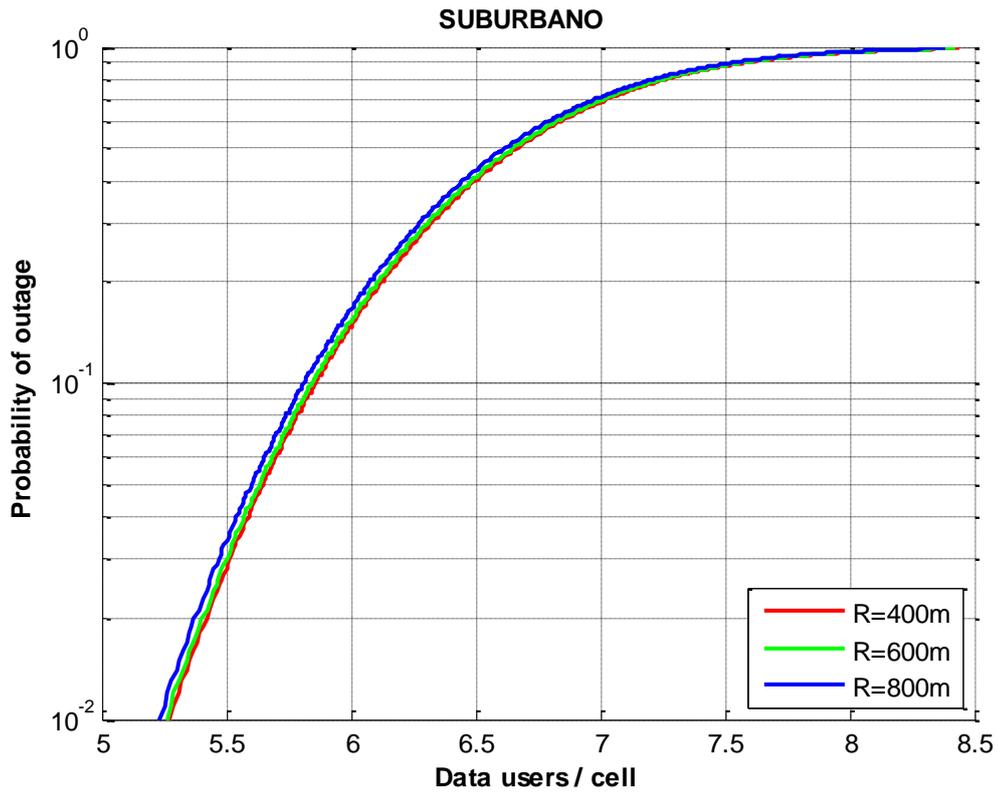


Figura 5.56- Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos - Suburbano

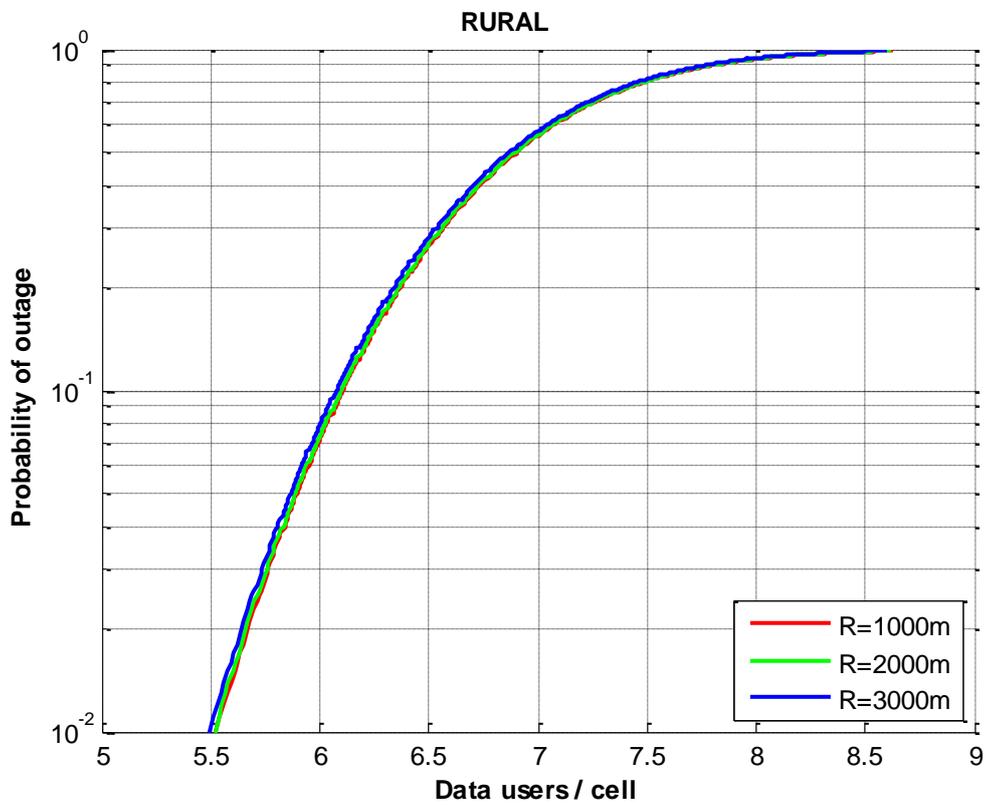


Figura 5.57 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos - Rural

Para una probabilidad de desbordamiento del 1% observamos distintas capacidades en función del tipo de escenario en que nos encontremos:

- 3 usuarios para grandes ciudades
- 4 usuarios para ciudades medias
- 5 usuarios para entornos suburbanos
- 5 usuarios para para entornos rurales

Al igual que sucedía con el servicio de voz, podemos comprobar cómo, a pesar del mayor tamaño de las celdas, la capacidad en entornos rurales es ligeramente superior a la de entornos urbanos, especialmente ciudades grandes. Esto es debido a que en estas últimas las pérdidas de propagación son mayores y el efecto shadowing mucho más acusado.

En todos los casos, la capacidad se ve reducida a medida que aumenta el radio de la célula, aunque observamos como las diferencias son verdaderamente apreciables en entornos urbanos, teniendo este parámetro una influencia mucho menor en entornos suburbanos y rurales.

En general, observamos cómo, independientemente del tipo de escenario, la capacidad de la celda con esta distribución celular es inferior a la que se observaba en autopistas y túneles. Esto es debido a que con esta configuración la interferencia intercelular generada es mucho mayor dado que cada célula se encuentra rodeada por otras 6 en su primera corona, 12 en la segunda ..., mientras que en las simulaciones anteriores cada célula únicamente tenía 2 celdas contiguas, otras 2 a continuación y así sucesivamente ....

Para analizar el efecto de la interferencia generada por el servicio HSUPA, diferenciaremos claramente cuando los usuarios del servicio de datos de alta velocidad se encuentran en la misma celda y cuando se encuentran en celdas contiguas.

Veamos en primer lugar la reducción en la capacidad de la célula que se produce cuando debemos ofrecer servicio simultáneamente a 1 usuario HSUPA. Las Figuras 5.58 – 5.61 muestran la capacidad celular para el servicio de datos en distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

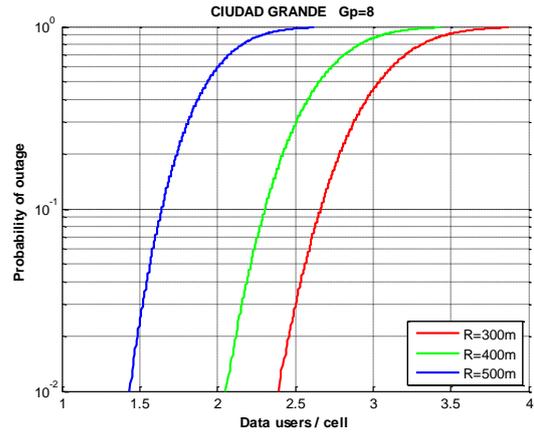
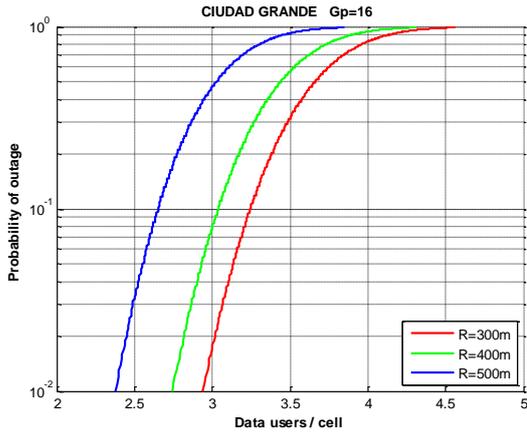


Figura 5.58 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA interno - Ciudad grande

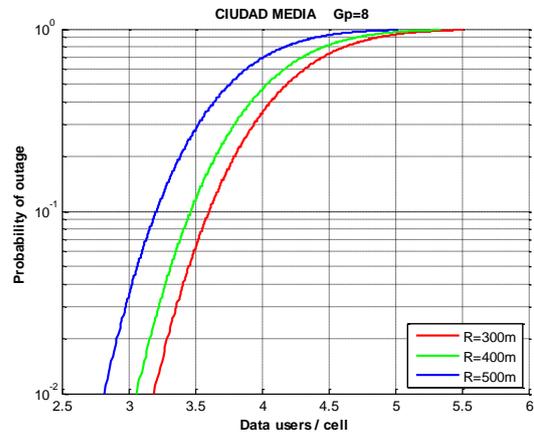
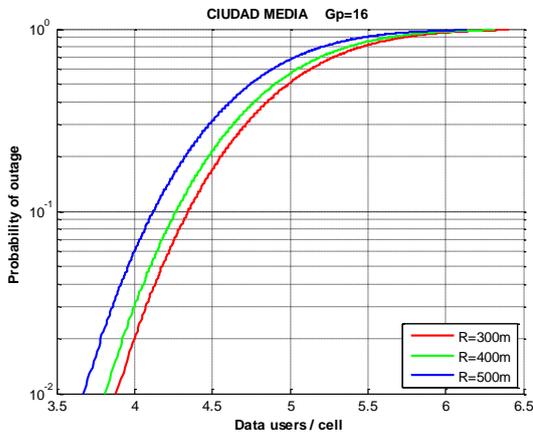


Figura 5.59 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA interno - Ciudad media

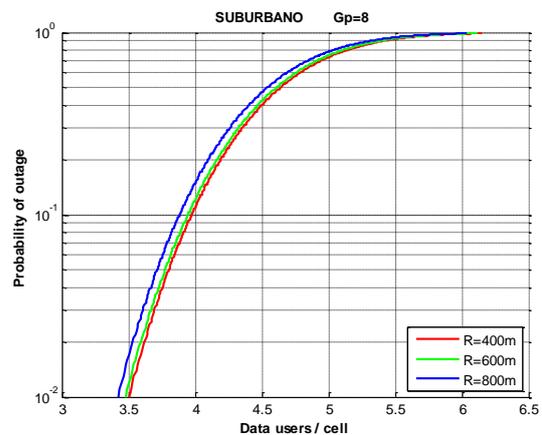
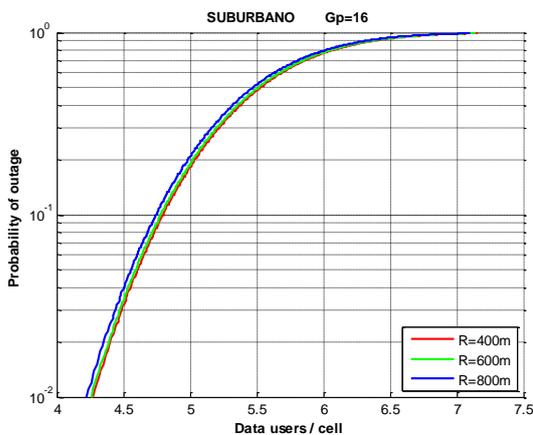


Figura 5.60 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA interno - Suburbano

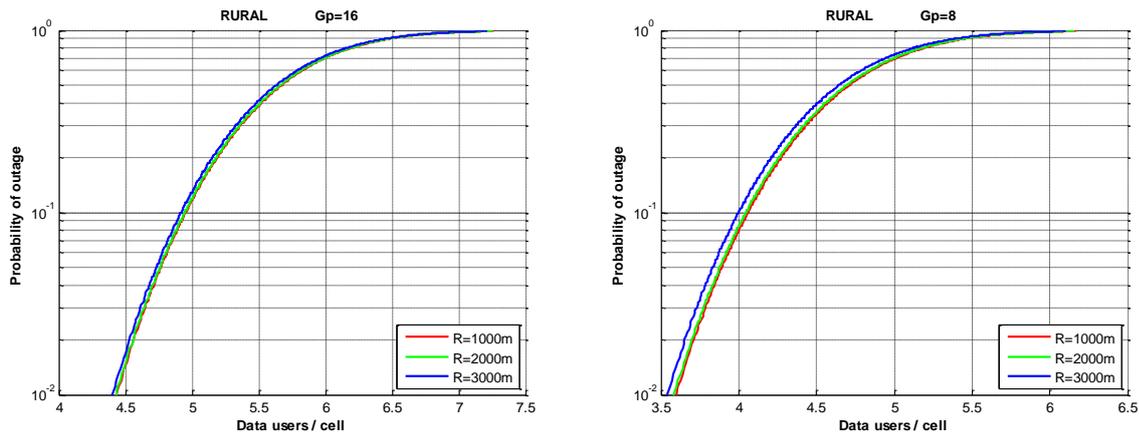


Figura 5.61 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA interno - Rural

Puede observarse en estas gráficas la inclusión de 1 usuario HSUPA en nuestra célula supone la disminución de su capacidad para ofrecer servicio a usuarios de datos. Dado que las potencias de transmisión máximas del servicio de datos son en general bastante superiores a las permitidas para el servicio de voz, en este caso no observamos grandes diferencias entre entornos urbanos y rurales, restándose aproximadamente 1 ó 2 usuarios en todos los casos dependiendo de la ganancia de procesamiento utilizada para el servicio HSUPA.

A continuación añadiremos un segundo usuario HSUPA también dentro de la célula bajo estudio. Las Figuras 5.62 – 5.65 muestran la capacidad celular para el servicio de datos en distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

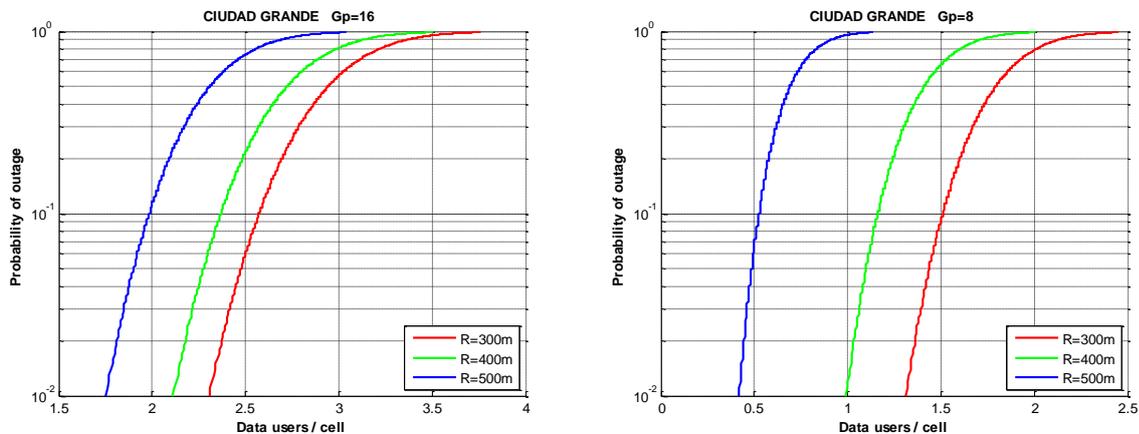


Figura 5.62 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA internos - Ciudad grande

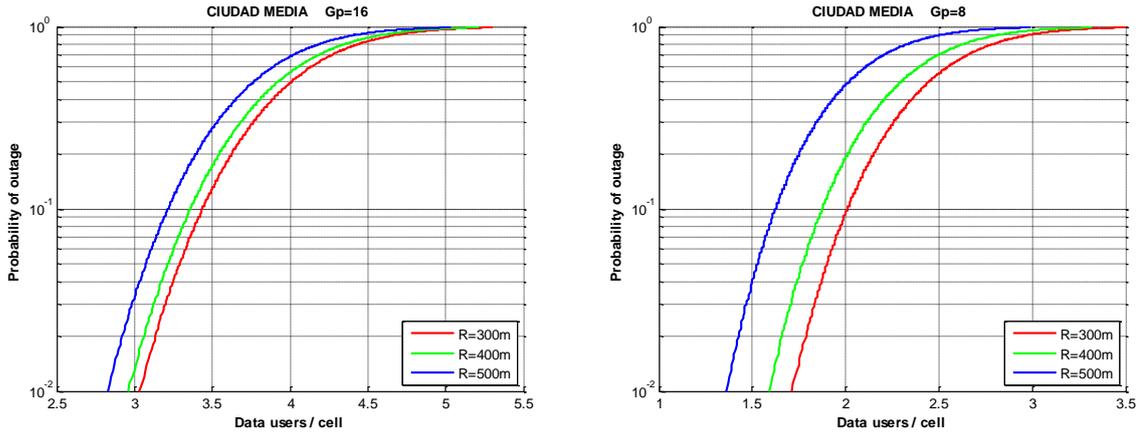


Figura 5.63 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA internos - Ciudad media

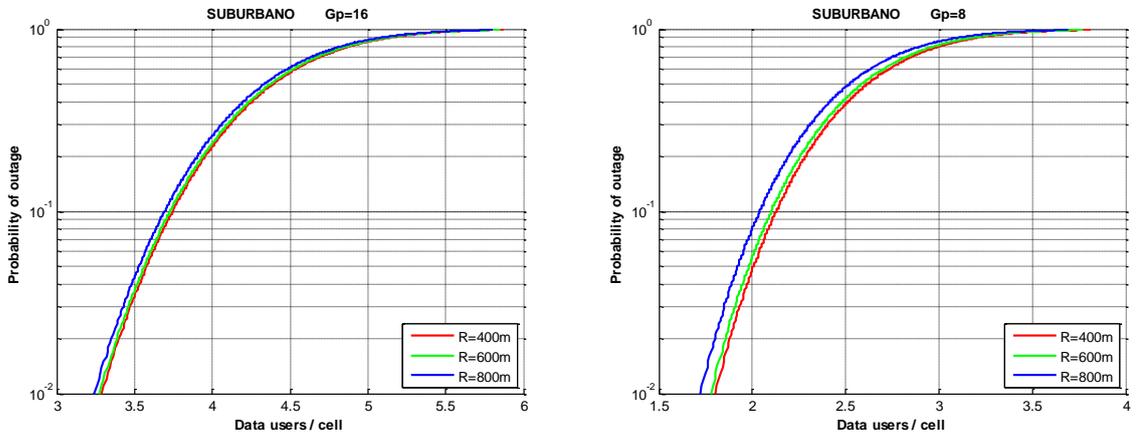


Figura 5.64 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA internos – Suburbano

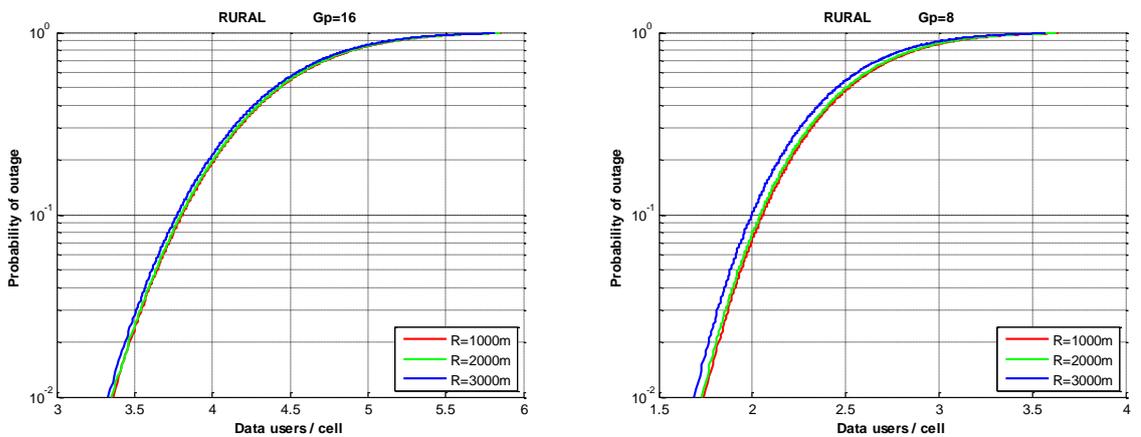


Figura 5.65 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA internos - Rural

Al incluir un segundo usuario del servicio HSUPA dentro de la celda bajo estudio, comprobamos nuevamente un efecto similar al que producía el primero. Se observa una disminución adicional en la capacidad del servicio de datos de aproximadamente 1 usuario en todos los escenarios simulados.

Pasemos ahora a nuestro segundo caso en el que los usuarios HSUPA se encuentran fuera de la celda bajo estudio. Comenzaremos situándolos en el borde de nuestra célula, a una distancia  $d$  de la estación base, y los alejaremos hasta una distancia  $2,5d$ .

Veamos en primer lugar la reducción en la capacidad de la célula que se produce cuando 1 usuario HSUPA se encuentra a una distancia  $r_1$  de la estación base, fuera de la celda bajo estudio. Las Figuras 5.66 – 5.69 muestran la capacidad celular para el servicio de datos en distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

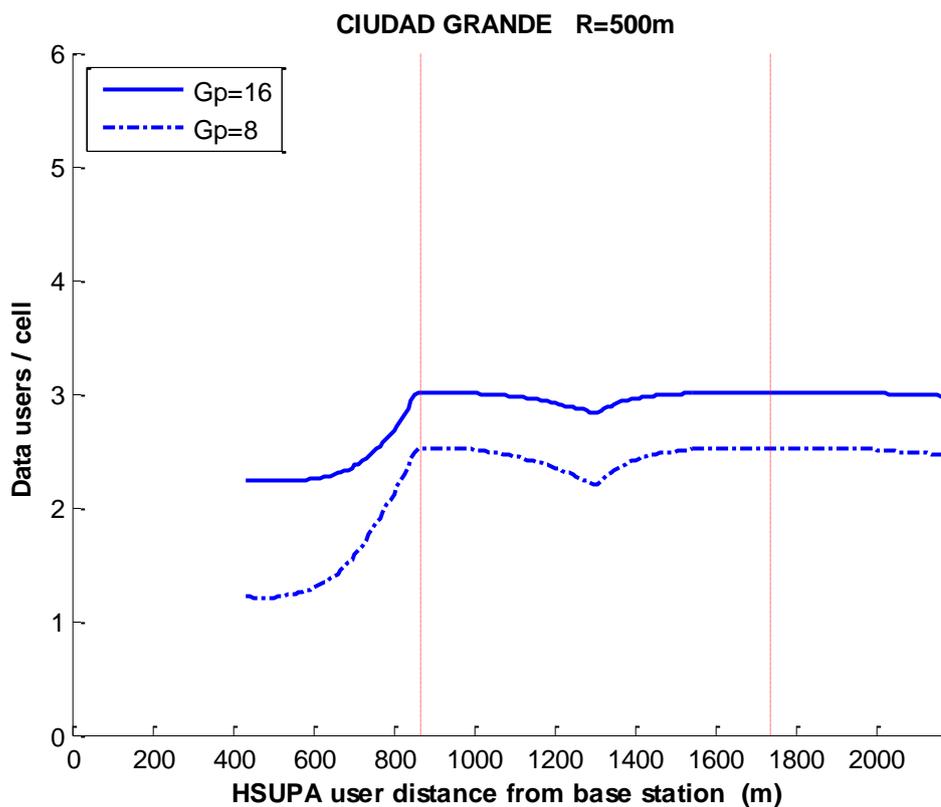


Figura 5.66 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo - Ciudad grande

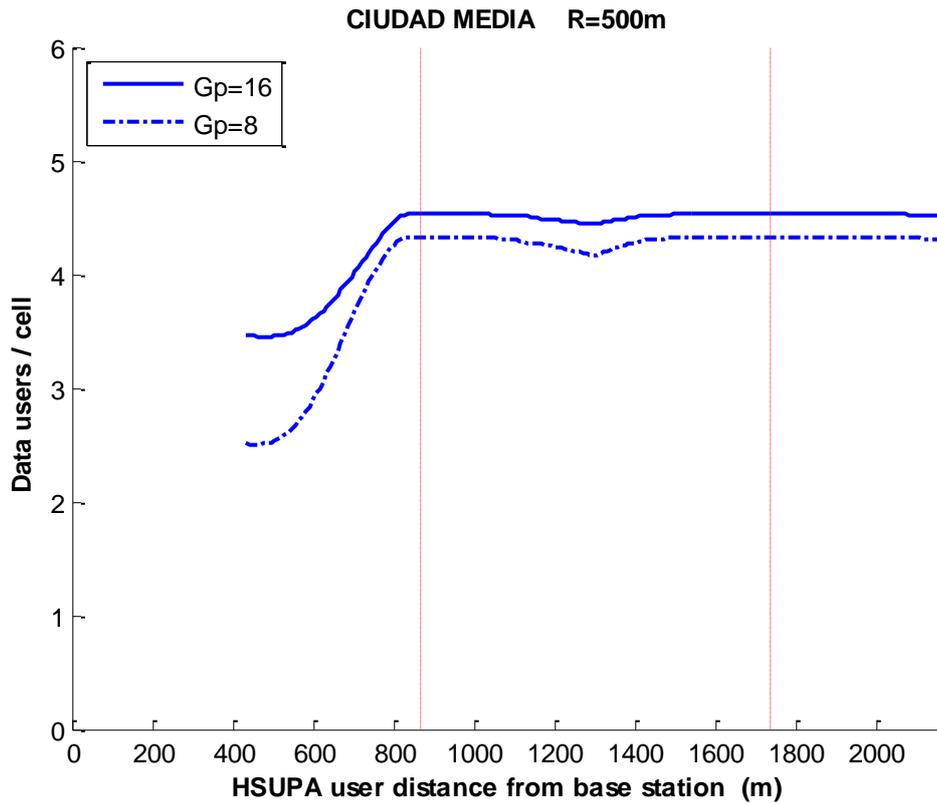


Figura 5.67 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo - Ciudad media

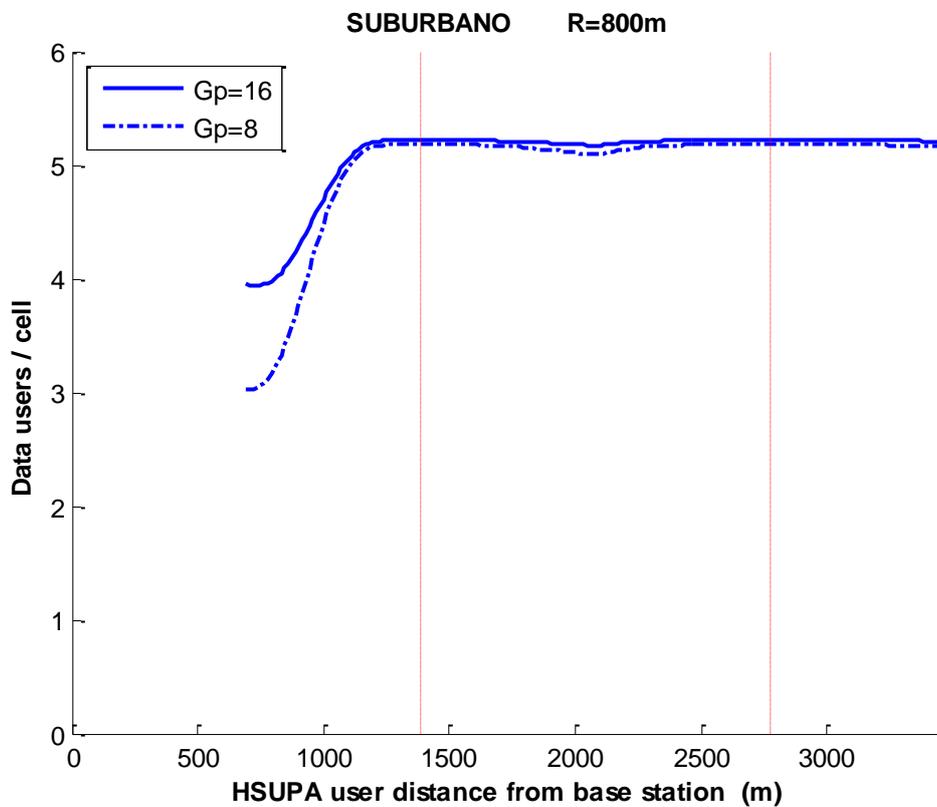


Figura 5.68 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo - Suburbano

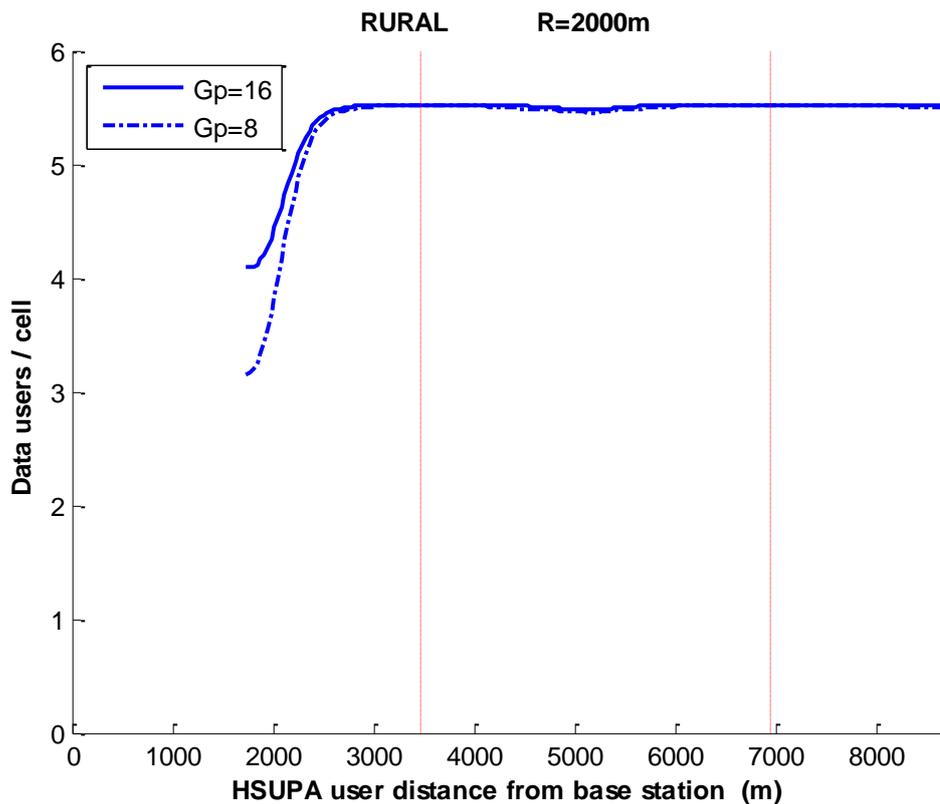


Figura 5.69 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo - Rural

Las marcas rojas verticales, separadas una distancia  $d$ , identifican los centros de las células contiguas de la red celular, donde se sitúan las estaciones base. Para todos los entornos simulados, observamos como a menor distancia del usuario HSUPA a la estación base bajo estudio, la interferencia generada en esta es mayor y, por lo tanto, nuestra célula tendrá una menor capacidad para ofrecer servicio de datos a los usuarios.

Esta capacidad se ve drásticamente reducida cuando el usuario del servicio de datos de alta velocidad se encuentra justo en el borde de la célula bajo estudio, a una distancia  $d$  de la antena. Para la simulación con  $G_p=8$ , comprobamos una disminución superior al 50% en la capacidad del servicio, siendo esta más acusada en entornos rurales que en entornos urbanos.

En el otro extremo, observamos cómo aproximadamente a partir la estación base contigua, un poco antes en los entornos donde el radio de célula utilizado es mayor, la interferencia generada sobre nuestra celda es ya mínima y se alcanzan los valores de capacidad calculados previamente en ausencia de usuarios de otros servicios.

