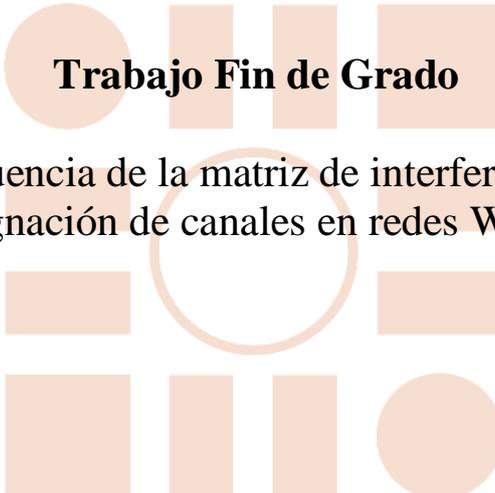


Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación



**Trabajo Fin de Grado**

Estudio de la influencia de la matriz de interferencia cocanal en la  
asignación de canales en redes WI-FI

**Autor:** Víctor Martínez Castellanos

**Tutor/es:** José Manuel Giménez Guzmán

2019

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

**Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación**

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la influencia de la matriz de interferencia cocanal en la  
asignación de canales en redes WI-FI

**Autor:** Víctor Martínez Castellanos

**Tutor/es:** José Manuel Giménez Guzmán

**TRIBUNAL:**

**Presidente:** Iván Marsá Maestre

**Vocal 1º:** Manuel Moreno Martín

**Vocal 2º:** José Manuel Giménez Guzmán

**FECHA:** Junio 2019

# Índice

<b>1. Resumen</b>	11
<b>2. Abstract</b>	11
<b>3. Palabras clave</b>	11
<b>4. Resumen extendido</b>	12
<b>5. Glosario de acrónimos y abreviaturas</b>	14
<b>6. Base teórica</b>	15
6.1. Interferencia cocanal y canales ortogonales	16
6.2. Modelo de red general (WLAN) y escenario concreto	16
6.3. Grafos y coloreado de grafos	17
6.4. Cálculos de propagación, efectos de las interferencias y utilidad	19
6.5. Factor de <i>roll-off</i>	22
6.6. Técnicas de asignación de canales	22
<b>7. Desarrollo del trabajo</b>	24
7.1. Datos de partida	24
7.1.1. Caso sin interferencias	25
7.1.2. Casos con interferencias	25
7.2. Herramientas utilizadas	32
7.3. Desarrollo	37
<b>8. Experimentos y resultados</b>	39
8.1. Cálculos de utilidad con intervalos de confianza y asignación de canales	39
8.1.1. Asignación de canales aleatoria ( <i>Random</i> )	42
8.1.2. Asignación de canales por LCCS	47
8.2. Gráficas y análisis	52
8.2.1. Asignación Random: Gráficas para cada matriz con distribución 1 de las aulas	52
8.2.2. Asignación LCCS: Gráficas para cada matriz con distribución 1 de las aulas	73
8.3. Comparativa	89
<b>9. Conclusiones</b>	93
<b>10. Pliego de condiciones</b>	95
10.1. Material utilizado	95
10.1.1. Recursos Hardware	95
10.1.2. Recursos Software	96
10.2. Planificación	97
10.3. Presupuesto	99
<b>11. Bibliografía</b>	100

<b>12.</b>	<b>ANEXOS</b>	104
12.1.	ANEXO I: Tablas de resultados	104
12.1.1.	Distribución 2 de las aulas	104
12.1.2.	Distribución 3 de las aulas	108
12.2.	ANEXO II: Gráficas distribuciones 2 y 3	112
12.2.1.	Distribución 2 de las aulas	112
12.2.2.	Distribución 3 de las aulas	122
12.3.	ANEXO III: Tablas valores de utilidad normalizados	132

# Índice de figuras

Figura 1 Espectro radioeléctrico y banda de 802.11 en 2,4 GHz [36] .....	15
Figura 2 Interferencias entre canales Wi-Fi [40] .....	16
Figura 3 Grafo de asociación (NNG).....	18
Figura 4 Grafo de interferencias (UDG).....	18
Figura 5 Relación entre utilidad y SINR presentada en [10].....	21
Figura 6 Respuesta en frecuencia del filtro de coseno alzado y factor de roll-off [30] .....	22
Figura 7 Diagrama de flujo del algoritmo de LCCS obtenida de [2] .....	23
Figura 8 Matriz identidad, caso sin interferencias.....	25
Figura 9 Gráfica factores de interferencia-número de canales, matriz de [24] .....	28
Figura 10 Obtención valores de los puntos de la gráfica matriz de [24].....	29
Figura 11 Gráfica factor de interferencia-separación entre canales de [34] .....	31
Figura 12 Obtención valores de factores de interferencia de [34] .....	32
Figura 13 Interfaz software Digitizelt [11].....	35
Figura 14 Interfaz web Refworks [31] .....	36
Figura 15 Interfaz del software GanttProject [12] .....	37
Figura 16 Asignación entre 3 canales (1, 7, 13) .....	40
Figura 17 Asignación entre 4 canales (1, 5, 9, 13) .....	40
Figura 18 Asignación entre 5 canales (1, 4, 7, 10, 13).....	41
Figura 19 Asignación entre 7 canales (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13) .....	41
Figura 20 Asignación entre 13 canales (todos).....	41
Figura 21 Gráfica caso sin interferencias .....	53
Figura 22 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, máscara ideal [39].....	54
Figura 23 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=2 [39].....	55
Figura 24 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=3 [39].....	56
Figura 25 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=4 [39].....	56
Figura 26 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=2 [39] .....	57
Figura 27 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=3 [39] .....	58
Figura 28 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=4 [39] .....	58
Figura 29 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=2 [39] .....	59
Figura 30 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=3 [39] .....	60
Figura 31 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=4 [39] .....	60
Figura 32 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [24].....	61

Figura 33 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [19].....	62
Figura 34 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [7].....	63
Figura 35 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [34].....	64
Figura 36 Comparativa entre casos con interferencias 25% ocupación, distribución 1 .....	65
Figura 37 Comparativa entre casos con interferencias 50% ocupación, distribución 1 .....	66
Figura 38 Comparativa entre casos con interferencias 75% ocupación, distribución 1 .....	66
Figura 39 Comparativa entre casos con interferencias 100% ocupación, distribución 1 .....	67
Figura 40 Comparativa entre casos con interferencias 25% ocupación, distribución 2 .....	68
Figura 41 Comparativa entre casos con interferencias 50% ocupación, distribución 2 .....	69
Figura 42 Comparativa entre casos con interferencias 75% ocupación, distribución 2 .....	69
Figura 43 Comparativa entre casos con interferencias 100% ocupación, distribución 2 .....	70
Figura 44 Comparativa entre casos con interferencias 25% ocupación, distribución 3 .....	71
Figura 45 Comparativa entre casos con interferencias 50% ocupación, distribución 3 .....	72
Figura 46 Comparativa entre casos con interferencias 75% ocupación, distribución 3 .....	72
Figura 47 Comparativa entre casos con interferencias 100% ocupación, distribución 3 .....	73
Figura 48 Gráfica caso sin interferencias .....	74
Figura 49 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, máscara ideal [39] .....	75
Figura 50 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=2 [39].....	76
Figura 51 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=3 [39].....	77
Figura 52 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=4 [39].....	77
Figura 53 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=2 [39] .....	78
Figura 54 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=3 [39] .....	79
Figura 55 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=4 [39] .....	79
Figura 56 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=2 [39] .....	80
Figura 57 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=3 [39] .....	81
Figura 58 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=4 [39] .....	81
Figura 59 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [24].....	82
Figura 60 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [19].....	83
Figura 61 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [7].....	84
Figura 62 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [34].....	85
Figura 63 Comparativa entre casos con interferencias 25% ocupación, distribución 1 .....	86
Figura 64 Comparativa entre casos con interferencias 50% ocupación, distribución 1 .....	87
Figura 65 Comparativa entre casos con interferencias 75% ocupación, distribución 1 .....	87
Figura 66 Comparativa entre casos con interferencias 100% ocupación, distribución 1 .....	88
Figura 67 Comparativa resultados normalizados 25% ocupación .....	90

Figura 68 Comparativa resultados normalizados 50% ocupación .....	90
Figura 69 Comparativa resultados normalizados 75% ocupación .....	91
Figura 70 Comparativa resultados normalizados 100% ocupación .....	91
Figura 71 Portátil utilizado [18] .....	95
Figura 72 Diagrama de Gantt del TFG [12] .....	98
Figura 73 Gráfica caso sin interferencias .....	112
Figura 74 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, máscara ideal [39] .....	113
Figura 75 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=2 [39] .....	114
Figura 76 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=3 [39] .....	115
Figura 77 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=4 [39] .....	115
Figura 78 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=2 [39] .....	116
Figura 79 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=3 [39] .....	117
Figura 80 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=4 [39] .....	117
Figura 81 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=2 [39] .....	118
Figura 82 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=3 [39] .....	119
Figura 83 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=4 [39] .....	119
Figura 84 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [24] .....	120
Figura 85 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [19] .....	120
Figura 86 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [7] .....	121
Figura 87 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [34] .....	121
Figura 88 Gráfica caso sin interferencias .....	122
Figura 89 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, máscara ideal [39] .....	123
Figura 90 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=2 [39] .....	124
Figura 91 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=3 [39] .....	125
Figura 92 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y k=4 [39] .....	125
Figura 93 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=2 [39] .....	126
Figura 94 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=3 [39] .....	127
Figura 95 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=4 [39] .....	127
Figura 96 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=2 [39] .....	128
Figura 97 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=3 [39] .....	129
Figura 98 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y k=4 [39] .....	129
Figura 99 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [24] .....	130
Figura 100 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [19] .....	130
Figura 101 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [7] .....	131
Figura 102 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [34] .....	131

# Índice de tablas

Tabla 1 Matriz con máscara ideal del espectro de [39] .....	26
Tabla 2 Matriz con factor de roll-off 1 de [39] .....	27
Tabla 3 Matriz con factor de roll-off 0,5 de [39].....	27
Tabla 4 Matriz con factor de roll-off 0,25 de [39].....	27
Tabla 5 Matriz de interferencia cocanal de [24] .....	29
Tabla 6 Matriz de interferencia cocanal de [19].....	30
Tabla 7 Matriz de interferencia cocanal de [7].....	30
Tabla 8 Matriz de interferencia cocanal de [34].....	32
Tabla 9 Resumen de parámetros.....	39
Tabla 10 Resultados de utilidad caso sin interferencias .....	42
Tabla 11 Resultados de matriz de [39] con máscara ideal .....	43
Tabla 12 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=2.....	43
Tabla 13 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=3.....	43
Tabla 14 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=4.....	44
Tabla 15 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=2 .....	44
Tabla 16 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=3 .....	44
Tabla 17 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=4 .....	44
Tabla 18 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=2 .....	45
Tabla 19 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=3 .....	45
Tabla 20 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=4 .....	45
Tabla 21 Resultados matriz de [24] .....	45
Tabla 22 Resultados matriz de [19] .....	46
Tabla 23 Resultados matriz de [7] .....	46
Tabla 24 Resultados matriz de [34] .....	46
Tabla 25 Resultados de utilidad caso sin interferencias .....	47
Tabla 26 Resultados de matriz de [39] con máscara ideal .....	48
Tabla 27 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=2.....	48
Tabla 28 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=3.....	48
Tabla 29 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=4.....	49
Tabla 30 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=2 .....	49
Tabla 31 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=3 .....	49
Tabla 32 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=4 .....	49

Tabla 33 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=2 .....	50
Tabla 34 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=3 .....	50
Tabla 35 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=4 .....	50
Tabla 36 Resultados matriz de [24] .....	50
Tabla 37 Resultados matriz de [19] .....	51
Tabla 38 Resultados matriz de [7] .....	51
Tabla 39 Resultados matriz de [34] .....	51
Tabla 40 Desglose y cálculo del presupuesto .....	99
Tabla 41 Resultados de utilidad caso sin interferencias .....	104
Tabla 42 Resultados matriz de [39] con máscara ideal.....	104
Tabla 43 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=2.....	104
Tabla 44 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=3.....	105
Tabla 45 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=4.....	105
Tabla 46 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=2 .....	105
Tabla 47 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=3 .....	105
Tabla 48 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=4.....	106
Tabla 49 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=2 .....	106
Tabla 50 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=3 .....	106
Tabla 51 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=4 .....	106
Tabla 52 Resultados matriz de [24] .....	107
Tabla 53 Resultados matriz de [19] .....	107
Tabla 54 Resultados matriz de [7] .....	107
Tabla 55 Resultados matriz de [34] .....	107
Tabla 56 Resultados de utilidad caso sin interferencias .....	108
Tabla 57 Resultados matriz de [39] con máscara ideal.....	108
Tabla 58 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=2.....	108
Tabla 59 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=3.....	109
Tabla 60 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=4.....	109
Tabla 61 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=2 .....	109
Tabla 62 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=3 .....	109
Tabla 63 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=4 .....	110
Tabla 64 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=2 .....	110
Tabla 65 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=3 .....	110
Tabla 66 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=4 .....	110
Tabla 67 Resultados matriz de [24] .....	111

Tabla 68 Resultados matriz de [19] .....	111
Tabla 69 Resultados matriz de [7] .....	111
Tabla 70 Resultados matriz de [34] .....	111
Tabla 71 Resultados de utilidad normalizados caso sin interferencias.....	132
Tabla 72 Resultados normalizados matriz de [39] con máscara ideal .....	132
Tabla 73 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=2 .....	132
Tabla 74 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=3 .....	133
Tabla 75 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=4 .....	133
Tabla 76 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=2 .....	133
Tabla 77 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=3 .....	133
Tabla 78 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=4 .....	134
Tabla 79 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=2 .....	134
Tabla 80 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=3 .....	134
Tabla 81 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y k=4 .....	134
Tabla 82 Resultados normalizados matriz de [24] .....	135
Tabla 83 Resultados normalizados matriz de [19] .....	135
Tabla 84 Resultados normalizados matriz de [7] .....	135
Tabla 85 Resultados normalizados matriz de [34] .....	135

# 1. Resumen

El trabajo que se recoge en esta memoria consiste, principalmente, en un estudio comparativo entre el comportamiento que tiene una serie de matrices que representan la interferencia existente entre los canales de las redes Wi-Fi y que intervienen en el cálculo de la utilidad, magnitud que se utiliza para determinar el comportamiento de la red. Los resultados se obtienen a partir de dos métodos diferentes de asignación de canales (*Random* y LCCS), los cuales permiten realizar la comparación entre el comportamiento que presenta cada una de las matrices, concluyendo que el uso de las diferentes matrices tiene un claro impacto en los resultados de utilidad.

# 2. Abstract

The work included in this document consists of a comparative study based in behavior presented by a group of matrices that represent the existing interference between Wi-Fi channels. The parameters of those matrices take part in the utility calculation. Utility is a quantity that is related to the performance of the network. The results are obtained by the application of two different channel assignment methods (Random and LCCS). Those results are the base of the comparative made about the behavior of the matrices, concluding that the use of the different matrices has a clear impact in the utility results.

# 3. Palabras clave

Redes Wi-Fi, interferencia cocanal, asignación de canales, grafo.

## 4. Resumen extendido

Los últimos años han estado marcados por el gran crecimiento de las tecnologías inalámbricas que hacen uso del espectro radioeléctrico, lo que ha provocado un aumento exponencial de los usuarios que hacen uso de ellas, que, además, exigen cada vez un ancho de banda mayor para los servicios que emplean. Es de vital importancia, por tanto, el método mediante el cual se reparten los recursos del espectro radioeléctrico y la eficiencia del mismo, dado que se trata de un recurso escaso.

Durante este Trabajo de Fin de Grado, se tratará el modo mediante el cual se asignan los canales Wi-Fi para la banda de frecuencias de 2,4 GHz del espectro radioeléctrico y la importancia que tiene el uso de las distintas matrices de interferencia durante el proceso.