A continuación añadiremos un segundo usuario HSUPA a una distancia  $r_2$  de la estación base, también fuera de la celda bajo estudio. Las Figuras 5.70 – 5.73 muestran la capacidad celular para el servicio de datos en distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

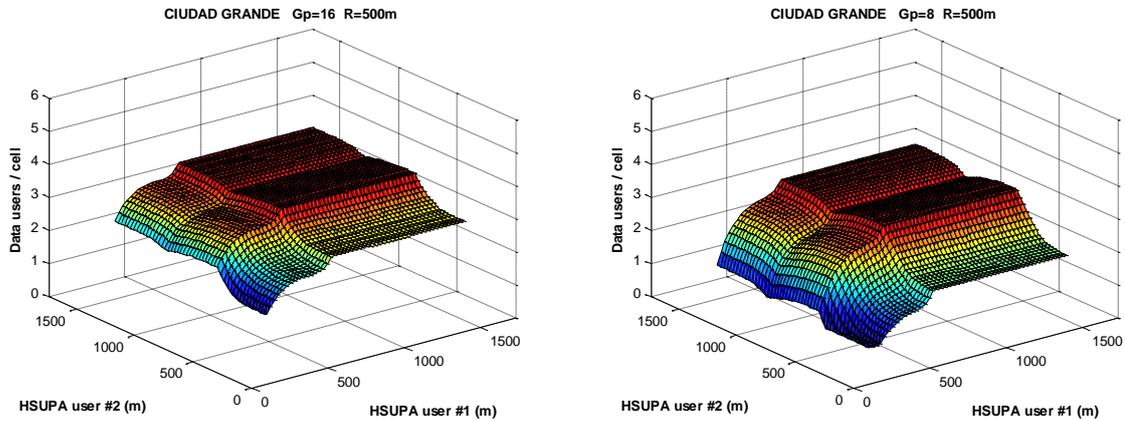


Figura 5.70 Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA externos - Ciudad grande

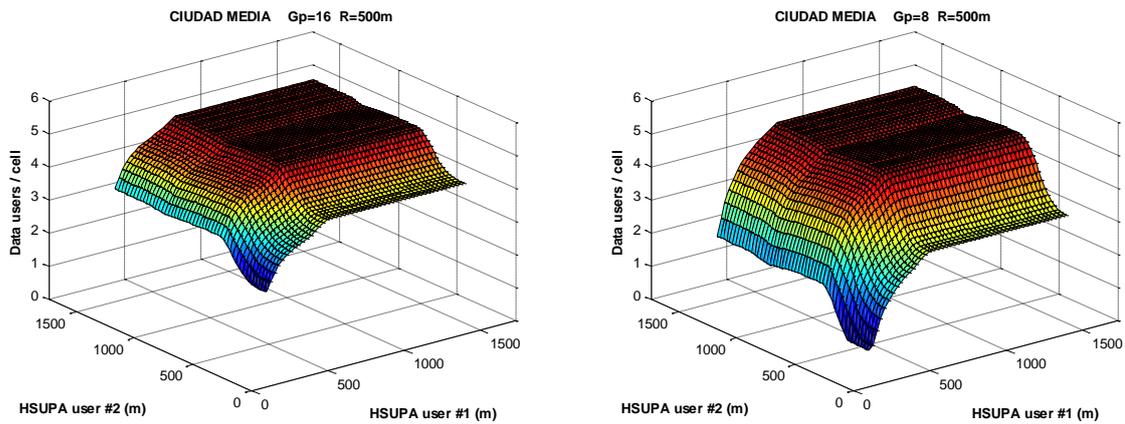


Figura 5.71 Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA externos - Ciudad media

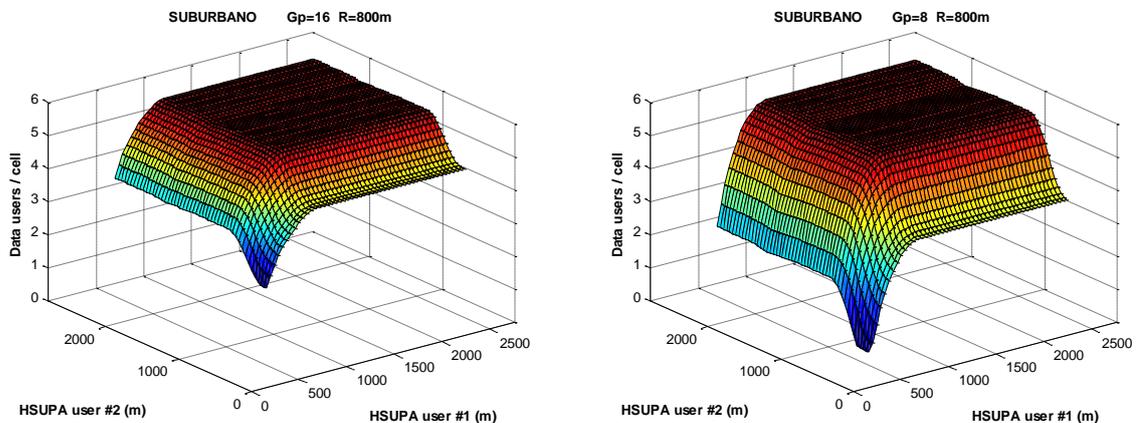


Figura 5.72 Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA externos – Suburbano

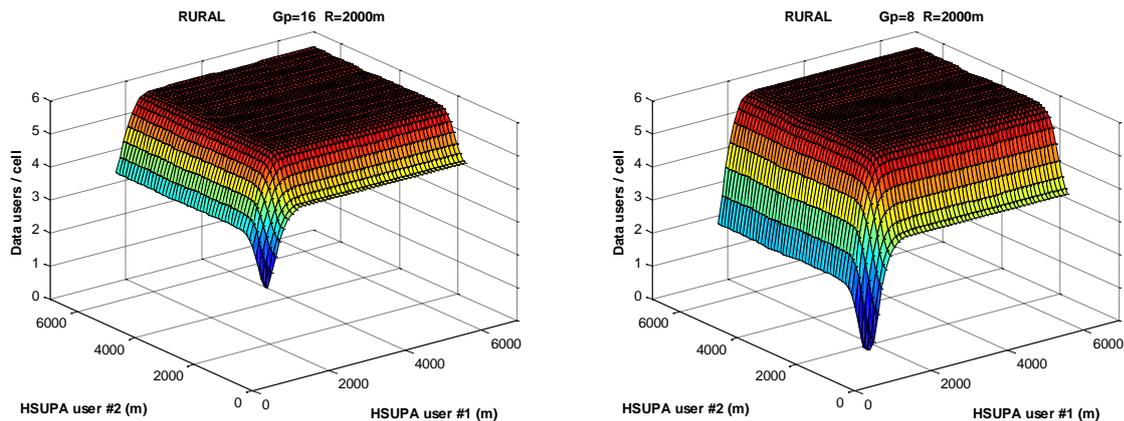


Figura 5.73 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA externos – Rural

Observamos en estas gráficas un comportamiento similar al descrito cuando incluimos el primer usuario HSUPA. Cuando ambos usuarios se encuentran en el borde de la celda, la interferencia generada sobre la estación base de referencia es máxima y la capacidad para el servicio de voz disminuye hasta 1 usuario cuando  $G_p=16$ , llegando incluso a anularse completamente en entornos urbanos. Para  $G_p=8$  la capacidad es también nula cuando la localización de los usuarios HSUPA es esta.

A partir aproximadamente de la estación base contigua, la interferencia generada es ya mínima, y vuelven a alcanzarse los valores de capacidad máxima calculada en ausencia de usuarios de otros servicios.

En estas simulaciones se ha visto la incidencia sobre la capacidad del servicio de datos de uno o dos usuarios del servicio de datos de alta velocidad fuera de la célula bajo estudio. Sin embargo, dado que suponemos una distribución uniforme de usuarios, cada una de las 6 celdas vecinas tendrá un número similar de usuarios HSUPA. En las siguientes simulaciones supondremos la presencia de un usuario interferente en cada una de estas celdas localizados cada uno de ellos a una distancia  $r$  de la estación base bajo estudio. La Figura 5.74 muestra las posibles localizaciones dentro de la simulación de estos 6 usuarios interferentes.

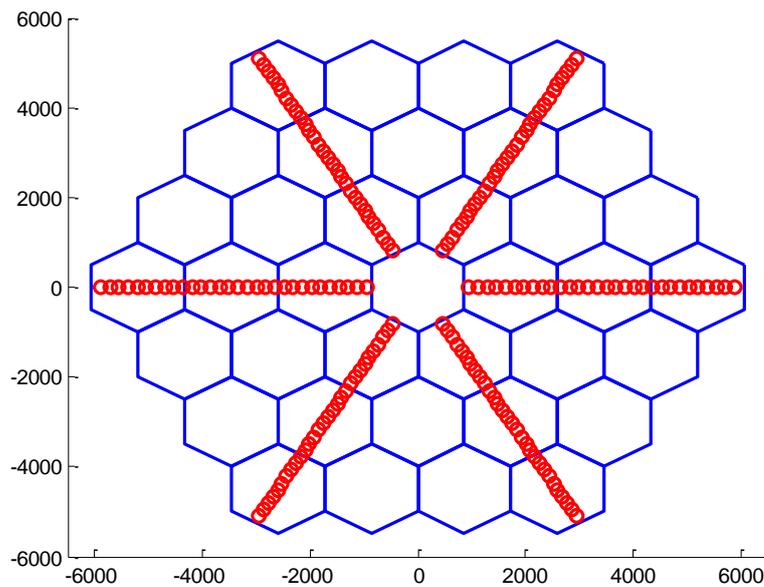


Figura 5.74 - Posibles localizaciones de los 6 usuarios interferentes

Las Figuras 5.75 – 5.78 muestran la capacidad de la célula para el servicio de datos en las circunstancias descritas para distintos escenarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

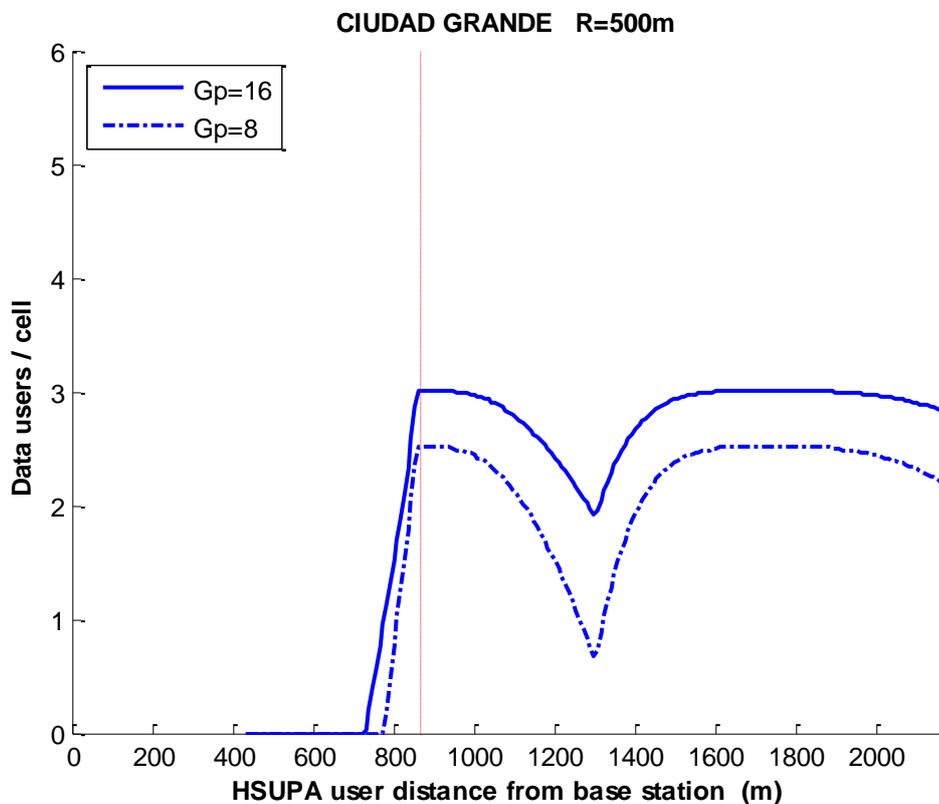


Figura 5.75 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos - Ciudad grande

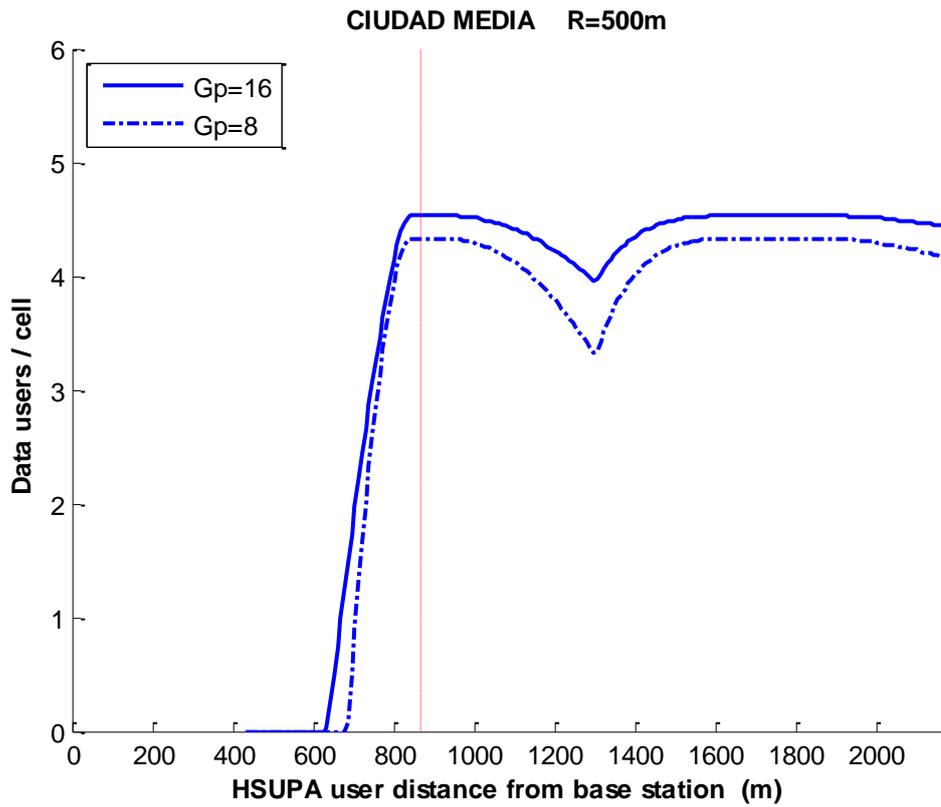


Figura 5.76 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos - Ciudad media

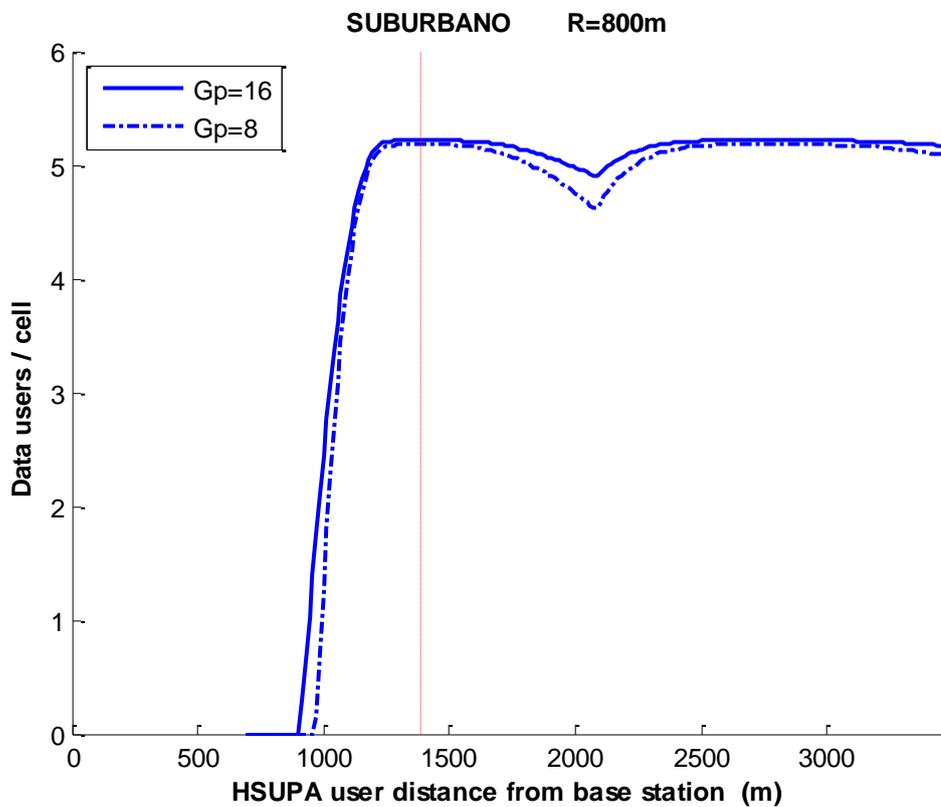


Figura 5.77 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos - Suburbano

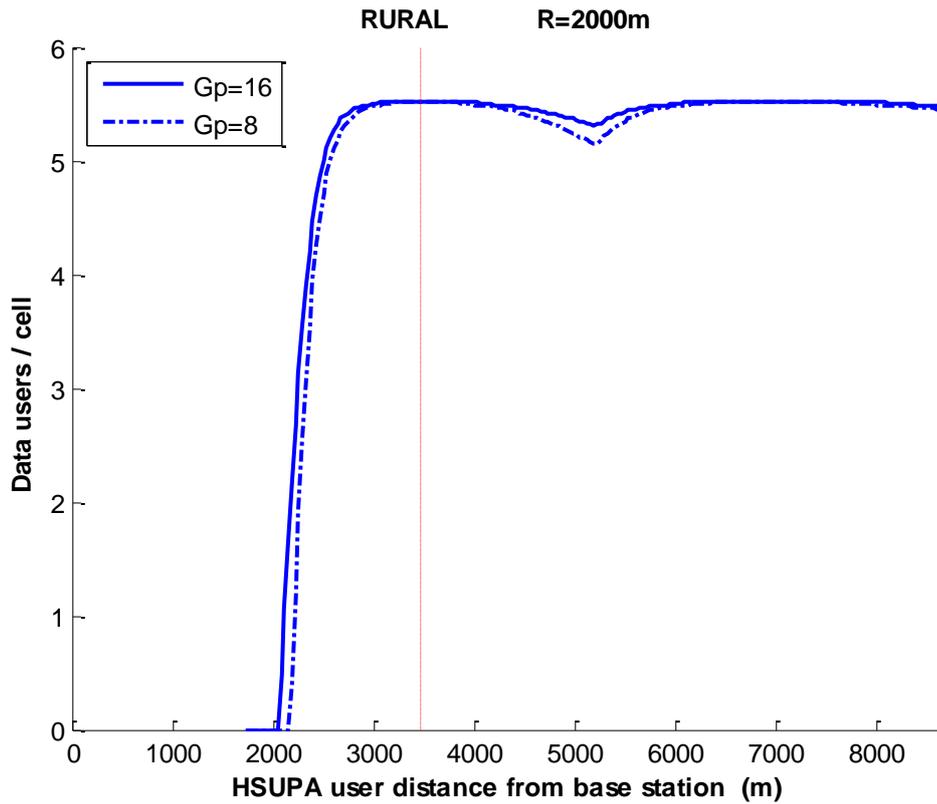


Figura 5.78 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos - Rural

Debido a la mayor interferencia generada por los 6 usuarios, podemos observar una caída más abrupta de la capacidad del servicio, que llega incluso a anularse cuando los usuarios se encuentran próximos al borde de la celda. Cuando los usuarios se encuentran más allá de las estaciones base de las células contiguas, incluso un poco antes en algunos entornos, la interferencia generada es mínima y llegan a obtenerse las capacidades máximas calculadas anteriormente en ausencia de usuarios de otros servicios.



## 6. Estudio de HSUPA en HAPs

Una nueva alternativa tecnológica para proveer acceso a servicios de banda ancha son las redes basadas en *High Altitude Platforms*. La UIT-R define los HAPS como estaciones radioeléctricas que pueden embarcarse en globos, planeadores, o aviones estratosféricos no tripulados situados a una altura de entre 20 y 50 km sobre la superficie terrestre.

El equipamiento embarcado en este tipo de estaciones ofrecerá servicios similares a los que actualmente se ofrecen desde satélites de órbita baja (LEO). Así pues, los HAPS serán en los próximos años competencia directa de este tipo de plataformas, sobre las que añaden algunas ventajas que veremos a continuación.

- Despliegue rápido
  - un HAP puede ser desplegado en cuestión de horas, lo que le convierte en la principal alternativa para entornos de emergencias o catástrofes naturales.
  
- Bajo coste de mantenimiento
  - los HAPS pueden estar en funcionamiento durante largos periodos de hasta varios años. En caso necesario, el coste de devolverlos a tierra para realizar tareas de mantenimiento o reconfiguración es también reducido.
  
- Gran área de cobertura
  - debido a la geometría de este tipo de despliegues, la propagación de ambos enlaces presentará una atenuación por obstáculos o lluvia mucho menor a la que encontramos en despliegues terrestres.
  
- Flexibilidad
  - los HAPS permiten adaptarse a las necesidades del tráfico de forma totalmente adaptable.

- Bajo retardo de propagación
  - despreciable comparado con los retardos que encontramos en transmisiones desde satélites, lo que representa una ventaja a la hora de ofrecer servicios interactivos.
  
- Menor infraestructura en tierra
  - un único HAP puede ofrecer servicio a un número elevado de células (siempre dependiendo de la tecnología de su antena), para lo que sería necesario un número mayor de estaciones en tierra.
  
- Bajo coste
  - un HAP es considerablemente más barato de operar y mantener que un satélite LEO ó GEO.
  
- Despliegue incremental
  - este tipo de redes permiten, al contrario que los satélites, un despliegue incremental aumentando el número de plataformas si fuera necesario.

También es importante mencionar el respeto por el medioambiente de este tipo de despliegues que se alimentan exclusivamente de energía solar, no utilizando ningún otro tipo de combustible contaminante.

El presente capítulo está basado en [10], donde se analiza para este tipo de escenarios la capacidad del uplink de UMTS sin tener en cuenta el efecto de los usuarios del servicio HSUPA. Se presentará el modelo de propagación que mejor aproxima las condiciones de este escenario y se realizará un estudio matemático de la capacidad del uplink mezclando distintos tipos de servicio. Por último, a partir de estos modelos, se mostrarán los resultados obtenidos para diversas simulaciones en las que se estudia la capacidad de los servicios tradicionales de voz y datos y el impacto que supone sobre estos la prestación de un servicio de datos de alta velocidad como HSUPA.

## 6.1 Sistemas comerciales

### 6.1.1 Sky Station

Nave no tripulada proyectada por la compañía estadounidense Sky Station International.



Figura 6.1- Sky Station

Para la propulsión de la nave se dispone de motores eléctricos alimentados por células solares que cubren la superficie del globo prácticamente en su totalidad. La dirección estaba originalmente encomendada a una serie de propulsores iónicos, tecnología sobre la que se dispone de muy poca información y cuya viabilidad es hoy en día objeto de debate.

### 6.1.2 Japanese Stratospheric Platform System

Se trata de un prototipo de nave no tripulada proyectado por el Grupo de Innovación de Sistemas Inalámbricos del Centro de Investigación de Radiocomunicaciones de Yokosuka en Japón.

Está formada por un casco semirrígido de forma elipsoidal con una longitud total cercana a los 200mt. El casco está presurizado para mantener la forma de su contorno y en su interior se alojan varias bolsas internas rellenas de gas helio. Adicionalmente se incluyen dos bolsas de aire para controlar la altitud del dirigible.

Dispone de dos propulsores montados en la proa y la popa de la nave, alimentados por un sistema de potencia fotovoltaica de células solares.

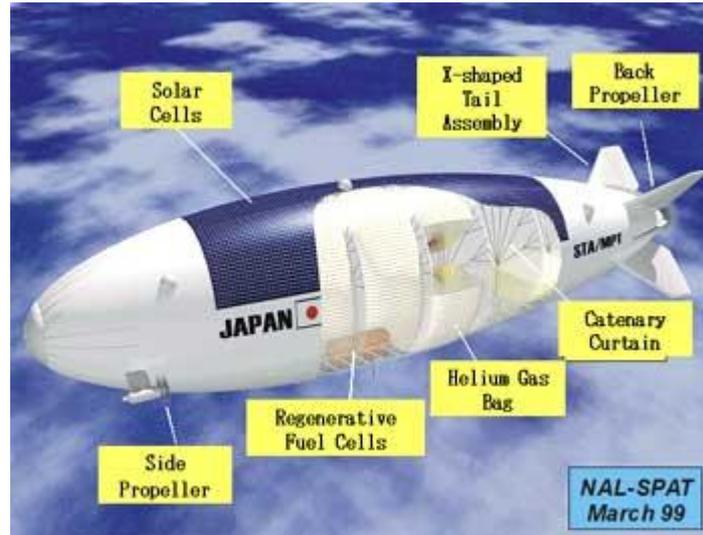


Figura 6.2 - Japanese Stratospheric Platform System

### 6.1.3 StartSat

Se trata de un sistema dirigible proyectado por la compañía Advanced Technology Group (ATG) con base en Reino Unido, pensado tanto para usos civiles como militares.

Posicionado en la estratosfera, el dirigible no afecta al tráfico aéreo comercial y puede estar en el aire hasta 5 años, alimentado por una pantalla solar que ocupa la mayor parte de su longitud.

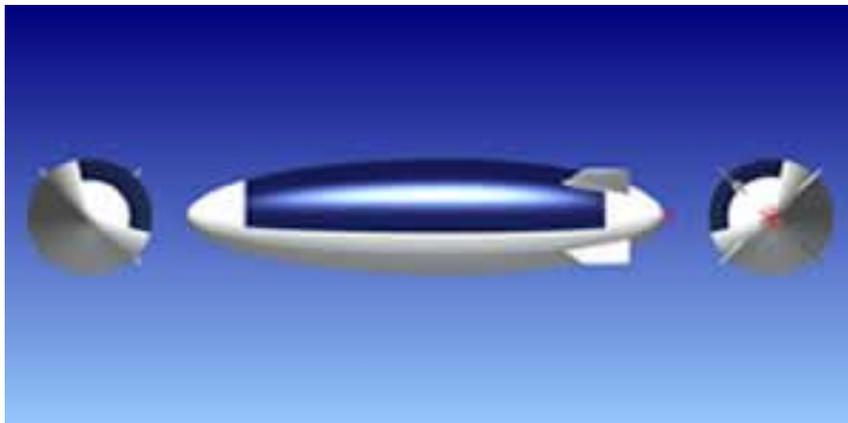


Figura 6.3 –StartSat

### 6.1.4 Airborne Relay Communications System

ARC System es el nombre de la nave desarrollada por la compañía estadounidense Platform Wireless International.

Originalmente pensados como plataformas de defensa para transportar radares de bajo nivel, su diseño se basa en los dirigibles que vigilan la frontera entre EEUU y México.

Se trata de un globo de 46mt de longitud relleno de gas helio que puede transportar una carga útil de hasta 700kg. Está diseñado para operar a baja altitud (3 – 10 km) ofreciendo cobertura en áreas con un diámetro de entre 55 y 225km, dependiendo de la configuración del sistema.

### 6.1.5 HALO – Proteus

High Altitude Long Operation es una nave tripulada, elemento central del sistema de la estadounidense Agel Technology Corporation para ofrecer servicios de banda ancha desde HAP's.

#### A Wireless Broadband Metropolitan Area Network Provided by HALO™ Aircraft

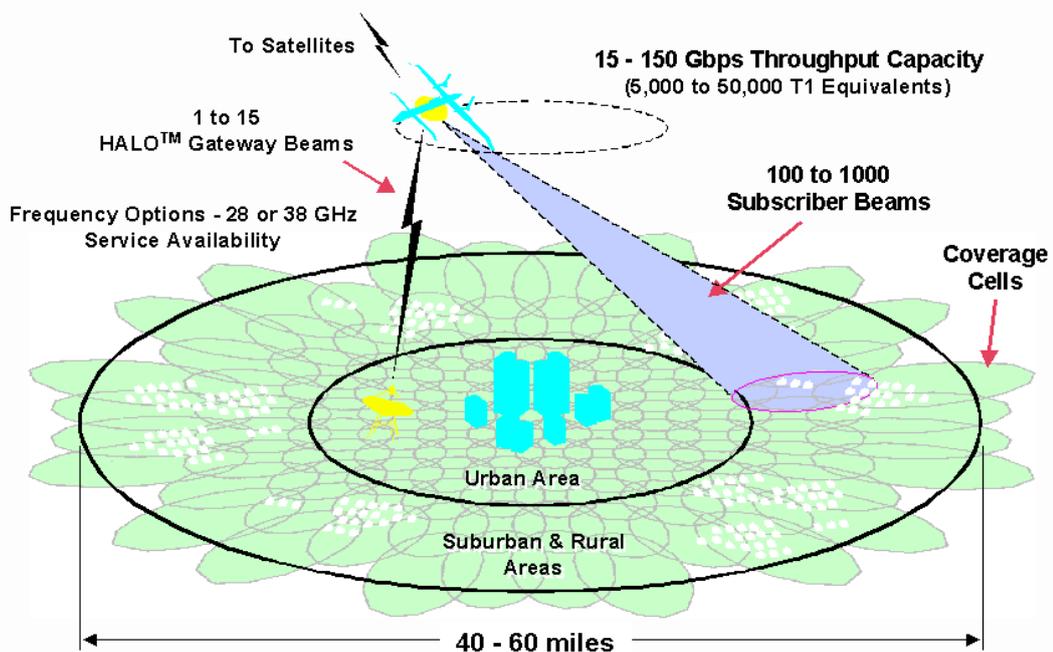


Figura 6.4 - Sistema HALO

## 6.1.6 Helios

Se trata de una aeronave no tripulada desarrollada por AeroVironment con el soporte financiero de la NASA. El aeroplano Helios puede volar de forma continuada hasta 6 meses a una altitud de 60.000 pies por encima del tráfico aéreo comercial y los obstáculos climatológicos.

En el año 2000, AeroVironment fundó Sky Tower, Inc para trabajar en las oportunidades dentro del sector de las telecomunicaciones que ofrece esta nave.



Figura 6.5 – Helios

## 6.1.7 AVCS

Aerial Vehicle Communications System es el nombre de la aeronave no tripulada que está desarrollando la compañía General Atomics, con sede en Estados Unidos.

### 6.1.8 Heliplat

Heliplat (HELlos PLATform) es el nombre de la nave diseñada en la Universidad Politécnica de Torino bajo concesión de la Agenzia Spaziale Italiana.

Su capacidad de carga es más limitada, del orden de 100kg, pero su facilidad de despliegue y capacidad de movimiento la hace ideal para restaurar las redes públicas de comunicaciones en caso de catástrofe.

Sin embargo, el objeto de esta investigación no se centra exclusivamente en las comunicaciones móviles, sino en otras posibles aplicaciones de la plataforma, como localización o vigilancia.

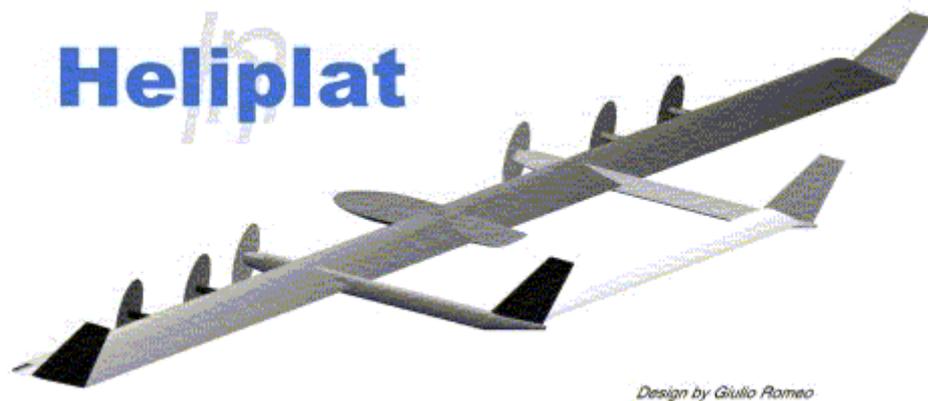


Figura 6.6 – Heliplat

## 6.2 Modelo de propagación

Dada la elevada altitud a la que se encuentran este tipo de estaciones, supondremos un escenario ideal sin obstáculos entre emisor y receptor, por lo que para calcular las pérdidas de propagación se utilizará el modelo de espacio libre.

Según este método, las pérdidas de propagación vendrán dadas por la siguiente ecuación:

$$L_b = 32,45 + 20 \log f_{MHz} + 20 \log d_{km} \quad (6.1)$$

Siendo

- $f$  la frecuencia (MHz)
- $d$  la distancia del enlace (km)

El efecto de shadowing provoca en la práctica una desviación de las pérdidas frente al valor esperado:

$$L_p(dB) \approx L_p + 1,25\sigma \quad (6.2)$$

### 6.3 Análisis del uplink

Para el cálculo de los estadísticos de interferencia y la capacidad de la célula, se utilizará un modelo formado por 3 coronas, llegando a calcular los valores para usuarios situados a una distancia de hasta  $5d$  de la estación base bajo estudio.

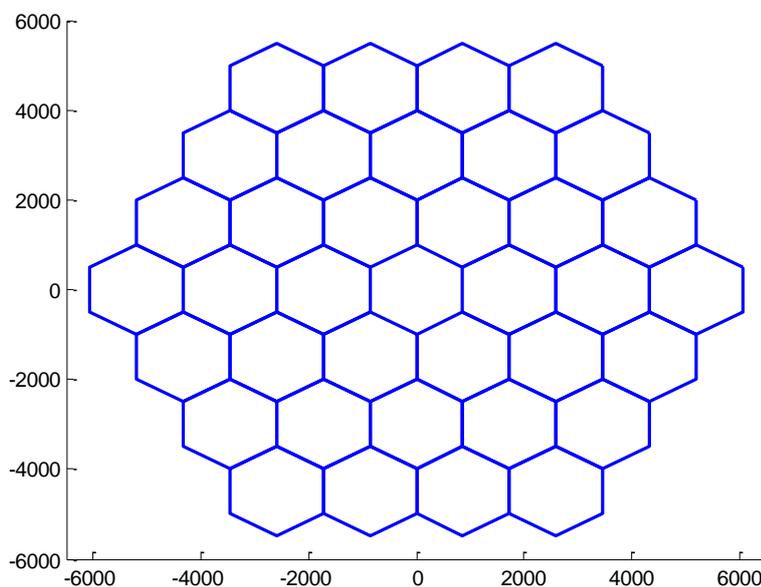


Figura 6.7 - Modelo de 5 coronas utilizado en las simulaciones

Supongamos un usuario interferente situado a una distancia  $r_{ij}$  del centro de la celda a cuya estación base está conectado y a una distancia  $r_{o,ij}$  del dentro de la celda bajo estudio, tal y como se muestra en la Figura 6.8.

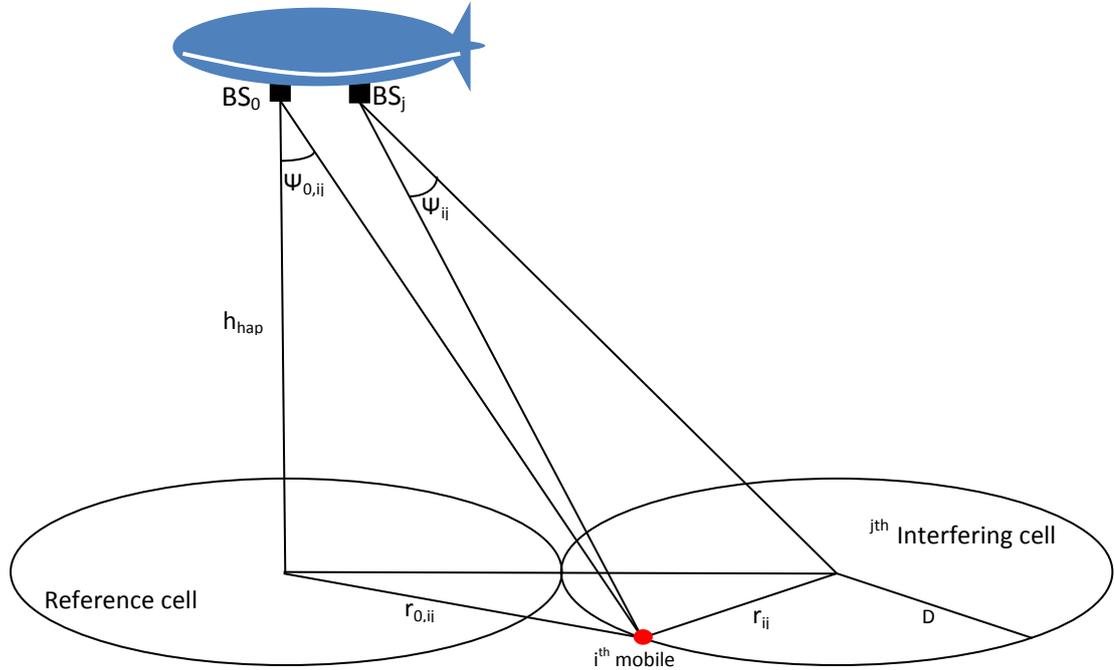


Figura 6.8 - Modelo de High Altitude Platform

El terminal se encuentra situado un ángulo  $\psi_{ij}$  relativo al haz que ofrece servicio y un ángulo  $\psi_{o,ij}$  relativo al haz dirigido a la célula de referencia.

Las distancias del equipo a las estaciones  $BS_j$  y  $BS_o$  serán  $l_{ij}$  y  $l_{o,ij}$  respectivamente.

La potencia de interferencia generada en la célula j-esima puede expresarse como:

$$I_j = \alpha S \int_0^{2\pi} \int_0^D \left( \frac{l_{ij}}{l_{o,ij}} \right)^\mu 10^{\frac{\epsilon_{o,ij} - \epsilon_{ij}}{10}} 10^{\frac{G(\psi_{o,ij}) - G(\psi_{ij})}{10}} \frac{N}{\pi D^2} r_{ij} \partial r_{ij} \partial \theta_{ij} \quad (6.3)$$

$$I_j = \alpha NS \int_0^{2\pi} \int_0^D 10^{\frac{G(\psi_{o,ij}) - G(\psi_{ij})}{10}} \frac{1}{\pi D^2} r_{ij} \partial r_{ij} \partial \theta_{ij} \quad (6.4)$$

La relación entre las señales de interferencia  $L(\psi_{o,ij}, \psi_{ij})$  debida exclusivamente a las pérdidas por distancia vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$L(\psi_{o,ij}, \psi_{ij}) = 10^{\frac{G(\psi_{o,ij}) - G(\psi_{ij})}{10}} \quad (6.5)$$

Los estadísticos de interferencia intercelular e intracelular para cada uno de los servicios se calcularán básicamente de la misma forma que se hizo en capítulos anteriores.

### 6.3.1 Esperanza de interferencia para los servicios de voz y datos

Dada la penetración en el mercado de estos servicios, supondremos una distribución uniforme de usuarios con una densidad  $\rho_s = N_{u,s}/S$  en cada una de las células.

Calculamos el valor esperado de potencia de interferencia intracelular del mismo modo que en los escenarios anteriores:

$$E[P]_{intra,s} = P_{r,s} E[I]_{intra,s} \approx P_{r,s} \alpha_s N_{u,s} \quad (6.6)$$

Resultando el valor esperado de potencia de interferencia intercelular:

$$E[P]_{inter,s} = P_{r,s} E[I]_{inter,s} \approx P_{r,s} E[I]_{intra,s} f \quad (6.7)$$

Donde el valor  $f$ , conocido como eficiencia de reutilización de frecuencia, es uno de los principales factores que afectan a la capacidad en sistemas CDMA.

$$F_{ur} = \frac{1}{1+f} = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^J \int_0^{2\pi} \int_0^D 10^{\frac{G(\psi_{o,ij}) - G(\psi_{ij})}{10}} \frac{1}{\pi D^2} r_{ij} \partial r_{ij} \partial \theta_{ij}} \quad (6.8)$$

Para simplificar el cálculo de este valor, nos remitiremos a [10]. La Figura 6.9 muestra el valor de  $F_{ur}$  en relación con el rango de la célula, entendido como la diferencia entre las ganancias de recepción en el centro de la célula y en el borde de esta.

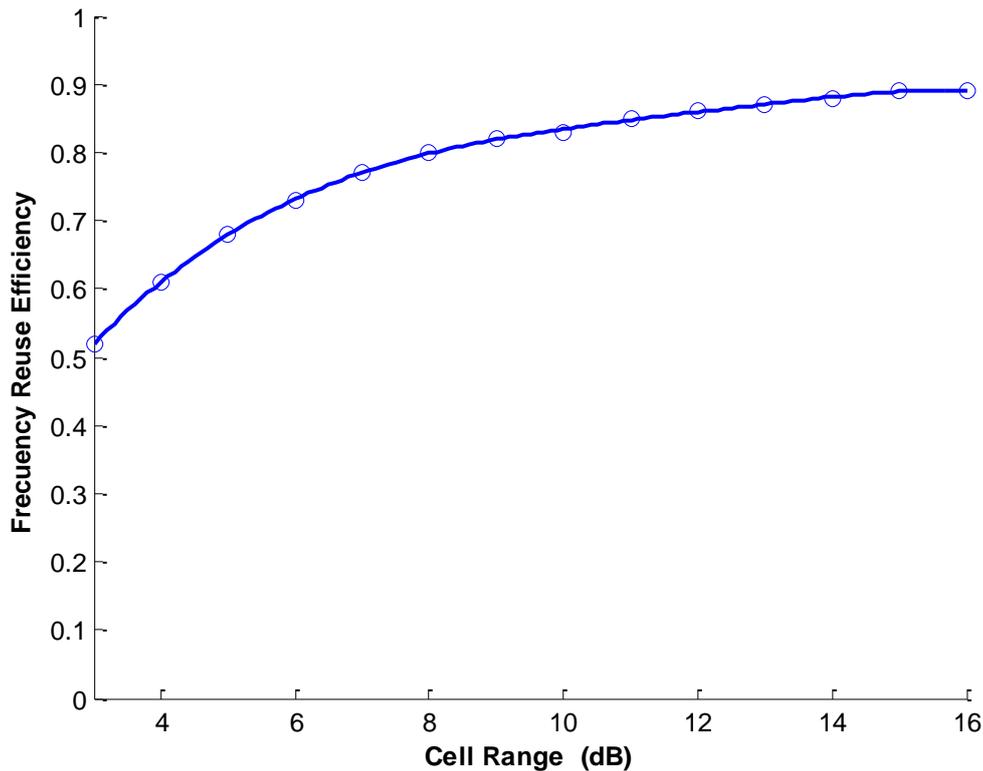


Figura 6.9 - Eficiencia de reutilización de frecuencias

Si consideramos un control de potencia imperfecto con un error con desviación estándar  $\sigma_c$ , la esperanza de potencia de interferencia total generada por el servicio  $s$  vendrá dada por la ecuación:

$$E[P_{int}]_s = e^{\frac{\beta^2 \sigma_c^2}{2}} (E[P]_{intra,s} + E[P]_{inter,s}) \quad (6.9)$$

### 6.3.2 Esperanza de interferencia para el servicio HSUPA

A día de hoy, servicios como HSUPA aún no están tan extendidos entre el gran público, además de no poder ofrecer la misma capacidad por el elevado nivel de interferencia que se genera entre usuarios.

Así pues, el número de usuarios que utilizarán este servicio concurrentemente dentro de la misma celda es mucho más limitado. Por ello, a la hora de calcular los estadísticos de interferencia para HSUPA lo haremos para un único usuario en lugar de integrar a lo largo de toda la región.

Calcularemos la relación entre las señales de interferencia  $L(\psi_{o,ij}, \psi_{ij})$  utilizando la ecuación (6.5).

Asumimos que el usuario HSUPA objeto de estudio se encuentra en la parte derecha de la región S0 por lo que esta será la única interferencia generada, no generándose ninguna en la región S1 ni en la parte izquierda de la región S0.

De esta forma, el valor esperado para la potencia de interferencia intercelular generada por el servicio HSUPA vendrá dado por la expresión:

$$E[P]_{inter,HSUPA} = P_{r,HSUPA} E[I]_{inter,HSUPA} = P_{r,HSUPA} \alpha_{HSUPA} L(\psi_{o,ij}, \psi_{ij}) \quad (6.10)$$

El valor esperado para la potencia de interferencia intracelular generada por el servicio HSUPA se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$E[P]_{intra,HSUPA} = P_{r,HSUPA} E[I]_{intra,HSUPA} \approx P_{r,HSUPA} \alpha_{HSUPA} \quad (6.11)$$

Considerando nuevamente un control de potencia imperfecto con desviación típica y sumando ambos valores, obtendremos la esperanza de potencia de interferencia total:

$$E[P]_{int,HSUPA} = e^{\frac{\beta^2 \sigma_c^2}{2}} (E[P]_{intra,HSUPA} + E[P]_{inter,HSUPA}) \quad (6.12)$$

### 6.3.3 Varianza de interferencia para los servicios de voz y datos

Supondremos una distribución uniforme de usuarios con una densidad  $\rho_s = N_{u,s}/S$  en cada una de las células

De esta forma, la varianza de potencia de interferencia intercelular vendrá dada por la siguiente expresión:

$$Var[P]_{inter,s} = \rho_s P_{r,s}^2 \int_S [L(\psi_{o,ij}, \psi_{ij})]^2 \{p\alpha_s - q\alpha_s^2\} \partial s \quad (6.13)$$

Siendo

$$p = e^{2\beta^2\sigma_c^2} \quad (6.14)$$

$$q = e^{\beta^2\sigma_c^2} \quad (6.15)$$

Para el cálculo de la varianza de potencia intracelular utilizaremos la siguiente expresión:

$$Var[P]_{intra,s} = N_{u,s} P_{r,s}^2 (p\alpha_s - q\alpha_s^2) \quad (6.16)$$

Sumando ambos valores, obtendremos la varianza de potencia de interferencia total:

$$Var[P]_{int,s} = Var[P]_{intra,s} + Var[P]_{inter,s} \quad (6.17)$$

### 6.3.4 Varianza de interferencia para el servicio HSUPA

Nuevamente, a la hora de calcular los estadísticos de interferencia para el servicio HSUPA lo haremos para un único usuario en lugar de integrar a lo largo de toda la región.

De esta forma, la varianza de potencia de interferencia intercelular generada por el servicio HSUPA vendrá dada por la expresión:

$$\begin{aligned} Var[P]_{inter,HSUPA} &= P_{r,HSUPA}^2 Var[I]_{inter,HSUPA} \\ &= P_{r,HSUPA}^2 [L(\psi_{o,ij}, \psi_{ij})]^2 \{p\alpha_{HSUPA} - q\alpha_{HSUPA}^2\} \end{aligned} \quad (6.18)$$

La varianza de potencia de interferencia intracelular generada por el servicio HSUPA se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$Var[P]_{intra,HSUPA} = N_{u,HSUPA} P_{r,s}^2 (p\alpha_s - q\alpha_s^2) \quad (6.19)$$

Sumando ambos valores, obtendremos la varianza de potencia de interferencia total:

$$Var[P]_{int,HSUPA} = Var[P]_{intra,HSUPA} + Var[P]_{inter,HSUPA} \quad (6.20)$$

### 6.3.5 Capacidad del sistema multiservicio

Así pues, aplicando unas u otras ecuaciones según corresponda, habremos obtenido los valores de los estadísticos de potencia de interferencia para cada uno de los servicios. Los estadísticos de interferencia totales se calcularán como la suma de los resultados para cada uno de los servicios.

$$E[P_{int}] = \sum_s E[P_{int}]_s \quad (6.21)$$

$$Var[P_{int}] = \sum_s Var[P_{int}]_s \quad (6.22)$$

Así pues, para una probabilidad de desbordamiento determinada, podemos calcular la SIR del servicio  $s$  como:

$$\left[ \frac{C}{I} \right]_s = \frac{\varepsilon P_{r,s}}{E[P_{int}] + P_N + \gamma \sqrt{var[P_{int}]}} \quad (6.23)$$

La relación entre la  $SNR_{bit}$  viene definida por la siguiente expresión:

$$\frac{E_b}{N_o} = G_p \left[ \frac{C}{I} \right] \quad (6.24)$$

Cuando ofrecemos distintos servicios en nuestro sistema, las potencias máximas transmitidas guardan la siguiente relación (en dB):

$$\left( \frac{P_{tx,HSUPA}}{P_{tx,datos}} \right)_{dB} = (1 + \delta_1) \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{G_{p,datos} / \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{datos}}{G_{p,HSUPA} / \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{HSUPA}} \right) \right] \quad (6.25)$$

$$\left( \frac{P_{tx,HSUPA}}{P_{tx,voz}} \right)_{dB} = (1 + \delta_2) \left[ 10 \log_{10} \left( \frac{G_{p,voz} / \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{voz}}{G_{p,HSUPA} / \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{HSUPA}} \right) \right] \quad (6.26)$$

Siendo  $\delta_1$  y  $\delta_2$  factores de corrección con valor dentro el intervalo  $[-0,1 - 0,1]$ .

## 6.4 Resultados de las simulaciones

Aplicando el modelo descrito para macroceldas, se han realizado simulaciones para estudiar la capacidad del servicio HSUPA, las capacidades en el uplink de los servicios tradicionales de voz y datos, y en qué medida esta se ve afectada por los nuevos servicios de datos de alta velocidad.

Los cálculos descritos con anterioridad se han implementado con ayuda de la herramienta Matlab y las simulaciones se han realizado con los siguientes valores que se consideran ajustados a los que razonablemente encontraremos en la realidad.

- Frecuencia
  - $f_{uplink} = 1950 \text{ MHz}$
  
- Altura del HAP
  - $h_{hap} = 20 \text{ km}$
  
- Radio celular
  - $R = 1000, 1500 \text{ y } 2000 \text{ mt.}$
  
- Shadowing
  - $\sigma = 6 \text{ dB}$
  - $C_{dm} = 1$  , suponiendo la utilización de una antena multi-haz.

En el caso de antenas multi-elemento el coeficiente de correlación vendrá dado por la ecuación  $C_{dm} = 1 - \frac{d_{elem}}{h_{hap}}$  , siendo  $d_{elem}$  la distancia entre elementos. Dada la relación entre  $h_{hap}$  (del orden de 20km) y  $d_{elem}$  (del orden de ½m) , podemos aproximar el valor de  $C_{dm}$  a 1 en cualquier caso.

- Ganancias de procesado
  - 256 para el servicio de voz
  - 32 para el servicio de datos
  - 16 (240kbps) y 8 (480kbps) para el servicio HSUPA
  
- Potencia máxima transmitida
  - 30dBm para el servicio HSUPA
  - Los valores para el servicio de datos han sido calculados utilizando las ecuaciones (6.25) y (6.26).

	HSUPA $G_p=16$	HSUPA $G_p=8$
Voice	20,7 dBm	18,2 dBm
Data	27,1 dBm	24,5 dBm

Tabla 6.1 - Potencias de transmisión máximas

- $E_b/N_o$  requerida
  - 7dB para el servicio de voz
  - 4dB para el servicio de datos
  - Los valores para el servicio HSUPA se han extraído de [12]. Dichos valores están calculados para peatones moviéndose a una velocidad de 3km/h. Dado que el despliegue de HAPs permite ofrecer cobertura en zonas con características muy diversas, se ha considerado la posibilidad haya usuarios moviéndose a distintas velocidades.

	HSUPA $G_p=16$	HSUPA $G_p=8$
60 km/h	4.4dB	4.4dB
90 km/h	4.6dB	4.6dB
120 km/h	4.8dB	4.8dB

Tabla 6.2 -  $E_b/N_o$  requerida por el servicio HSUPA

- Control de potencia
  - o Dependiendo de la velocidad máxima que puedan alcanzar los usuarios dentro del escenario escogido para el despliegue de los HAP's, utilizaremos distintos valores para  $\sigma_c$ .

	$\sigma_c$
60 km/h	0.50dB
90 km/h	0.75dB
120 km/h	1.00dB

Tabla 6.3 - Control de potencia - Velocidad máxima

- Ganancia de recepción de la antena embarcada

$$G(\vartheta) = \begin{cases} 34.8 - 3\left(\frac{\vartheta}{1.57}\right)^2, & 0^\circ \leq \theta \leq 4.53^\circ \\ 9.8, & 4.53^\circ \leq \theta \leq 5.87^\circ \\ 55.95 - 60 \log \vartheta, & 5.87^\circ \leq \theta \leq 37^\circ \\ -38.2, & 37^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (6.27)$$

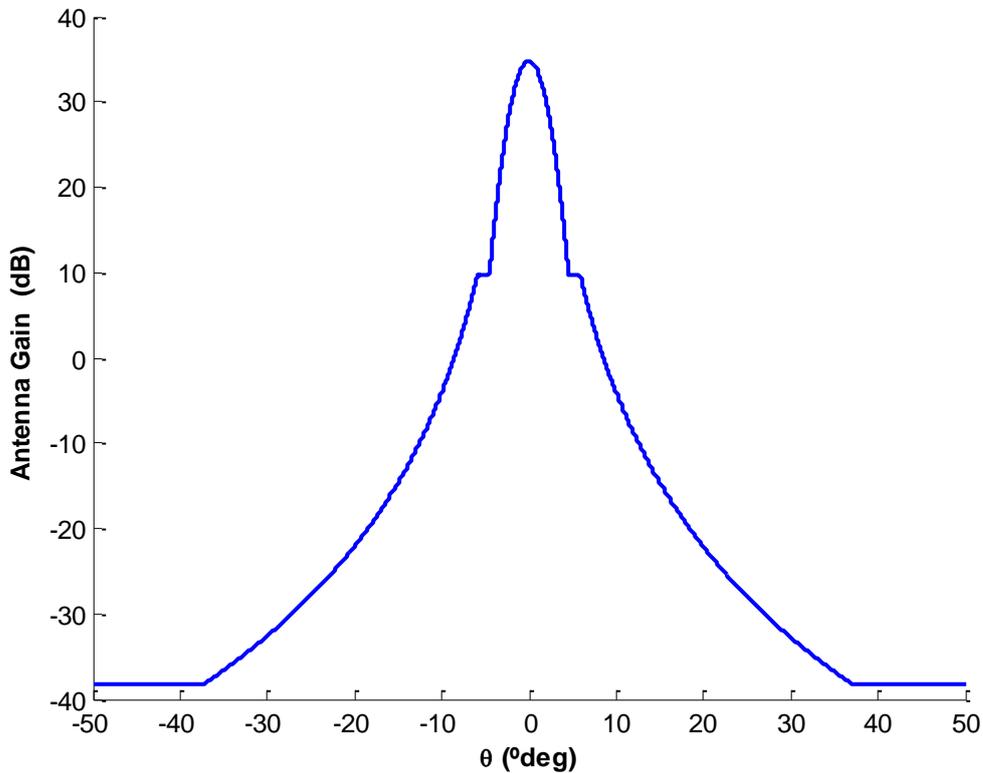


Figura 6.10 - Ganancia de la antena receptora

Conocido este diagrama de radiación, puede estimarse el tamaño de la antena mediante la siguiente relación:

$$\theta_{3dB} = \frac{75\lambda}{D}$$

Aunque no es apreciable a simple vista, puede comprobarse como  $\theta_{3dB} = 3.14^\circ$ , por lo que, para una frecuencia de 1950MHz ( $\lambda=0,153\text{mt}$ ), la antena embarcada deberá tener un diámetro de más de 3,6mt.

- Potencia de ruido en el receptor de  $P_n = -100\text{dBm}$ .

Para la probabilidad de desbordamiento se considera aceptable un valor del 1% y las capacidades mostradas a continuación han sido calculadas de acuerdo a este porcentaje.

### 6.4.1 Servicio HSUPA

Analizaremos en primer lugar las prestaciones del servicio HSUPA en entornos de macroceldas para distintos tipos de escenario.

Las Figuras 6.11 y 6.12 muestran la capacidad de la célula para el servicio HSUPA cuando este es el único servicio ofrecido, no existiendo ningún otro usuario que pueda generar interferencia. Es decir, sin usuarios de otros servicios dentro o fuera de la célula bajo estudio, ni otros usuarios HSUPA en celdas próximas a la nuestra. Evidentemente, esta situación es completamente irreal pero su estudio teórico nos permitirá hacer algunas conclusiones.

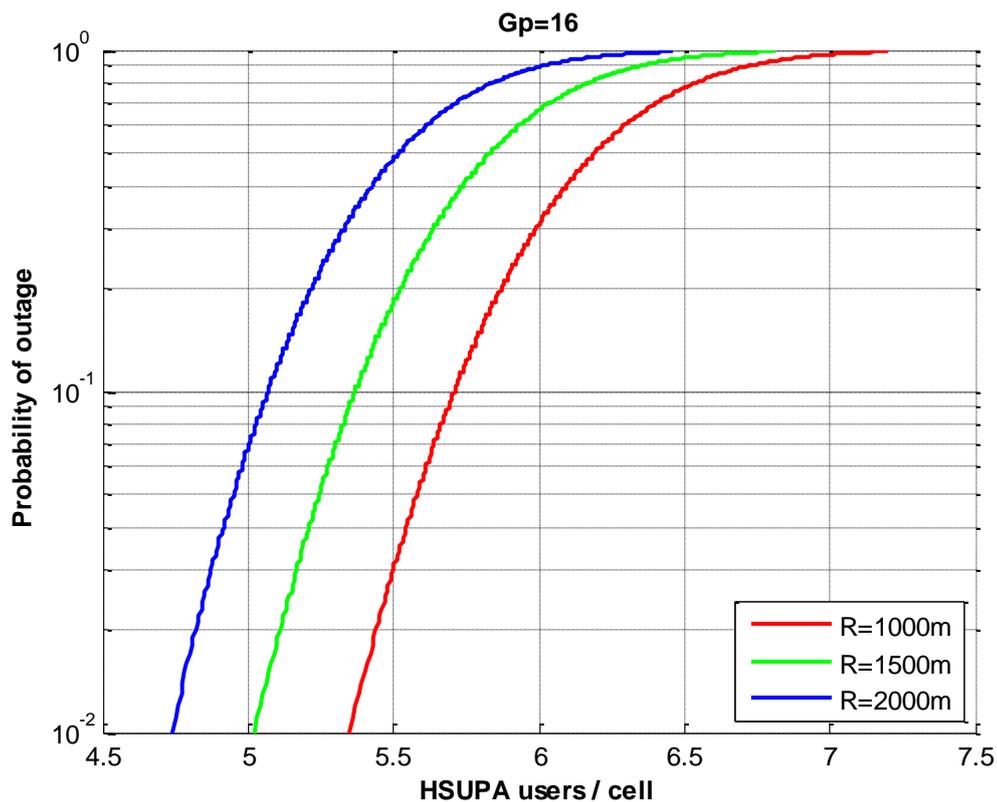


Figura 6.11 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA ( $G_p=16$ )

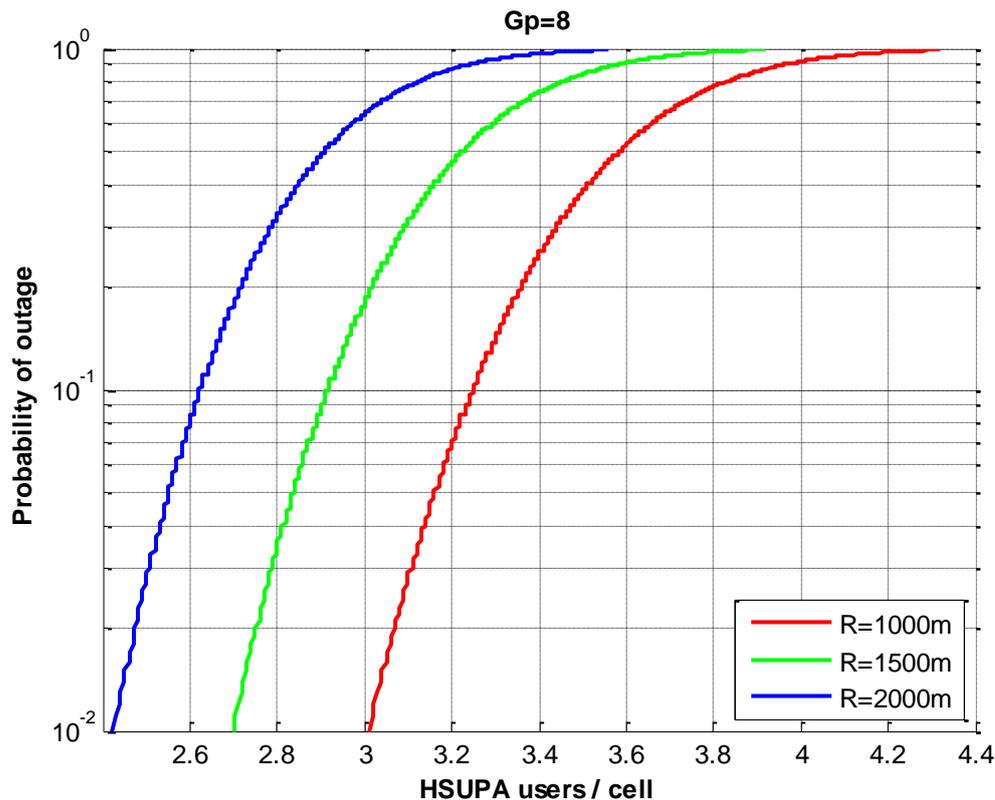


Figura 6.12 - Probabilidad de desbordamiento del servicio HSUPA ( $G_p=8$ )

Puede observarse como la capacidad de la célula para el servicio HSUPA disminuye a medida que aumenta el radio de la red celular. Asumiendo una probabilidad de desbordamiento del 1% y un radio de 1000mt, se han obtenido capacidades de 5 y 3 usuarios para ganancias de procesamiento de 16 y 8 respectivamente.

Debemos tener en mente que la relación entre el radio celular de la red y la capacidad de la misma para ofrecer un determinado servicio es algo más compleja. Por un lado, como es lógico, aumentar el tamaño de celda implica unas mayores pérdidas de propagación, una menor ganancia cuando los usuarios se encuentran próximos al borde de la celda y, como consecuencia, una menor potencia disponible en recepción para procesar la señal, lo que tiene un efecto negativo sobre la capacidad celular. Sin embargo, como puede comprobarse en la Figura 6.9, un aumento en el radio celular supone una mayor reutilización de frecuencias  $F_{ur}$ , y, por tanto, una menor interferencia intercelular, lo que redundaría en una mayor capacidad.

La Figura 6.13 muestra la capacidad del servicio HSUPA para distintos radios celulares entre 500 y 3000 mt.

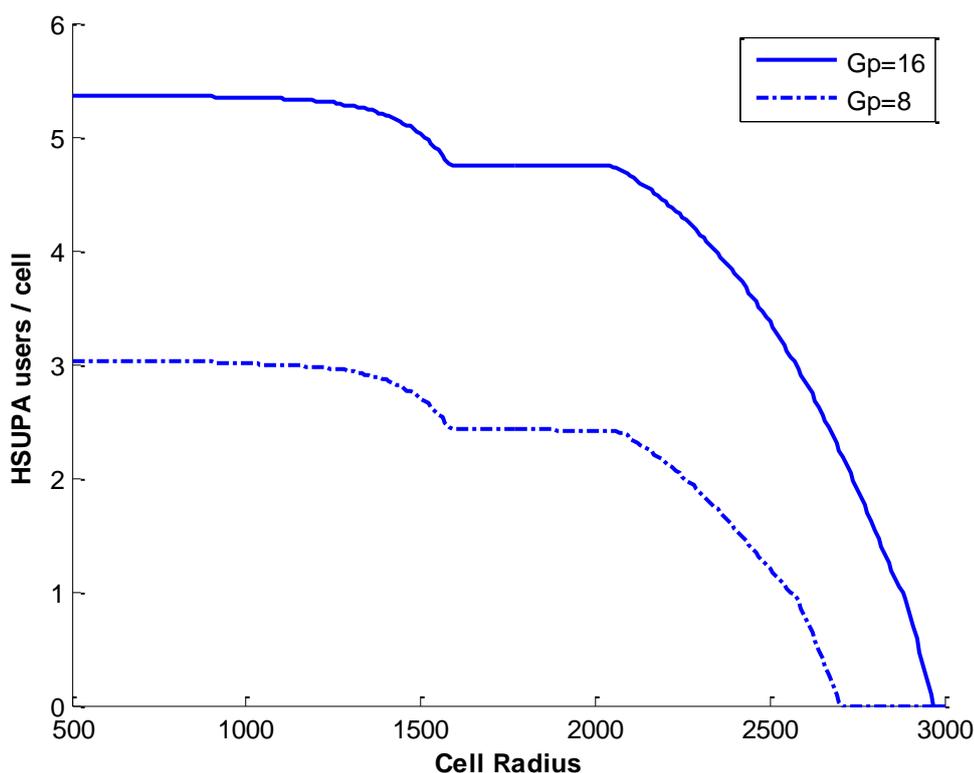


Figura 6.13 - Capacidad del servicio HSUPA - Radio celular

Puede observarse como la capacidad decrece a medida que aumentamos el radio celular. Esto es absolutamente cierto en un caso como este donde, no existiendo otros usuarios, no estamos teniendo en cuenta el valor de la interferencia intercelular. Para los servicios de voz y datos, donde sí se está suponiendo una densidad uniforme de usuarios en cada célula, veremos cómo las variaciones en el radio celular tienen una incidencia distinta.

Estos valores de capacidad, en ausencia de cualquier otro tipo de usuario de este u otros servicios que pueda generar interferencia, aunque inalcanzables en escenarios reales, nos dan una idea de su voracidad de recursos.

Estos resultados se han obtenido suponiendo que debemos dar servicio a usuarios moviéndose a velocidades elevadas, del orden de 120 km/h. Dado que este tipo de despliegues pueden encontrarse sobre escenarios muy variados, encontraremos casos donde no necesitemos asegurar el servicio a estas velocidades. Las figuras 6.14 y 6.15 muestran la capacidad celular para el servicio de voz para distintas velocidades máximas de los usuarios.

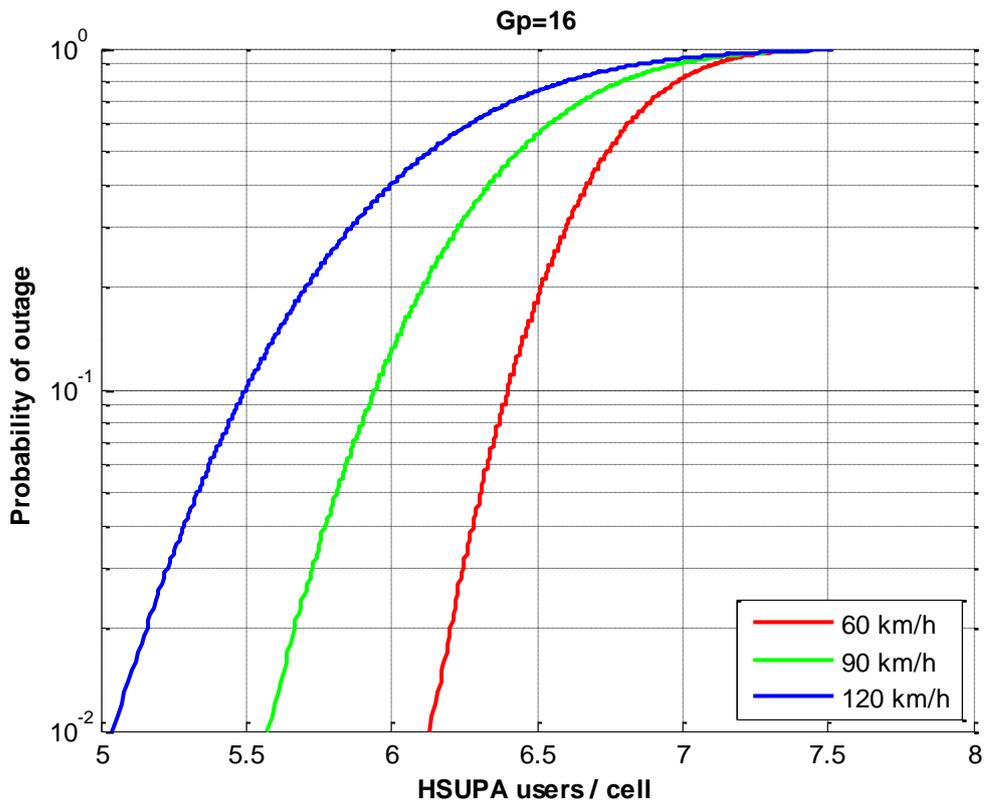


Figura 6.14 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=16$ ) - Velocidad máxima

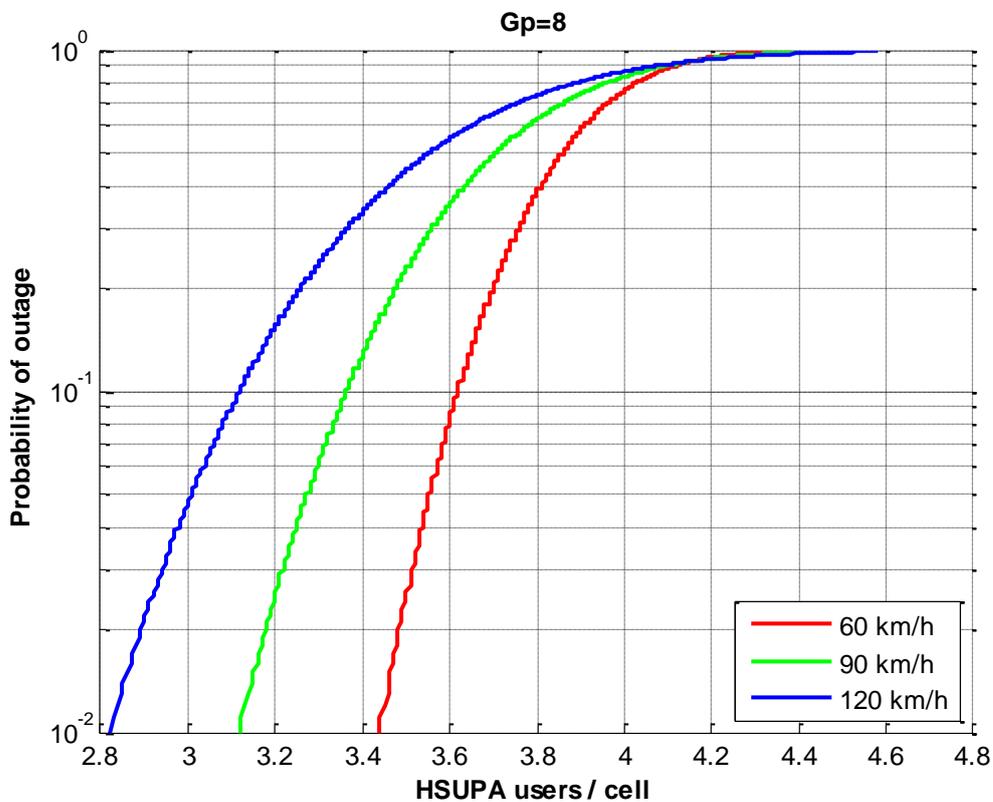


Figura 6.15 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=8$ ) - Velocidad máxima

Se observa cómo, a medida que disminuimos la velocidad máxima permitida para los usuarios de la celda, aumenta la capacidad celular. Esto es debido a la menor  $E_b/N_0$  requerida por el servicio y a la disminución de errores en el control de potencia.