Para la banda de 2,4 GHz, se tienen catorce canales separados por 5 MHz, aunque según cada país y zona geográfica existen restricciones al número de canales disponibles, siendo, por ejemplo, once canales disponibles para América del Norte (los once primeros) y trece para Europa. El problema consiste en que cada canal necesita 22 MHz de ancho de banda, lo cual provoca la aparición de solapamientos entre los anchos de banda de los canales adyacentes.

Aparte de las interferencias entre los propios canales Wi-Fi, tratándose la banda de 2,4 GHz de un rango no licenciado, es decir, libre para que cualquier fabricante pueda transmitir en ese rango de frecuencias de forma gratuita y legal, esta circunstancia permite que exista una gran cantidad de dispositivos inalámbricos que comparten frecuencias con la red Wi-Fi, lo cual aumenta de manera crítica la cantidad de interferencias existentes en la banda de 2,4 GHz.

El objetivo general de este estudio consiste en lograr que todos los dispositivos conectados en la red Wi-Fi obtengan el mayor rendimiento en sus conexiones, compartiendo la banda de frecuencias de la manera más eficiente posible para el menor nivel de interferencia entre los canales de la banda de frecuencia. Más concretamente, el objetivo que se persigue y en el que se va a enfocar este Trabajo de Fin de Grado es el estudio de la influencia que puede tener el uso de distintas matrices de interferencia que modelan la interferencia cocanal en redes Wi-Fi y aportar conclusiones útiles para el problema de la asignación eficiente de canales Wi-Fi a las solicitudes de conexión que se reciben. Las matrices que se utilizarán han sido obtenidas tras una búsqueda bibliográfica de estudios recientes que modelen la interferencia cocanal en redes Wi-Fi.

Por tanto, el estudio consiste en la comparación e interpretación de varios casos modificando una parte del proceso del cálculo de utilidad de la red, en concreto, se utilizarán diversas

matrices de interferencia cocanal. Para ello, se realizarán distintas pruebas sobre el mismo escenario en diferentes condiciones de ocupación por parte de los usuarios, aplicando en cada caso los distintos valores de las matrices de interferencia y utilizando dos métodos distintos a la hora de realizar la asignación de canales. Dichas técnicas de asignación de canales están basadas en los algoritmos *Random* (cada punto de acceso elige el canal a usar de manera aleatoria) y *LCCS (Least Congested Channel Search*, consistente en que cada punto de acceso elige el canal con menor interferencia).

Para la ejecución de los algoritmos escritos en lenguaje Python, se utilizará la herramienta de software Anaconda, que incluye el editor Spyder, ya que son los programas que se han utilizado en este Departamento en los estudios previos al que ocupa este Trabajo de Fin de Grado.

Estas pruebas se realizan sobre diferentes modelos, debido a la dificultad de contar con el sistema real aislado que se quiere estudiar para su monitorización. Se dispone de modelos del mismo escenario en condiciones distintas en función del grado de ocupación por parte de los usuarios.

Resumiendo, el objetivo principal del trabajo es la obtención de conclusiones útiles que sirvan para próximos estudios y proyectos, en lo relativo a la importancia que tiene el uso de las distintas matrices de interferencia en el cálculo de la utilidad de una red.

## 5. Glosario de acrónimos y abreviaturas

20T-20R	Transmisor de 20 MHz y receptor de 20 MHz
AP	<i>Access Point</i>
C.A.	K. R. Chowdhury, I. F. Akyildiz
EPS	Escuela Politécnica Superior
Factor-I	Factor de interferencia
I.c.	Intervalo de confianza
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
Irrr	<i>Reduced interference range ratio</i>
LCCS	<i>Least Congested Channel Search</i>
M.S.B.A.	A. Mishra, V. Shrivastava, S. Banerjee, W. Arbaugh
NNG	<i>Nearest Neighbor Graph</i>
SINR	<i>Signal-to-interference-plus-noise ratio</i>
S.R.Y.B.	V. Shrivastava, S. Rayanchu, J. Yooni, S. Banerjee
UDG	<i>Unit Disk Graph</i>
Util.	Utilidad
WD	<i>Wireless Device</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless local area network</i>
W.S.C.L.	J. Wang, W. Shi, K. Cui, Y. Li

## 6. Base teórica

En este capítulo se va a tratar de explicar la base teórica desde la que parte el trabajo para situar al lector en el marco adecuado, proporcionando o repasando los conceptos básicos para la correcta comprensión del estudio realizado.

Para comenzar, se va a encuadrar el campo de acción en el que se va a trabajar, que no es otro que la banda de frecuencias de 2,4 GHz dentro del espectro radioeléctrico, en la que se encuentran las redes IEEE 802.11, comúnmente llamadas redes Wi-Fi. Para la banda de 2,4 GHz, se tienen catorce canales separados por 5 MHz, aunque según cada país y zona geográfica existen restricciones al número de canales disponibles, siendo, por ejemplo, once canales disponibles para América del Norte (los once primeros) y trece para Europa, siendo este último dato el que se tendrá en cuenta durante los experimentos, además de la distancia entre canales, concepto que se explicará con más detalle más adelante.

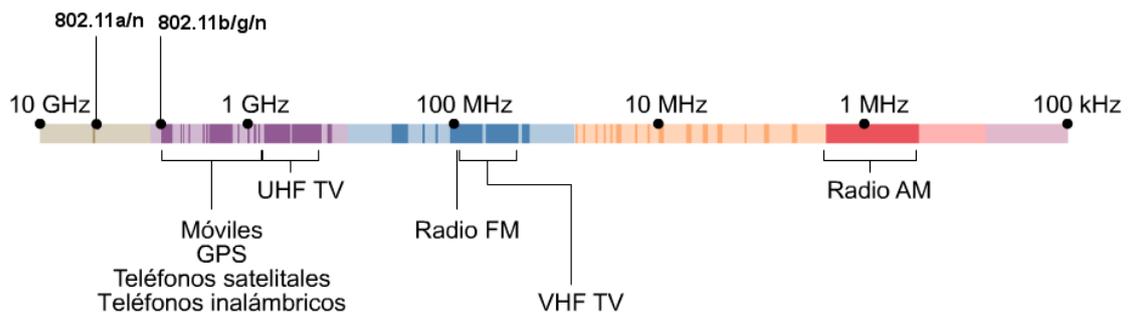


Figura 1 Espectro radioeléctrico y banda de 802.11 en 2,4 GHz [36]

Con estas condiciones, aparece el primer problema: cada canal necesita 22 MHz de ancho de banda, lo cual provoca la aparición de solapamientos entre los canales contiguos. Aparte de las interferencias entre los propios canales Wi-Fi, tratándose la banda de 2,4 GHz de un rango no licenciado, es decir, libre para que cualquier fabricante pueda transmitir en ese rango de frecuencias de forma gratuita y legal, esta circunstancia permite que exista una gran cantidad de dispositivos inalámbricos que comparten frecuencias con la red Wi-Fi, lo cual aumenta de manera crítica la cantidad de interferencias existentes en la banda de 2,4 GHz.

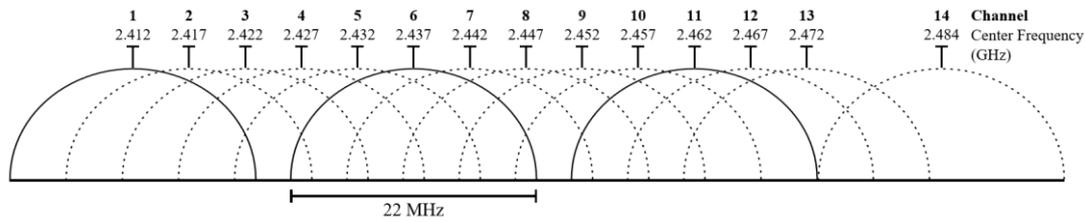


Figura 2 Interferencias entre canales Wi-Fi [40]

A continuación, se van a explicar algunos de los conceptos nombrados o introducidos en los párrafos anteriores, además de algunos nuevos para continuar encaminando y concretando el tema del que se ocupa este estudio.

### 6.1. Interferencia cocanal y canales ortogonales

Se ha comentado que, además del dato del número de canales a utilizar, es importante tener en cuenta la distancia entre los mismos, es decir, hay que prestar especial atención a la interferencia que puede producir un canal a sus adyacentes y a cuántos de ellos llega a interferir, por ejemplo, el canal 1 no interfiere de la misma manera o con la misma magnitud al canal 2, que está a su lado, que al canal 7, que está a mayor distancia. De este modo aparece el concepto de canales ortogonales, que son aquellos que están lo suficientemente lejos unos de otros como para que no se produzca interferencia entre esos canales. En el caso de Europa, los canales ortogonales son el 1, el 7 y el 13.

### 6.2. Modelo de red general (WLAN) y escenario concreto

El tipo de red en la que se va a centrar el estudio es una red Wi-Fi. Estas redes disponen de dos tipos de elementos: los puntos de acceso (*access points*, AP) y los dispositivos inalámbricos (*wireless devices*, WD), en los cuales se incluyen todos los dispositivos capaces de conectarse a una red Wi-Fi, tales como ordenadores, smartphones, tablets, smartTVs, etc. La finalidad de este tipo de redes es la de asignar un canal Wi-Fi a cada punto de acceso para la comunicación entre el punto de acceso y sus dispositivos inalámbricos asociados. Cabe destacar que, puesto que se consideran redes Wi-Fi de infraestructura, la comunicación directa se realiza entre AP y WDs, es decir, las comunicaciones entre WDs tienen que pasar primero a través de un punto de acceso.

En este caso, la red escenario WLAN (red de área local inalámbrica) en la que se va a trabajar será, concretamente, la red de la Escuela Politécnica Superior (EPS) de la Universidad de Alcalá de Henares (UAH). Por tanto, en este trabajo cobra gran importancia el problema de asignación de frecuencias en WLANs, teniendo muy en cuenta las interferencias cocanal, a partir de técnicas de negociación que se irán explicando después, pudiendo considerarse como un problema

matemático de coloreado de grafos, concepto que se introduce ahora para ser detallado más adelante. Este escenario será utilizado a través de distintos grafos de asociación (NNG) e interferencias (UDG) en función del porcentaje de ocupación de las aulas y la distribución de los clientes en las mismas. Esto último nos sirve para introducir y enlazar con el siguiente apartado.

### 6.3. Grafos y coloreado de grafos

Un grafo, según la teoría de grafos, es una estructura de datos compuesta por un conjunto no vacío de vértices (nodos) y un conjunto no vacío de aristas (pares de vértices o *edges*), los cuales forman un conjunto de pares ordenados o desordenados de vértices o nodos. A continuación, se van a enumerar algunas definiciones explicadas en [14] que pueden ser útiles para la comprensión en posteriores explicaciones:

1. Un grafo  $G = (V, E)$  consiste en dos conjuntos  $V$  y  $E$ , donde  $V$  son los vértices o nodos y  $E$  son los *edges* o aristas. Cada arista tiene dos nodos asociados a ella, los cuales se llaman *endpoints* o terminales. Se dice que una arista une dos terminales.
2. Si un vértice es un terminal de una arista, se dice que dicho vértice es incidente en esa arista y viceversa.
3. Un vértice es adyacente a otro si están unidos por una arista.
4. Dos vértices adyacentes se llaman vecinos.
5. Dos aristas adyacentes son las que tienen en común un terminal.

Como se ha nombrado anteriormente, y, siguiendo la explicación de [10], la parte de la asignación de frecuencias puede afrontarse como un problema de coloreado de grafos con los APs como vértices del grafo, siendo equivalente la asignación de canales al coloreado de las aristas (*edges*) del grafo. La técnica de coloreado de grafos consiste en lo siguiente: se considera un grafo abstracto, definido por un conjunto de vértices y aristas, siendo el objetivo asignar un color a cada vértice, de tal manera que se use el mínimo número de colores posible. Los vértices representan dispositivos a los cuales se debe asignar una frecuencia, mientras que las aristas representan pares de elementos a los que no se debe asignar la misma frecuencia. Así pues, los colores actúan como frecuencias y las aristas heterocromáticas garantizan pares de elementos con diferentes frecuencias. A partir de estos principios se tienen dos tipos de grafos:

- **Grafos de asociación (NNG):** Representa el modelo de red, siendo las aristas las asociaciones entre WDs y APs y los vértices los propios dispositivos y puntos de acceso.

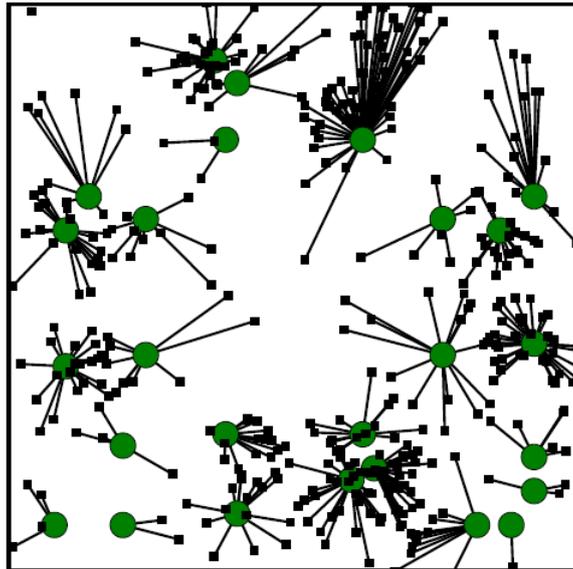


Figura 3 Grafo de asociación (NNG)

- **Grafos de interferencias (UDG):** Muestra el modelo de red, pero esta vez las aristas representan las interferencias entre los dispositivos y puntos de acceso, pudiendo diferenciarse tres casos: interferencias entre puntos de acceso, interferencias entre dispositivos asociados a distintos puntos de acceso e interferencias entre dispositivos y puntos de acceso que no estén asociados entre sí, ya que las comunicaciones entre dispositivos conectados al mismo punto de acceso están coordinadas y no se interfieren entre ellas. Es importante tener en cuenta que cada arista tendrá un peso que representa la potencia de la señal recibida.

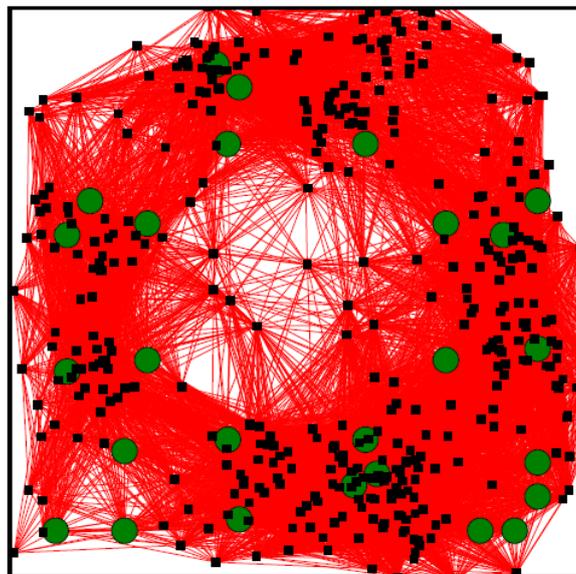


Figura 4 Grafo de interferencias (UDG)

En el escenario de estudio, como ya se ha comentado, se va a trabajar con los grafos de asociación y de interferencias de la primera planta de la EPS de la UAH. Estos grafos, como ya se ha adelantado, están definidos en función del porcentaje de ocupación de las aulas de la escuela, considerando los casos del 25%, 50%, 75% y 100% de ocupación, además habrá tres formas distintas de distribución de los clientes en las aulas, por tanto, para cada porcentaje de ocupación existen tres grafos distintos de cada tipo. En la Figura 3 se presenta el grafo de asociación de la EPS y, en la Figura 4, el grafo de interferencias, ambos para el caso del 25% de ocupación considerando la distribución número 1 de los clientes en las aulas.