Veamos por último la influencia de la altitud del HAP. Lógicamente, este parámetro incide directamente sobre las pérdidas en el trayecto entre el terminal y la base receptora embarcada en la plataforma. Las Figuras 6.16 y 6.17 muestran la capacidad de la célula en función de la probabilidad de desbordamiento de la misma para sistemas con plataformas situadas a 18, 20 y 22 Km de altura.

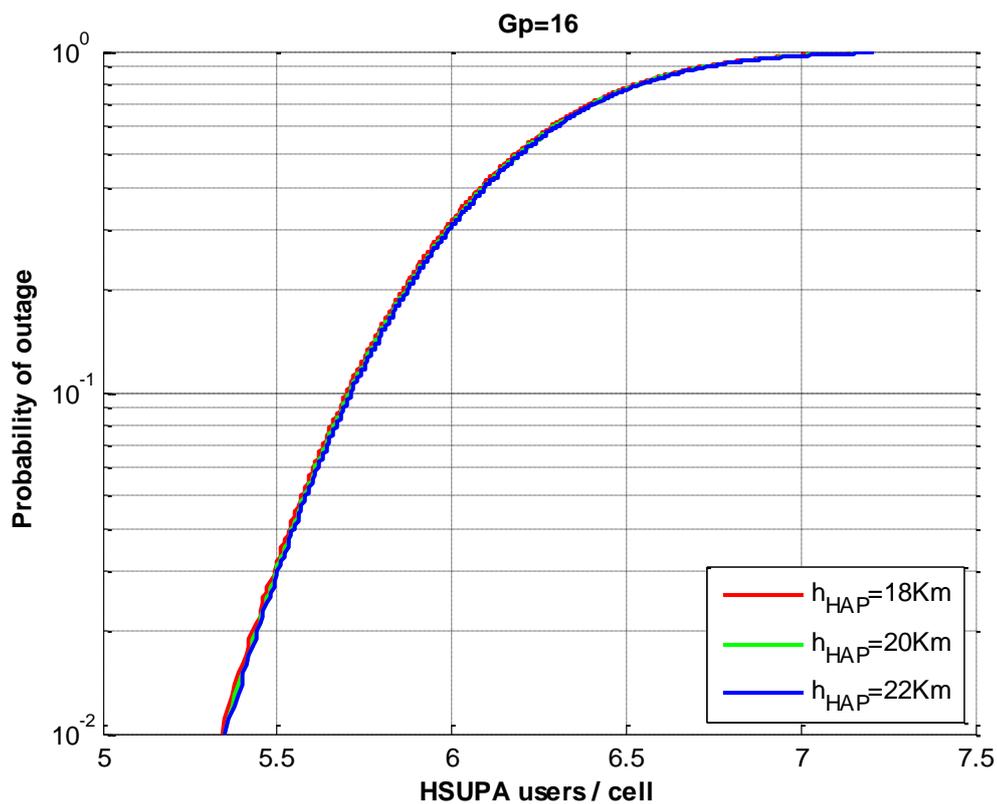


Figura 6.16 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=16$ ) - Altitud del HAP

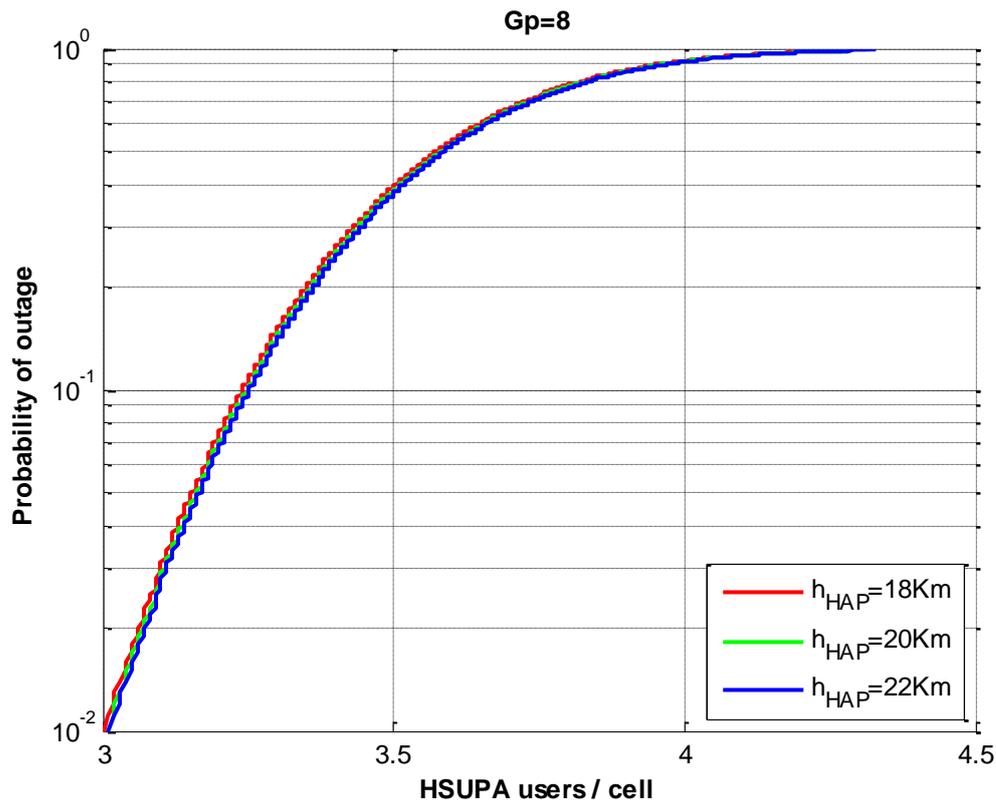


Figura 6.17 - Probabilidad de desbordamiento HSUPA ( $G_p=8$ ) - Altitud del HAP

Puede comprobarse como, a mayor altura de la plataforma, la capacidad de la célula disminuye al recibir la señal de los usuarios con una menor potencia a causa de la mayor longitud en el trayecto desde el terminal a la base. En cualquier caso, estas diferencias son mínimas en las gráficas dado que, al no haber otros usuarios, no se está teniendo en cuenta la interferencia intercelular. En caso de haber otros usuarios localizados en células vecinas, las diferencias serían más apreciables, dado que a menor altura la interferencia intercelular será menor y, por tanto, la capacidad celular mayor.

Como se comentó anteriormente, todas estas simulaciones se han realizado suponiendo la ausencia total de usuarios de este u otros servicios en cualquiera de las celdas próximas desde las que la interferencia generada fuera suficiente para afectar a la capacidad. Se trata por tanto de un caso irreal.

En los siguientes apartados se estudiará el efecto que los usuarios del servicio HSUPA tienen sobre la capacidad de otros servicios. Para ello, comenzaremos calculando los estadísticos de interferencia del servicio HSUPA. Las Figuras 6.18 y 6.19 muestran el valor medio esperado y la varianza de la potencia de interferencia generada por un usuario situado a una distancia  $d$  de la estación base bajo estudio formando un ángulo de  $0^\circ$  ó  $29,9^\circ$  con el eje de la antena. Estas gráficas ya nos adelantan de que forma la localización del usuario afectará al resto de servicios.

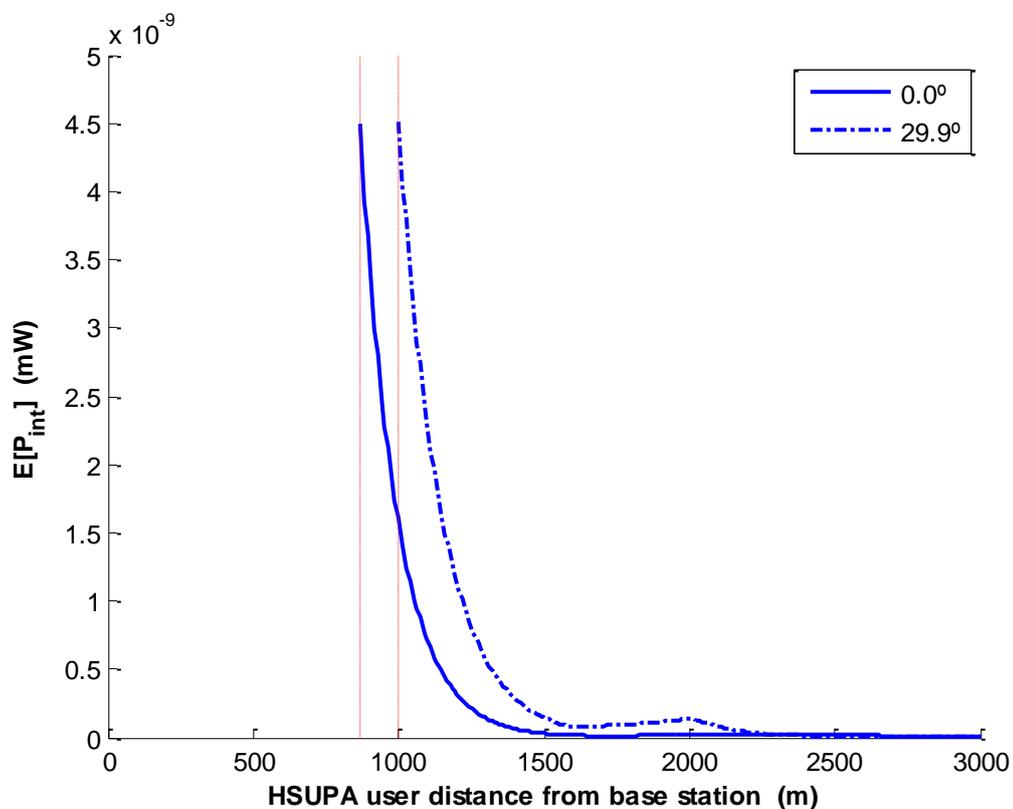


Figura 6.18 - Esperanza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA

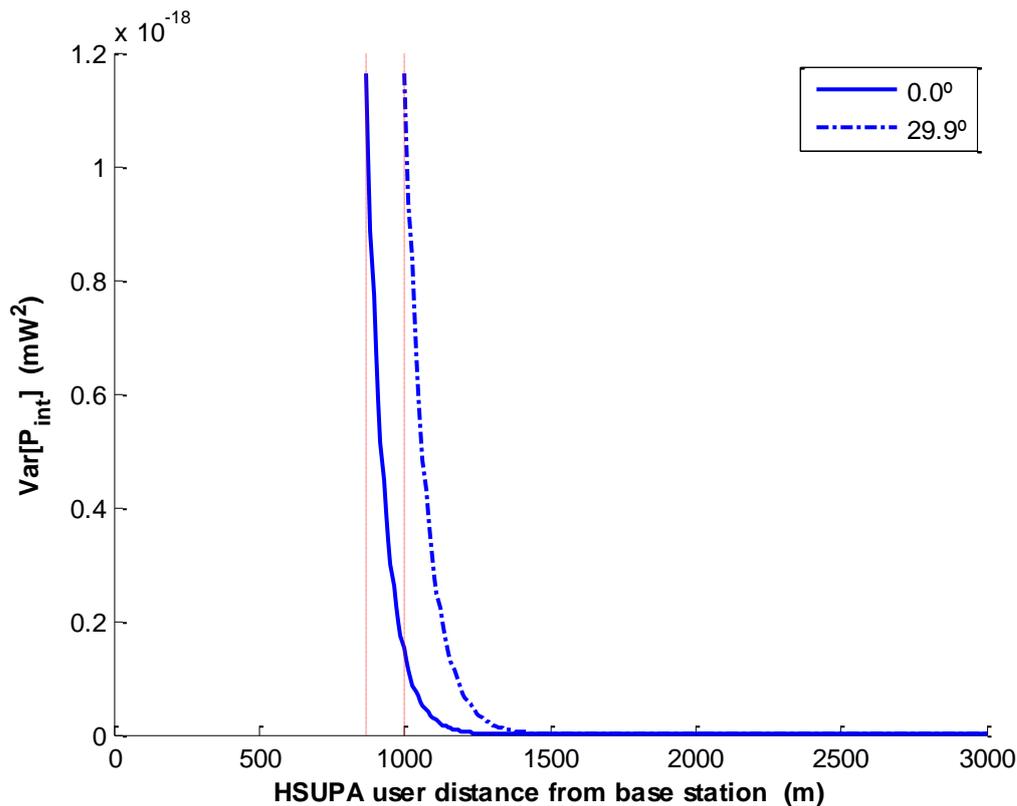


Figura 6.19 - Varianza de potencia de interferencia generada por un usuario HSUPA

Veamos a continuación como un usuario del servicio HSUPA fuera de la celda bajo estudio, situado a una distancia  $r_1$  de su centro, afecta a la prestación del servicio dentro de esta.

Dado que las antenas utilizadas son directivas, y la ganancia en recepción está definida por la ecuación (6.27), la interferencia generada por el usuario HSUPA no dependerá exclusivamente de su distancia a la estación de referencia como en casos anteriores, sino también del ángulo. Por ello, se realizarán simulaciones para los casos en que la dirección del usuario interferente hacia la estación base forma un ángulo de  $0^\circ$  y  $29,9^\circ$  con respecto al eje de abscisas de la plantilla celular.

Situaremos el nuevo usuario interferente a una distancia  $r_1$  del centro de la célula bajo estudio, sobre una recta que forma un ángulo de  $0^\circ$  con el supuesto eje de abscisas de nuestra plantilla celular. La Figura 6.20 muestra las posibles localizaciones de este usuario en la simulación.

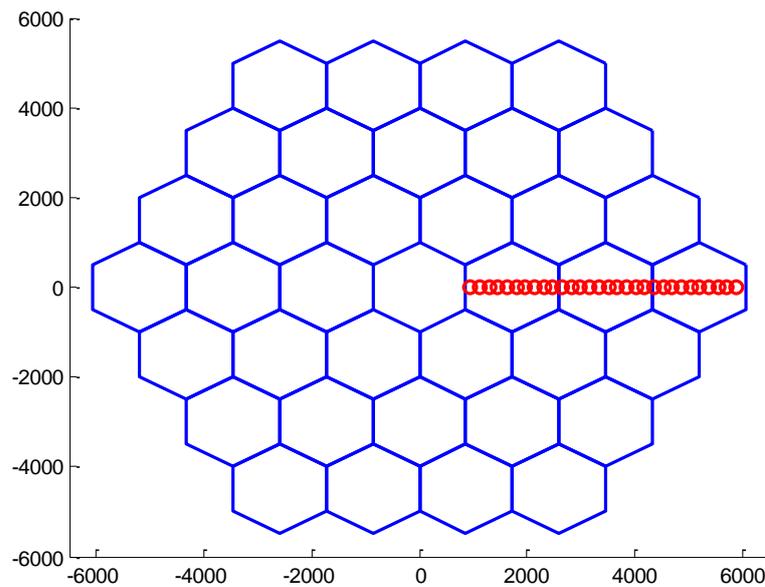


Figura 6.20 - Posibles localizaciones del usuario interferente ( $0,1^\circ$ )

La Figura 6.21 muestra la capacidad de la célula para el servicio HSUPA con un usuario adicional del servicio localizado según se explicaba anteriormente. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

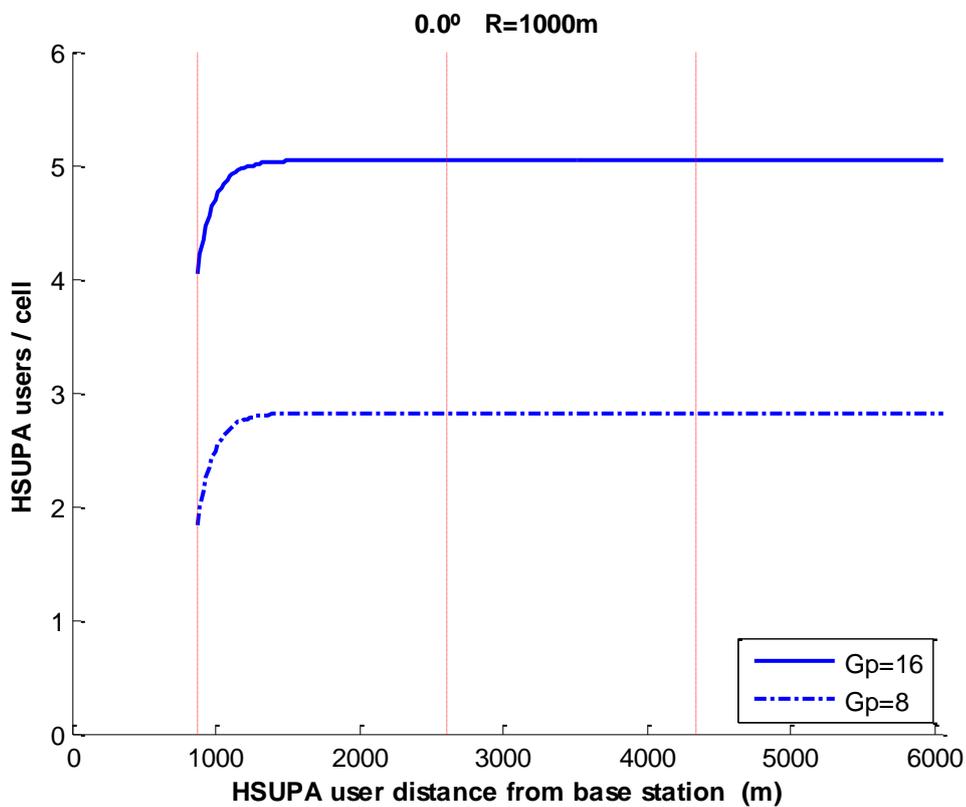


Figura 6.21 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo ( $0^\circ$ )

Las marcas rojas verticales, separadas una distancia  $d$ , identifican las fronteras entre células contiguas de la red celular, donde el usuario pasa de estar en una corona a la siguiente.

Lógicamente, a menor distancia del usuario HSUPA al centro de la célula bajo estudio, la interferencia generada en esta es mayor y, por lo tanto, nuestra celda tendrá una menor capacidad para ofrecer servicio de voz a los usuarios. Observamos como la interferencia generada es significativa hasta, aproximadamente, una distancia  $d$ , donde estarán situados los centros de las células de la 1ª corona.

A partir de esa distancia, debido principalmente al ángulo formado con la antena receptora, la potencia de interferencia es mínima y los valores de capacidad obtenidos coinciden con los simulados anteriormente en ausencia de usuarios externos.

A continuación, volveremos a situar nuestro usuario externo a una distancia  $r_1$  del centro de la célula bajo estudio, pero esta vez sobre una recta que forma un ángulo de  $29.9^\circ$  con el supuesto eje de abscisas de nuestra plantilla celular. La Figura 6.22 muestra las posibles localizaciones de este usuario en la simulación.

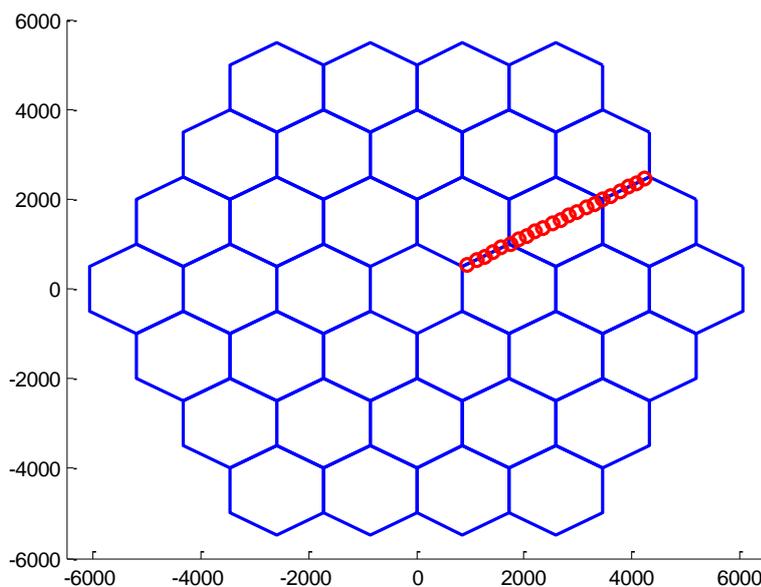


Figura 6.22 - Posibles localizaciones del usuario interferente ( $29,9^\circ$ )

La Figura 6.23 muestra la capacidad de la célula para el servicio HSUPA con un usuario adicional del servicio localizado según se explicaba anteriormente. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesado de 16 y 8.

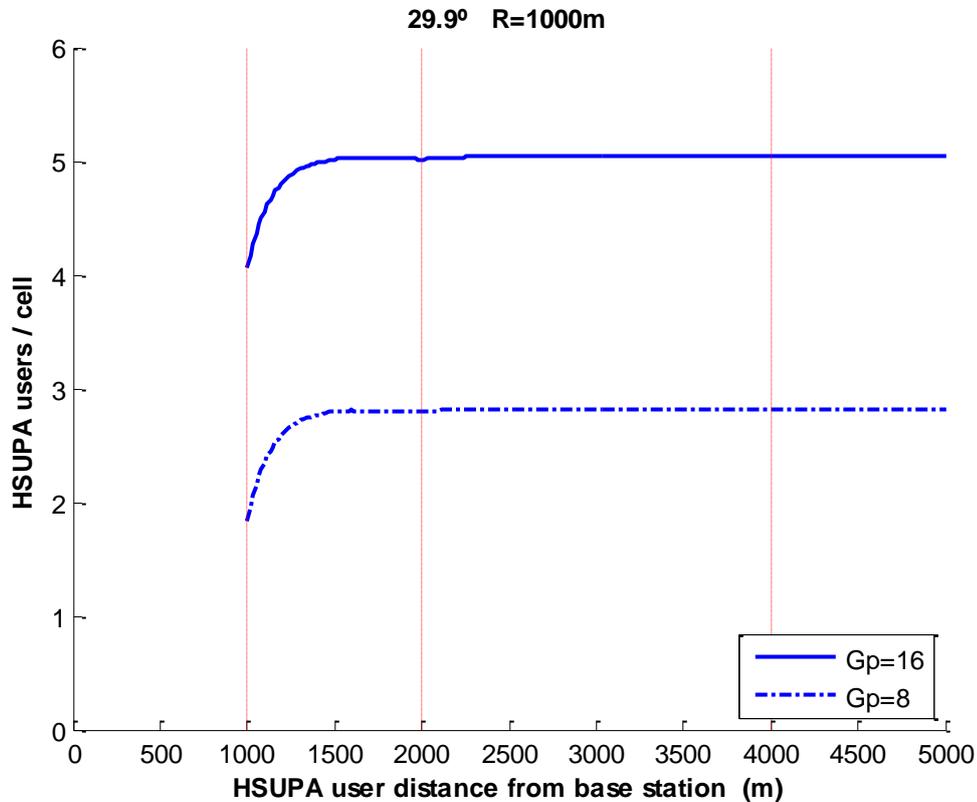


Figura 6.23 - Capacidad del servicio HSUPA - 1 usuario externo (29,9°)

Las marcas rojas verticales, separadas una distancia  $2R$ , identifican las fronteras entre células contiguas de la red celular, donde el usuario pasa de estar en una corona a la siguiente.

Lógicamente, a menor distancia del usuario HSUPA al centro de la célula bajo estudio, la interferencia generada en esta es mayor y, por lo tanto, nuestra celda tendrá una menor capacidad para ofrecer servicio de voz a los usuarios. Observamos como la interferencia generada es significativa hasta, aproximadamente, una distancia  $d$ , donde estarán situados los centros de las células de la 1ª corona.

A partir de esa distancia, debido principalmente al ángulo formado con la antena receptora, la potencia de interferencia es mínima y los valores de capacidad obtenidos coinciden con los simulados anteriormente en ausencia de usuarios externos.

De acuerdo a las simulaciones realizadas, teniendo en cuenta la función de ganancia de la antena receptora, un usuario HSUPA externo a la célula bajo estudio únicamente genera interferencia suficiente para afectar al mismo servicio cuando se encuentra situado dentro de la 1ª corona.

A continuación, se analizará en detalle la capacidad del servicio HSUPA cuando un usuario de este servicio se encuentra localizado dentro de una de estas células, según se muestra en la Figura 6.24.

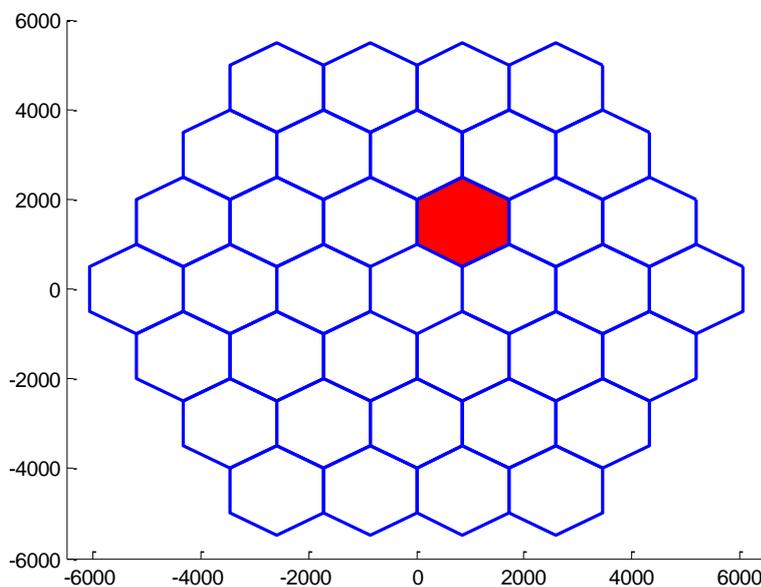


Figura 6.24 - Célula en la que se localiza el usuario interferente

Las Figuras 6.25 y 6.26 muestran la capacidad del servicio HSUPA en función de la localización del otro usuario del mismo servicio dentro de una celda de la 1ª corona. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

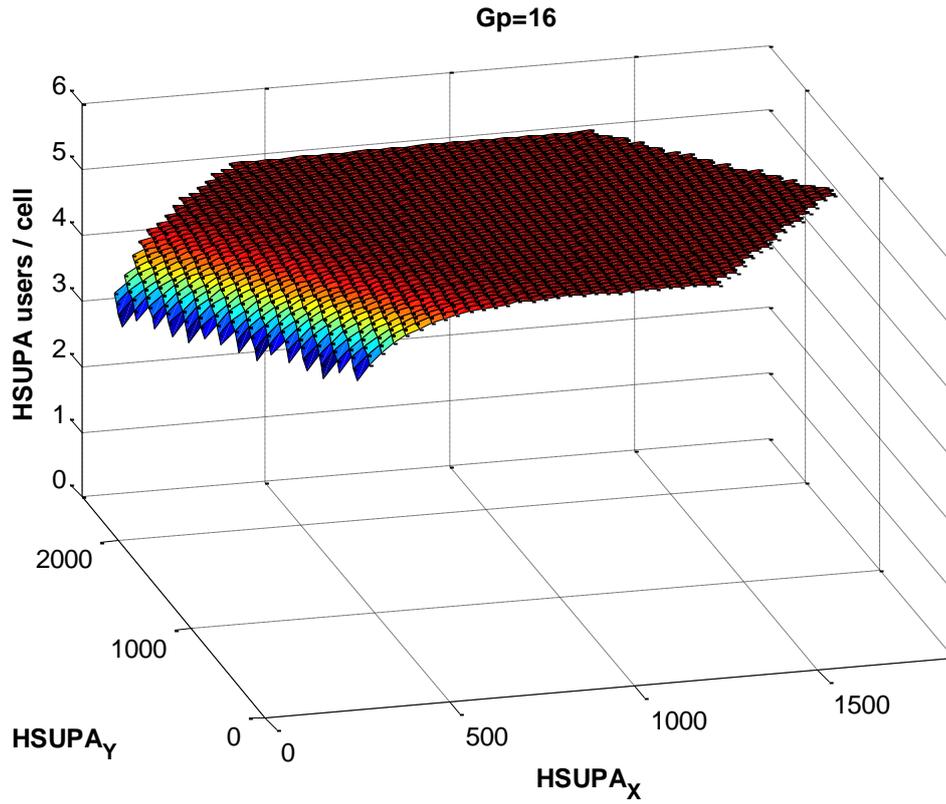


Figura 6.25 - Capacidad del servicio HSUPA ( $G_p=16$ ) - 1u interferente en la 1ª corona

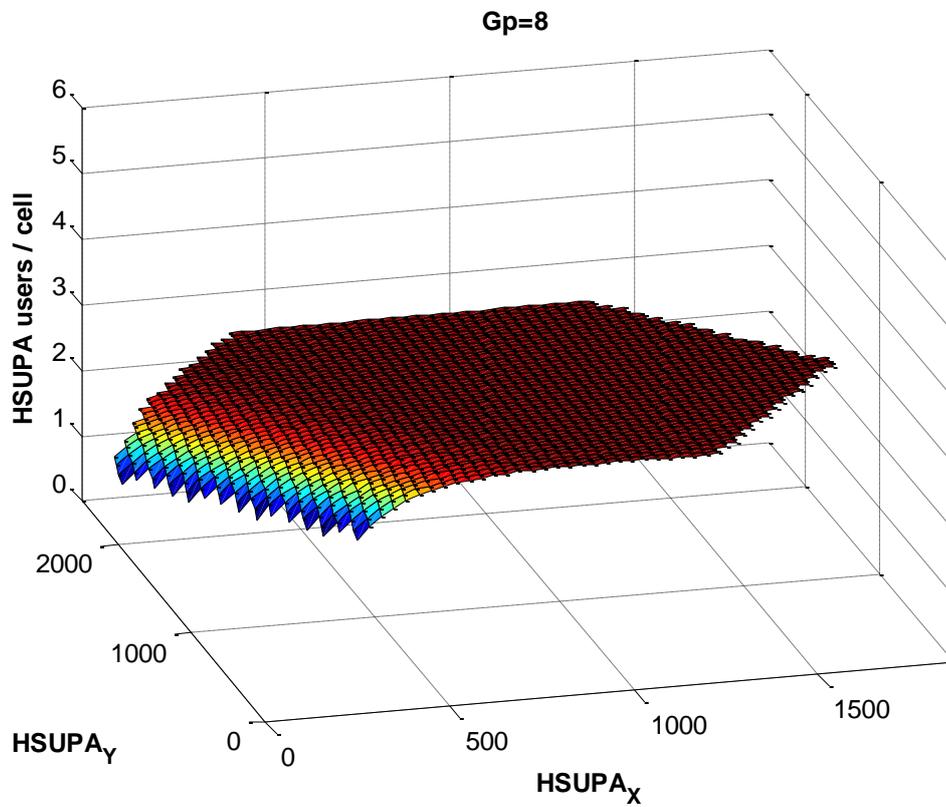


Figura 6.26 - Capacidad del servicio HSUPA ( $G_p=8$ ) - 1u interferente en la 1ª corona

En estas simulaciones se ha visto la incidencia sobre la capacidad del servicio de un único usuario del servicio de datos de alta velocidad fuera de la célula bajo estudio. Sin embargo, dado que suponemos una distribución uniforme de usuarios, cada una de las 6 celdas vecinas tendrá un número similar de usuarios HSUPA. En las siguientes simulaciones supondremos la presencia de un usuario interferente en cada una de estas celdas localizados cada uno de ellos a una distancia  $r$  de la estación base bajo estudio.

La Figura 6.27 muestra las posibles localizaciones dentro de la simulación de estos 6 usuarios interferentes.

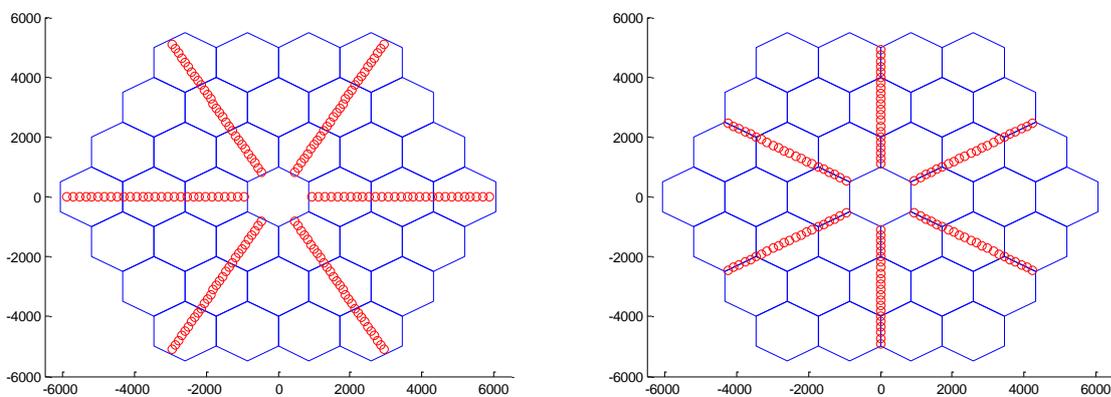


Figura 6.27 - Posibles localizaciones de los 6 usuarios interferentes

Las Figuras 6.28 y 6.29 muestran la capacidad de la célula para ofrecer el servicio en función de la distancia de cada uno de estos 6 usuarios interferentes a la estación base de referencia.

Puede comprobarse como la suma de la interferencias generadas por cada uno de estos 6 usuarios del servicio HSUPA provocan una caída mucho más drástica en la capacidad celular a medida que se aproximan a la estación base, llegando a anularse por completo poco antes de llegar al borde de la celda bajo estudio.

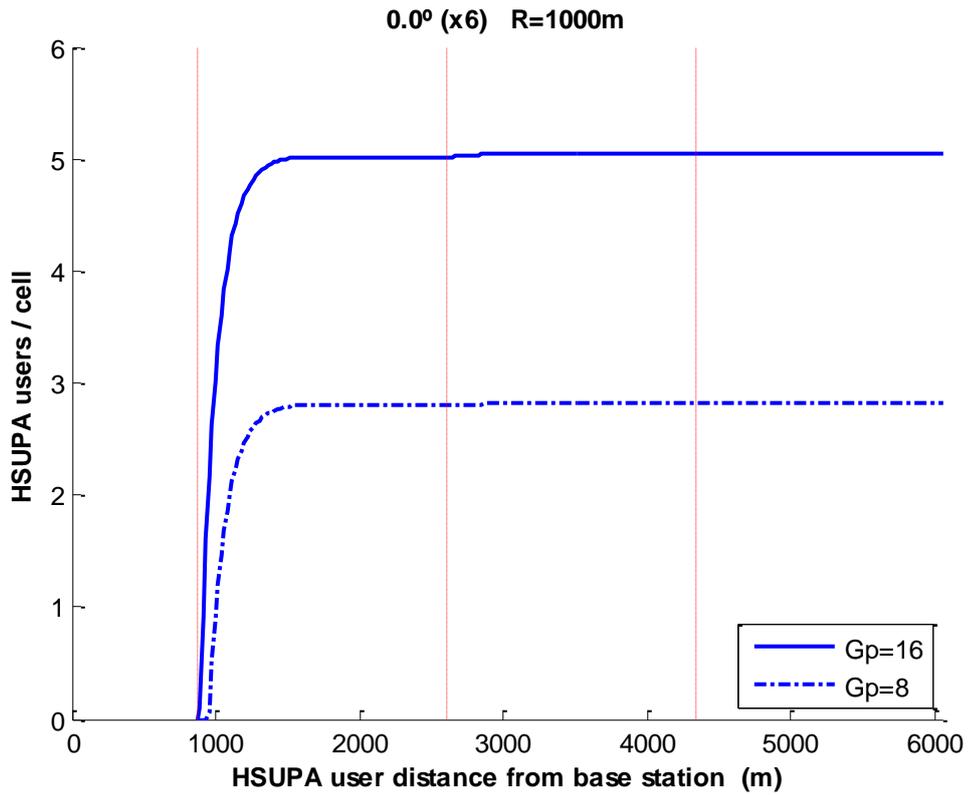


Figura 6.28 - Capacidad del servicio HSUPA - 6 usuarios externos (0,0°)

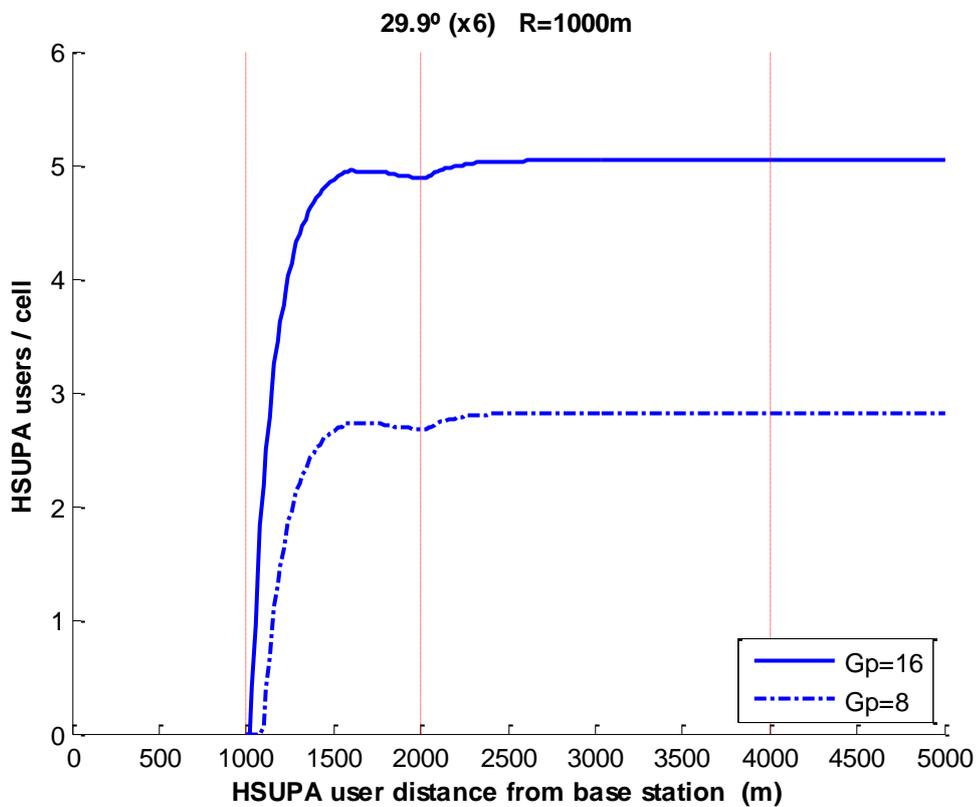


Figura 6.29 - Capacidad del servicio HSUPA - 6 usuarios externos (29,9°)

A continuación se realizará la misma simulación suponiendo 6 usuarios interferentes localizados en la misma posición dentro de cada una de las 6 células que componen la 1ª corona, según se muestra en la Figura 6.30.

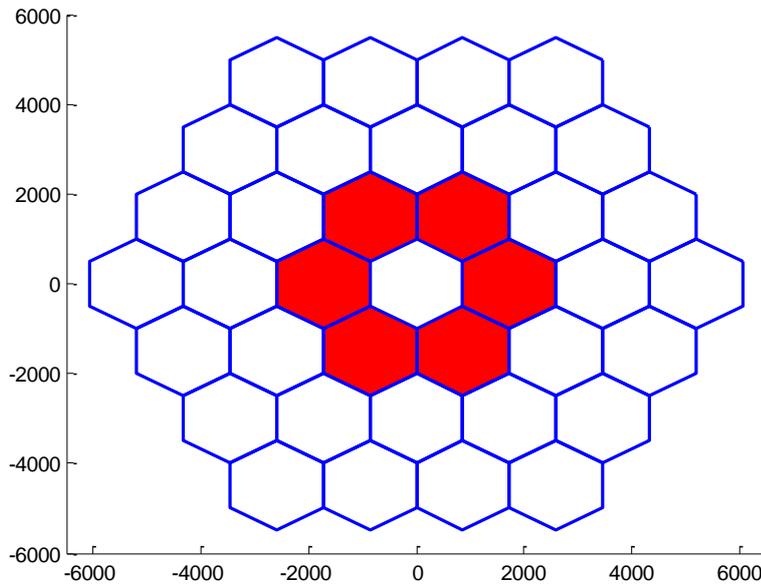


Figura 6.30 - Células en las que se localizan los 6 usuarios interferentes

Las Figuras 6.31 y 6.32 muestran la capacidad del servicio HSUPA en función de la localización de estos usuarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

Puede apreciarse claramente como la capacidad del sector para ofrecer el servicio de voz se anula completamente cuando los 6 usuarios interferentes se encuentran próximos al borde de la celda de referencia.

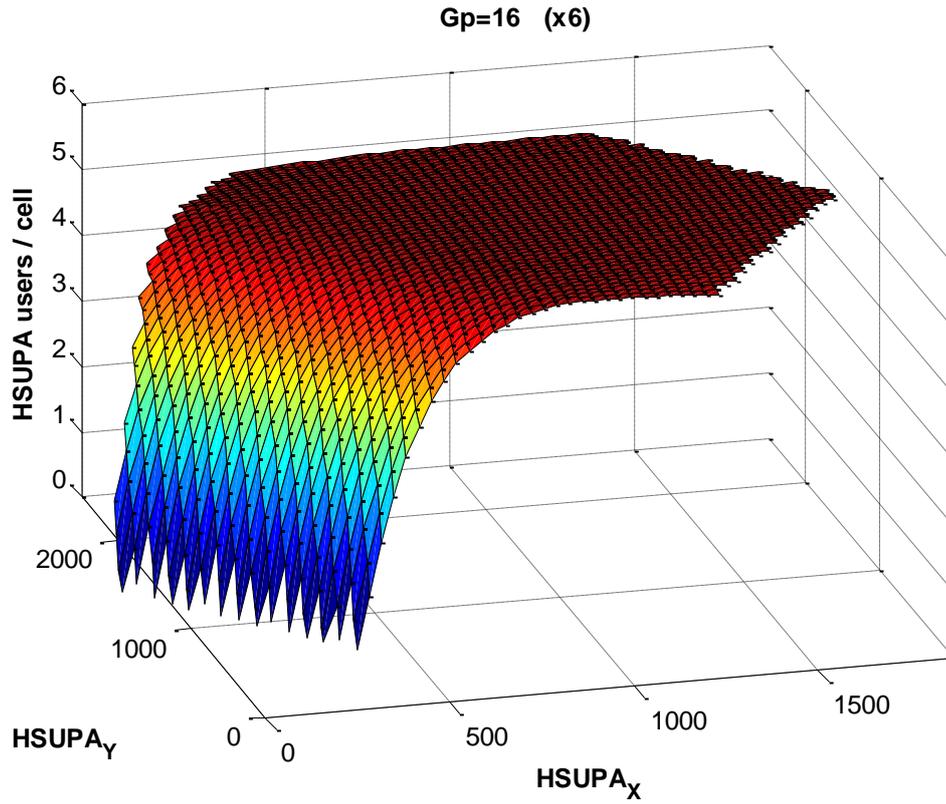


Figura 6.31 - Capacidad del servicio HSUPA ( $G_p=16$ ) - 6u interferentes en la 1ª corona

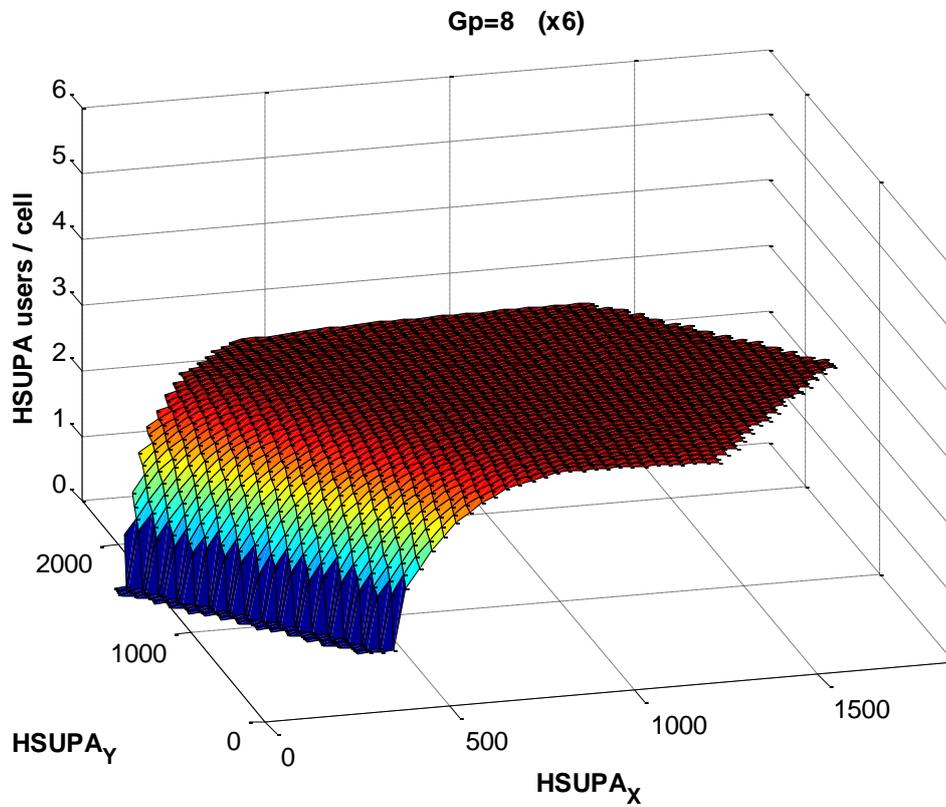


Figura 6.32 Capacidad del servicio HSUPA ( $G_p=8$ ) - 6u interferentes en la 1ª corona

## 6.4.2 Servicio de voz

Una vez caracterizadas las prestaciones que los usuarios pueden esperar del servicio HSUPA cuando se ofrece desde HAPs, veamos de qué forma la interferencia generada por estos afecta al servicio de voz, suponiendo una densidad uniforme de usuarios de este servicio dentro de cada célula.

La Figura 6.33 muestra la capacidad de la célula para el servicio de voz cuando este es el único servicio utilizado. Se han realizado simulaciones para distintos valores de radio celular.

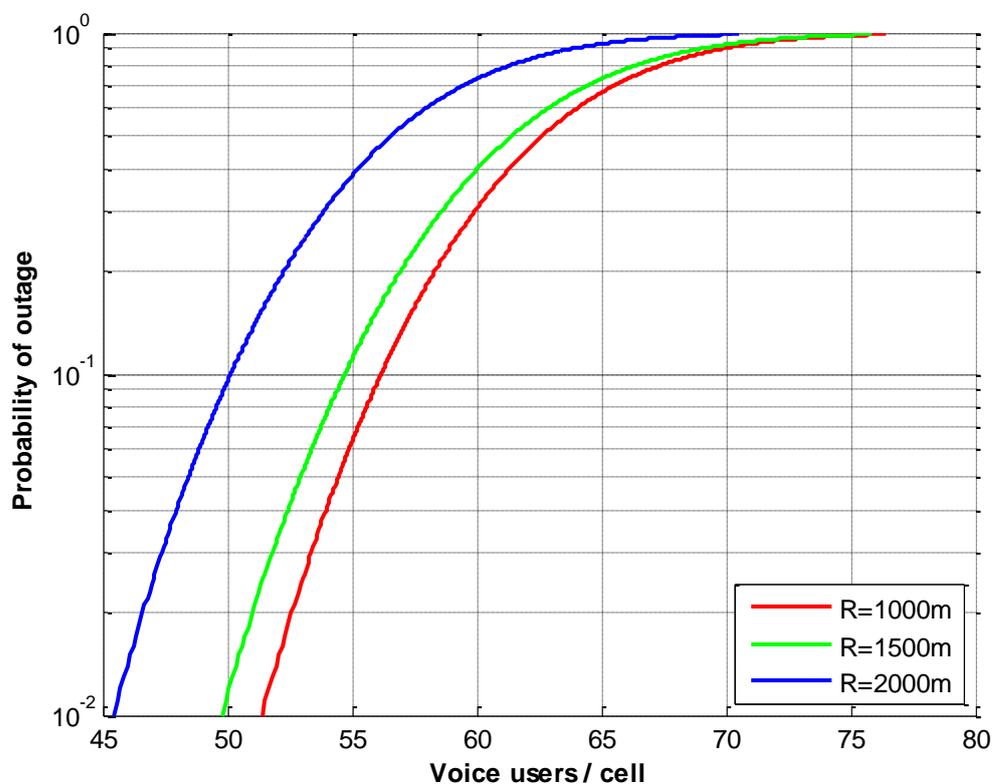


Figura 6.33 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz

En general, observamos cómo, independientemente del radio escogido, la capacidad con este tipo de sistemas es ligeramente inferior a la que se observaba en el caso de autopistas.

Para una probabilidad de desbordamiento del 1% observamos una capacidad de 51 usuarios para una sistema celular de radio 1000mt. En el resto de simulaciones, la capacidad decrece a medida que aumentamos el radio de la célula, llegándose a los 46 usuarios para un radio de 2000mt.

Debe tenerse en cuenta que la relación entre el radio celular de la red y la capacidad de la misma para ofrecer un determinado servicio es algo más compleja. Por un lado, como es lógico, aumentar el tamaño de celda implica unas mayores pérdidas de propagación, una menor ganancia cuando los usuarios se encuentran próximos al borde de la celda y, como consecuencia, una menor potencia disponible en recepción para procesar la señal, lo que tiene un efecto negativo sobre la capacidad celular. Sin embargo, como puede comprobarse en la Figura 6.9, un aumento en el radio celular supone una mayor reutilización de frecuencias  $F_{ur}$ , y, por tanto, una menor interferencia intercelular, lo que redonda en una mayor capacidad.

La Figura 6.34 muestra la capacidad del servicio de voz para distintos radios celulares entre 500 y 3000 mt.

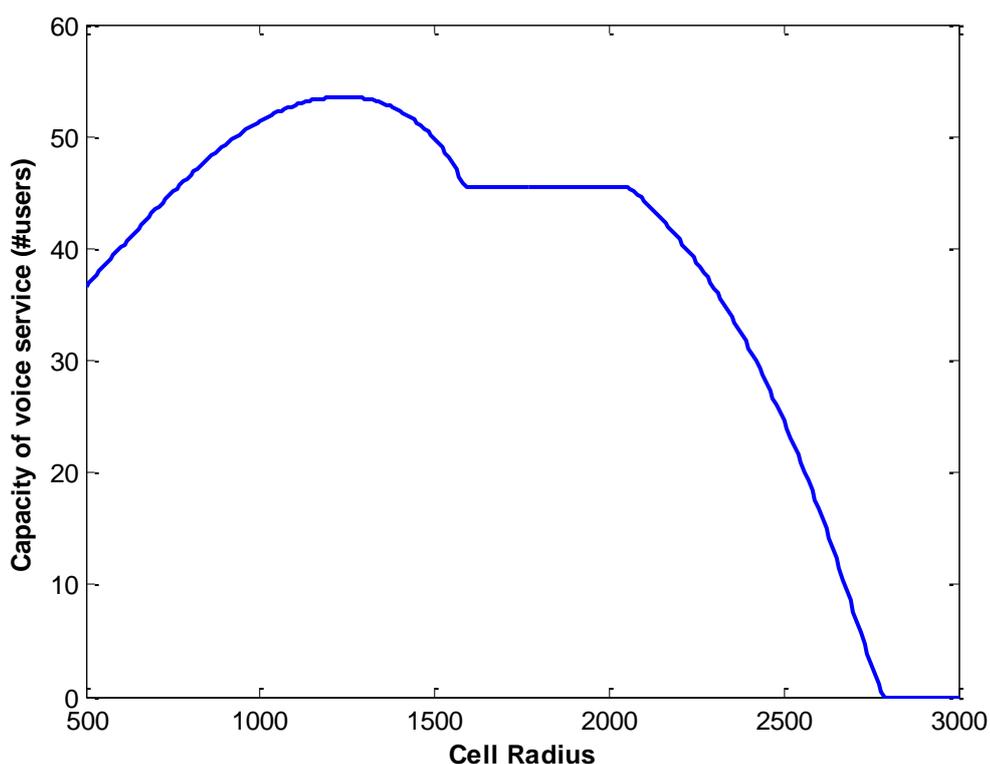


Figura 6.34 - Capacidad del servicio de voz - Radio celular

Puede observarse como inicialmente el aumento del radio celular tiene una influencia positiva sobre la capacidad, aumentando esta hasta alcanzar sus valores máximos entre 1200 y 1300 mt. A partir de este punto, como consecuencia de la menor potencia recibida la ganancia decrece hasta llegar a anularse en los 2800 mt.

Estos resultados se han obtenido suponiendo que debemos dar servicio a usuarios moviéndose a velocidades elevadas, del orden de 120 km/h. Dado que este tipo de despliegues pueden encontrarse sobre escenarios muy variados, encontraremos casos donde no necesitemos asegurar el servicio a estas velocidades. La Figura 6.35 muestra la capacidad celular para el servicio de voz para distintas velocidades máximas de los usuarios.

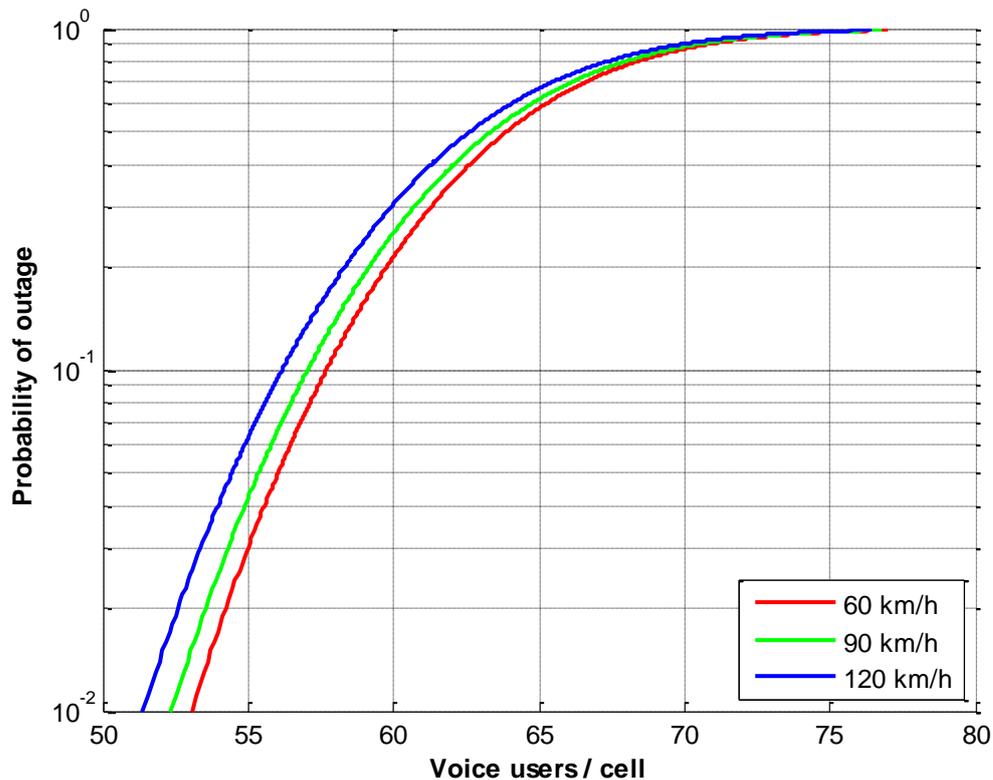


Figura 6.35 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz - Velocidad máxima

Se observa cómo, a medida que disminuimos la velocidad máxima permitida para los usuarios de la celda, aumenta la capacidad celular. Esto es debido a la menor  $E_b/N_o$  requerida por el servicio y a la disminución de errores en el control de potencia.

Para analizar el efecto de la interferencia generada por el servicio HSUPA, diferenciaremos claramente cuando los usuarios del servicio de datos de alta velocidad se encuentran en la misma celda y cuando se encuentran en celdas contiguas.

Veamos en primer lugar la reducción en la capacidad de la célula que se produce cuando debemos ofrecer servicio simultáneamente a 1 usuario HSUPA. Las Figuras 6.36 y 6.37 muestran la capacidad para el servicio de voz para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

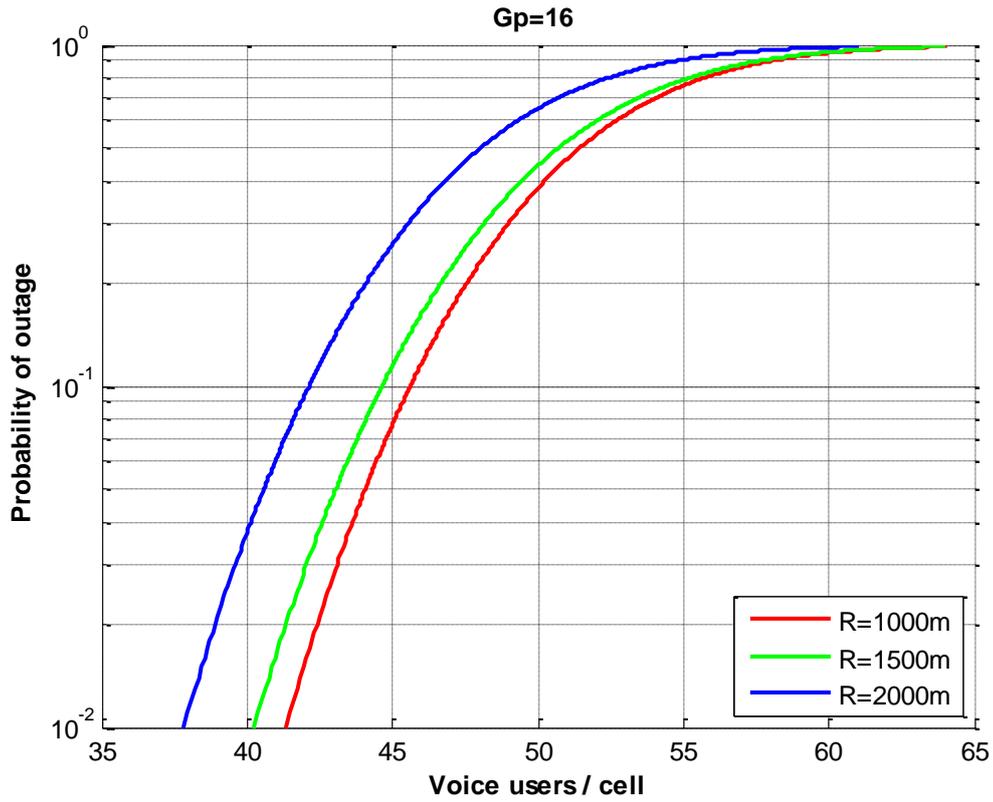


Figura 6.36 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) interno

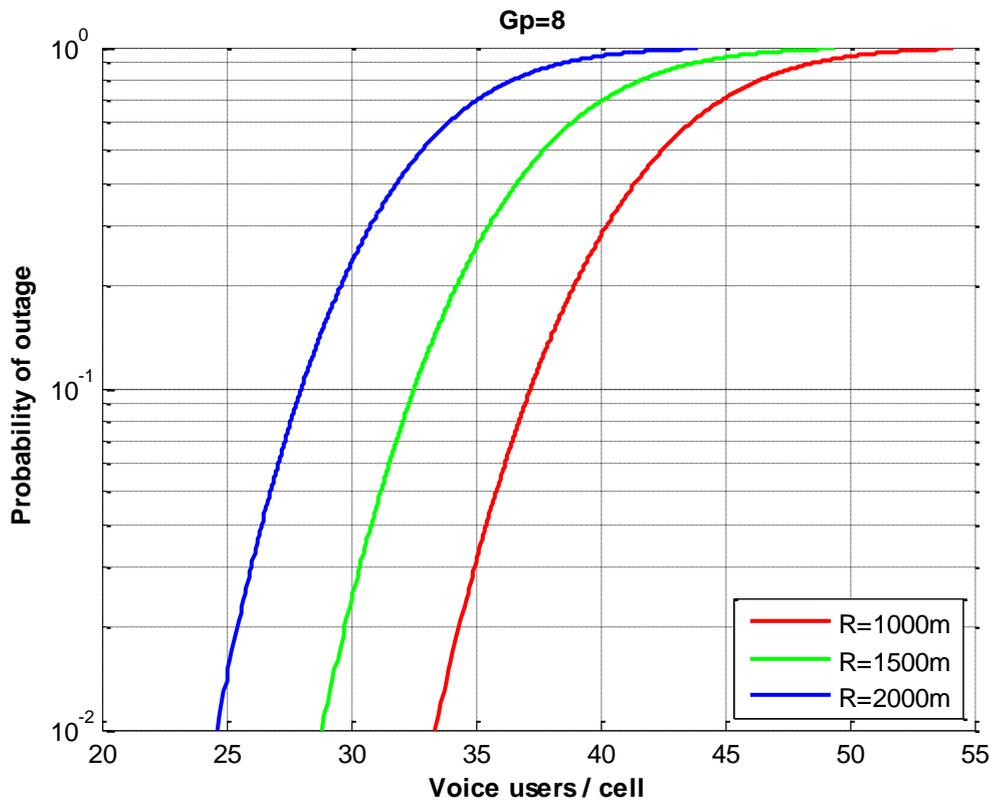


Figura 6.37 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) interno

Puede observarse en estas gráficas la inclusión de 1 usuario HSUPA en nuestra celda supone la disminución de su capacidad para ofrecer servicio a usuarios de voz. Dicha disminución dependerá de la máxima potencia de transmisión permitida para el servicio, variando desde los 10 - 11 usuarios para  $G_p=16$ , cuando se permite una potencia superior, hasta los 19 usuarios para  $G_p=8$ , cuando la máxima potencia de transmisión permitida es 3 dBm menor.

A continuación añadiremos un segundo usuario HSUPA también dentro de la célula bajo estudio. Las Figuras 6.38 y 6.39 muestran la capacidad para el servicio de voz para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

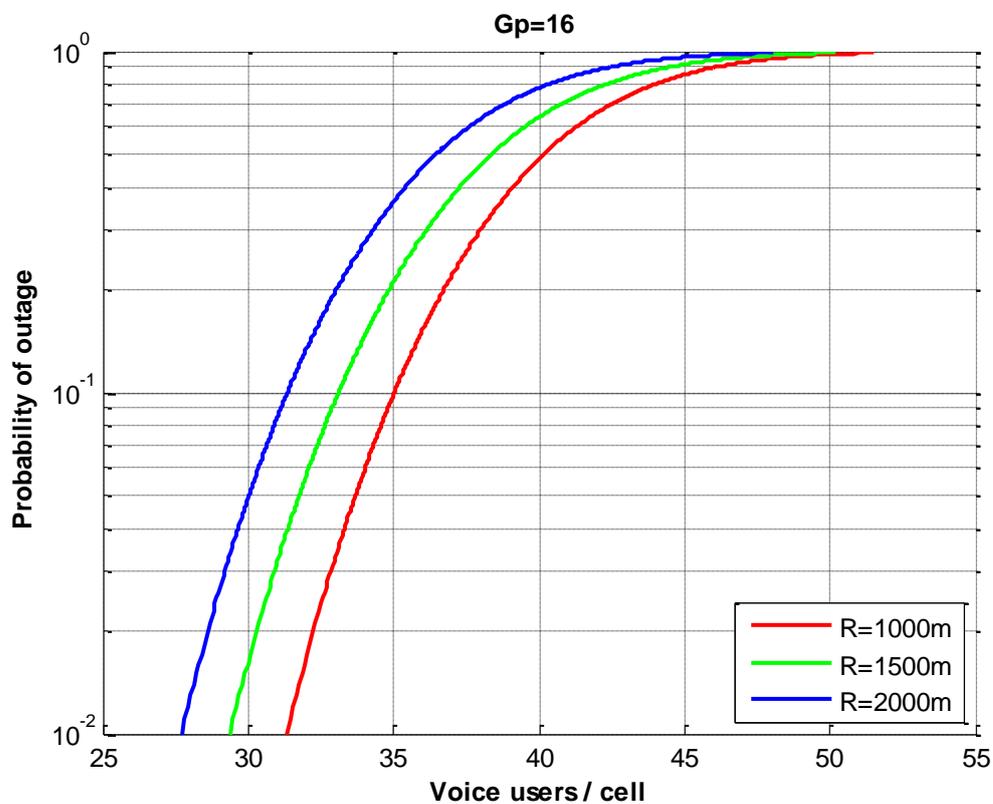


Figura 6.38 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ ) internos

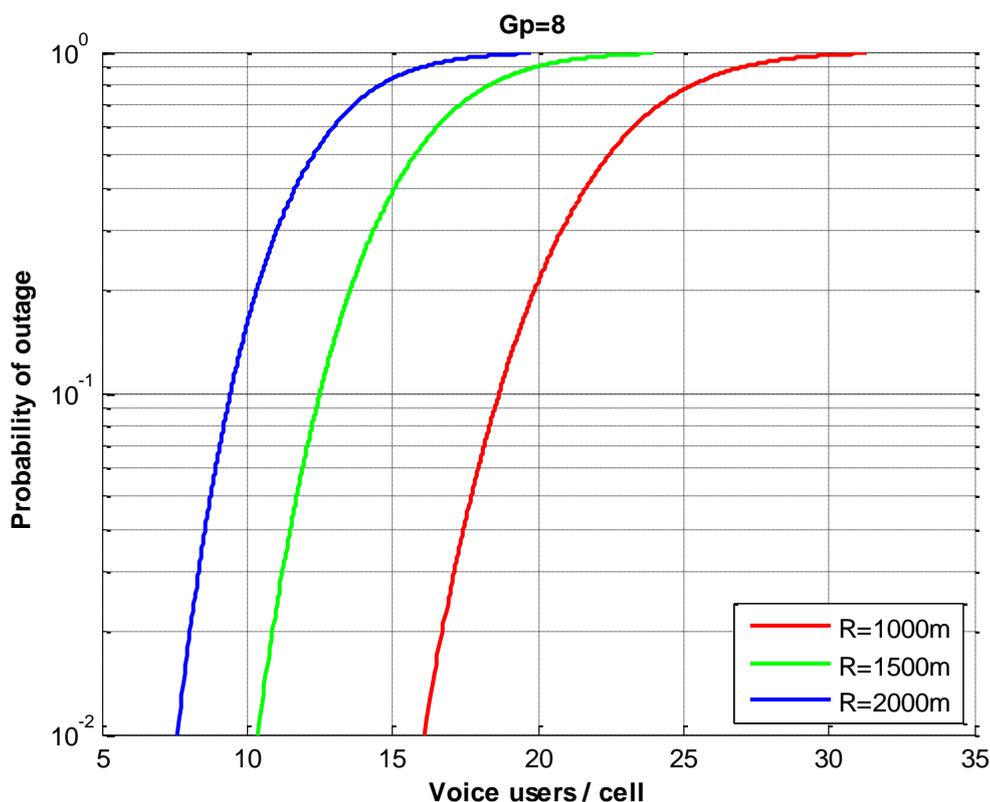


Figura 6.39 - Capacidad del servicio de voz - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ ) internos

Al incluir un segundo usuario del servicio HSUPA dentro de la célula bajo estudio, comprobamos nuevamente un efecto similar al que producía el primero. Se observa una disminución adicional de la capacidad para el servicio de voz de otros 10 usuarios para  $G_p=16$  y unos 19 usuarios en el caso de  $G_p=8$ .

Pasemos ahora a nuestro segundo caso en el que los usuarios HSUPA se encuentran fuera de la celda bajo estudio. Nuevamente, el tipo de antenas utilizadas nos obliga a tener en cuenta la dirección en la que el usuario se aproxima a la estación base de referencia. Se han realizado simulaciones para ángulos de  $0^\circ$  y  $29,9^\circ$  entre la dirección usuario interferente – estación base y el eje de abscisas de nuestra plantilla celular

Situaremos el nuevo usuario interferente a una distancia  $r_1$  del centro de la célula bajo estudio, sobre una recta que forma un ángulo de  $0^\circ$  con el supuesto eje de abscisas de nuestra plantilla celular. La Figura 6.40 muestra las posibles localizaciones de este usuario en la simulación.