Además, en este trabajo, tal como se ha hecho en los estudios previos que se han tenido como referencia, se van a realizar algunas extensiones del problema típico de coloreado para adecuarlo más a la realidad y obtener unos resultados más precisos. Estas extensiones consisten en considerar las interferencias entre colores adyacentes y colores en un cierto rango de distancia, mientras que en el caso típico sólo se consideran las interferencias entre vértices del mismo color. La segunda extensión que se va a realizar es introducir la distancia entre los dispositivos de un vértice, de manera que el peso que se asigne a una arista sea diferente en función de lo lejos que se encuentre el dispositivo. Por último, la tercera ampliación del problema inicial es incluir el efecto que tiene la cantidad de datos, ya que un flujo de datos con un ancho de banda mayor ocupará el canal durante más tiempo.

#### 6.4. Cálculos de propagación, efectos de las interferencias y utilidad

Continuando con el procedimiento, habrá que tener en cuenta, también, los efectos de la propagación y de las interferencias de las señales inalámbricas a la hora de evaluar el coloreado en el escenario propuesto. Además, en este apartado, se definirá el concepto de utilidad y la importancia de esta magnitud en el desarrollo del trabajo.

Primero, se definirá el modelo de propagación utilizado para representar las pérdidas de señal que se producen entre el transmisor y el receptor de esta. Este modelo no es otro que el descrito en [14], en el que se definen las pérdidas de la señal en dB como:

$$P_{loss} = 40\log_{10}d + 20\log_{10}f - 20\log_{10}(h_t h_r) \quad (1)$$

Donde  $f$  es la frecuencia en GHz,  $h_t$  y  $h_r$  son las alturas de las antenas transmisora y receptora en metros y  $d$  la distancia también en metros.

Esta fórmula se puede simplificar para este caso, ya que se va a trabajar con la banda de frecuencia de 2,4 GHz de la WLAN de IEEE 802.01, por lo que queda:

$$P_{loss} = 7,6 + 40\log_{10}d - 20\log_{10}(h_t h_r) \quad (2)$$

Para el caso particular en el que se recibe una señal cuya potencia es igual a la sensibilidad del receptor, se tiene que:

$$P_t + G_t + G_r - L - P_{loss} = S \quad (3)$$

Donde  $P_t$  es la potencia transmitida en dBm,  $G_t$  y  $G_r$  son las ganancias de transmisión y recepción en dB,  $L$  son las pérdidas debido a paredes, muros, ventanas y otros obstáculos en dB,  $P_{loss}$  son las pérdidas de propagación en dB y  $S$  es la sensibilidad del receptor en dBm.

A partir de estas fórmulas, se puede calcular la distancia (en metros) a la que estas señales pueden ser percibidas por el receptor. La importancia de este cálculo es que permite obtener la distancia máxima entre un par de nodos para que estén conectados entre sí en el grafo de interferencias.

$$R = 10^{\frac{P_t + G_t + G_r - L - S - 7,6 + 20 \log_{10}(hthr)}{40}} \quad (4)$$

Una vez analizado el modelo de propagación, se va a explicar el modelo de interferencia, ya que para poder medir la calidad de una señal recibida tenemos que tener en cuenta las señales que producen interferencias, ya que la calidad depende de las interferencias que se produzcan. Aparte de la distancia, existen otros factores de los que depende la calidad de la señal recibida, tales como el índice de actividad ( $\psi$ ) y el índice cocanal ( $\delta$ ). El índice de actividad representa el efecto negativo de las interferencias producidas por los APs ( $\psi = 0,5$ ) y los WDs ( $\psi = 0,2$ ). Por otra parte, el índice cocanal se define por el solapamiento existente entre canales de la banda de 2,4 GHz de IEEE 802.11 y se corresponde con el valor ( $i,j$ ) correspondiente de la matriz de interferencia cocanal, la cual representa la interferencia producida por un determinado canal en el resto, es decir, si un nodo que opera en el canal  $i$  es interferido por un nodo que opera en el canal  $j$ . Más adelante se profundizará en el tema de la matriz de interferencia cocanal, ya que se trata de un aspecto de vital importancia debido al enfoque de este estudio, puesto que se centra en la importancia que tiene el hecho de usar una matriz de interferencia u otra, dentro de varias opciones extraídas de diversos estudios previos que se explicarán con detalle en siguientes capítulos. Continuando con la explicación teórica, se puede expresar la potencia de la interferencia producida en un nodo que opera en un canal  $i$  por un nodo que opera en un canal  $j$  como:

$$I = P_t + G_t + G_r - L - P_{loss} + \delta(i;j) + \psi \quad (5)$$

Donde todos los valores están expresados en dB. Una vez se tiene esta fórmula, se puede expresar la relación señal a ruido para un WD  $i$  ( $SINR_i$ ) como la relación entre la señal recibida y la suma de las interferencias recibidas:

$$SINR_i = \frac{P}{\sum_{j=1}^M I_j} \quad (6)$$

Cada punto de acceso tendrá un valor de SINR para cada WD asociado a él, por tanto, se supondrá que el SINR del AP será el menor de todos los SINR de los terminales, ya que se trata del peor caso.

El último concepto que se va a introducir en este apartado es el de utilidad. La utilidad es un parámetro de comportamiento estrechamente relacionado con la relación señal a ruido (SINR) y el *throughput* (rendimiento). El *throughput* es máximo cuando la SINR sobrepasa un valor  $SINR_{max}$  y decrece con la SINR hasta llegar a un valor mínimo  $SINR_{min}$ , donde el *throughput* es 0. El valor de la utilidad se encuentra en un rango de 0 a 1, siendo 0 cuando la SINR decrece por debajo del valor  $SINR_{min}$  y 1 cuando llega por encima del valor de  $SINR_{max}$ . A continuación, se muestra gráficamente la relación lineal entre la utilidad y la SINR:

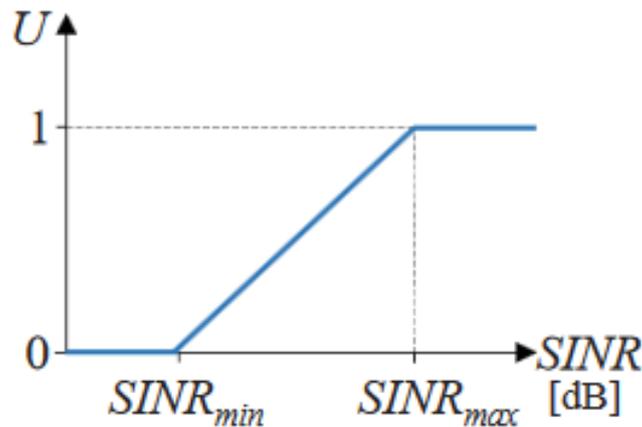


Figura 5 Relación entre utilidad y SINR presentada en [10]

La utilidad para el coloreado de una red (asignación de canales), se calcula como la suma de las utilidades de los nodos o vértices del grafo.

$$U = \sum_{v_i} U_i \quad (7)$$

### 6.5. Factor de *roll-off*

Se trata de un concepto que, aunque no es imprescindible para el desarrollo del método que se está exponiendo, es interesante conocerlo para poder comprender mejor alguna de las explicaciones que se darán durante los próximos capítulos en los que se presente el caso práctico llevado a cabo. Concretamente, este término será usado mayoritariamente durante la presentación y explicación de las matrices de interferencia de [39], ya que en función del valor del factor de *roll-off*, los valores de la matriz serán distintos.

Para explicar lo que es el factor de *roll-off*, es importante conocer primero qué es un filtro de coseno alzado. Sin entrar en demasiados detalles, un filtro de coseno alzado es un tipo de filtro capaz de reducir las interferencias entre símbolos (ISI) al mínimo, cuya respuesta en frecuencia es la siguiente:

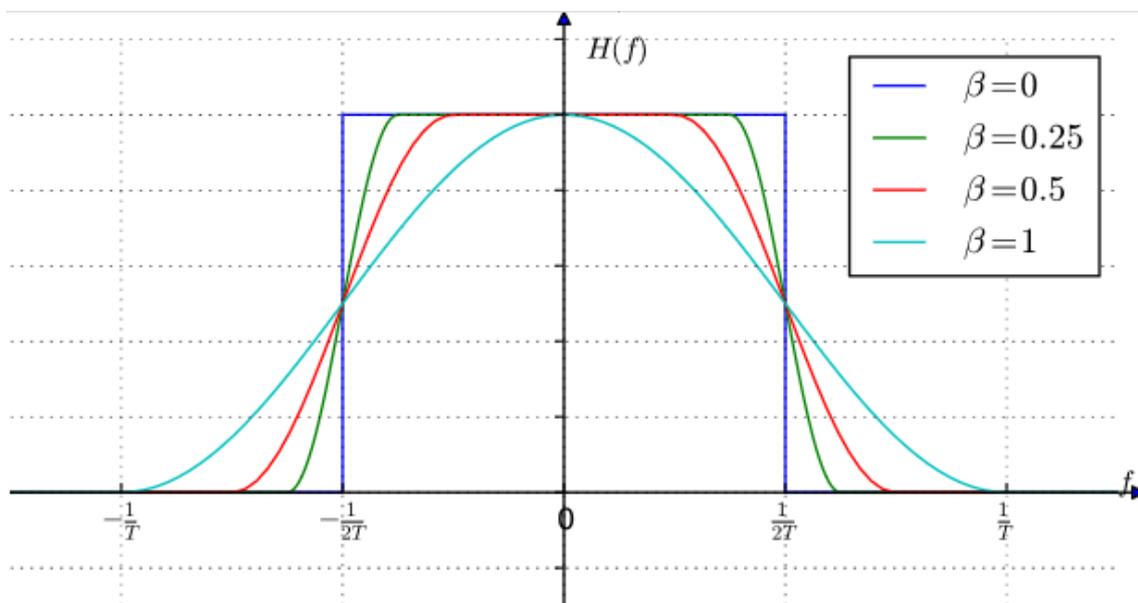


Figura 6 Respuesta en frecuencia del filtro de coseno alzado y factor de *roll-off* [30]

La función de transferencia del filtro de coseno alzado está caracterizada por el parámetro  $\beta$ , llamado factor de *roll-off*. El factor de *roll-off* indica el exceso de ancho de banda, es decir, representa el porcentaje de ancho de banda del filtro. El factor de *roll-off* es un número real que toma valores entre 0 y 1. En la Figura 6, se pueden observar las variaciones que provoca el valor del factor de *roll-off* en la respuesta en frecuencia del filtro.

### 6.6. Técnicas de asignación de canales

Anteriormente se ha nombrado de manera genérica la asignación de canales durante la explicación del coloreado de grafos, por tanto, en este apartado se van a detallar los dos métodos que se van a usar en el estudio, mediante los cuales se van a asignar los canales de la

banda de frecuencias de 2,4 GHz. Estos métodos son: asignación *Random* (aleatoria) y LCCS (*Least Congested Channel Search*).

- **Random:** Básicamente, esta técnica consiste en que cada AP elige aleatoriamente el canal que va a usar con sus clientes. Aparte de albergar menor complicación que LCCS, va a proporcionar un punto de partida y una base o referencia sobre la que poder realizar una comparación razonada y firme entre los resultados de las distintas matrices de interferencia con las que se va a tratar durante el trabajo, además de proporcionar una primera impresión respecto a la influencia del uso de una matriz u otra en las mismas condiciones.
- **LCCS:** Este sistema consiste en que cada punto de acceso, de manera autónoma, busca el canal menos congestionado, contando periódicamente el número de WDs activos asociados a cada canal, cambiando de canal si con un nuevo escaneo se detecta un canal menos ocupado. En este algoritmo se presupone la misma cantidad de tráfico para todos los clientes, por lo que se sigue la premisa de que, a mayor número de clientes conectados, mayor volumen de tráfico. LCCS es asíncrono por definición, lo que dificulta la comparación, por tanto, se deben realizar una serie de iteraciones, permitiendo así que el algoritmo se ejecute de manera asíncrona una vez por cada punto de acceso en cada iteración.

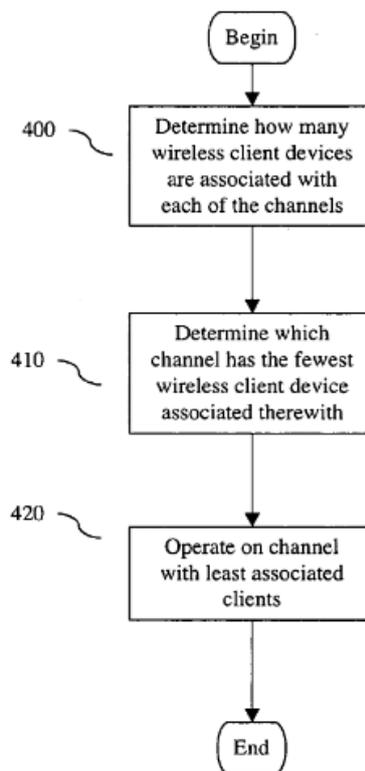


Figura 7 Diagrama de flujo del algoritmo de LCCS obtenida de [2]

## 7. Desarrollo del trabajo

Durante este capítulo se van a describir todas las tareas de desarrollo del TFG (Trabajo de Fin de Grado) a partir de la teoría explicada en el capítulo anterior, así como los datos y el escenario desde los que parten los experimentos, el proceso de aprendizaje que ha tenido lugar y las herramientas de software utilizadas durante el trabajo.

### 7.1. Datos de partida

Para comenzar, se va a determinar el escenario concreto en el que se va a trabajar, así como sus características y aspectos más importantes a tener en cuenta. Como ya se ha nombrado durante la explicación de la base teórica, el escenario de trabajo es la red WLAN de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá de Henares. Se ha elegido este escenario por las razones más simples e importantes: se dispone de los grafos necesarios para poder llevar a cabo el trabajo y los experimentos adecuadamente, pero, además de eso, se trata del escenario en el cual se ha realizado el Grado que finaliza con la presentación de este TFG, por tanto, es un lugar con el que se está familiarizado y es fácil de identificar, aunque esto no es decisivo a la hora de realizar las pruebas e interpretar los resultados que se obtengan. Para trabajar con este escenario, se disponen de 24 grafos de la EPS proporcionados por el tutor del TFG, 12 de ellos son grafos de asociación (NNG) y los otros 12, sus respectivos grafos de interferencias (UDG). De esos 12 grafos de cada tipo, se dividen en 3 distribuciones distintas de los usuarios dentro de las aulas de la Universidad, teniendo cada una de las distribuciones 4 grafos diferenciados por porcentajes distintos de ocupación por parte de los usuarios (25%, 50%, 75% y 100%). Conociendo esto, la nomenclatura de los grafos tiene la siguiente estructura:

EPS-0.5-2\_1-NNG

Donde:

- **EPS:** es el nombre de la escuela.
- **0.5:** es el porcentaje de ocupación (Puede ser 0.25, 0.5, 0.75 o 1).
- **2:** se refiere al número de la distribución (Puede ser la distribución 1, 2 o 3).
- **NNG:** es el tipo de grafo del que se trata, en este caso, de asociación (Puede ser NNG si es de asociación o UDG si es de interferencias).

Los archivos de los grafos tienen una extensión .pk, porque se ha usado el módulo pickle [1] de Python, el cual permite representar un objeto de Python como una cadena de bytes. El archivo pickle permite ser usado por otro programa de Python. EL módulo pickle también permite la

operación inversa, es decir, a partir del archivo pickle (cadena de bytes) permite obtener el objeto Python original.

El trabajo a desarrollar consiste en un estudio y análisis comparativo de la influencia que tiene el uso de distintas matrices de interferencia durante los cálculos de la utilidad que se han detallado en el capítulo relativo a la base teórica, dentro de la misma red. Se han seleccionado distintas matrices de interferencia cocanal, extraídas de distintos artículos y estudios especializados en la materia. A continuación, se van a presentar cada una de las opciones con las que se va a trabajar, indicando el estudio de origen de cada una de ellas:

#### 7.1.1. Caso sin interferencias

Siguiendo el esquema general de [39], se comienza por este caso, en el cual se asume que no existe interferencias entre canales, para poder analizar el efecto que tiene la variación del número de canales en el valor de utilidad que se obtiene. Esto, además, permitirá observar claramente el efecto que producen las interferencias entre los canales. Para ello, se considerará, para los cálculos, una matriz identidad a modo de matriz de interferencia, compuesta por una diagonal principal formada por unos y el resto de las posiciones rellenas completamente por ceros.

$$\delta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

*Figura 8 Matriz identidad, caso sin interferencias*

#### 7.1.2. Casos con interferencias

A partir de este punto, se considerarán las interferencias entre canales, ya que, según se ha venido explicando, es una característica de gran interés de las redes Wi-Fi y es de gran importancia en el desarrollo de este estudio. Con los resultados que se obtengan para cada uno de los casos que se presentarán individualmente a continuación, se evaluará el efecto que tienen los canales ortogonales y la separación entre canales en el rendimiento.

**I. Opción 1: Matrices de J. Wang, W. Shi, K. Cui, Y. Li [39]**

De ahora en adelante, se mencionará a estas matrices como matrices de W.S.C.L. por las iniciales de los autores.

Entre otras aportaciones y contribuciones que aportan los autores de [39], en el trabajo que ocupa este documento va a utilizarse el enfoque de cálculo teórico, usado para obtener rangos de interferencia con los que evitar la débil transportabilidad de los rangos de interferencia obtenidos en medidas de campo.

En el *paper* se define el ratio de rango de interferencia reducido (*reduced interference range ratio*,  $I_{rrr}(\tau)$ ) en función del solapamiento entre canales y otros parámetros tales como la potencia transmitida hacia el receptor, las ganancias de las antenas transmisora y receptora, así como la altura de ambas, la distancia entre ellas y un factor  $k$  referido a las pérdidas por la trayectoria, cuyo valor se encuentra típicamente entre 2 y 4. El valor de  $I_{rrr}(\tau)$  está normalizado en una escala entre 0 y 1 y se usa para describir la disminución del rango de interferencia observado en canales adyacentes debido a la utilización de canales parcialmente solapados, donde  $\tau$  es la distancia entre dos canales  $i$  y  $j$ . En el uso del filtro de coseno alzado, los  $I_{rrr}(\tau)$  están relacionados con el valor del factor de *roll-off*, de tal manera que  $I_{rrr}(\tau)$  crece a la vez que crece el valor del factor  $k$ . Por tanto, esta opción considerada para el estudio presenta, a su vez, distintos casos diferenciados en función del valor del factor de *roll-off* del filtro de coseno alzado.

Los  $I_{rrr}(\tau)$  correspondientes a las diferentes separaciones entre canales ( $\tau$ ), se muestran a continuación:

- i. Ratios de rango de interferencia reducido para máscara ideal del espectro.

$\tau$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	$\geq 9$
$I_{rrr}(\tau)$	1	0,9376	0,8596	0,7515	0,5505	0,1714	0,1588	0,1422	0,1161	0

Tabla 1 Matriz con máscara ideal del espectro de [39]

- ii. Ratios de rango de interferencia reducido para filtros de coseno alzado con factor de *roll-off* 1.

k = 2	$\tau$	0	1	2	3	4	$\geq 5$
	lrrr( $\tau$ )	1	0,7512	0,4800	0,2246	0,03554	0
k = 3	$\tau$	0	1	2	3	4	$\geq 5$
	lrrr( $\tau$ )	1	0,8264	0,6131	0,3695	0,1079	0
k = 4	$\tau$	0	1	2	3	4	$\geq 5$
	lrrr( $\tau$ )	1	0,8667	0,6928	0,4739	0,1882	0

Tabla 2 Matriz con factor de *roll-off* 1 de [39]

- iii. Ratios de rango de interferencia reducido para filtros de coseno alzado con factor de *roll-off* 0,5.

k = 2	$\tau$	0	1	2	3	$\geq 4$
	lrrr( $\tau$ )	1	0,7355	0,3741	0,0442	0
k = 3	$\tau$	0	1	2	3	4
	lrrr( $\tau$ )	1	0,8148	0,5192	0,2150	0
k = 4	$\tau$	0	1	2	3	4
	lrrr( $\tau$ )	1	0,8596	0,6116	0,2103	0

Tabla 3 Matriz con factor de *roll-off* 0,5 de [39]

- iv. Ratios de rango de interferencia reducido para filtros de coseno alzado con factor de *roll-off* 0,25.

k = 2	$\tau$	0	1	2	$\geq 3$
	lrrr( $\tau$ )	1	0,7339	0,3138	0
k = 3	$\tau$	0	1	2	3
	lrrr( $\tau$ )	1	0,8136	0,4617	0
k = 4	$\tau$	0	1	2	3
	lrrr( $\tau$ )	1	0,8567	0,5601	0

Tabla 4 Matriz con factor de *roll-off* 0,25 de [39]

## II. Opción 2: Matriz de A. Mishra, V. Shrivastava, S. Banerjee, W. Arbaugh [24]

A partir de este punto, se referirá a esta matriz como matriz de M.S.B.A. por las siglas de los autores.

A lo largo del *paper* [24], se desarrolla un modelo de solapamiento parcial, aspecto que se va a aprovechar para el estudio realizado en este trabajo.

Introduce la noción de factor de interferencia (factor-I), que captura cuantitativamente la cantidad de solapamiento entre una transmisión a cierta frecuencia de transmisión y la recepción a cierta frecuencia de recepción. Esto se hace calculando el área de intersección entre el espectro de una señal y el filtro paso-banda del receptor. Se considera un modelo ideal y discreto del factor de interferencia definido como la cantidad de interferencia entre los canales  $i$  y  $j$ , asumiendo que la distribución de la potencia de la señal transmitida tiene la forma exacta de la máscara del espectro transmitida y siendo el filtro del receptor igual que la máscara del espectro transmitida. El factor-I discreto puede obtenerse también empíricamente mediante las medidas que se detallan en el propio *paper*. Llegando, finalmente, a la presentación de los datos de manera gráfica, tanto los medidos empíricamente como los teóricos, siendo los primeros con los que se va a trabajar. Al darse los datos de los factores de interferencia de manera gráfica, sin dar los valores concretos, se han tenido que estimar los valores de los puntos, tarea realizada mediante la herramienta software Digitizelt [11]. La siguiente gráfica representa los valores teóricos y los medidos del factor I (factor de interferencia) para dos canales de la banda de 2,4 GHz de 802.11 obtenida del *paper*.

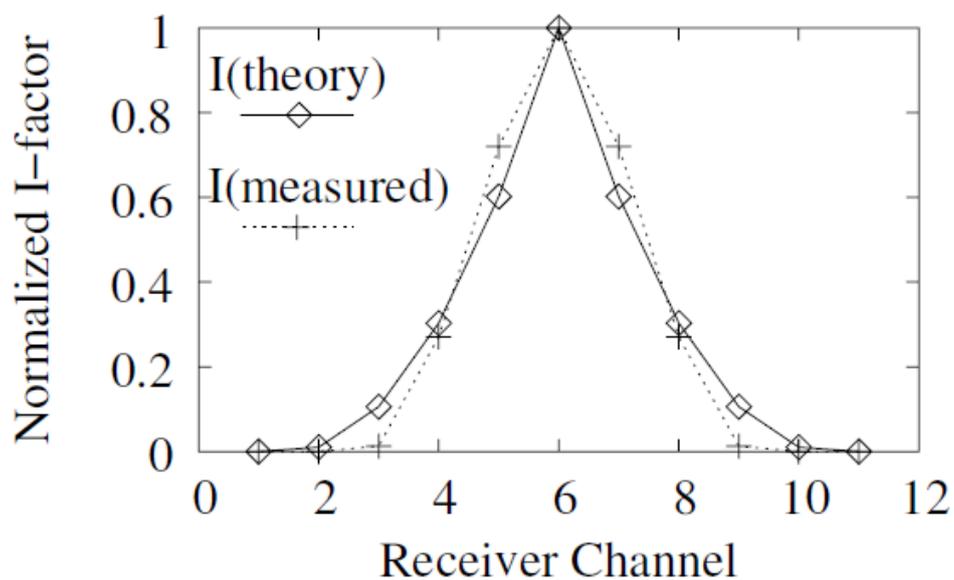


Figura 9 Gráfica factores de interferencia-número de canales, matriz de [24]

La siguiente imagen se corresponde con la estimación realizada de los valores de los puntos de la gráfica a través del software mencionado.

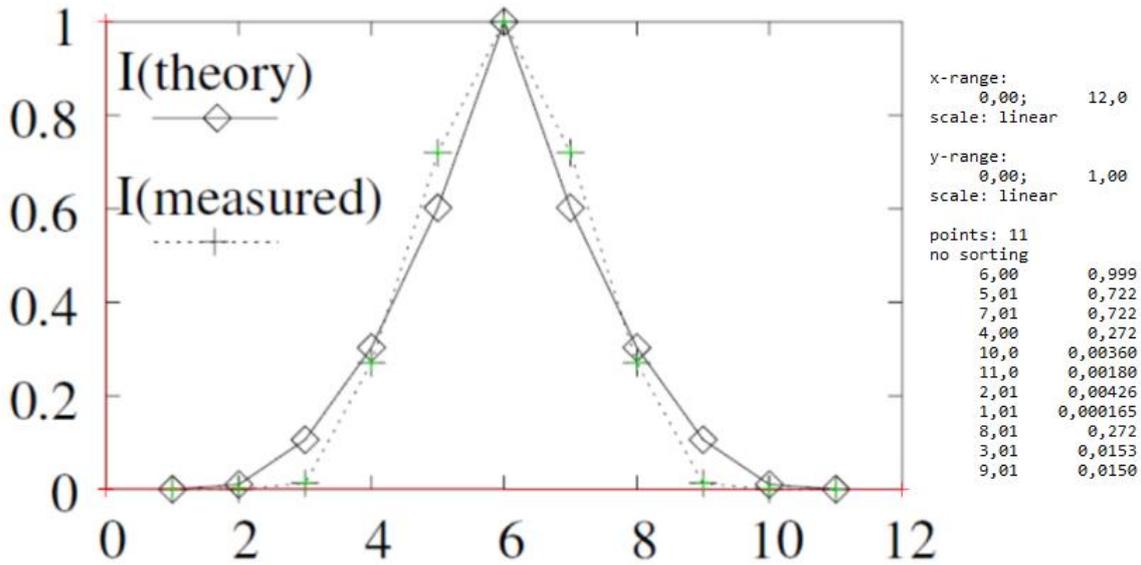


Figura 10 Obtención valores de los puntos de la gráfica matriz de [24]

Pudiendo expresar, finalmente, los valores medidos en forma de matriz de interferencia, que es la forma con la que se va a trabajar.

Separación	0	1	2	3	4	5	$\geq 6$
Interferencia	1	0.722	0.272	0.015	0.0036	0.0018	0

Tabla 5 Matriz de interferencia cocanal de [24]

### III. Opción 3: Matriz de J. Kratz [19]

En [19] se realiza una aproximación lineal del estudio de [24]. Concretamente, se realiza una aproximación lineal del factor de interferencia, el cual da un valor de  $\gamma = 0,29$ , donde  $\gamma$  representa la disminución del ratio de solapamiento entre canales adyacentes. Este valor ha sido obtenido al aproximar la función de la gráfica mostrada en la explicación de la matriz de M.S.B.A. [24] en el apartado anterior. En el estudio de Kratz [19] se menciona que se trata de una aproximación lineal de una función no lineal y que su modelo usa el método de optimización global para situar los puntos de acceso y asignar las frecuencias, mientras que [24] utiliza un modelo heurístico y de simulación.

Los valores de los porcentajes de solapamiento entre canales para el valor obtenido de  $\gamma = 0,29$ , son los que se muestran en la siguiente matriz, que será la que se utilizará en este estudio.

$k_s$	$k_r$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0,71	0,42	0,13							
2	0,71	1	0,71	0,42	0,13						
3	0,42	0,71	1	0,71	0,42	0,13					
4	0,13	0,42	0,71	1	0,71	0,42	0,13				
5		0,13	0,42	0,71	1	0,71	0,42	0,13			
6			0,13	0,42	0,71	1	0,71	0,42	0,13		
7				0,13	0,42	0,71	1	0,71	0,42	0,13	
8					0,13	0,42	0,71	1	0,71	0,42	0,13
9						0,13	0,42	0,71	1	0,71	0,42
10							0,13	0,42	0,71	1	0,71
11								0,13	0,42	0,71	1

Tabla 6 Matriz de interferencia cocanal de [19]

#### IV. Opción 4: Matriz de K. R. Chowdhury, I. F. Akyildiz [7]

En adelante será mencionada como matriz de C.A. para abreviar.

De entre las contribuciones realizadas en [7], en este trabajo se va a utilizar el resultado de las medidas empíricas realizadas para obtener los valores de los factores de solapamiento espectral, expresado como  $\Omega$  en función de la separación entre canales. Para IEEE 802.11 con una frecuencia entre canales de 5 MHz, los valores medidos de los factores de solapamiento se muestran en la siguiente tabla:

$\Omega$ Values	0	1	2	3	4	5	6
Spectral Overlap	1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,001	0

Tabla 7 Matriz de interferencia cocanal de [7]

#### V. Opción 5: Matriz de V. Shrivastava, S. Rayanchu, J. Yooni, S. Banerjee [34]

Del mismo modo que en los casos anteriores, se nombrará a esta matriz como matriz de S.R.Y.B. por los apellidos de los autores.

En este *paper* se extiende el modelo de [24] para caracterizar la interferencia de un enlace 802.11n debida al solapamiento parcial entre canales y lo valida a través de resultados experimentales que se van presentando a lo largo del documento. El propósito de extender el modelo de [24] es el de calcular el factor de interferencia que captura la cantidad de solapamiento entre la transmisión y

la recepción en determinadas frecuencias de transmisión y recepción. La cantidad de solapamiento es capturada cuantitativamente calculando el área de intersección entre el espectro de la señal y el filtro paso-banda del receptor. Shrivastava y los demás autores incluyen en su modelo descrito en [34] el ancho de banda de los canales transmisor y receptor para obtener el factor de interferencia. Como resultado, presenta diferentes gráficas para cuatro escenarios distintos. En el caso que ocupa este documento, se va a utilizar el caso que corresponde a un transmisor de 20 MHz y un receptor de 20 MHz (20T-20R), correspondiente a la figura que se muestra a continuación.

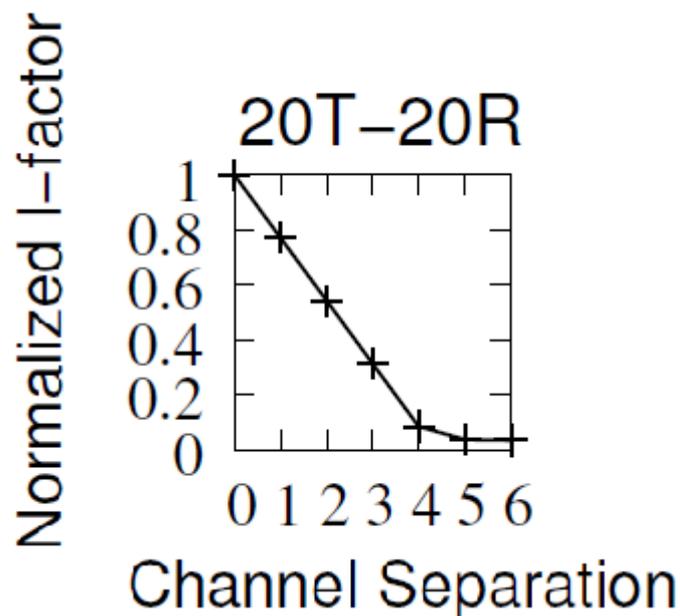


Figura 11 Gráfica factor de interferencia-separación entre canales de [34]

Al presentarse los datos de los factores de interferencia de manera gráfica sin proporcionar directamente los valores numéricos, de la misma manera que en la matriz de la opción 2, se obtienen los valores de los puntos de la gráfica a través del software Digitizelt [11] para poder trabajar con la matriz de la misma forma que en los casos anteriores.