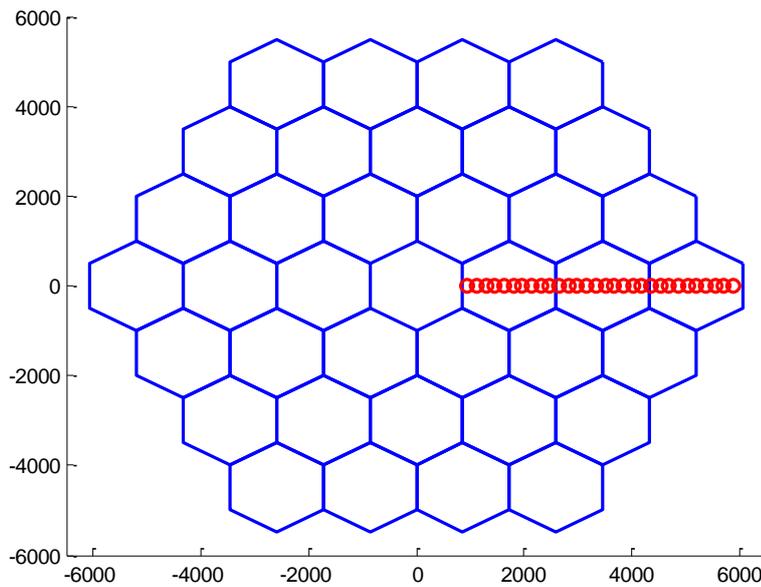


Figura 6.40 - Posibles localizaciones del usuario interferente ( $0,1^\circ$ )

La Figura 6.41 muestra la capacidad de la célula para el servicio de voz con un usuario del servicio HSUPA localizado según se explicaba anteriormente. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

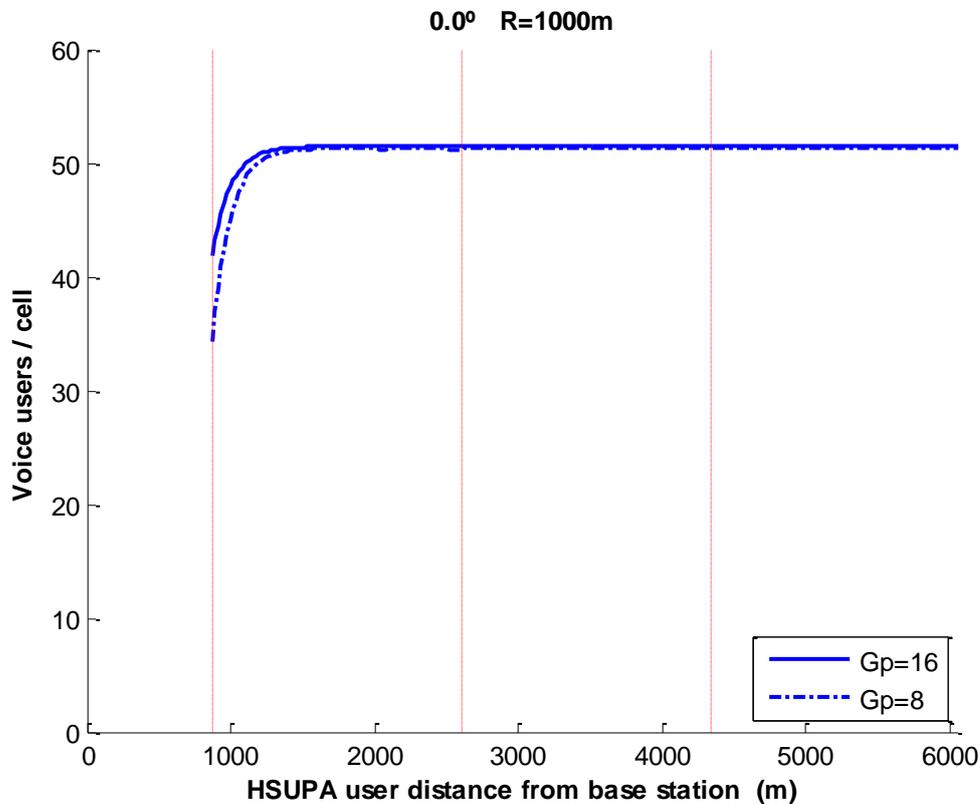


Figura 6.41 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo ( $0,0^\circ$ )

Las marcas rojas verticales, separadas una distancia  $d$ , identifican las fronteras entre células contiguas de la red celular, donde el usuario pasa de estar en una corona a la siguiente.

Lógicamente, a menor distancia del usuario HSUPA al centro de la célula bajo estudio, la interferencia generada en esta es mayor y, por lo tanto, nuestra celda tendrá una menor capacidad para ofrecer servicio de voz a los usuarios. Observamos como la interferencia generada es significativa hasta, aproximadamente, una distancia  $d$ , donde estarán situados los centros de las células de la 1ª corona.

A partir de esa distancia, debido principalmente al ángulo formado con la antena receptora, la potencia de interferencia es mínima y los valores de capacidad obtenidos coinciden con los simulados anteriormente en ausencia de usuarios externos.

A continuación, volveremos a situar nuestro usuario externo a una distancia  $r_1$  del centro de la célula bajo estudio, pero esta vez sobre una recta que forma un ángulo de  $29.9^\circ$  con el supuesto eje de abscisas de nuestra plantilla celular. La Figura 6.42 muestra las posibles localizaciones de este usuario en la simulación.

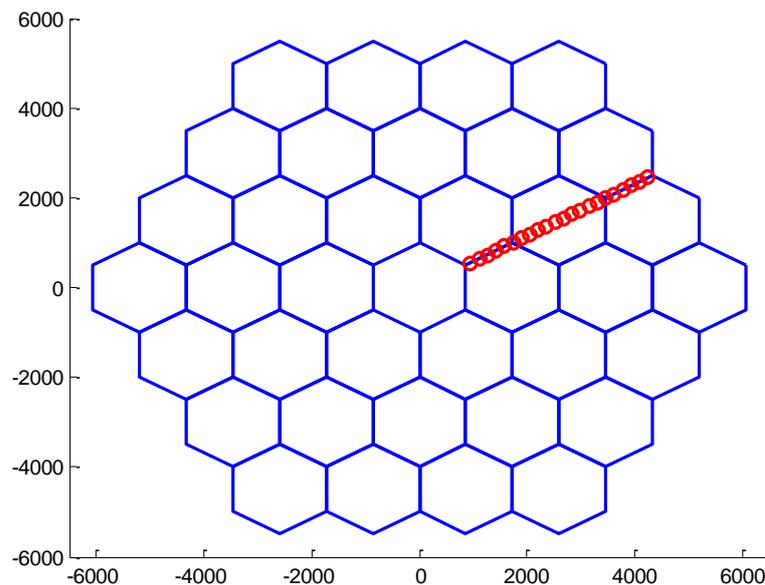


Figura 6.42 - Posibles localizaciones del usuario interferente ( $29,9^\circ$ )

La Figura 6.43 muestra la capacidad de la célula para el servicio de voz con un usuario HSUPA localizado según se explicaba anteriormente. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

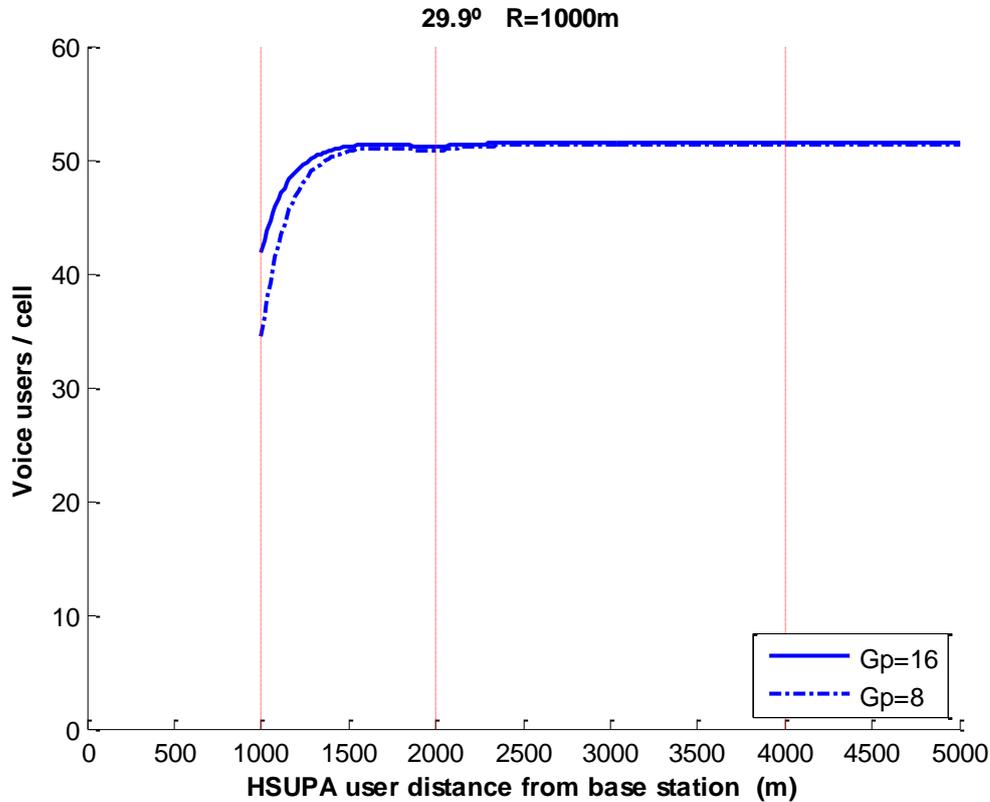


Figura 6.43 - Capacidad del servicio de voz - 1 usuario HSUPA externo (29,9°)

Las marcas rojas verticales, separadas una distancia  $2R$ , identifican las fronteras entre células contiguas de la red celular, donde el usuario pasa de estar en una corona a la siguiente.

Lógicamente, a menor distancia del usuario HSUPA al centro de la célula bajo estudio, la interferencia generada en esta es mayor y, por lo tanto, nuestra celda tendrá una menor capacidad para ofrecer servicio de voz a los usuarios. Observamos como la interferencia generada es significativa hasta, aproximadamente, una distancia  $d$ , donde estarán situados los centros de las células de la 1ª corona.

A partir de esa distancia, debido principalmente al ángulo formado con la antena receptora, la potencia de interferencia es mínima y los valores de capacidad obtenidos coinciden con los simulados anteriormente en ausencia de usuarios externos.

En estas simulaciones se ha visto la incidencia sobre la capacidad del servicio de voz de un único usuario del servicio de datos de alta velocidad fuera de la célula bajo estudio. Sin embargo, dado que suponemos una distribución uniforme de usuarios, cada una de las 6 celdas vecinas tendrá un número similar de usuarios HSUPA. En las siguientes simulaciones supondremos la presencia de un usuario interferente en cada una de estas celdas localizados cada uno de ellos a una distancia  $r$  de la estación base bajo estudio.

La Figura 6.44 muestra las posibles localizaciones dentro de la simulación de estos 6 usuarios interferentes y los resultados de capacidad en función de la distancia de estos usuarios a la estación base.

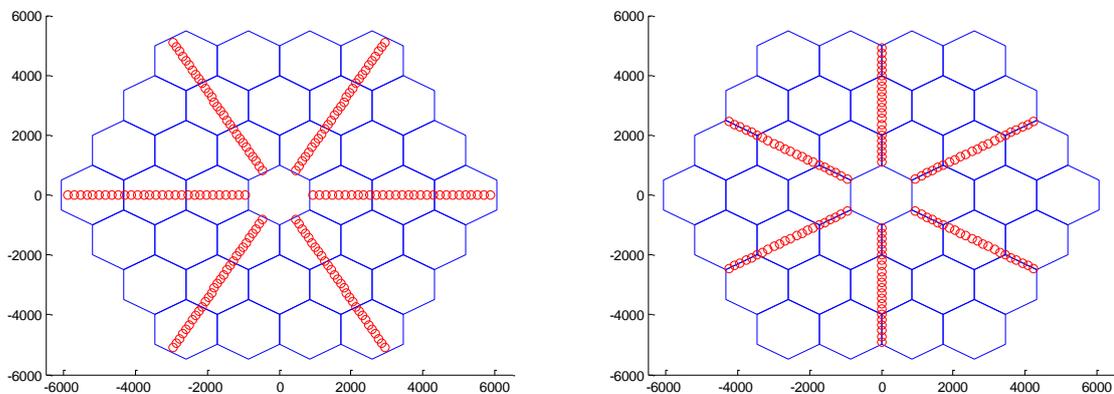


Figura 6.44 - Posibles localizaciones de los 6 usuarios interferentes

Las Figuras 6.45 y 6.46 muestran la capacidad de la célula para ofrecer el servicio en función de la distancia de cada uno de estos 6 usuarios interferentes a la estación base de referencia.

Puede comprobarse como la suma de la interferencias generadas por cada uno de estos 6 usuarios del servicio HSUPA provocan una caída mucho más drástica en la capacidad celular a medida que se aproximan a la estación base, llegando a anularse por completo poco antes de llegar al borde de la celda bajo estudio.

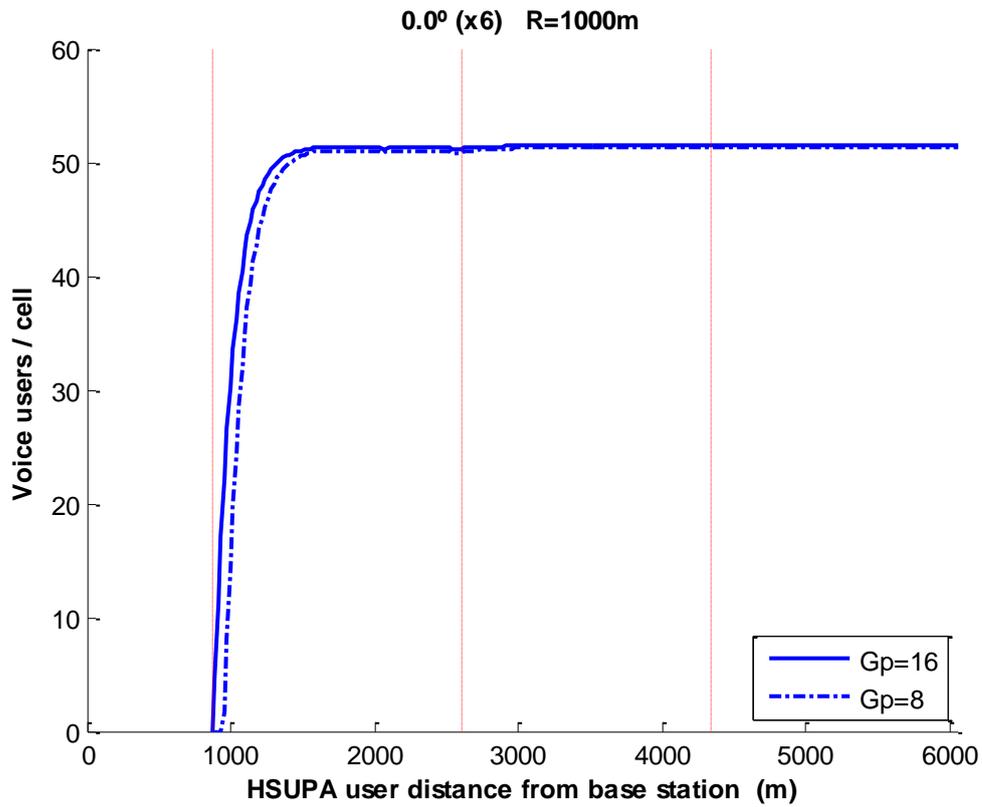


Figura 6.45 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos (0,0°)

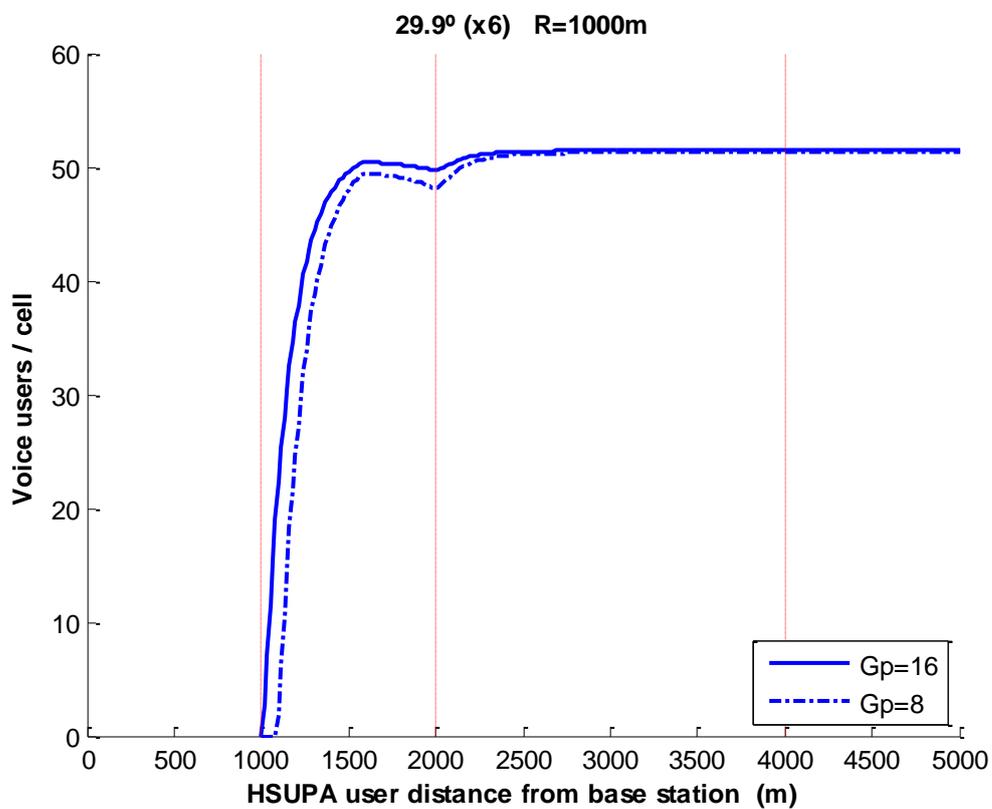


Figura 6.46 - Capacidad del servicio de voz - 6 usuarios HSUPA externos (29,9°)

De acuerdo a las simulaciones realizadas, teniendo en cuenta la función de ganancia de la antena receptora, un usuario HSUPA externo a la célula bajo estudio únicamente genera interferencia suficiente para afectar al servicio de voz cuando se encuentra situado dentro de la 1ª corona. A continuación, se analizará en detalle la capacidad del servicio de voz cuando un usuario HSUPA se encuentra localizado dentro de una de estas células, según se muestra en la Figura 6.47.

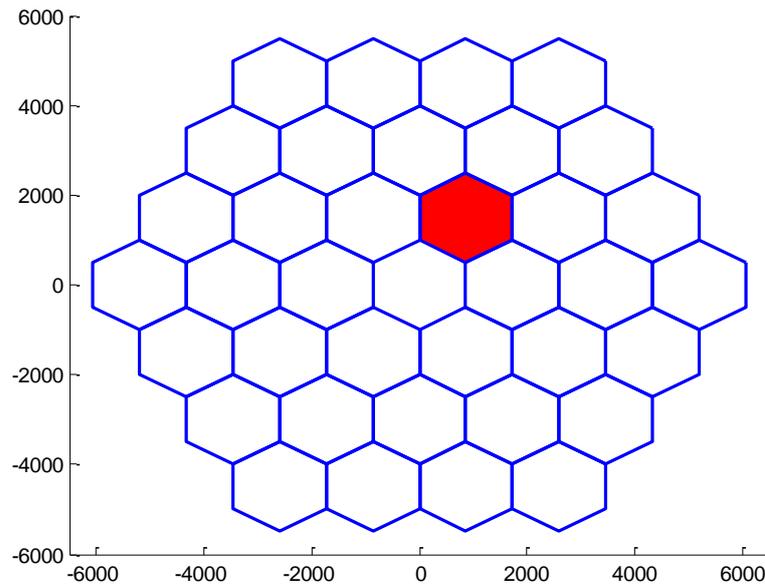


Figura 6.47 - Célula en la que se localiza el usuario interferente

Las Figuras 6.48 y 6.49 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la localización del usuario HSUPA dentro de una celda de la 1ª corona. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

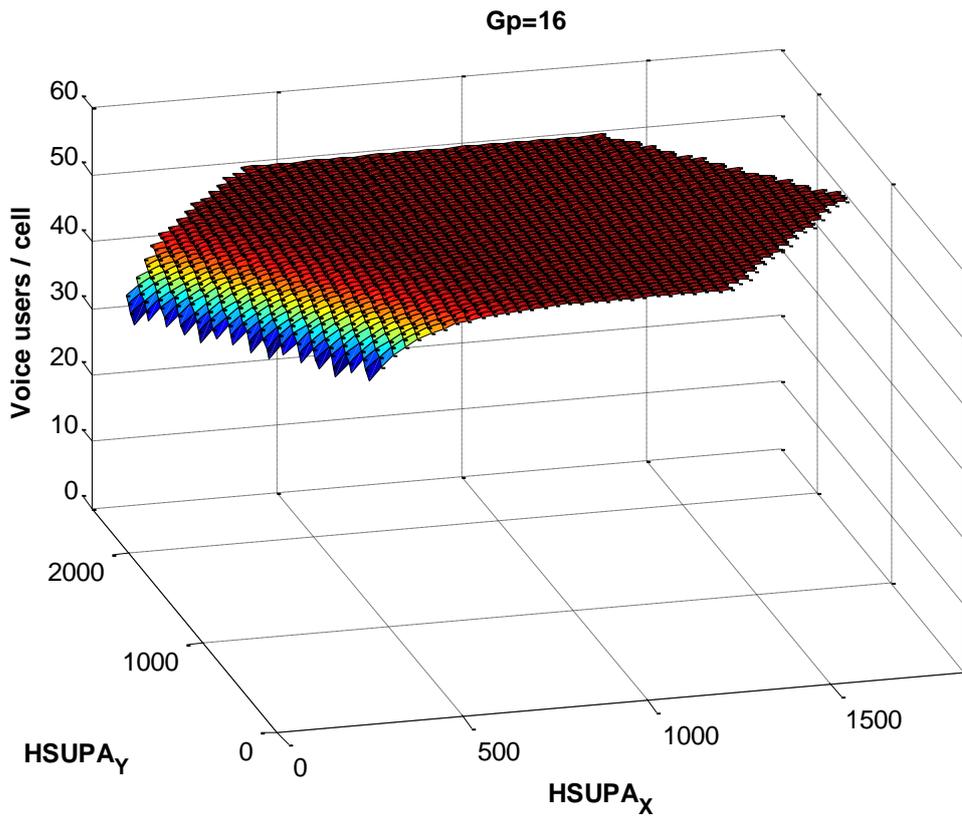


Figura 6.48 - Capacidad del servicio de voz - 1u interferente en la 1ª corona

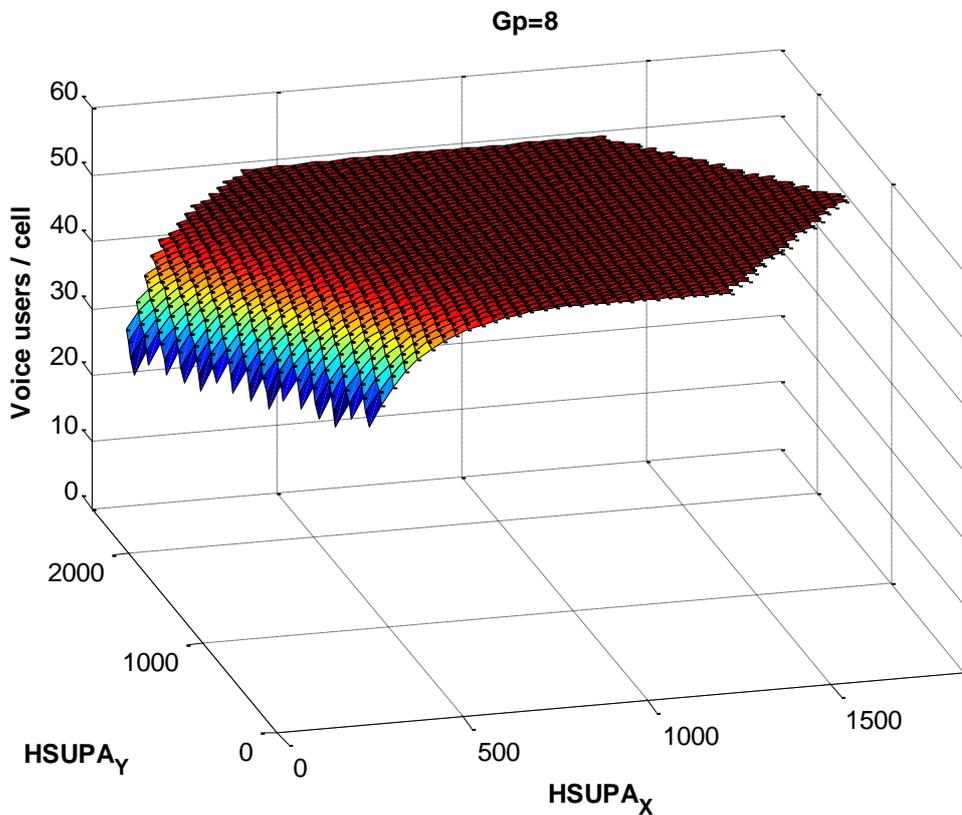


Figura 6.49 - Capacidad del servicio de voz - 1u interferente en la 1ª corona

A continuación se realizará la misma simulación suponiendo 6 usuarios interferentes localizados en la misma posición dentro de cada una de las 6 células que componen la 1ª corona, según se muestra en la Figura 6.50.

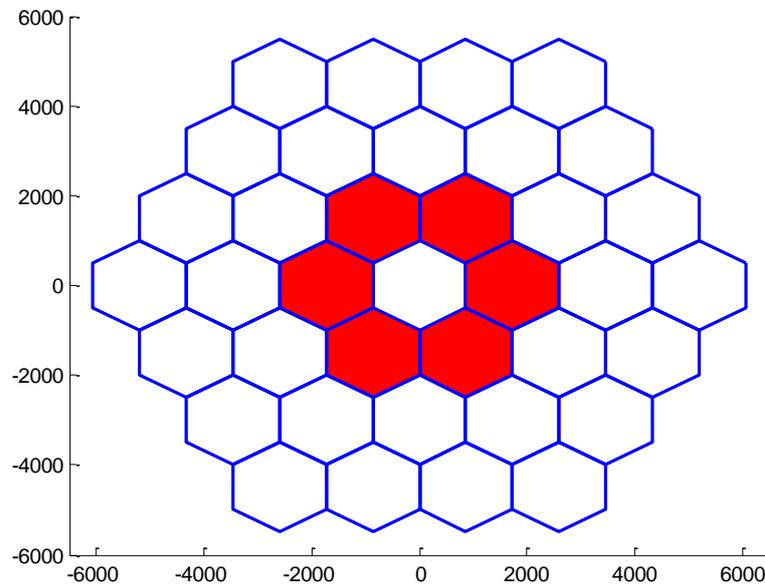


Figura 6.50 - Células en las que se localizan los 6 usuarios interferentes

Las Figuras 6.51 y 6.52 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la localización de estos usuarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

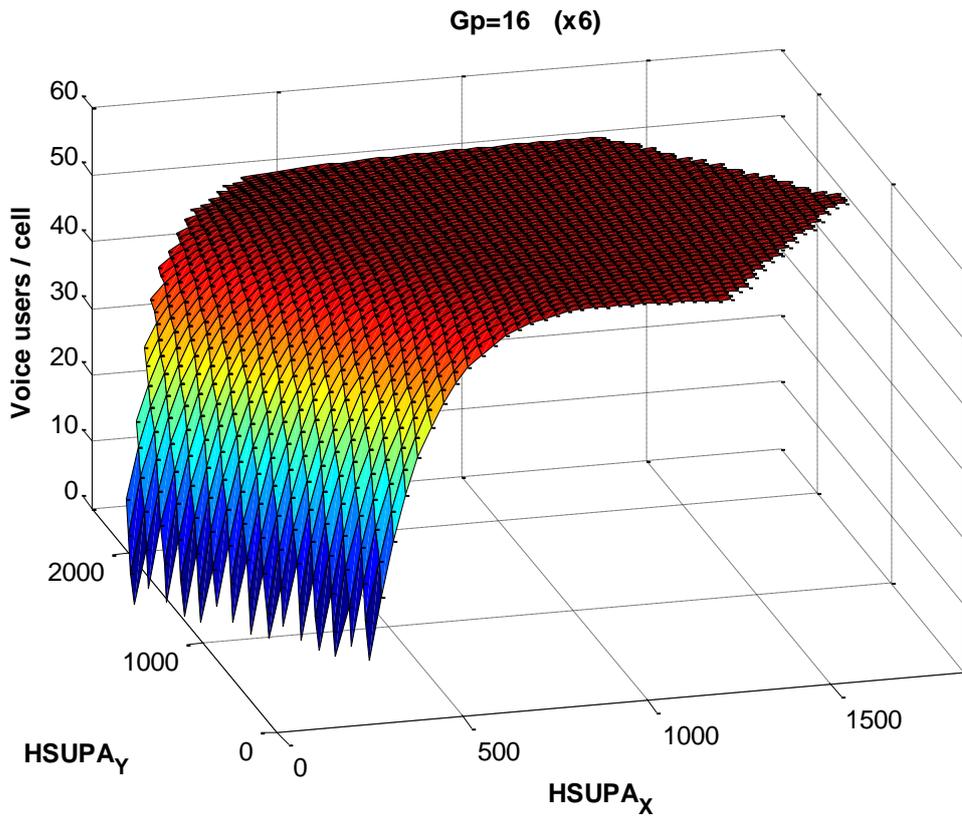


Figura 6.51 - Capacidad del servicio de voz - 6u interferentes en la 1ª corona

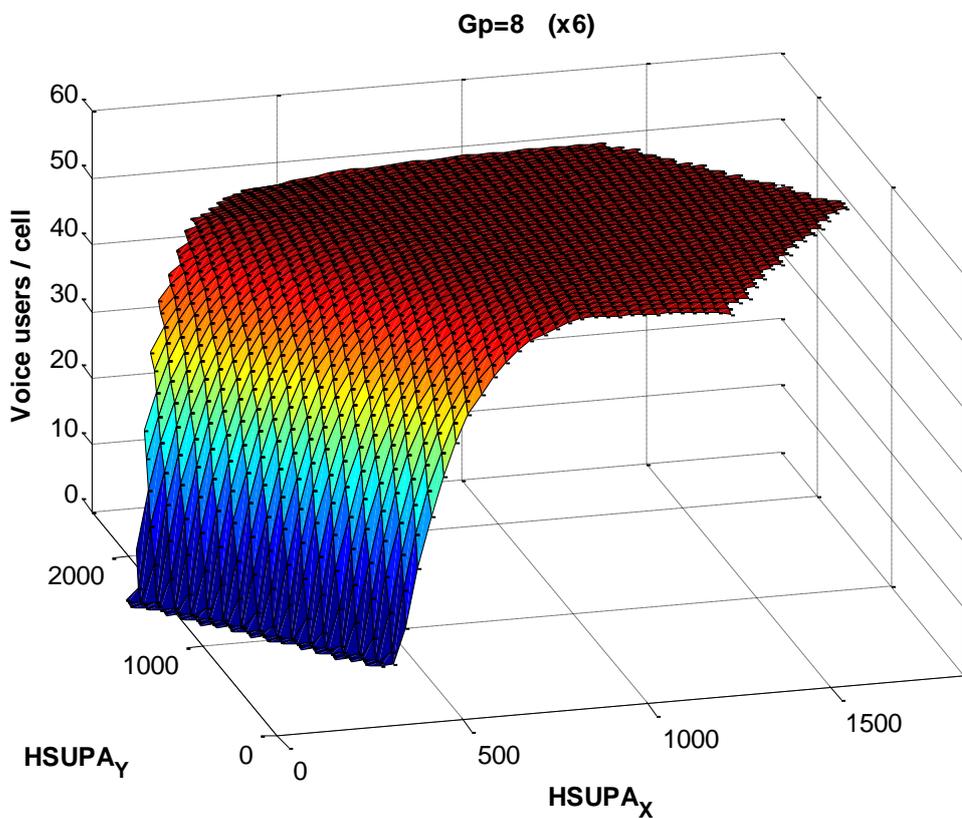


Figura 6.52 - Capacidad del servicio de voz - 6u interferentes en la 1ª corona

### 6.4.3 Servicio de datos

Una vez caracterizadas las prestaciones que los usuarios pueden esperar del servicio HSUPA cuando se ofrece desde HAP's, veamos de qué forma la interferencia generada por estos afecta al servicio de datos R99, suponiendo una densidad uniforme de usuarios de este servicio dentro de cada célula.

La Figura 6.53 muestra la capacidad de la célula para el servicio de datos cuando este es el único servicio utilizado. Se han realizado simulaciones para distintos valores de radio celular.

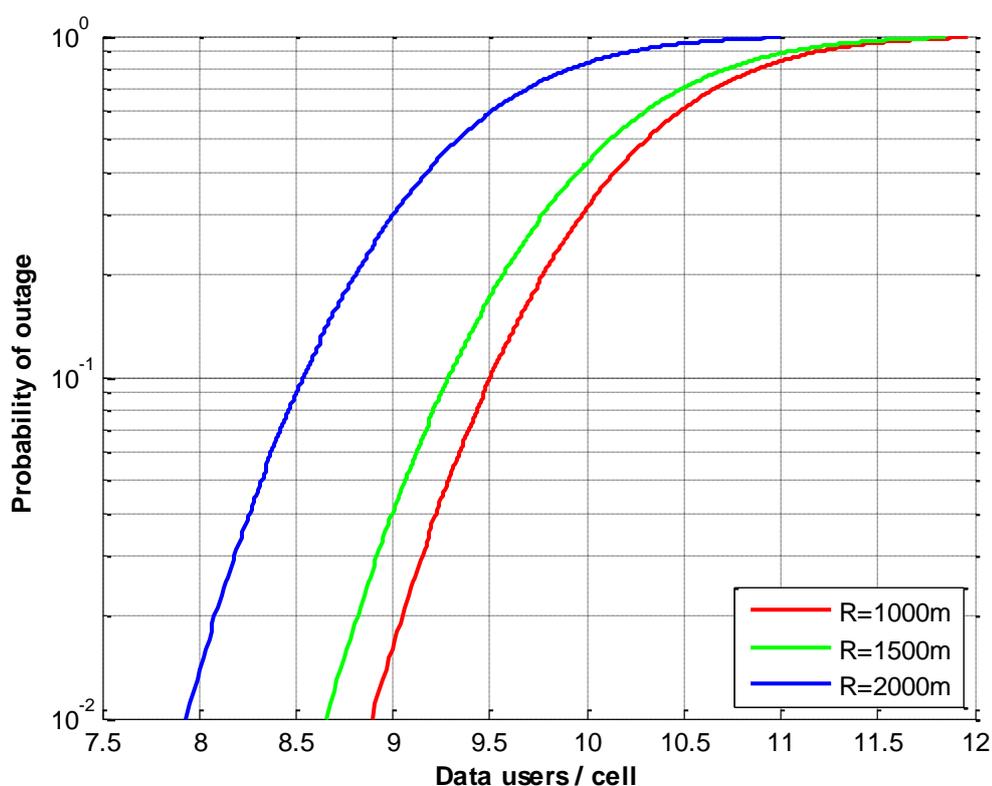


Figura 6.53 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos

En general, observamos cómo, independientemente del radio escogido, la capacidad con este tipo de sistemas es ligeramente inferior a la que se observaba en el caso de autopistas.

Para una probabilidad de desbordamiento del 1% observamos una capacidad de 8 usuarios para una sistema celular de radio 1000mt. En el resto de simulaciones, la capacidad decrece a medida que aumentamos el radio de la célula, llegándose a los 7 usuarios para un radio de 2.000mt.

Debemos tener en mente que la relación entre el radio celular de la red y la capacidad de la misma para ofrecer un determinado servicio es algo más compleja. Por un lado, como es lógico, aumentar el tamaño de celda implica unas mayores pérdidas de propagación, una menor ganancia cuando los usuarios se encuentran próximos al borde de la celda y, como consecuencia, una menor potencia disponible en recepción para procesar la señal, lo que tiene un efecto negativo sobre la capacidad celular. Sin embargo, como puede comprobarse en la Figura 6.9, un aumento en el radio celular supone una mayor reutilización de frecuencias  $F_{urr}$ , y, por tanto, una menor interferencia intercelular, lo que redundaría en una mayor capacidad.