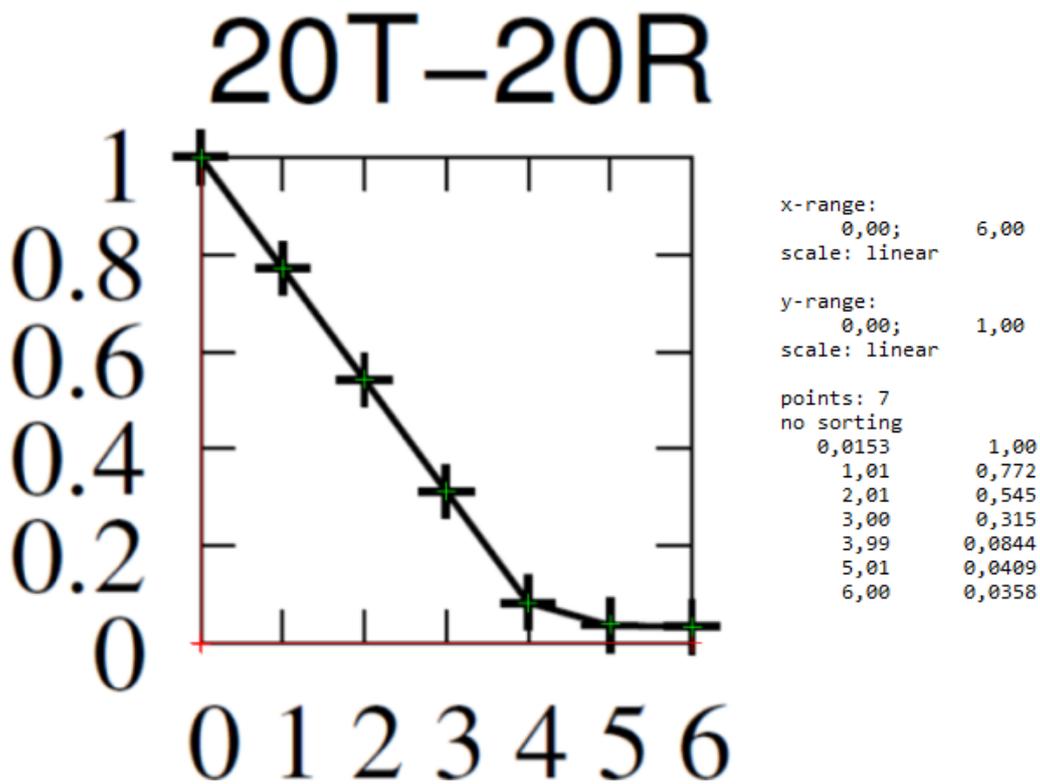


Figura 12 Obtención valores de factores de interferencia de [34]

La matriz, por tanto, queda formada por los siguientes valores:

Separación	0	1	2	3	4	5	6	≥ 6
Interferencia	1	0.772	0.545	0.315	0.0844	0.0409	0.0358	0

Tabla 8 Matriz de interferencia cocanal de [34]

## 7.2. Herramientas utilizadas

En este apartado se van a enumerar las distintas herramientas usadas a lo largo del TFG y que han permitido el desarrollo del mismo, además de explicar para qué tareas ha sido utilizada cada una de ellas.

- **Python**

Para realizar todos los cálculos de utilidades e intervalos de confianza y la representación de las gráficas en función del número de canales, respectivos a cada uno de los grafos que se han explicado anteriormente, se han utilizado distintos scripts escritos en lenguaje Python proporcionados por el tutor del TFG y modificados o adaptados a las necesidades surgidas durante el desarrollo del trabajo. La versión con la que se ha trabajado es Python 2.7.

- Anaconda y Spyder:
  - **Anaconda [16]:** es una distribución libre de Python que se utiliza en ciencia de datos y *machine learning*, abarcando una serie de aplicaciones y librerías desarrollados para procesar grandes volúmenes de información, análisis predictivo y cálculos científicos, soportando computaciones de alto rendimiento. Además, Anaconda reúne los paquetes necesarios para estos propósitos, lo que proporciona gran comodidad a la hora de trabajar. Dispone de una interfaz gráfica y permite la gestión de todos los paquetes mediante el gestor Conda.
  - **Spyder [35]:** se trata de un entorno de desarrollo para Python que posee funciones avanzadas de edición, pruebas y depuración. Esta herramienta es la que se va a usar como editor de los scripts de Python con los que se va a trabajar y la que va a permitir ejecutarlos para obtener los resultados de los cálculos y gráficas necesarios para el análisis posterior.
  
- Scripts de Python:
  - **wifi\_utility.py:** es el script encargado de realizar todos los cálculos de utilidad detallados durante la explicación de la base teórica, en el que se define la matriz de interferencia y todos los datos necesarios para los cálculos de potencia y utilidad, además de las funciones que se utilizarán para el coloreado de los grafos, tanto para *Random* como para LCCS.
  - **analizar\_resultados.py:** este script importa las funciones definidas en `wifi_utility.py` y, a partir de un grafo seleccionado, calcula la utilidad de este junto con el intervalo de confianza y la desviación típica. En este script es donde se utiliza el coloreado de grafos mediante asignación aleatoria. Este proceso se replica en base a las funciones `randint` y `choice` del módulo `random` de Python, que generan números pseudoaleatorios de entre una selección determinada, según con cuantos canales se trabaje en ese momento. La función más importante de este script, es la denominada `analizar_grafo`, en la que se determina el número de iteraciones que se van a realizar (se realizan 1000 iteraciones), se seleccionan los grafos NNG y UDG del escenario sobre el que se aplique el método en cada ejecución y, como se ha

mencionado, se realiza el coloreado en función del número de canales seleccionado, a partir de las funciones de utilidad importadas del script anterior, presentando como resultado en la consola los valores de la utilidad media de las 1000 iteraciones en ese grafo concreto, la desviación estándar y el intervalo de confianza.

- **lccs\_jmg\_limpio.py:** de la misma forma que hace el script `analizar_resultados.py`, importa las funciones de `wifi_utility.py` para aplicarlas al cálculo de la utilidad con el algoritmo LCCS. Este algoritmo se aplica realizando 50 rondas de 5 iteraciones, quedándose con el mejor resultado de utilidad de cada iteración. Finalmente, se proporciona el resultado de la media de las mejores utilidades y su respectivo intervalo de confianza. A diferencia del script anterior, el algoritmo se aplica en cada ejecución a los cuatro grafos (25%, 50%, 75% y 100% de ocupación) a la vez, para el número de canales seleccionado.
  - **curvas\_rnd\_sin\_interf.py:** se encarga de la representación gráfica, en función del número de canales, de los valores de utilidad junto con sus intervalos de confianza obtenidos con los scripts anteriores para el caso sin interferencias. Las tareas llevadas a cabo de representación se realizan gracias a la librería `matplotlib` de Python y sus distintas funciones.
  - **curvas\_ci.py:** funciona de la misma manera que el script anterior, es decir, permite obtener las gráficas de los valores de utilidad con los intervalos de confianza en función del número de canales, pero ahora para los casos con interferencias. Como se ha explicado en el script anterior, este también genera las gráficas a partir de las funciones de la librería `matplotlib` de Python.
- NetworkX [25]:

Es un *framework* o entorno de Python dedicado a la creación, manipulación y estudio de la estructura, dinámica y funciones de redes complejas, permitiendo crear y emplear grafos orientados a redes. También permite el uso de estructuras de datos para grafos, digrafos (aristas con sentido definido) y multigrafos (posibilidad de más de una arista entre dos nodos). En este caso se ha utilizado la versión de NetworkX 1.1, ya que es la que se venía utilizando en los scripts originales proporcionados por el tutor. Esta herramienta ha sido

importante a la hora de trabajar con los grafos descritos anteriormente, ya que permite la caracterización de los elementos del grafo, permitiendo, por ejemplo, asignar colores, clientes, peso, etc.

- **Digitizelt [11]**

Se trata de un software de digitalización empleado para obtener los valores de los puntos de las gráficas proporcionadas en dos de los artículos de los que se han extraído los datos de las matrices de interferencia cocanal. En esos dos casos no se proporcionaban los datos numéricos, por lo que se ha recurrido a esta herramienta, escaneando las gráficas y digitalizándolas, determinando los rangos de los ejes y seleccionando los puntos de los que se deseaba obtener los valores. A continuación, se puede observar la interfaz del software durante la obtención de los valores de la gráfica de la matriz de [24].

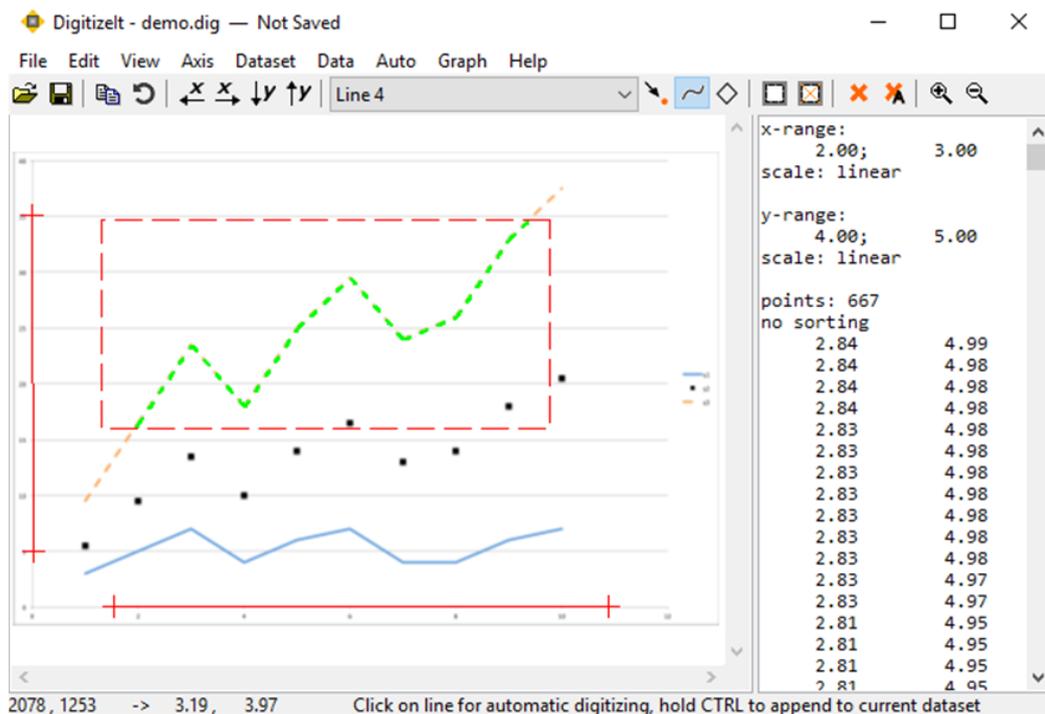


Figura 13 Interfaz software Digitizelt [11]

- **RefWorks [31]**

Es un programa que permite almacenar, formatear, organizar y gestionar toda la bibliografía consultada durante el desarrollo del trabajo a través de una base de datos personal y accesible online desde cualquier equipo. Sincronizada con el editor de texto utilizado para redactar la memoria del TFG, en este caso Microsoft Word, posibilita la utilización de citas y creación de la bibliografía en el formato del convenio que se desee o requiera cumplir de manera sencilla. Esta herramienta ha sido de utilidad durante la

redacción de la memoria del trabajo más que durante el desarrollo de este, pero que de igual manera ha facilitado la tarea del autor.

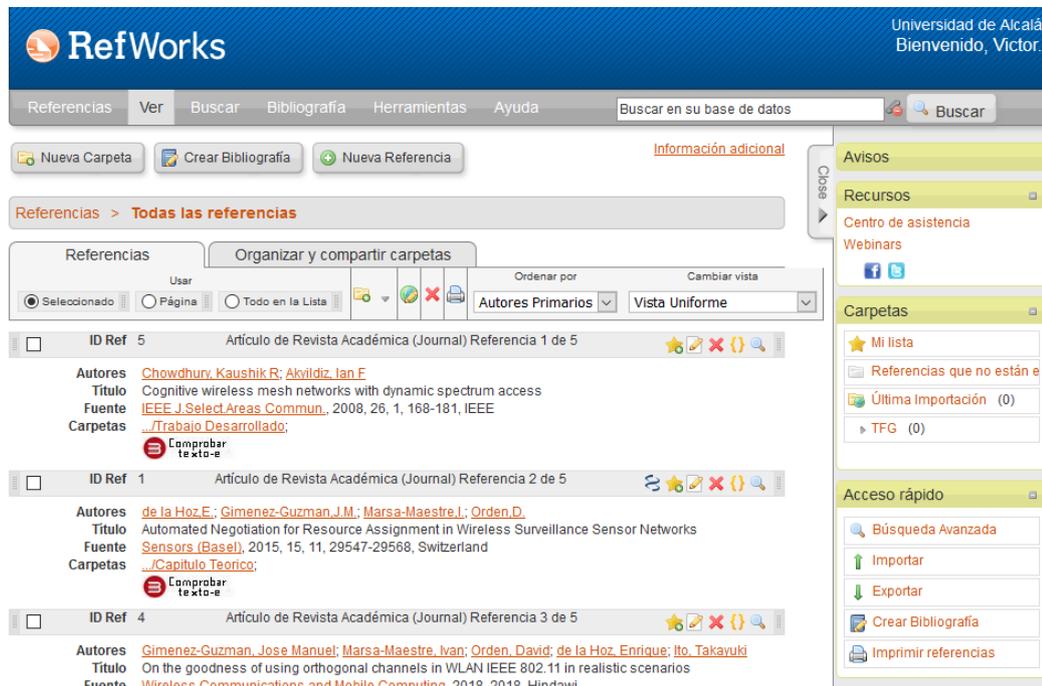


Figura 14 Interfaz web Refworks [31]

- **GanttProject [12]**

Es el software elegido para realizar el diagrama de Gantt que representa la duración de cada una de las tareas que componen el desarrollo del TFG. Dicho diagrama se presenta más adelante en la parte correspondiente a la planificación dentro del pliego de condiciones.

Este programa permite la creación de diagramas de Gantt determinando las fechas de inicio y fin de las tareas, así como la dependencia o relación que existe entre ellas.

A continuación, se muestra una captura de pantalla de la interfaz del software descrito, ya que más adelante se podrá ver en detalle el diagrama de Gantt diseñado.

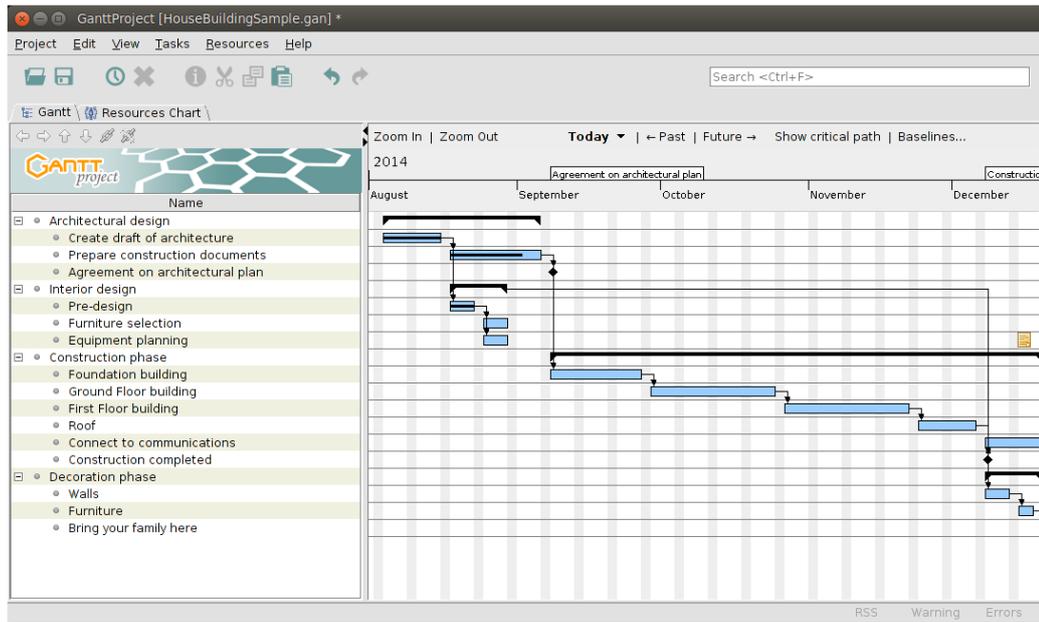


Figura 15 Interfaz del software GanttProject [12]

### 7.3. Desarrollo

Durante esta sección, se van a detallar las fases de las que ha constado el trabajo realizado, así como la serie de tareas llevadas a cabo durante cada una de las mismas.

- **Documentación y aprendizaje:** Una vez definido el tema del TFG con el tutor, empezó una fase de lectura, documentación, proceso de aprendizaje y familiarización con el manejo de las herramientas software y scripts proporcionados. Durante estos primeros pasos fueron muy importantes los artículos [10] y [13] proporcionados por el tutor, los *papers* de los estudios de los que se iban a obtener las matrices de interferencia, así como el tiempo empleado comprendiendo y tratando de ejecutar los scripts proporcionados por el tutor. Durante esta etapa es en la que surgieron más dudas y errores, debido a la curva de aprendizaje que tuvo lugar, sin embargo, una vez superada, se pudo continuar de manera satisfactoria con el desarrollo del trabajo.
- **Simulaciones y experimentos:** Después de superar el período de aprendizaje inicial, se inició una fase que se centró en los cálculos, experimentos y simulaciones de los distintos casos en los que se divide el escenario principal, explicados anteriormente. Se trata de la parte central del trabajo, ya que todos los resultados obtenidos y experimentos realizados son la base que permitirá la comparación entre los distintos casos y la extracción de una serie de conclusiones, que no son otras que el fin que persigue este trabajo y donde reside el interés de este estudio, ya que, al no haberse realizado previamente algo similar, cualquier conclusión obtenida será de interés y

tendrá que, al menos, ser tomada en cuenta en los subsiguientes estudios e investigaciones en este campo.

- **Obtención de conclusiones:** Una vez terminados los experimentos, se procederá al análisis comparativo propiamente dicho, ya que como se ha comentado, la fase anterior era la que proporcionaba la base para la que se inicia a continuación. Todas las conclusiones extraídas y resultados obtenidos, así como la comparación entre el comportamiento de las distintas matrices, será explicado y mostrado en profundidad en el siguiente capítulo de esta memoria, ya que el objetivo de esta sección no es otro que explicar el proceso que se ha seguido durante el trabajo, sin entrar en detalles, así como las tareas realizadas y los problemas que se han encontrado durante el camino.

## 8. Experimentos y resultados

Una vez explicada la teoría necesaria, los cálculos teóricos que se van a realizar, los datos de los que se dispone, las herramientas que van a permitir el desarrollo del trabajo y el escenario en el que se va a centrar, en este capítulo se procede a detallar todo el proceso seguido en la realización de los experimentos, tanto los cálculos de utilidad y sus respectivos intervalos de confianza en función del tipo de asignación y el número de canales, como las gráficas obtenidas en los distintos casos que van a permitir el análisis comparativo en el que reside la mayor parte del interés de este estudio.

### 8.1. Cálculos de utilidad con intervalos de confianza y asignación de canales

Durante la explicación teórica del proceso de cálculo y aplicación de las ecuaciones, se han ido detallando los parámetros que forman parte de dichas expresiones, así como su significado y, en algunos casos, su valor. A continuación, a modo de resumen, se muestra una lista completa de los valores que toman cada uno de los parámetros que servirán para realizar los cálculos de las utilidades.

Parámetro	Valor
$P_t$	30 mW
$G_t$	0 dB
$G_r$	0 dB
$L$	40 dB
$\sigma$	-90 dBm
$h_t$	1,5 m
$h_r$	1,5 m
$\Psi$ (APs)	0,5
$\Psi$ (WDs)	0,2
$SINR_{min}$	10 dB
$SINR_{max}$	40 dB

Tabla 9 Resumen de parámetros

En lo respectivo a los cálculos de utilidad con intervalos de confianza, se van a obtener los resultados de aplicar las fórmulas ya explicadas. Éstas se encuentran escritas en lenguaje Python en los scripts `wifi_utility.py`, `analizar_resultados.py` (para *Random*) y `lccs_jmg_limpio.py` (para LCCS), explicados anteriormente, que permiten elegir la matriz de interferencia que se utiliza en cada caso y el número de canales entre los que se realiza la asignación, así como el grafo

concreto sobre el que se lanza el experimento en cada ocasión. Los intervalos de confianza con los que se trabaja son del 95%, independientemente del algoritmo utilizado.

Como ya se ha nombrado, las técnicas de asignación de canales que se van a utilizar son *Random* y LCCS, cuyos resultados se detallarán a continuación de esta explicación.

La asignación de canales se va a realizar, con ambos algoritmos, para los casos en los que se tengan tres (1, 7 y 13), cuatro (1, 5, 9 y 13), cinco (1, 4, 7, 10 y 13), siete (1, 3, 5, 7, 9, 11 y 13) y trece canales (todos). Cada una de estas asignaciones se representa gráficamente a continuación:

Usando tres canales (1, 7 y 13): Se puede observar que entre los canales 1, 7 y 13 no se produce solapamiento, ya que, como se explicó anteriormente, se trata de canales ortogonales.

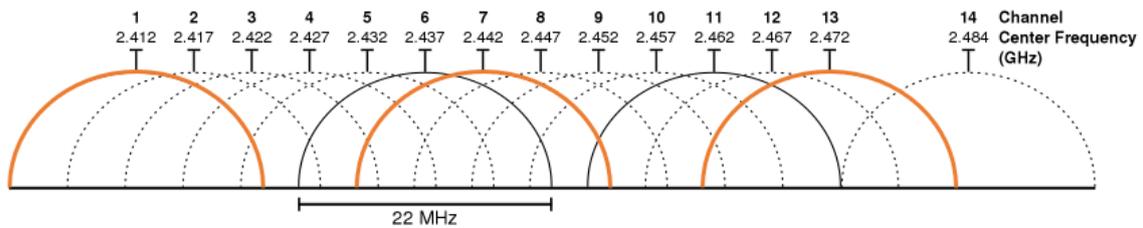


Figura 16 Asignación entre 3 canales (1, 7, 13)

Usando cuatro canales (1, 5, 9, 13): Aquí se empieza a visualizar el solapamiento entre los canales que entran en juego en la asignación y que irá aumentando en los siguientes casos.

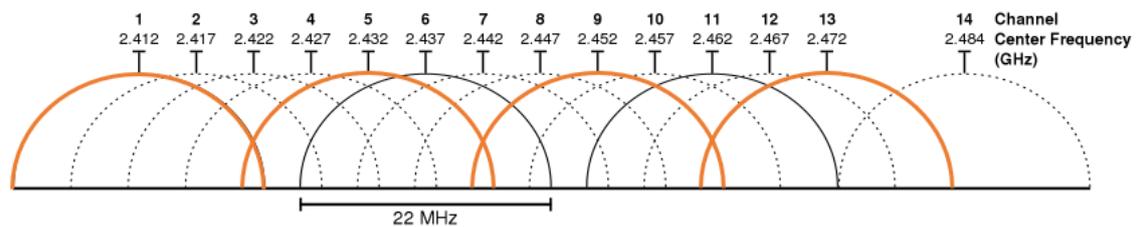


Figura 17 Asignación entre 4 canales (1, 5, 9, 13)

Usando cinco canales (1, 4, 7, 10 y 13): Se observa mayor solapamiento que en el caso con cuatro canales, como era previsible.

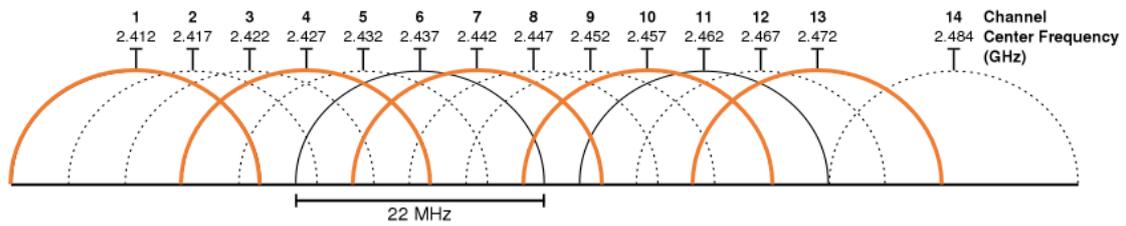


Figura 18 Asignación entre 5 canales (1, 4, 7, 10, 13)

Usando siete canales (1, 3, 5, 7, 9, 11 y 13): En este caso no solo se produce solapamiento con el canal más cercano, sino que además se puede observar solapamiento con el siguiente, es decir, el canal 1 solapa al canal 3, pero, además ahora solapa al canal 5.

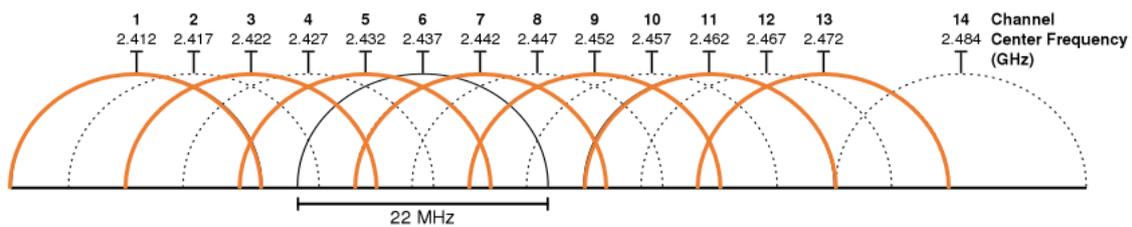


Figura 19 Asignación entre 7 canales (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13)

Usando los trece canales: Se tiene el solapamiento máximo entre canales, ya que, en este caso, se utilizan todos los disponibles. Este caso ya se introdujo al inicio de la explicación teórica, donde se mencionaba que los canales están separados por 5 MHz, mientras que el ancho de banda que necesita cada uno de ellos es de 22 MHz, lo cual produce los solapamientos que se observan en la figura.

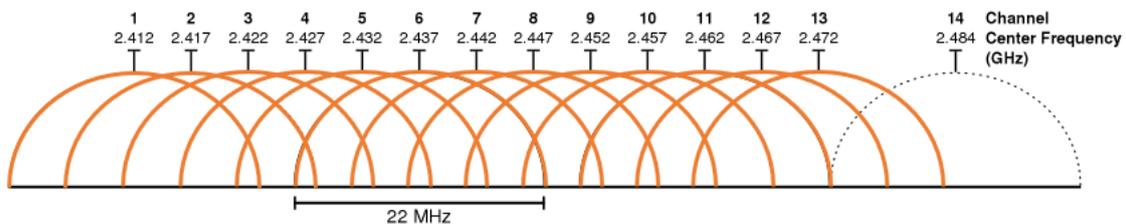


Figura 20 Asignación entre 13 canales (todos)

### 8.1.1. Asignación de canales aleatoria (*Random*)

Como ya se ha razonado, se corresponde con el problema de coloreado aleatorio de los grafos, replicado mediante Python a partir de funciones del módulo random, que generan números pseudoaleatorios de entre un conjunto de números que varía según el número de canales y entre los que se haga la asignación. Como se ha podido ver en detalle, la asignación se va a realizar para los casos en los que se tengan tres, cuatro, cinco, siete y trece canales.

Este proceso se va a seguir para todos los grafos que se describieron anteriormente, es decir, tres distribuciones distintas de las aulas y cuatro porcentajes de ocupación (25%, 50%, 75% y 100%) para cada distribución del escenario. Como ya se ha mencionado, los intervalos de confianza con los que se va a trabajar son del 95% y, para cada caso, se realizarán 1000 ejecuciones para acabar obteniendo la media de la utilidad, la desviación típica y el intervalo de confianza.

Se toma el caso de la distribución 1 para presentar los resultados durante esta explicación, proporcionando los resultados de las otras dos distribuciones en el ANEXO I, para no sobrecargar en exceso la exposición de este capítulo, ya que, como podrá observarse, el utilizar una distribución u otra no influye de manera significativa ni aporta información adicional en lo referente a las magnitudes obtenidas.

- **Caso sin interferencias**

Recordando lo que ya se había comentado, en este caso los cálculos se realizan con una matriz identidad como matriz de interferencia, es decir, la diagonal principal compuesta por unos y el resto de las posiciones completadas con ceros, ya que es así la forma de expresar que no hay interferencias provocadas por los canales adyacentes.

Los resultados de utilidad e intervalos de confianza en función del número de canales obtenidos al aplicar el método descrito para este caso son los siguientes:

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	91.093	1.564	130.707	1.992	161.665	2.348	211.558	2.548	286.966	2.749
50%	140.582	2.863	207.789	3.698	268.159	4.406	351.728	5.063	491.632	5.198
75%	199.484	4.068	289.289	5.483	379.450	6.473	494.442	7.307	696.020	7.479
100%	223.011	4.661	346.705	6.222	454.504	7.583	597.750	8.303	869.713	9.327

Tabla 10 Resultados de utilidad caso sin interferencias

- **Casos con interferencias**

Estos han sido explicados detalladamente en el capítulo anterior, exponiendo los valores de las matrices de interferencia obtenidas de los distintos artículos, por lo que en este apartado se van a presentar los resultados de los cálculos obtenidos a raíz del uso de cada una de ellas.