La Figura 6.54 muestra la capacidad del servicio de datos para distintos radios celulares entre 500 y 3000 mt.

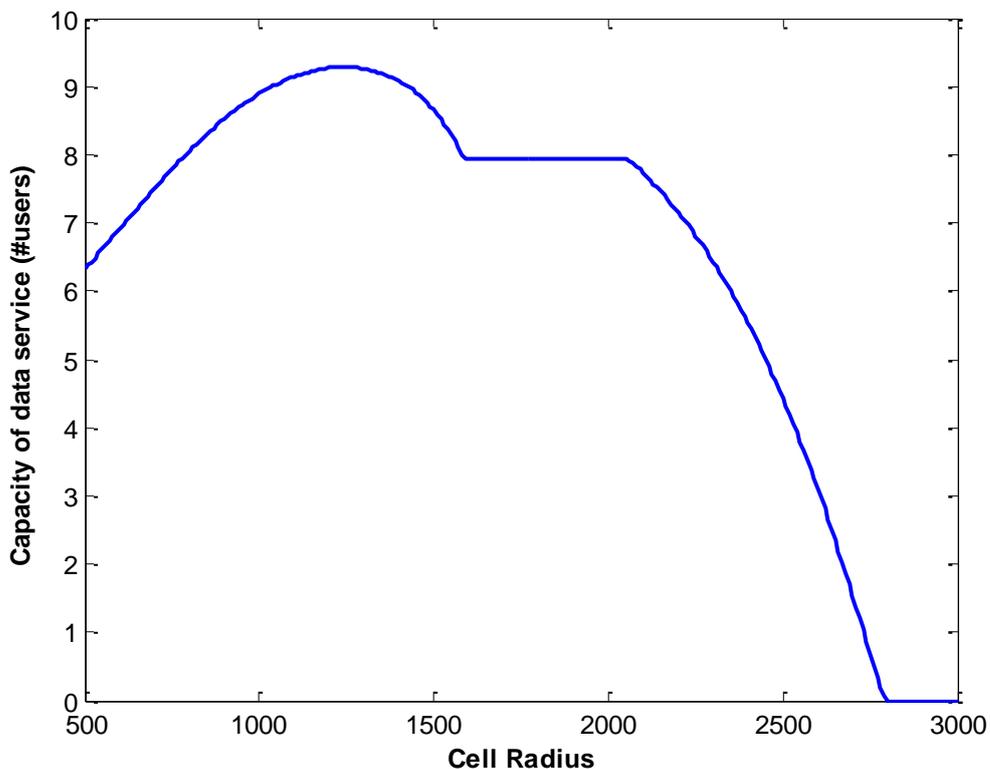


Figura 6.54 - Capacidad del servicio de datos - Radio celular

Puede observarse como inicialmente el aumento del radio celular tiene una influencia positiva sobre la capacidad, aumentando esta hasta alcanzar sus valores máximos entre 1200 y 1300 mt. A partir de este punto, como consecuencia de la menor potencia recibida la ganancia decrece hasta llegar a anularse en los 2800 mt.

Estos resultados se han obtenido suponiendo que debemos dar servicio a usuarios moviéndose a velocidades elevadas, del orden de 120 km/h. La Figura 6.55 muestra la capacidad celular para el servicio de datos para distintas velocidades máximas de los usuarios.

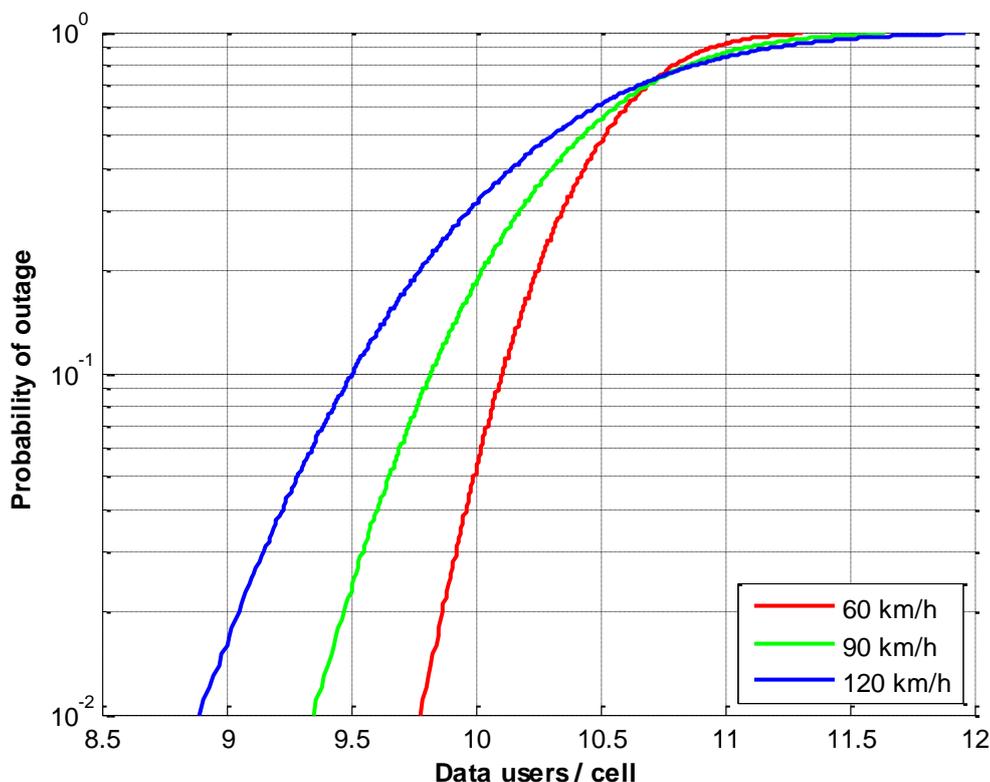


Figura 6.55 - Probabilidad de desbordamiento del servicio de datos - Velocidad máxima

Se observa cómo, a medida que disminuimos la velocidad máxima permitida para los usuarios de la celda, aumenta la capacidad celular. Esto es debido a la menor  $E_b/N_0$  requerida por el servicio y a la disminución de errores en el control de potencia.

Para analizar el efecto de la interferencia generada por el servicio HSUPA, diferenciaremos claramente cuando los usuarios del servicio de datos de alta velocidad se encuentran en la misma celda y cuando se encuentran en celdas contiguas.

Veamos en primer lugar la reducción en la capacidad de la célula que se produce cuando debemos ofrecer servicio simultáneamente a 1 usuario HSUPA. Las Figuras 6.56 y 6.57 muestran la capacidad para el servicio de datos para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

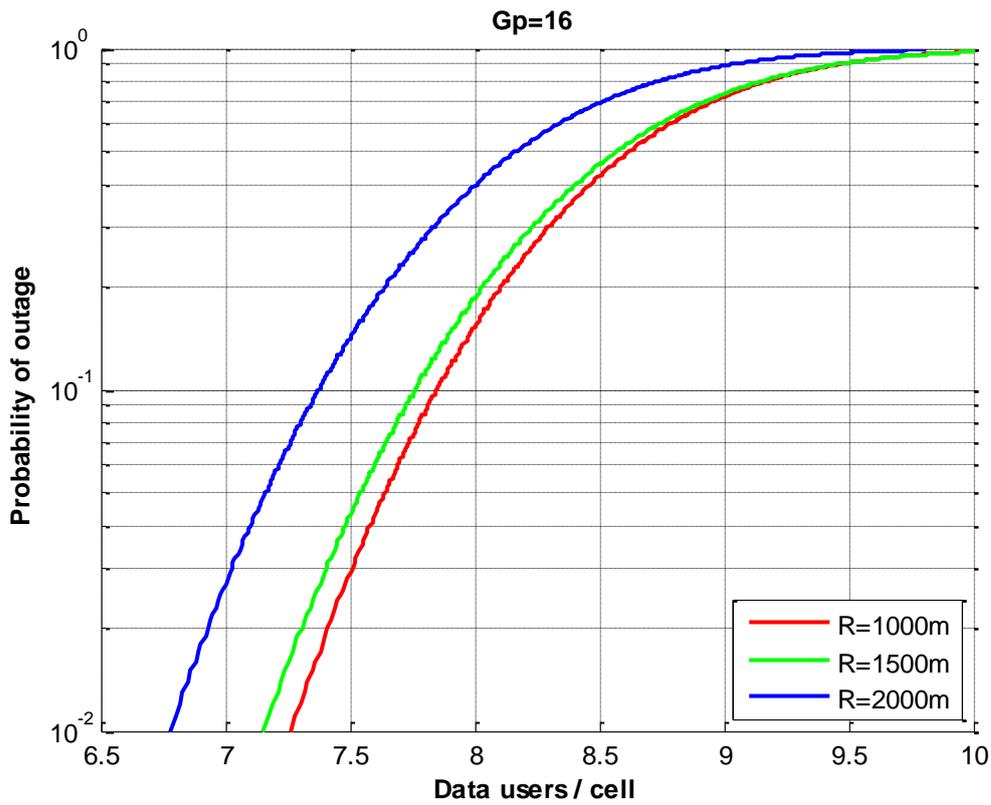


Figura 6.56 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=16$ ) interno

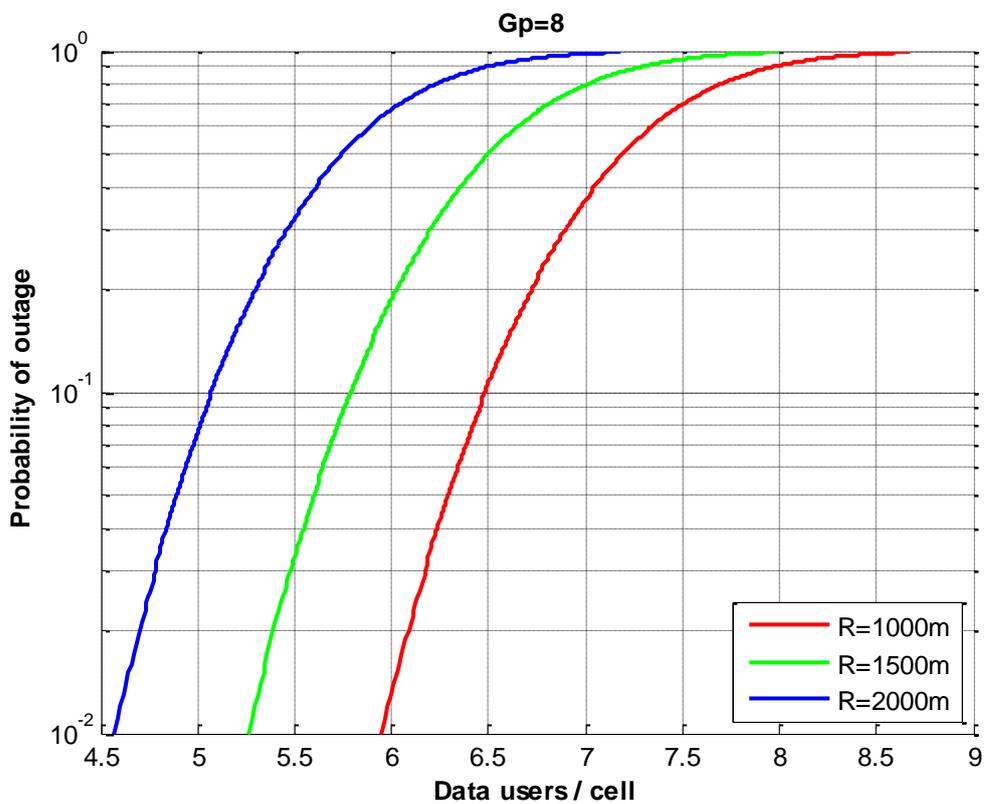


Figura 6.57 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA ( $G_p=8$ ) interno

Puede observarse en estas gráficas como la inclusión de 1 usuario HSUPA en nuestra celda supone la disminución de su capacidad para ofrecer servicio a usuarios de datos. Dicha disminución dependerá de la máxima potencia de transmisión permitida para el servicio, variando desde los 1 - 2 usuarios para  $G_p=16$ , cuando se permite una potencia superior, hasta los 3 usuarios para  $G_p=8$ , cuando la máxima potencia de transmisión permitida es 3 dBm menor.

A continuación añadiremos un segundo usuario HSUPA también dentro de la célula bajo estudio. Las Figuras 6.58 y 6.59 muestran la capacidad para el servicio de voz para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

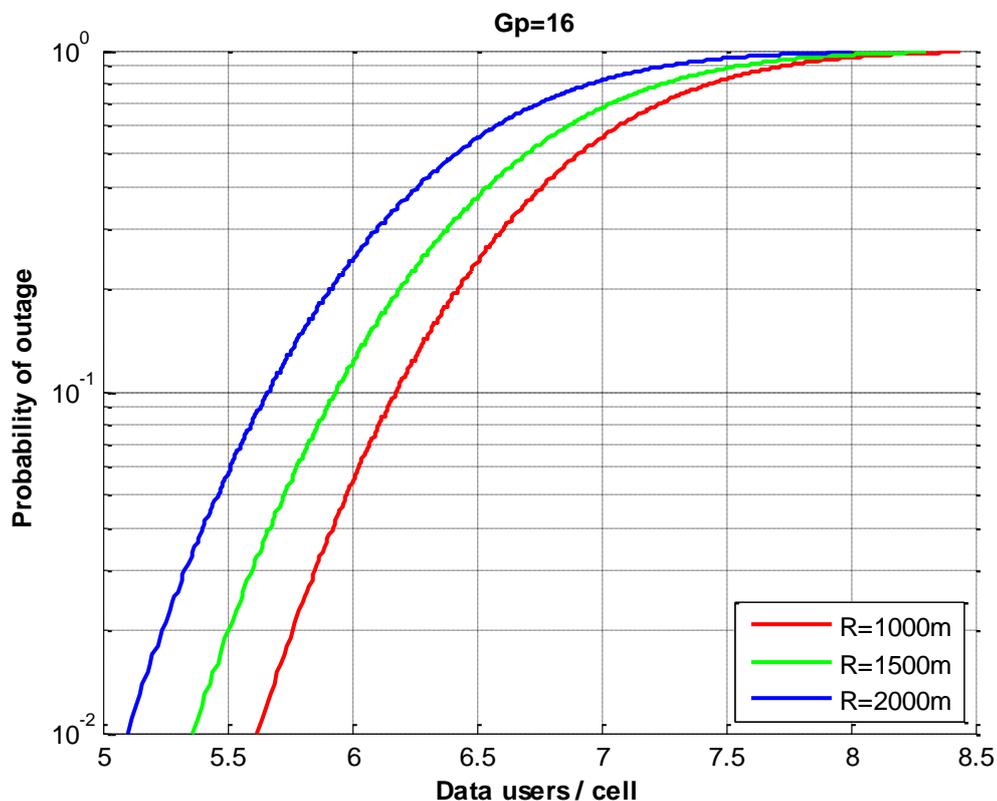


Figura 6.58 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=16$ ) internos

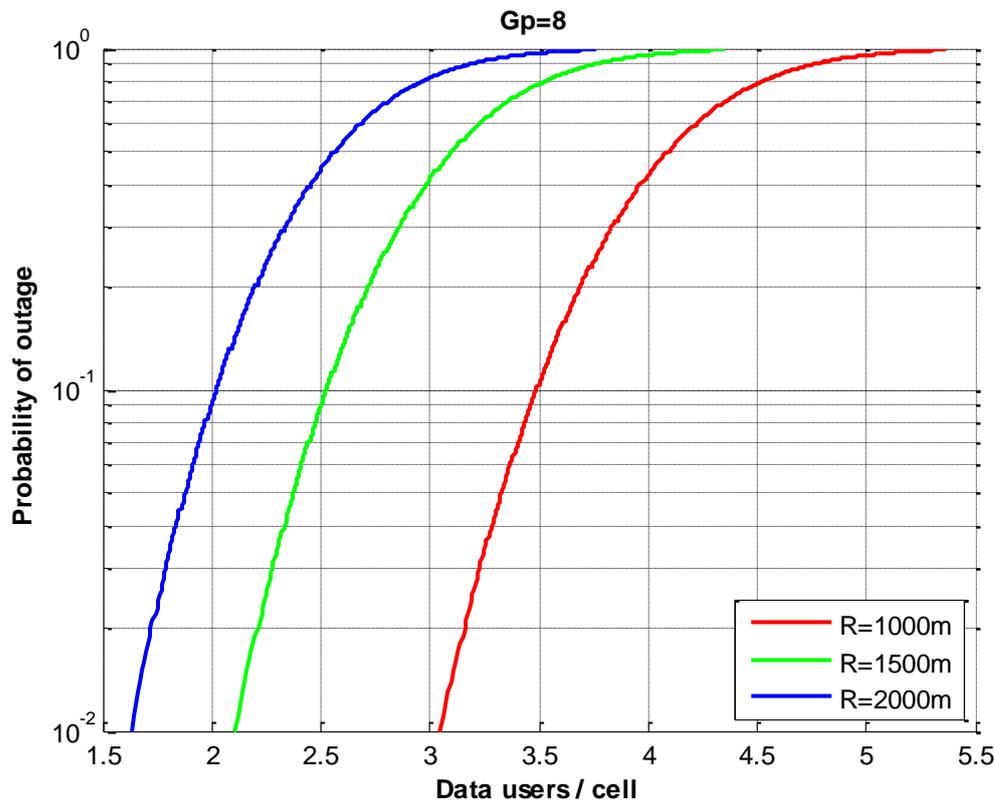


Figura 6.59 - Capacidad del servicio de datos - 2 usuarios HSUPA ( $G_p=8$ ) internos

Al incluir un segundo usuario del servicio HSUPA dentro de la célula bajo estudio, comprobamos nuevamente un efecto similar al que producía el primero. Se observa una disminución adicional de la capacidad para el servicio de datos de otros 2 usuarios para  $G_p=16$  y unos 3-4 usuarios en el caso de  $G_p=8$ .

Pasemos ahora a nuestro segundo caso en el que los usuarios HSUPA se encuentran fuera de la celda bajo estudio. Nuevamente, el tipo de antenas utilizadas nos obliga a tener en cuenta la dirección en la que el usuario se aproxima a la estación base de referencia. Se han realizado simulaciones para ángulos de  $0^\circ$  y  $29,9^\circ$  entre la dirección usuario interferente – estación base y el eje de abscisas de nuestra plantilla celular

Situaremos el nuevo usuario interferente a una distancia  $r_1$  del centro de la célula bajo estudio, sobre una recta que forma un ángulo de  $0^\circ$  con el supuesto eje de abscisas de nuestra plantilla celular. La Figura 6.60 muestra las posibles localizaciones de este usuario en la simulación.

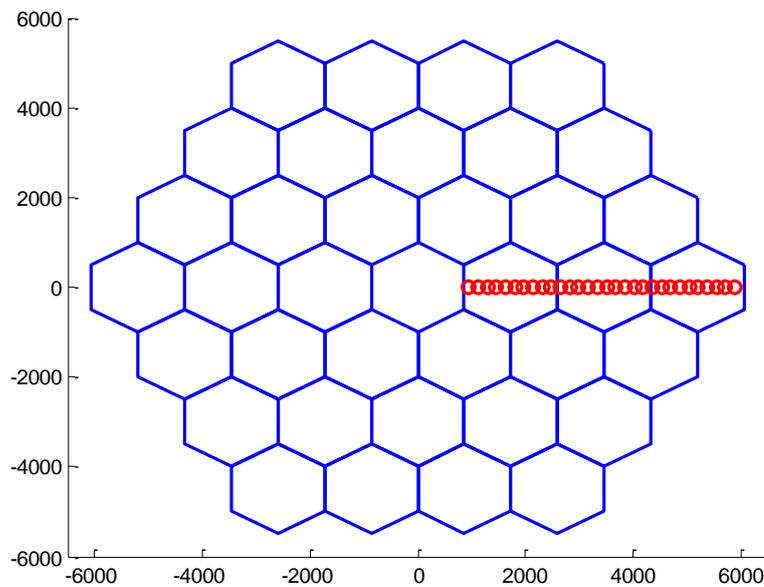


Figura 6.60 - Posibles localizaciones del usuario interferente (0,1°)

La Figura 6.61 muestra la capacidad de la célula para el servicio HSUPA con un usuario adicional del servicio localizado según se explicaba anteriormente. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

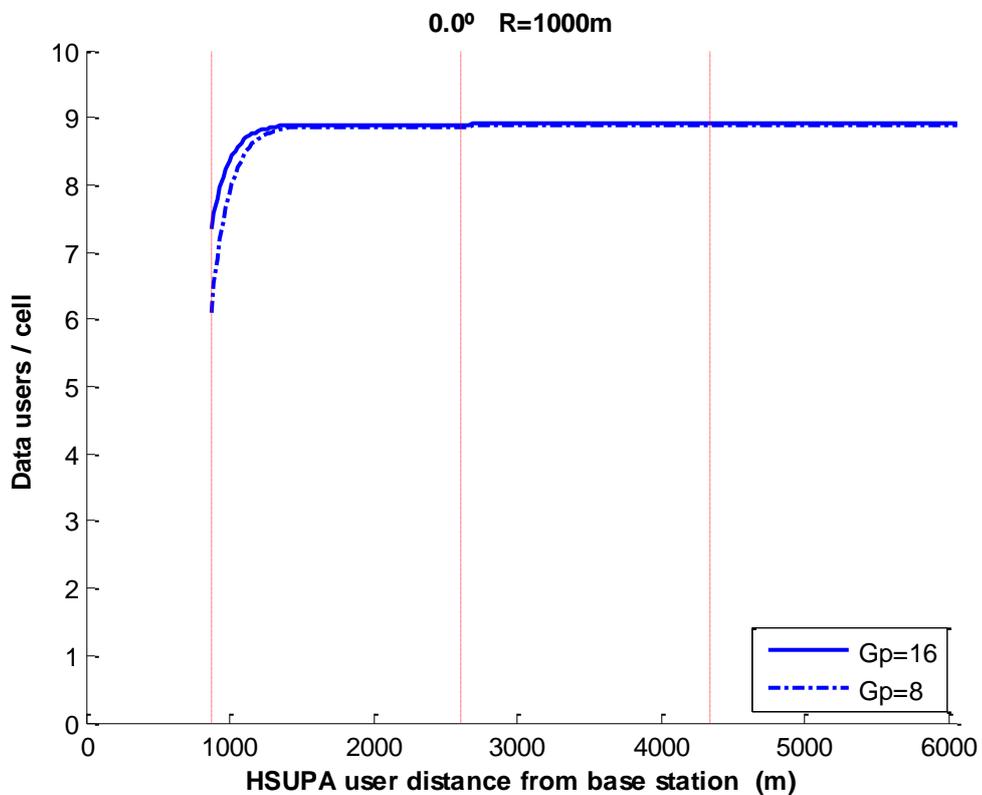


Figura 6.61 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo (0,0°)

Las marcas rojas verticales, separadas una distancia  $d$ , identifican las fronteras entre células contiguas de la red celular, donde el usuario pasa de estar en una corona a la siguiente.

Lógicamente, a menor distancia del usuario HSUPA al centro de la célula bajo estudio, la interferencia generada en esta es mayor y, por lo tanto, nuestra celda tendrá una menor capacidad para ofrecer servicio de datos a los usuarios. Observamos como la interferencia generada es significativa hasta, aproximadamente, una distancia  $d$ , donde estarán situados los centros de las células de la 1ª corona.

A partir de esa distancia, debido principalmente al ángulo formado con la antena receptora, la potencia de interferencia es mínima y los valores de capacidad obtenidos coinciden con los simulados anteriormente en ausencia de usuarios externos.

A continuación, volveremos a situar nuestro usuario externo a una distancia  $r_1$  del centro de la célula bajo estudio, pero esta vez sobre una recta que forma un ángulo de  $29.9^\circ$  con el supuesto eje de abscisas de nuestra plantilla celular. La Figura 6.62 muestra las posibles localizaciones de este usuario en la simulación.

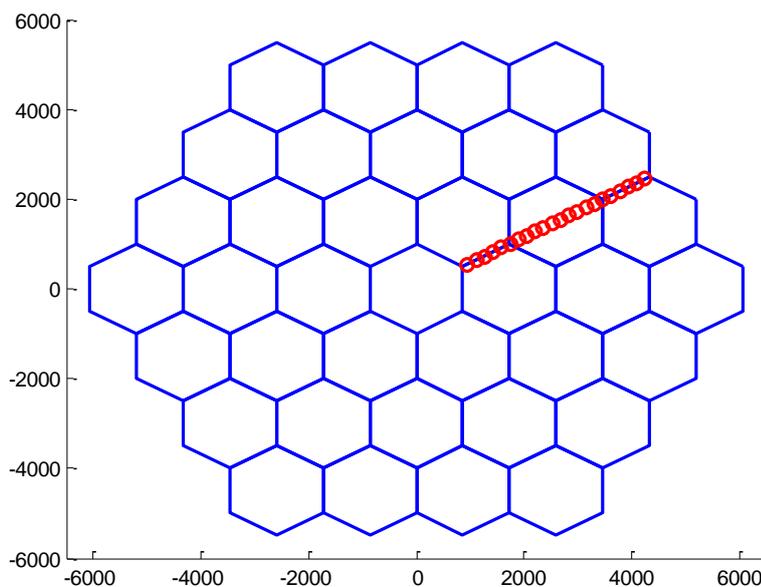


Figura 6.62 - Posibles localizaciones del usuario interferente ( $29,9^\circ$ )

La Figura 6.63 muestra la capacidad de la célula para el servicio HSUPA con un usuario adicional del servicio localizado según se explicaba anteriormente. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

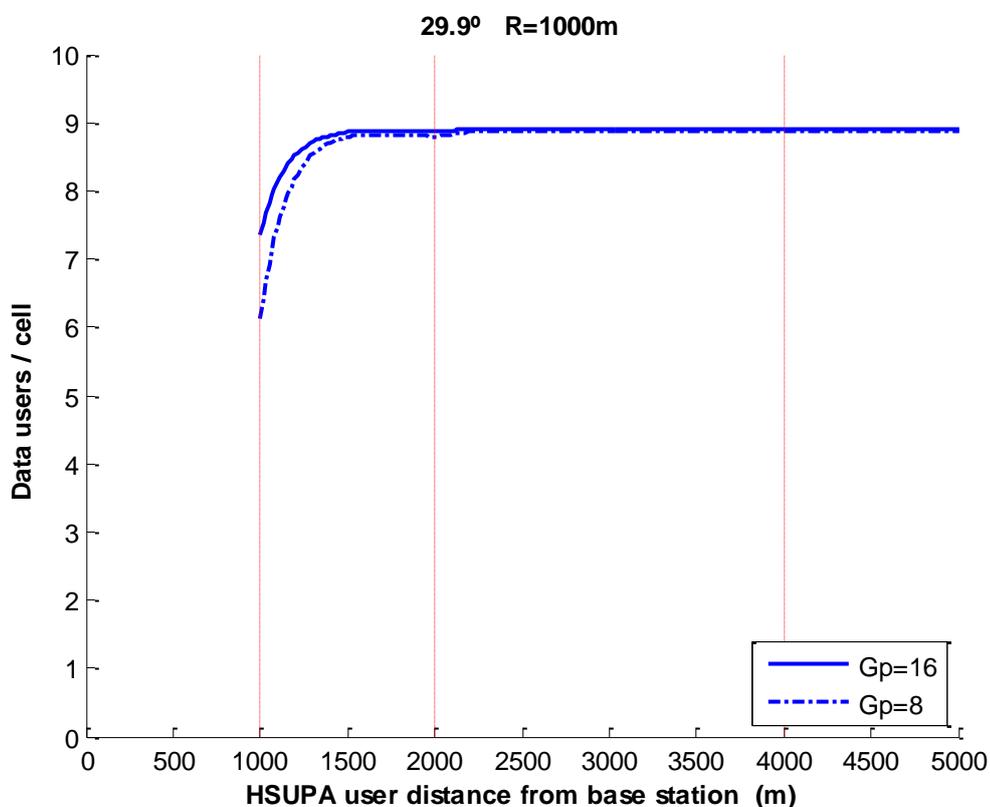


Figura 6.63 - Capacidad del servicio de datos - 1 usuario HSUPA externo (29,9°)

Las marcas rojas verticales, separadas una distancia  $2R$ , identifican las fronteras entre células contiguas de la red celular, donde el usuario pasa de estar en una corona a la siguiente.

Lógicamente, a menor distancia del usuario HSUPA al centro de la célula bajo estudio, la interferencia generada en esta es mayor y, por lo tanto, nuestra celda tendrá una menor capacidad para ofrecer servicio de datos a los usuarios. Observamos como la interferencia generada es significativa hasta, aproximadamente, una distancia  $d$ , donde estarán situados los centros de las células de la 1ª corona.

A partir de esa distancia, debido principalmente al ángulo formado con la antena receptora, la potencia de interferencia es mínima y los valores de capacidad obtenidos coinciden con los simulados anteriormente en ausencia de usuarios externos.

En estas simulaciones se ha visto la incidencia sobre la capacidad del servicio de datos de un único usuario del servicio de datos de alta velocidad fuera de la célula bajo estudio. Sin embargo, dado que suponemos una distribución uniforme de usuarios, cada una de las 6 celdas vecinas tendrá un número similar de usuarios HSUPA. En las siguientes simulaciones supondremos la presencia de un usuario interferente en cada una de estas celdas localizados cada uno de ellos a una distancia  $r$  de la estación base bajo estudio.

La Figuras 6.64 muestran las posibles localizaciones dentro de la simulación de estos 6 usuarios interferentes y los resultados de capacidad en función de la distancia de estos usuarios a la estación base.

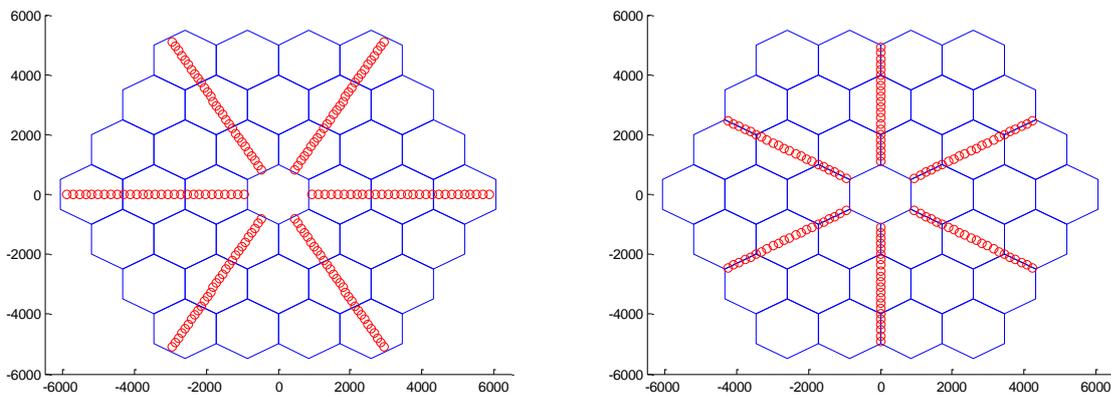


Figura 6.64 - Posibles localizaciones de los 6 usuarios interferentes

Las Figuras 6.65 y 6.66 muestran la capacidad de la célula para ofrecer el servicio en función de la distancia de cada uno de estos 6 usuarios interferentes a la estación base de referencia.

Puede comprobarse como la suma de la interferencias generadas por cada uno de estos 6 usuarios del servicio HSUPA provocan una caída mucho más drástica en la capacidad celular a medida que se aproximan a la estación base, llegando a anularse por completo poco antes de llegar al borde de la celda bajo estudio.

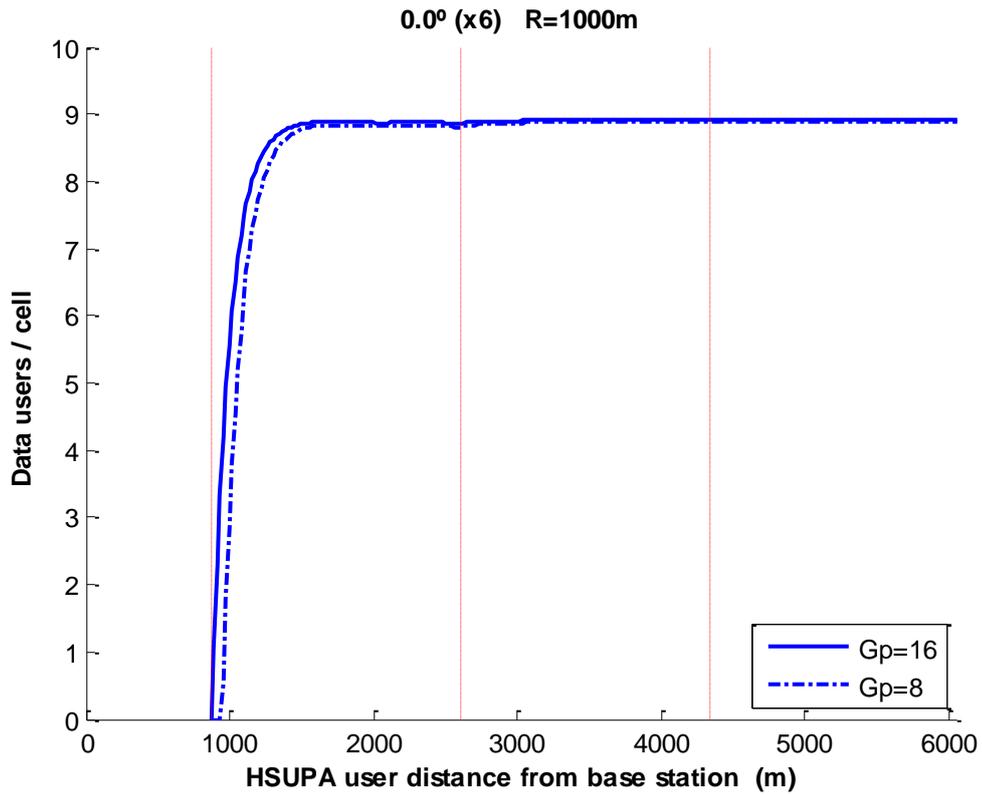


Figura 6.65 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos (0,0°)

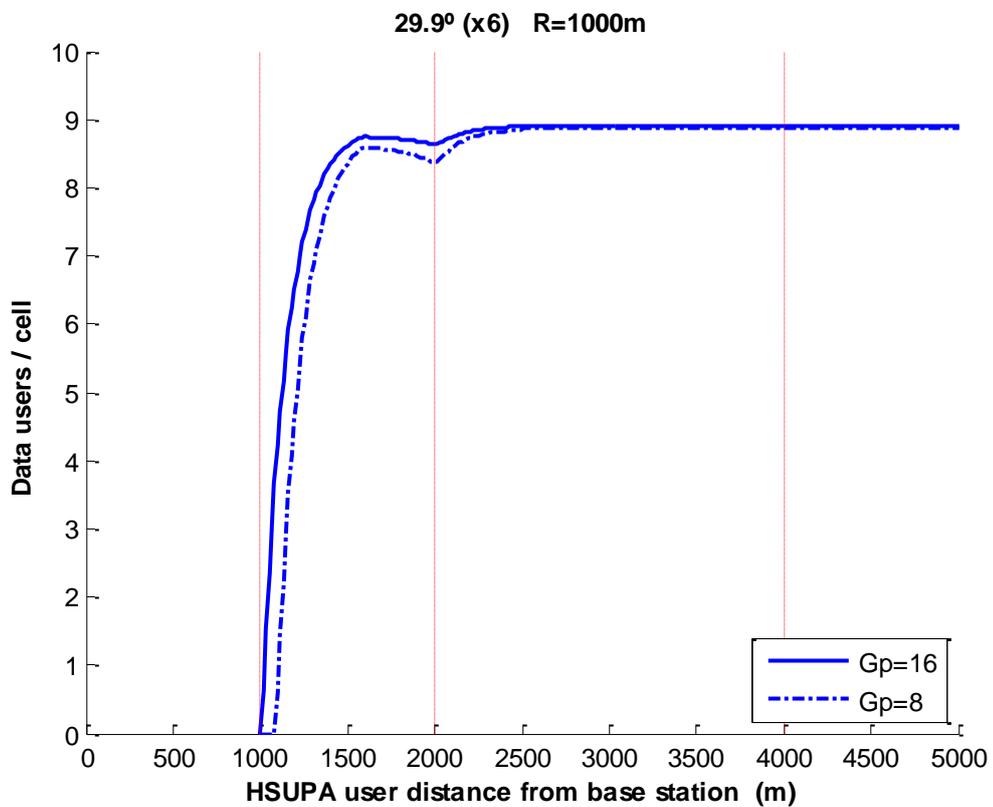


Figura 6.66 - Capacidad del servicio de datos - 6 usuarios HSUPA externos (29,9°)

De acuerdo a las simulaciones realizadas, teniendo en cuenta la función de ganancia de la antena receptora, un usuario HSUPA externo a la célula bajo estudio únicamente genera interferencia suficiente para afectar al servicio de datos cuando se encuentra situado dentro de la 1ª corona. A continuación, se analizará en detalle la capacidad del servicio de datos cuando un usuario HSUPA se encuentra localizado dentro de una de estas células, según se muestra en la Figura 6.67.