1. Matrices de W.S.C.L. [39]

- a. Máscara ideal

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	90.887	1.529	42.360	0.727	53.906	1.054	45.232	0.876	40.045	0.701
50%	141.867	2.886	55.308	1.324	73.054	1.771	60.318	1.508	49.063	1.188
75%	195.868	3.966	78.114	1.719	103.050	2.559	84.530	1.967	71.342	1.581
100%	221.415	4.523	86.651	1.995	117.479	2.852	92.902	2.209	79.906	1.789

Tabla 11 Resultados de matriz de [39] con máscara ideal

- b. Factor de roll-off = 1

- i.  $k = 2$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	91.350	1.481	71.396	0.983	67.660	1.034	65.771	0.954	62.822	0.953
50%	139.333	2.793	94.113	1.633	91.952	1.953	87.201	1.728	86.917	1.843
75%	192.009	3.897	134.278	2.247	129.268	2.647	125.760	2.317	119.631	2.519
100%	224.583	4.486	150.169	2.351	146.744	2.969	138.289	2.483	133.659	2.579

Tabla 12 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y  $k=2$

- ii.  $k = 3$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	91.585	1.511	59.088	0.799	61.719	1.068	56.993	0.906	57.254	0.946
50%	140.292	2.960	77.774	1.501	83.770	1.854	76.986	1.656	74.287	1.670
75%	195.487	4.022	108.706	1.852	116.015	2.619	106.470	2.163	105.413	2.271
100%	225.309	4.560	121.490	2.051	132.695	2.850	119.399	2.394	118.887	2.631

Tabla 13 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	90.555	1.478	53.329	0.785	59.468	1.049	53.361	0.866	53.073	0.858
50%	140.785	2.841	69.429	1.386	82.4534	1.938	68.923	1.546	70.208	1.691
75%	194.766	3.999	97.427	1.873	112.224	2.590	99.878	2.084	100.330	2.269
100%	227.910	4.668	107.839	2.005	124.541	2.851	110.474	2.385	111.385	2.574

Tabla 14 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y  $k=4$

c. Factor de roll-off = 0,5

i.  $k = 2$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	91.371	1.514	131.180	1.978	88.703	1.204	92.322	1.481	82.586	1.342
50%	140.386	2.804	210.365	3.900	123.316	2.169	134.435	2.778	118.718	2.398
75%	193.328	3.965	293.391	5.450	174.624	3.13	184.732	3.759	161.564	3.121
100%	220.722	4.414	352.089	6.316	195.509	3.240	212.756	4.336	187.257	3.683

Tabla 15 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=2$

ii.  $k = 3$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	91.504	1.532	129.040	1.958	74.642	1.095	84.101	1.462	74.427	1.250
50%	141.300	2.905	208.342	3.785	101.866	1.977	127.904	2.811	106.435	2.287
75%	193.792	4.058	296.093	5.498	144.338	2.635	178.873	3.711	147.444	3.170
100%	220.757	4.440	338.890	6.283	164.420	3.146	203.921	4.477	168.393	3.567

Tabla 16 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	90.970	1.526	128.579	1.986	70.031	1.098	82.600	1.448	70.349	1.228
50%	140.591	2.794	211.677	3.877	95.608	2.013	124.662	2.757	99.807	2.197
75%	194.377	3.891	290.327	5.433	129.595	2.670	171.985	3.795	139.959	3.168
100%	226.033	4.486	342.068	6.270	148.001	2.883	198.730	4.222	158.612	3.471

Tabla 17 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=4$

d. Factor de *roll-off* = 0,25

i.  $k = 2$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	90.985	1.528	129.726	2.035	162.412	2.244	93.740	1.507	101.606	1.677
50%	143.863	2.858	209.398	3.769	267.291	4.426	138.824	2.860	156.481	3.120
75%	195.879	4.167	291.666	5.271	369.391	6.446	191.681	3.922	214.139	4.435
100%	227.084	4.590	344.586	5.804	443.425	7.579	220.924	4.447	249.832	5.138

Tabla 18 Resultados matriz de [39] con factor de *roll-off*=0,25 y  $k=2$

ii.  $k = 3$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	92.112	1.508	128.995	1.928	164.206	2.287	88.189	1.491	97.537	1.634
50%	141.795	2.883	208.514	3.773	268.936	4.358	128.043	2.732	148.056	3.203
75%	193.034	4.091	297.587	5.553	373.938	6.406	182.485	4.095	205.084	4.319
100%	221.218	4.408	341.447	6.161	445.804	7.600	208.088	4.379	240.817	5.165

Tabla 19 Resultados matriz de [39] con factor de *roll-off*=0,25 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	91.935	1.523	129.477	2.009	161.835	2.321	83.688	1.464	95.292	1.718
50%	138.170	2.745	209.906	3.793	264.762	4.445	126.706	2.797	143.411	3.136
75%	193.461	3.998	289.324	5.578	372.978	6.210	174.615	3.854	202.011	4.674
100%	225.490	4.570	345.223	6.450	441.724	7.408	200.399	4.644	237.336	5.142

Tabla 20 Resultados matriz de [39] con factor de *roll-off*=0,25 y  $k=4$

2. Matriz de M.S.B.A. [24]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	91.990	1.518	95.108	1.311	103.598	1.456	82.895	1.176	80.704	1.150
50%	139.667	2.835	132.755	2.220	145.122	2.371	113.917	2.050	107.909	1.871
75%	194.065	3.963	185.530	2.964	206.679	3.326	160.286	2.680	154.283	2.614
100%	226.013	4.461	212.203	3.432	230.501	3.736	184.103	3.128	173.259	2.823

Tabla 21 Resultados matriz de [24]

### 3. Matriz de Kratz [19]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	91.792	1.543	129.154	1.986	74.011	1.065	88.512	1.471	76.704	1.228
50%	141.000	2.856	208.866	3.730	100.265	1.925	133.446	2.814	109.098	2.319
75%	196.589	4.152	293.114	5.541	141.634	2.508	182.096	3.833	153.962	3.433
100%	224.984	4.543	344.990	6.413	158.835	3.029	209.885	4.463	171.099	3.643

Tabla 22 Resultados matriz de [19]

### 4. Matriz de C.A. [7]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	92.408	1.442	59.302	0.809	69.674	1.056	59.846	0.924	58.540	0.883
50%	142.527	2.862	75.628	1.496	96.278	1.995	79.525	1.646	75.768	1.536
75%	195.753	4.062	111.121	1.980	131.964	2.848	110.896	2.270	109.696	2.186
100%	221.932	4.559	122.761	2.214	147.946	2.750	123.218	2.409	119.703	2.289

Tabla 23 Resultados matriz de [7]

### 5. Matriz de S.R.Y.B. [34]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	91.764	1.505	62.340	0.863	63.611	1.013	60.487	0.922	52.980	0.768
50%	140.899	2.800	79.790	1.502	87.186	1.974	78.842	1.699	68.008	1.330
75%	201.384	4.093	114.173	1.974	120.675	2.524	110.297	2.135	94.629	1.791
100%	223.982	4.616	129.378	2.238	135.287	2.880	123.599	2.411	106.664	2.084

Tabla 24 Resultados matriz de [34]

### 8.1.2. Asignación de canales por LCCS

Siguiendo con las explicaciones anteriores, este tipo de asignación se realiza a partir de aplicar el algoritmo con el mismo nombre al escenario que ocupa a este trabajo. De manera análoga a la asignación aleatoria, se obtienen los resultados de utilidad y sus intervalos de confianza en función del número de canales entre los que se hace la asignación, variando, como ya es sabido, entre tres, cuatro, cinco, siete y trece canales. A diferencia de la asignación *Random*, para LCCS solo se han considerado los resultados obtenidos para los grafos correspondientes a la distribución 1 de las aulas de la Escuela, ya que, como se puede apreciar analizando el caso de *Random*, no existen diferencias notables entre los resultados de la distribución 1 con los obtenidos para las distribuciones 2 y 3. Por tanto, con LCCS se ha optado por aportar menor cantidad de resultados y mayor profundidad en el análisis, en vez de incluir una cantidad mucho mayor de resultados que no aportan información adicional al estudio, tal y como se puede observar comparando los resultados de las tres distintas distribuciones aplicando la asignación *Random*.

De la misma forma que en la asignación aleatoria, los intervalos de confianza son del 95% y el algoritmo se ejecutará en cada caso durante 50 rondas de 5 iteraciones cada una, obteniendo la media de las mejores utilidades que se van obteniendo y el consiguiente intervalo de confianza.

A continuación, se muestran las tablas de resultados obtenidos con la aplicación de cada una de las distintas matrices, del mismo modo que en el caso anterior.

- **Caso sin interferencias**

De la misma forma que en la asignación aleatoria, para el caso sin interferencias los cálculos se realizan con una matriz identidad como matriz de interferencia.

Los resultados de utilidad e intervalos de confianza en función del número de canales obtenidos al aplicar LCCS son los siguientes:

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	157.727	7.402	248.186	6.940	320.164	3.752	369.501	3.468	408.765	2.658
50%	261.958	10.678	412.104	10.884	542.130	13.019	629.784	7.349	697.930	4.715
75%	373.363	18.777	586.351	16.630	792.632	10.891	897.231	11.923	987.829	5.746
100%	424.511	19.336	738.344	20.961	940.404	15.878	1117.283	17.351	1259.199	8.507

Tabla 25 Resultados de utilidad caso sin interferencias

- **Casos con interferencias**

Las matrices correspondientes a cada caso se han detallado en el capítulo anterior. Los resultados obtenidos al utilizar cada una de esas matrices con el algoritmo LCCS se muestran a continuación.

1. Matrices de W.S.C.L. [39]

- a. Máscara ideal

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	162.405	7.600	51.196	2.602	68.893	4.192	61.523	3.3194	55.3934	3.618
50%	254.755	13.053	62.829	4.860	98.877	7.397	91.443	6.540	71.664	5.405
75%	369.977	18.073	83.699	3.449	141.437	9.860	126.177	8.942	99.457	8.611
100%	419.743	17.800	96.911	5.298	150.034	7.842	134.995	10.945	113.303	6.805

Tabla 26 Resultados de matriz de [39] con máscara ideal

- b. Factor de *roll-off* = 1

- i.  $k = 2$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	155.488	7.348	116.049	3.331	103.757	4.662	97.039	4.500	90.420	3.626
50%	248.503	11.748	143.491	5.915	139.125	5.659	132.433	6.200	132.019	7.350
75%	391.458	20.653	207.067	7.838	195.825	9.113	184.024	9.458	176.389	10.110
100%	432.613	19.338	239.228	7.588	220.983	10.646	210.003	9.270	200.091	14.196

Tabla 27 Resultados matriz de [39] con factor de *roll-off*=1 y  $k=2$

- ii.  $k = 3$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	157.251	6.341	83.215	2.730	86.184	4.060	79.996	3.265	78.251	4.142
50%	251.695	11.095	103.934	5.877	117.058	6.363	110.513	6.021	109.557	5.378
75%	385.562	20.838	142.451	5.377	175.482	10.962	161.711	9.107	155.349	9.802
100%	423.497	17.154	171.631	7.831	189.355	10.441	179.568	8.809	173.624	12.709

Tabla 28 Resultados matriz de [39] con factor de *roll-off*=1 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	164.450	8.196	74.788	2.731	83.097	4.733	73.303	3.042	73.450	4.078
50%	268.234	11.406	92.665	5.182	114.279	5.843	107.580	5.918	106.373	6.330
75%	383.975	18.577	120.326	5.001	165.021	8.890	147.422	10.254	148.625	10.169
100%	436.628	19.068	140.029	6.590	176.361	10.302	150.488	8.185	161.989	9.277

Tabla 29 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y  $k=4$

c. Factor de roll-off = 0,5

i.  $k = 2$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	159.213	7.630	243.193	7.449	149.138	3.495	138.808	5.210	118.112	4.661
50%	247.964	11.129	403.568	11.096	207.396	6.833	226.641	11.642	173.318	7.132
75%	368.241	19.676	612.740	19.152	293.363	12.222	301.913	16.619	254.355	12.105
100%	425.402	18.937	745.388	19.128	324.156	10.465	335.323	13.646	285.853	15.290

Tabla 30 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=2$

ii.  $k = 3$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	160.246	7.522	239.994	7.348	114.592	4.088	132.904	6.007	103.524	4.336
50%	254.936	13.041	403.479	9.727	163.008	6.396	199.947	8.706	153.645	6.707
75%	371.456	19.753	600.701	19.812	222.050	9.857	286.926	16.538	224.117	13.241
100%	428.012	22.183	731.541	21.207	251.496	10.904	317.278	14.755	241.875	10.811

Tabla 31 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	159.264	7.559	240.534	8.272	103.138	3.904	130.567	6.133	99.291	4.078
50%	265.111	12.624	406.033	10.181	139.969	6.389	197.239	10.925	147.813	7.210
75%	380.592	20.723	604.766	18.028	184.087	9.984	285.181	18.040	215.568	14.103
100%	417.314	19.552	735.951	16.545	227.331	9.357	323.087	16.105	235.578	14.641

Tabla 32 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=4$

d. Factor de *roll-off* = 0,25

i.  $k = 2$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	161.952	7.255	249.303	8.005	318.036	4.435	144.537	5.399	148.829	6.551
50%	256.250	10.987	408.520	11.408	539.695	9.885	218.792	11.637	235.744	10.410
75%	366.633	19.800	588.603	19.308	797.823	12.132	314.43	17.367	327.322	14.436
100%	425.201	19.197	726.738	19.347	949.090	16.484	353.493	13.441	380.609	15.146

Tabla 33 Resultados matriz de [39] con factor de *roll-off*=0,25 y  $k=2$

ii.  $k = 3$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	164.799	7.182	245.179	7.980	314.869	5.065	136.937	5.314	142.797	7.290
50%	264.438	11.395	412.680	9.289	546.108	10.903	215.931	10.596	231.015	12.270
75%	396.827	19.429	596.048	17.540	799.984	12.587	299.072	12.749	326.983	19.550
100%	446.093	19.138	743.713	21.528	939.298	17.588	329.223	18.729	355.831	18.742

Tabla 34 Resultados matriz de [39] con factor de *roll-off*=0,25 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	158.234	8.333	241.666	8.086	318.359	3.988	128.681	5.541	139.951	6.644
50%	262.814	11.000	410.851	11.530	542.744	11.918	201.453	7.889	224.381	10.818
75%	391.596	18.840	607.027	17.149	796.510	8.898	283.895	15.373	339.965	19.288
100%	433.768	18.447	733.572	20.179	936.869	16.148	304.300	14.993	359.325	20.903

Tabla 35 Resultados matriz de [39] con factor de *roll-off*=0,25 y  $k=4$

2. Matriz de M.S.B.A. [24]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	157.974	7.623	168.615	4.606	178.921	3.506	122.595	4.139	114.312	4.204
50%	260.826	11.262	237.678	7.760	247.845	7.118	181.007	7.189	157.524	5.710
75%	369.805	19.175	334.447	9.402	361.623	11.253	246.090	10.801	221.313	9.411
100%	415.780	19.820	402.692	11.329	413.263	11.297	280.241	10.957	248.482	7.767

Tabla 36 Resultados matriz de [24]

### 3. Matriz de Kratz [19]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	159.060	7.292	244.491	7.554	118.324	4.421	134.798	5.051	108.681	5.810
50%	254.497	12.674	410.560	12.768	162.530	6.983	211.977	9.950	164.070	9.756
75%	375.786	19.743	595.576	19.254	227.367	11.261	304.294	14.164	225.404	11.364
100%	435.478	20.575	714.869	26.075	257.519	12.056	343.925	18.752	262.021	13.969

Tabla 37 Resultados matriz de [19]

### 4. Matriz de C.A. [7]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	159.311	7.539	87.465	3.211	100.329	4.093	88.362	3.909	80.565	3.293
50%	257.936	11.216	109.881	5.232	147.807	6.123	122.075	6.072	111.351	6.338
75%	373.262	18.691	147.211	5.384	199.916	8.750	156.147	7.847	158.793	9.142
100%	426.269	18.768	174.141	6.546	219.602	8.860	181.438	9.658	174.133	8.826

Tabla 38 Resultados matriz de [7]

### 5. Matriz de S.R.Y.B. [34]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	155.362	6.774	89.138	3.606	89.950	4.425	85.481	3.745	70.938	3.311
50%	264.837	12.676	115.413	5.191	123.300	5.875	118.615	5.992	97.148	5.597
75%	393.507	20.426	155.376	5.987	175.896	11.282	173.295	10.427	141.243	8.134
100%	431.202	20.836	180.539	6.503	197.039	11.422	185.302	10.237	151.136	7.920

Tabla 39 Resultados matriz de [34]

## 8.2. Gráficas y análisis

### 8.2.1. Asignación Random: Gráficas para cada matriz con distribución 1 de las aulas

Siguiendo el mismo razonamiento que durante la presentación de los resultados numéricos, en este apartado se van a exponer las gráficas correspondientes a la distribución 1 de las aulas, obtenidas a partir de la representación gráfica de los datos aportados antes. El resto de las gráficas se proporcionan en el ANEXO II, ya que, de la misma forma que con los datos numéricos, estas no aportan una diferencia notable o relevante en lo que concierne a este estudio, por tanto, se ha optado por no saturar, en la medida de lo posible, la explicación de estos apartados, añadiendo, como se ha mencionado, el resto de las gráficas y resultados en los ANEXOS I y II.