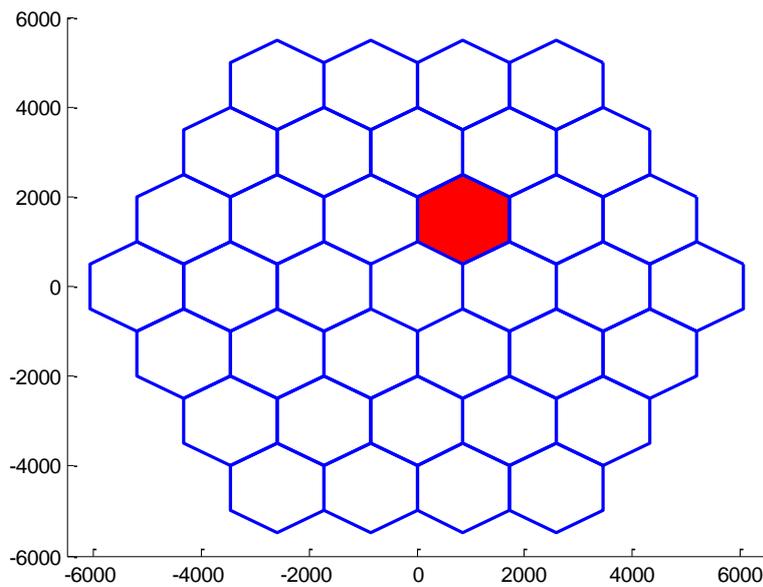


Figura 6.67 - Célula en la que se localiza el usuario interferente

Las Figuras 6.68 y 6.69 muestran la capacidad del servicio de datos en función de la localización del usuario HSUPA dentro de una celda de la 1ª corona. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

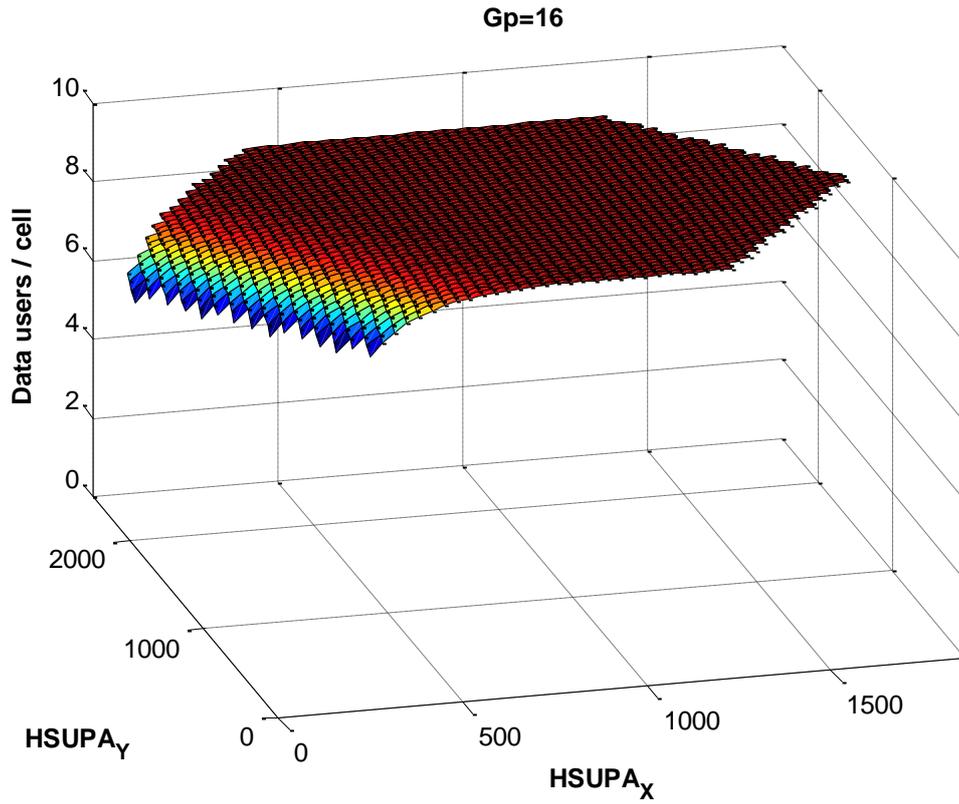


Figura 6.68 - Capacidad del servicio de datos - 1u interferente en la 1ª corona

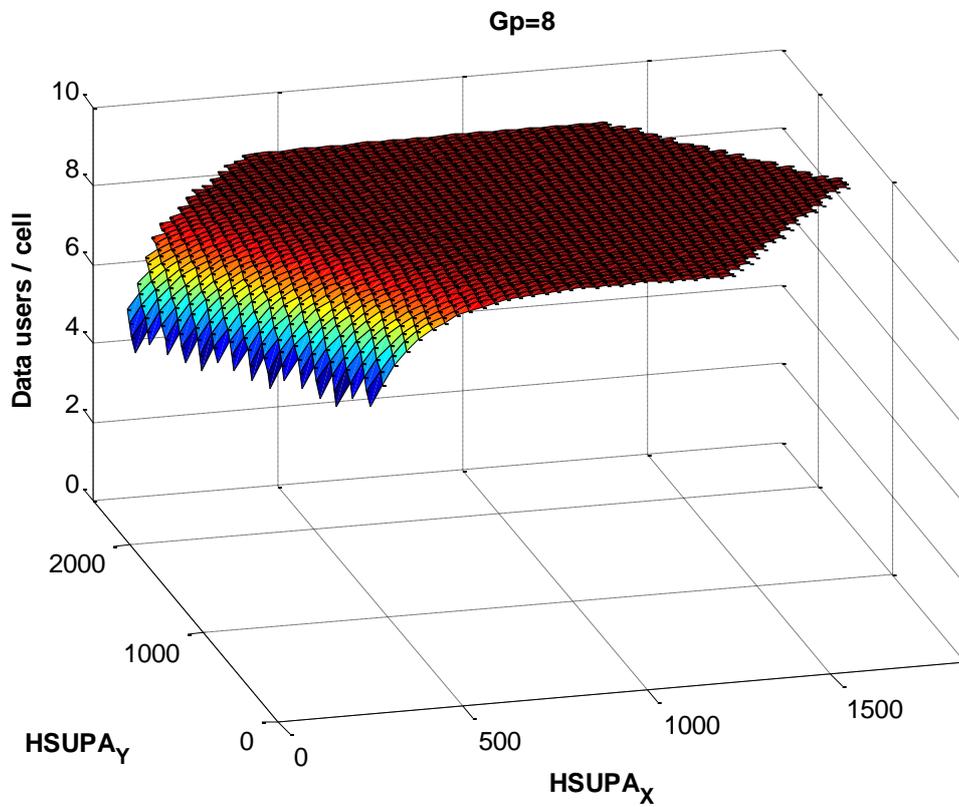


Figura 6.69 - Capacidad del servicio de datos - 1u interferente en la 1ª corona

A continuación se realizará la misma simulación suponiendo 6 usuarios interferentes localizados en la misma posición dentro de cada una de las 6 células que componen la 1ª corona, según se muestra en la Figura 6.70

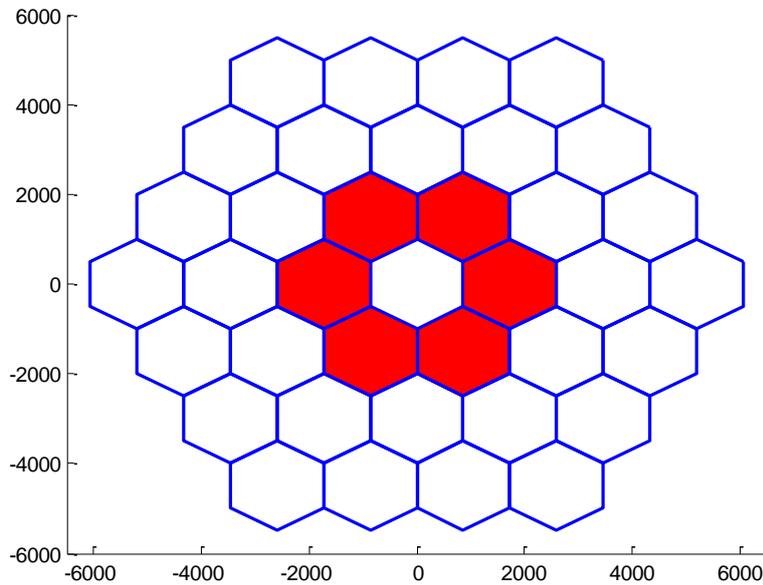


Figura 6.70 - Células en las que se localizan los 6 usuarios interferentes

Las Figuras 6.71 y 6.72 muestran la capacidad del servicio de voz en función de la localización de estos usuarios. Se han realizado simulaciones para ganancias de procesamiento de 16 y 8.

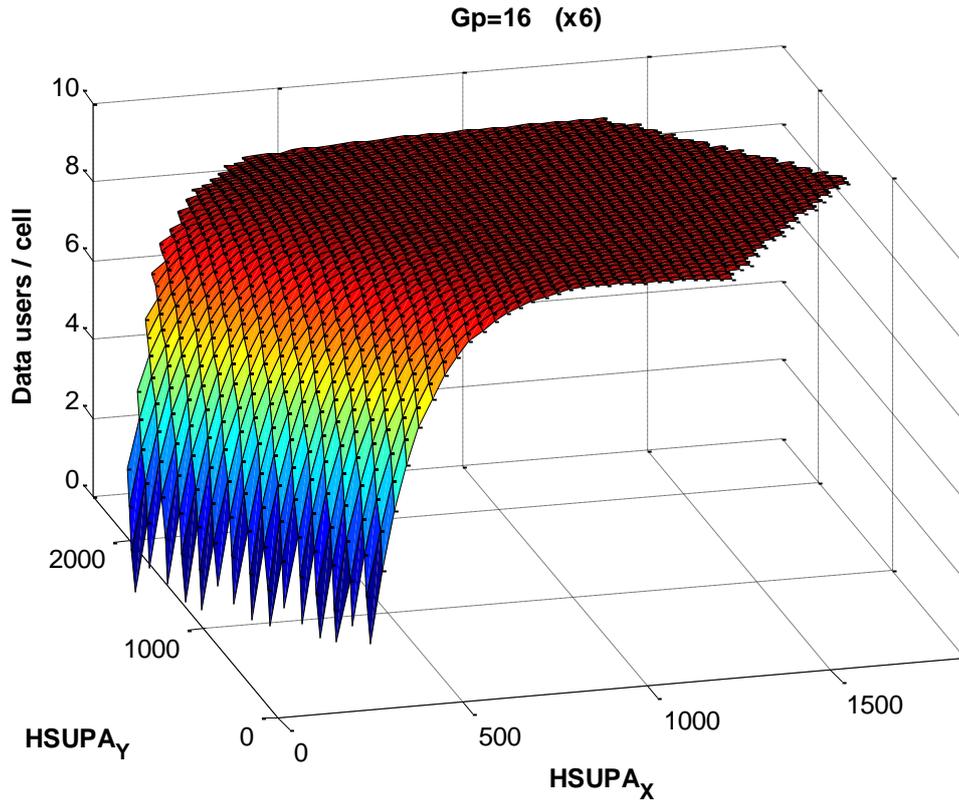


Figura 6.71 - Capacidad del servicio de datos - 6u interferentes en la 1ª corona

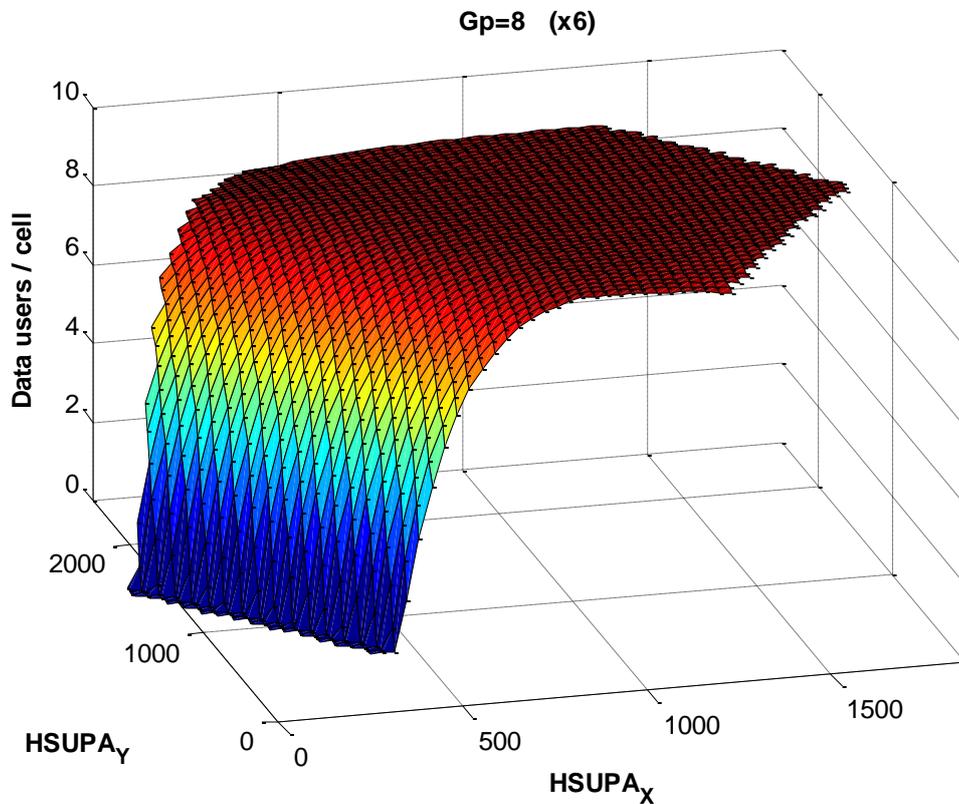


Figura 6.72 - Capacidad del servicio de datos - 6u interferentes en la 1ª corona



## 7. Conclusiones

En el estudio se han realizado simulaciones para medir la capacidad celular para los servicios de voz y datos, y valorar de qué forma la interferencia generada por los usuarios de HSUPA afecta a la prestación de estos servicios.

### 7.1 Células cigar-shaped en autopistas

Se han realizado simulaciones con un modelo de 5 células *cigar-shaped*, cada una con 2 sectores de radio  $R=1000$  mt.

Para el cálculo de las pérdidas de propagación se ha utilizado un modelo de tierra plana con doble pendiente y efecto shadowing con una distribución log-normal.

Para el servicio HSUPA se ha obtenido una capacidad de 5 usuarios para  $G_p=16$  y 2 usuarios (casi 3) para  $G_p=8$ , con una probabilidad de desbordamiento del 1%.

Para el servicio de voz se ha obtenido una capacidad máxima de 55 usuarios. La presencia de un usuario HSUPA en las proximidades a la estación base bajo estudio hace descender ese valor hasta los 43-44 usuarios cuando  $G_p=16$  y hasta los 33-36 en el caso de utilizar  $G_p=8$ , siempre en función de la distancia del usuario interferente a la base. Aproximadamente a partir de los 1700 mt, la interferencia generada en la estación base por el usuario HSUPA es ya mínima y vuelven a alcanzarse los valores calculados en ausencia de otros usuarios.

Para el servicio de datos R99 se ha obtenido una capacidad máxima de 9 usuarios. La presencia de un usuario HSUPA en las proximidades a la estación base bajo estudio hace descender ese valor hasta los 7 usuarios cuando  $G_p=16$  y hasta los 5-6 en el caso de utilizar  $G_p=8$ , siempre en función de la distancia del usuario interferente a la base. Aproximadamente a partir de los 1700 mt, la interferencia generada en la estación base por el usuario HSUPA es ya mínima y vuelven a alcanzarse los valores calculados en ausencia de otros usuarios.

Se han realizado simulaciones comprobando la influencia sobre la capacidad del sector de distintos parámetros del modelo de propagación. Para una información más detallada se recomienda la lectura del capítulo 3.

## 7.2 Células cigar-shaped en túneles

Se han realizado simulaciones con un modelo de 5 células *cigar-shaped* en el interior de túneles, cada una con 2 sectores de radio  $R=1000$  mt. Se ha supuesto la ausencia de curvas en la trayectoria del túnel.

Para el cálculo de las pérdidas de propagación se ha utilizado un modelo híbrido, añadiendo efecto shadowing con una distribución log-normal.

Para el servicio HSUPA se ha obtenido una capacidad de 5 usuarios para  $G_p=16$  y 2 usuarios (casi 3) para  $G_p=8$ , con una probabilidad de desbordamiento del 1%.

Para el servicio de voz se ha obtenido una capacidad máxima de 52 usuarios. La presencia de un usuario HSUPA en las proximidades a la estación base bajo estudio hace descender ese valor hasta los 42-43 usuarios cuando  $G_p=16$  y hasta los 33-36 en el caso de utilizar  $G_p=8$ , siempre en función de la distancia del usuario interferente a la base. Aproximadamente a partir de los 1700 mt, la interferencia generada en la estación base por el usuario HSUPA es ya mínima y vuelven a alcanzarse los valores calculados en ausencia de otros usuarios.

Para el servicio de datos R99 se ha obtenido una capacidad máxima de 8 usuarios. La presencia de un usuario HSUPA en las proximidades a la estación base bajo estudio hace descender ese valor hasta los 6-7 usuarios cuando  $G_p=16$  y hasta los 5-6 en el caso de utilizar  $G_p=8$ , siempre en función de la distancia del usuario interferente a la base. Aproximadamente a partir de los 1700 mt, la interferencia generada en la estación base por el usuario HSUPA es ya mínima y vuelven a alcanzarse los valores calculados en ausencia de otros usuarios.

En general, se han obtenido resultados ligeramente inferiores a los obtenidos previamente en el caso de autopistas.

Se han realizado simulaciones comprobando la influencia sobre la capacidad del sector de distintos parámetros del modelo de propagación. Para una información más detallada se recomienda la lectura del capítulo 4.

## 7.3 Macroceldas

Se han realizado simulaciones sobre escenarios de tipo urbano, suburbano y rural, con un modelo de 5 coronas con células hexagonales de diferente radio. Con objeto de simular escenarios parecidos a los que encontraremos en la realidad, para cada uno de estos escenarios se han escogido valores adecuados para el radio celular, la desviación de la variable que modela el efecto shadowing, el  $E_b/N_0$  necesaria para el funcionamiento del sistema en función de la velocidad máxima de los usuarios ....

Se ha supuesto la utilización de antenas omnidireccionales en su diagrama de radiación horizontal, lo que permite modelar el escenario en una única dirección tal y como se hizo para las células *cigar-shaped*. Para el cálculo de las pérdidas de propagación se ha utilizado el método Hata-COST 231.

Para el servicio HSUPA con  $G_p=16$  se ha obtenido una capacidad de entre 4 y 5 usuarios para entornos urbanos y 5 usuarios para entornos suburbanos y rurales. Para  $G_p=8$  los resultados han sido de entre 2 y 3 usuarios para entornos urbanos y 3 usuarios en entornos suburbanos y rurales. Se ha comprobado cómo en entornos urbanos estos valores pueden tener variaciones de 1 usuario en función de la altitud del emplazamiento de las antenas. La prestación de este servicio a otro usuario en las proximidades de la célula supone una reducción en la capacidad de hasta 2 usuarios.

Para el servicio de voz se ha obtenido una capacidad máxima de alrededor de 20 usuarios para grandes ciudades, alrededor de 20 para ciudades medias y 33-34 usuarios para entornos suburbanos y rurales. La presencia de un usuario del servicio HSUPA en la celda bajo estudio, supone una reducción en la capacidad celular de entre 5 y 10 usuarios para entornos urbanos y entre 7 y 12 para entornos rurales, donde las potencias máximas de transmisión son inferiores. Fuera de la celda bajo estudio, la interferencia generada por el usuario HSUPA solo ha demostrado tener efectos negativos para la capacidad hasta las estaciones colindantes, siempre dependiendo del escenario en el que nos encontremos.

Para el servicio de datos R99 se ha obtenido una capacidad máxima de 3-4 usuarios para entornos urbanos y 5 usuarios para entornos suburbanos y rurales. La presencia de un usuario del servicio HSUPA en la celda bajo estudio, supone una reducción en la capacidad celular de 1 a 2 usuarios en todos los entornos simulados, dependiendo de la ganancia de procesamiento. Fuera de la celda bajo estudio, la interferencia generada por el usuario HSUPA solo ha demostrado tener efectos negativos para la capacidad hasta las estaciones colindantes, siempre dependiendo del escenario en el que nos encontremos.

Para los servicios de voz y datos, el radio celular ha resultado tener mucha incidencia sobre la capacidad en entornos urbanos. En general, los resultados de capacidad obtenidos han sido sensiblemente inferiores a los calculados para células *cigar-shaped*, dado que con esta configuración la interferencia intercelular generada es mucho mayor, al estar cada célula rodeada por otras 6.

Se han realizado simulaciones comprobando la influencia sobre la capacidad del sector de distintos parámetros. Para una información más detallada se recomienda la lectura del capítulo 5.

## 7.4 High Altitude Platforms

Se han realizado simulaciones con un modelo de 5 coronas de células hexagonales de radio  $R=1000$  mt, ofreciendo el servicio desde una plataforma situada a 20 km de altitud.

Dada la localización de la plataforma, se supone una transmisión libre de obstáculos, por lo que para el cálculo de las pérdidas de propagación se ha utilizado el método de espacio libre.

Para el servicio HSUPA se ha obtenido una capacidad de 5 usuarios para  $G_p=16$  y 3 usuarios para  $G_p=8$ , con una probabilidad de desbordamiento del 1%.

Para el servicio de voz se ha obtenido una capacidad máxima de 51 usuarios. La prestación del servicio HSUPA a un usuario dentro de la misma celda supone una caída de la capacidad celular de aproximadamente 10 usuarios para  $G_p=16$  y 19 usuarios para  $G_p=8$ , cuando la potencia de transmisión para el servicio de voz está más limitada. Fuera de la celda bajo estudio, la interferencia generada sobre la estación base de referencia es significativa cuando el usuario se encuentra próximo al borde. Mas allá de la estación base contigua, la interferencia generada es ya mínima y se alcanzan los valores de capacidad para el servicio de voz calculados en ausencia de otros servicios.

Para el servicio de datos R99 se ha obtenido una capacidad máxima de 8 usuarios. La prestación del servicio HSUPA a un usuario dentro de la misma celda supone una caída de la capacidad celular de aproximadamente 1-2 usuarios para  $G_p=16$  y 3 usuarios para  $G_p=8$ , cuando la potencia de transmisión para el servicio de voz está más limitada. Fuera de la celda bajo estudio, la interferencia generada sobre la estación base de referencia es significativa cuando el usuario se encuentra próximo al borde. Mas allá de la estación base contigua, la interferencia generada es ya mínima y se alcanzan los valores de capacidad para el servicio de datos calculados en ausencia de otros servicios.

En general, se han obtenido capacidades similares a las calculadas en el caso de células *cigar-shaped*. Conseguir estos resultados con esta configuración celular es posible gracias al diagrama de radiación de las antenas utilizadas que minimizan el efecto de la interferencia intercelular y a un coeficiente *inter-sites*  $C_{dm}=1$  que anula la incertidumbre sobre la estación a la que el usuario estará conectado.

Se han realizado simulaciones comprobando la influencia sobre la capacidad del sector de distintos parámetros. Para una información más detallada se recomienda la lectura del capítulo 6.

## 8. Referencias

- [1] Harri Holma, Antti Toskala, “HSDPA / HSUPA for UMTS”, JOHN WILEY & SONS LTD, 2006.
- [2] Harri Holma, Antti Toskala, “WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE, JOHN WILEY & SONS LTD, 4ª Edición, 2007.
- [3] Jose María Hernando Rábanos, “Comunicaciones Móviles”, Editorial Universitaria Ramón Areces, 2ª Edición, 2004.
- [4] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón, “WCDMA Multiservice Uplink Capacity of Highways Cigar-Shaped Microcells, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007.
- [5] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón, Leandro de Haro Ariet, “W-CDMA Uplink Capacity and Interference Statistics of a Long Tunnel Cigar-shaped Microcells Using the Hybrid Model of Propagation with Imperfect Power Control”, Wireless Personal Communications, Vol. 31, pp. 19 – 31, 2004.
- [6] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón, “Uplink multiservice capacity and interference statistics of WCDMA macrocells with antenna diversity reception in a multipath fading environment”, Computer Communications, Vol. 32, pp. 907 – 912, 2009.
- [7] Jong-Han Kim, Kyung K. Bae, Annamalai Annamalai, William H. Tranter, Jeffrey H. Reed, “Reverse Link Capacity and Interference Statistics of DS/CDMA with Transmit Diversity”, Spring VTC-2004. pp. 4320 – 4324, 2004.
- [8] Bassam Hashem, Elvino S. Sousa, “Reverse Link Capacity and Interference Statistics of a Fixed-Step Power-Controlled DS/CDMA System Under Slow Multipath Fading”, IEEE Transactions on Communications, Vol. 47, No. 12, pp. 1905 – 1912, 1999.
- [9] Y.C. Foo, W.L. Lim, R. Tafazolli, L. Barclay, “Other-cell interference and reverse link capacity of high altitude platform station CDMA system”, Electronic Letters, Vol. 36, No. 22, pp. 1881 - 1882, 2000.
- [10] Tae Chul Hong, Bon-Jun Ku, Jong-Min Park, Do-Seob Ahn, “Reverse Link Capacity of the WCDMA System Using High Altitude Platform Stations”, IEEE WCNC Conference, pp. 195 – 200, 2005.

- [11] Stylianos Karapantazis, Fotini-Niovi Pavlidou, “Call Admission Control in Multiservice High Altitude Platform (HAP) W-CDMA Cellular Systems”, Computer Networks, Vol. 51, pp. 3491 – 3506, 2007.
- [12] “Aspects of HSUPA Network Planning”, Rev B, Qualcomm, 2007.  
[http://www.qualcomm.com/common/documents/white\\_papers/AspectsOfHSUPANetworkPlanning\\_RevB\\_new.pdf](http://www.qualcomm.com/common/documents/white_papers/AspectsOfHSUPANetworkPlanning_RevB_new.pdf)

## Anexo A – Presupuesto

<b>1) Ejecución Material</b>	
Ordenador personal (software incluido).....	2.000,00 €
Alquiler impresora laser (1 año).....	100,00 €
Material de oficina.....	100,00 €
Total Ejecución Material.....	2.200,00 €
<b>2) Gastos Generales</b>	
16% sobre Ejecución Material.....	352,00 €
<b>3) Beneficio Industrial</b>	
6% sobre Ejecución Material.....	132,00 €
<b>4) Honorarios Proyecto</b>	
800 horas (30€/h).....	24.000,00 €
<b>5) Material Fungible</b>	
Impresión.....	100,00 €
Encuadernación.....	9,00 €
<b>6) Subtotal Presupuesto</b>	
Subtotal.....	26.793,00 €
<b>7) I.V.A.</b>	
18% sobre Subtotal Presupuesto.....	4.642,74 €
<b>8) Total Presupuesto</b>	
Total.....	31.435,74 €

Madrid, Marzo de 2011

Tutor : Bazil Taha Ahmed

Fdo. : Enrique Rebollo García

Ingeniero Superior de Telecomunicación



## Anexo B – Pliego de condiciones

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un estudio sobre la capacidad del servicio HSUPA y la incidencia de éste en la prestación de otros servicios.

En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho estudio. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

### Condiciones generales

- 1) La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
- 2) El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
- 3) En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
- 4) La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
- 5) Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

- 6) El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.
- 7) Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.
- 8) Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.
- 9) Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.
- 10) Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.
- 11) Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

- 12) Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.
- 13) El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.
- 14) Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.
- 15) La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.
- 16) La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.
- 17) La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.
- 18) Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.
- 19) El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.
- 20) Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.
- 21) El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

- 22) Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.
- 23) Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

## Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

- 1) La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.
- 2) La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.
- 3) Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.
- 4) En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.
- 5) En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.
- 6) Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

- 7) Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.
- 8) Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.
- 9) Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.
- 10) La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.
- 11) La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.
- 12) El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.



## Anexo C – Publicaciones

### WCDMA Uplink Capacity of Highways Cigar-Shaped Microcells with Incorporated HSUPA Service

Wireless Pers Commun  
DOI 10.1007/s11277-011-0229-3

#### WCDMA Uplink Capacity of Highways Cigar-Shaped Microcells with Incorporated HSUPA Service

Bazil Taha Ahmed · Enrique Rebollo García

© Springer Science+Business Media, LLC. 2011

**Abstract** The multi-service (voice, data and HSUPA) uplink capacity and the interference statistics of the sectors of the cigar-shaped WCDMA microcell are studied using a model of 5 highway microcells. The two-slope propagation loss model with lognormal shadowing is used in the analysis. It is concluded that the voice and data service are significantly affected by HSUPA users and sector capacity decreases dramatically when one of these users gets connected to a given sector or to one next to it. Also it has been concluded that the capacity decrement is highly sensitive to the location of the HSUPA users. Thus, no more than one HSUPA with a process gain of 16 can be connected to a given base station. In this case, the HSUPA user should interrupt its transmission when it is near to the sector border. No more than one HSUPA user with a process gain of 8 is permitted in a given sector and the sector next to it. When the HSUPA user is at the sector border, its transmission should be disabled.

**Keywords** W-CDMA · HSUPA · Uplink capacity · Interference statistics

#### 1 Introduction

High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA) is a 3G mobile telephony protocol in the HSPA family with up-link speeds up to 5.76 Mbit/s. The name HSUPA was created by Nokia. The 3GPP does not support the name 'HSUPA', but instead uses the name Enhanced Uplink (EUL) [1]. The specifications for HSUPA are included in Universal Mobile Telecommunications System Release 6 standard published by 3GPP. The technical purpose of the Enhanced Uplink feature is to improve the performance of uplink dedicated transport channels, i.e. to increase capacity and throughput and reduce delay.

HSUPA uses an uplink enhanced dedicated channel (E-DCH) on which it will employ link adaptation methods similar to those employed by HSDPA, namely: shorter Transmission

B. T. Ahmed (✉) · E. R. García  
Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Spain  
e-mail: bazil.taha@uam.es

Published online: 11 February 2011

 Springer

## WCDMA Uplink Capacity of High Altitude Platforms (HAPs) Macrocells with Incorporated HSUPA Service

---

\*Manuscript

[Click here to download Manuscript: HAPs+HSUPA to Submit.doc](#)

[Click here to view linked References](#)

### WCDMA Uplink Capacity of High Altitude Platforms (HAPs) Macrocells with Incorporated HSUPA Service

Bazil Taha Ahmed, Enrique Rebollo Garcia

Universidad Autonoma de Madrid,

E-mail: [bazil.taha@uam.es](mailto:bazil.taha@uam.es)

**Abstract:** The multi-service (voice, data and HSUPA) uplink capacity and the interference statistics of High Altitude Platforms WCDMA microcell are studied. The free space propagation loss model with shadowing is used in the analysis. It is concluded that the voice and data service are significantly affected by HSUPA users and that the macrocell capacity decreases dramatically when one of these users gets connected to it in the case that they share the same frequency band. Also it is concluded that the capacity decrement is highly sensitive to the location of the HSUPA users. When the HSUPA users did not share the same frequency band with the voice and traditional data users, macrocell capacity will be 3 HSUPA users with a processing gain of 8 or 5 HSUPA users with a processing gain of 16.

**Keywords:** Uplink capacity, HAPs, Power control, WCDMA, HSUPA.

#### 1- Introduction

First of all we will present a brief idea about the High Speed Uplink Packet Access (HSUPA). HSUPA is a 3G mobile telephony protocol in the HSPA family with up-link speeds up to 5.76 Mbit/s. The name HSUPA was created by Nokia. The 3GPP does not support the name 'HSUPA', but instead uses the name Enhanced Uplink (EUL) [1]. The specifications for HSUPA are included in Universal Mobile Telecommunications System Release 6 standard published by 3GPP. – "The technical purpose of the Enhanced Uplink feature is to improve the performance of uplink dedicated transport channels, i.e. to increase capacity and throughput and reduce delay.