- **Caso sin interferencias**

En este caso, se presentan en la misma gráfica los valores de utilidad en función del número de canales, obtenidos para cada uno de los cuatro porcentajes de ocupación considerados. Como se puede apreciar, debido a la ausencia de interferencias, la utilidad crece según aumenta el número de canales utilizados, además de aumentar al crecer el grado de ocupación (crece al aumentar el número de clientes). Este resultado es el que cabía esperar, ya que, siguiendo la explicación teórica del cálculo de utilidad, cuanto más ocupación, mayor número de WDs a tener en cuenta para el cómputo de la utilidad y, al aumentar el número de canales disponibles, disminuye la probabilidad de que vértices adyacentes del grafo usen el mismo canal.

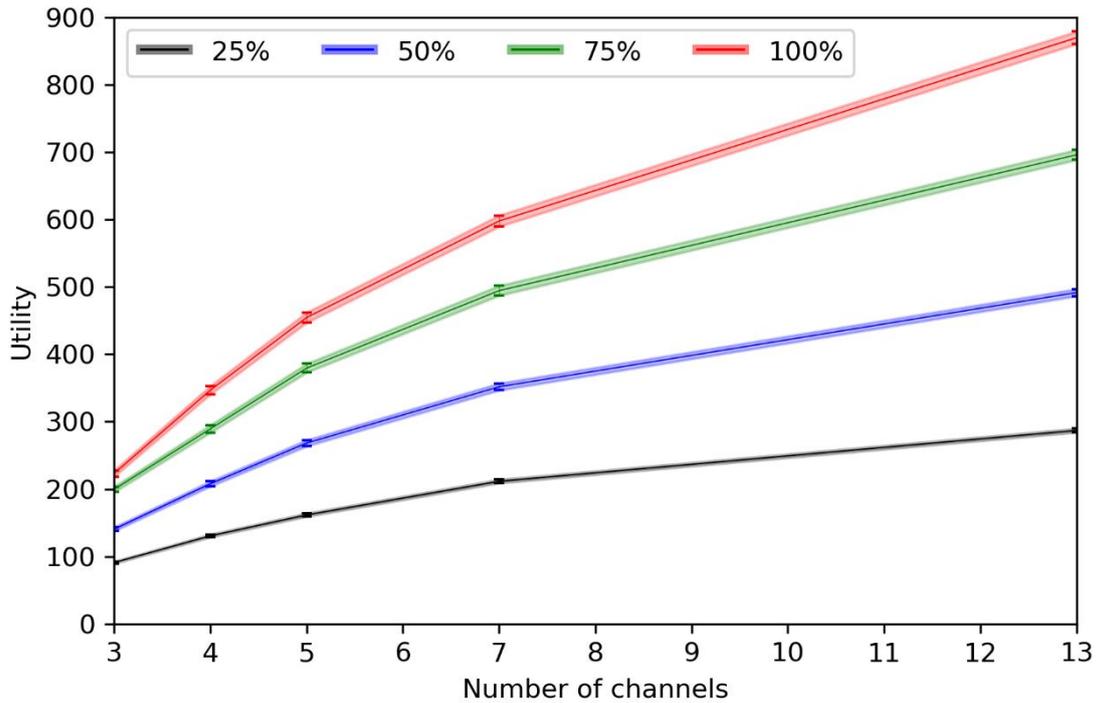


Figura 21 Gráfica caso sin interferencias

- **Casos con interferencias**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los distintos casos de las matrices de interferencia utilizadas, expresados de forma gráfica, siguiendo el mismo procedimiento que en el caso ideal. Al tratarse de un número mayor de casos que en el apartado sin interferencias, se irán comentando los aspectos más interesantes a tener en cuenta, así como las explicaciones y conclusiones que se puedan extraer, durante la presentación de las gráficas de cada caso.

En primer lugar, se va a hacer un repaso de las gráficas obtenidas para cada caso según el porcentaje de ocupación (como ya se ha puntualizado anteriormente, solo los casos de la distribución 1, mostrando el resto de las distribuciones en los ANEXOS). Una vez observado todos los casos por separado, se procederá a analizar y comparar todas las gráficas de todos los casos diferenciadas según el porcentaje de ocupación.

## 1. Matrices de W.S.C.L. [39]

Para comenzar, se tienen, a continuación, las gráficas obtenidas del uso de las matrices de [39].

### a. Máscara ideal

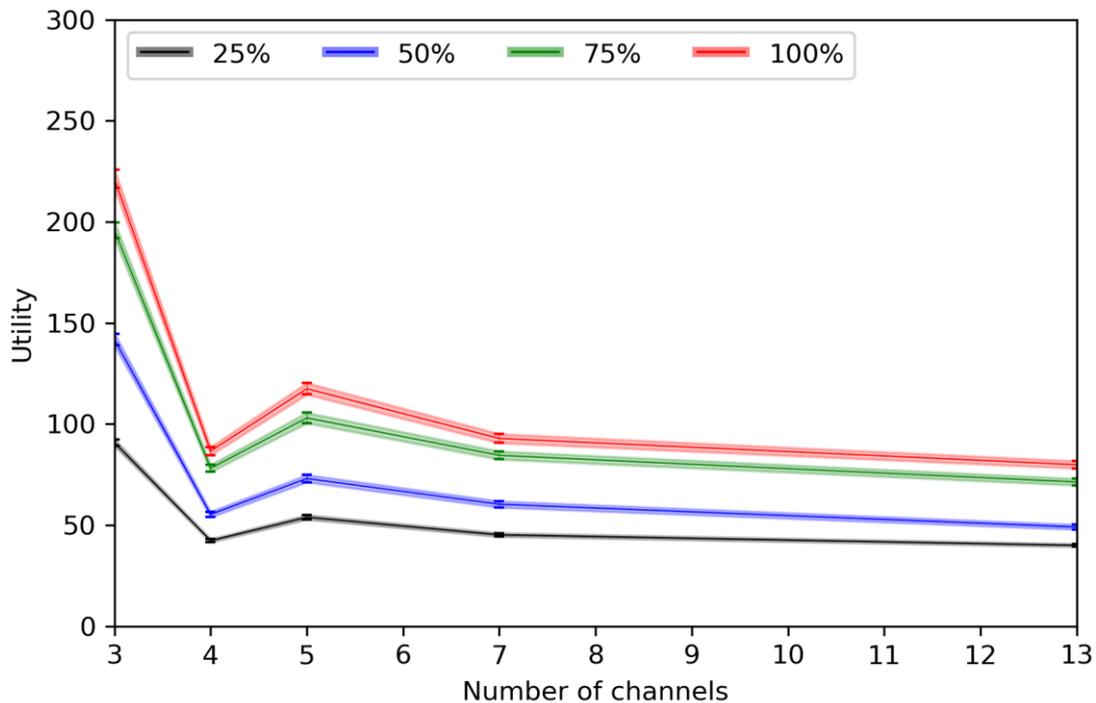


Figura 22 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, máscara ideal [39]

Tal y como se puede observar, de la misma manera que ocurría en el caso sin interferencias y como ocurrirá en el resto de los casos que se van a evaluar a continuación, la utilidad aumenta al aumentar el porcentaje de ocupación, es decir, al aumentar el número de clientes. Este aspecto, como ya se ha explicado antes concuerda con lo esperado, debido a la relación entre utilidad y WDs de la red. Sin embargo, a diferencia del caso ideal y como se podrá comprobar en los casos que siguen, debido a las interferencias, las líneas ya no son crecientes en su totalidad. En concreto, en este primer caso se aprecia que el pico máximo de utilidad se obtiene para 3 canales y el mínimo cuando se usan 4 para posteriormente volver a experimentar un pequeño crecimiento con 5 canales y a partir de ahí decrece suavemente, manteniéndose más o menos en valores estables.

b. Factor de *roll-off* = 1

i.  $k = 2$

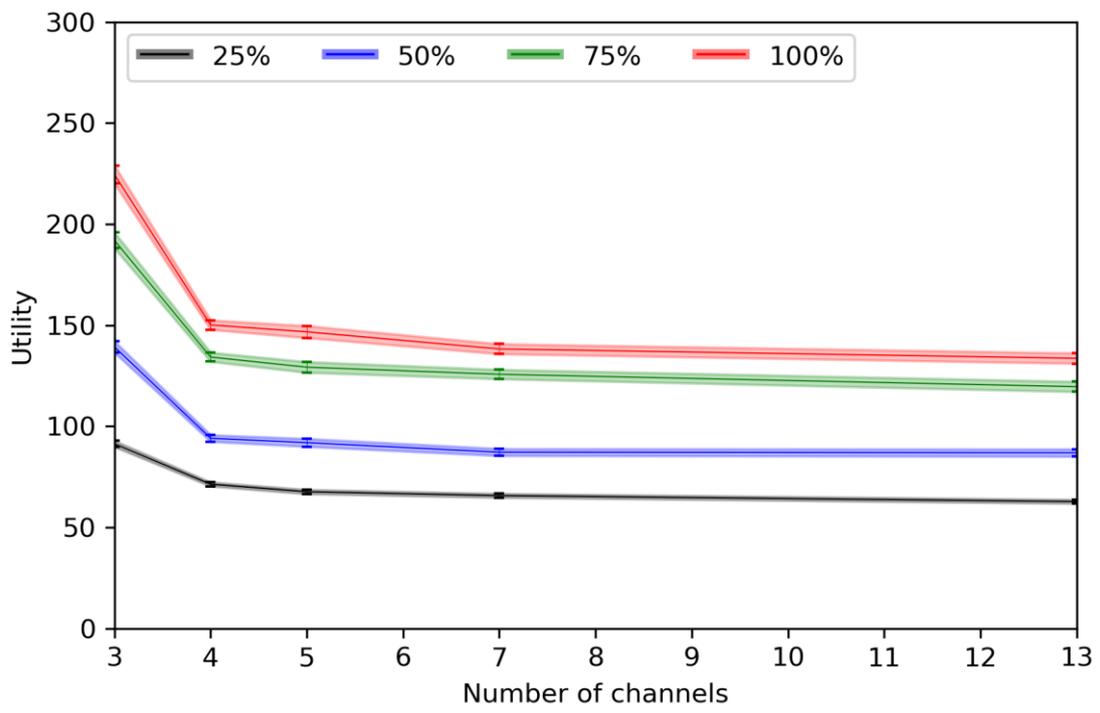


Figura 23 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=1 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

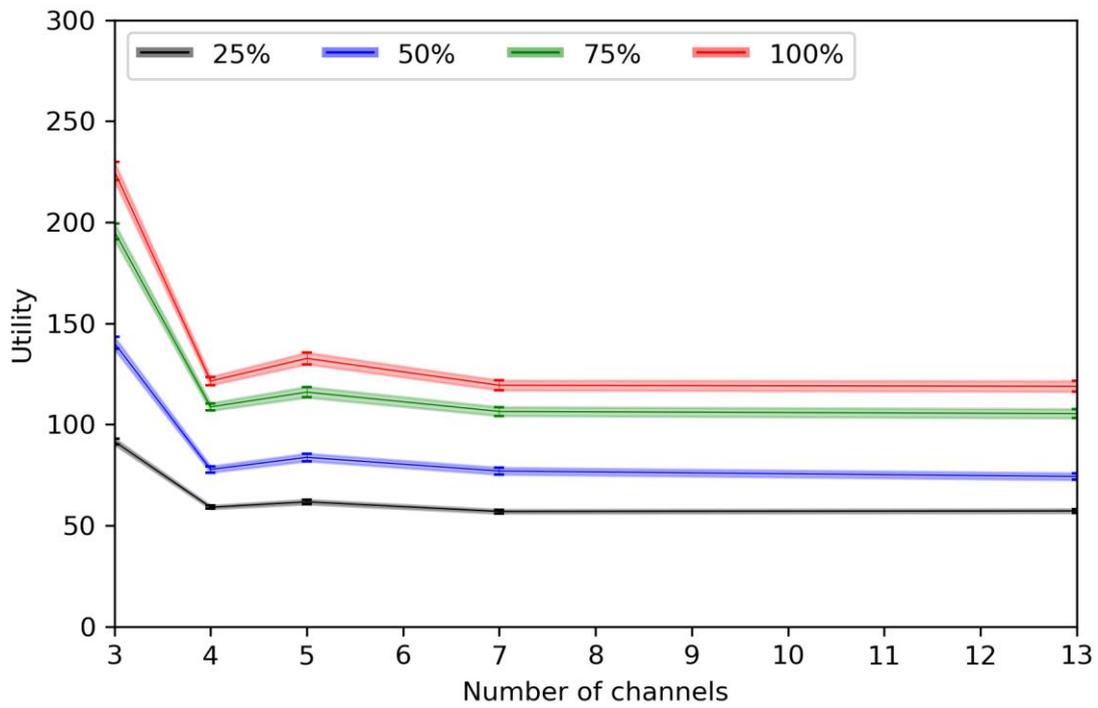


Figura 24 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y  $k=3$  [39]

iii.  $k = 4$

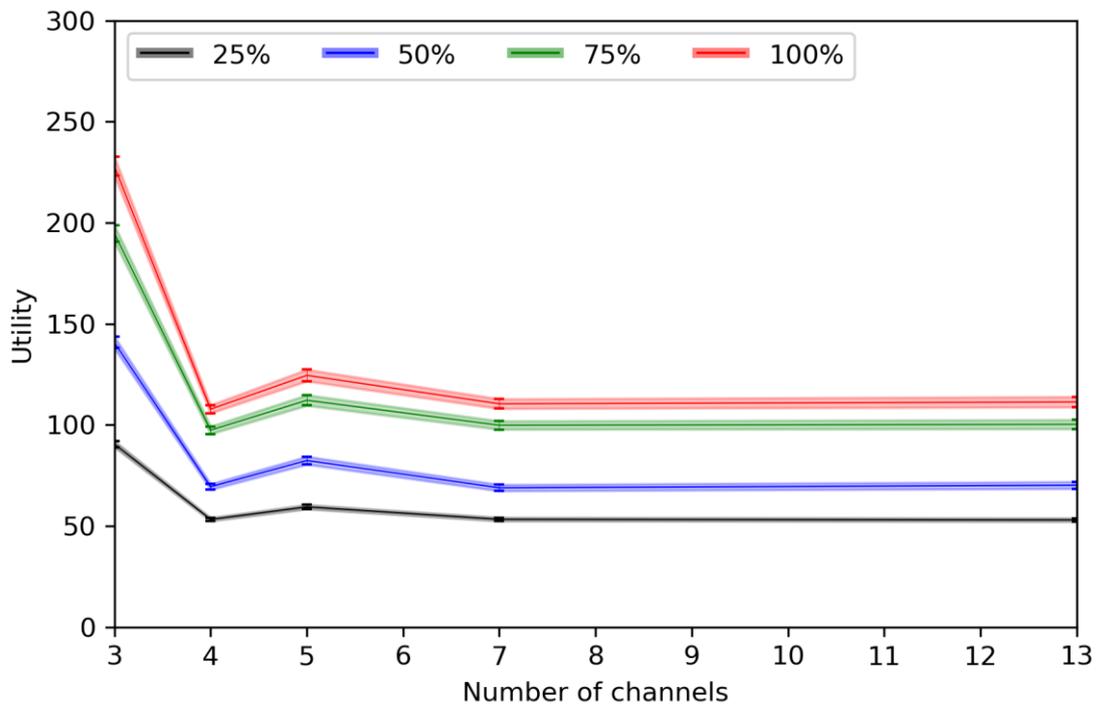


Figura 25 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y  $k=4$  [39]

Para el valor del factor de *roll-off* igual a 1, como ocurre en el resto de las matrices de [39], se tienen tres casos diferenciados por el parámetro  $k$ , tal y como se explicó durante la explicación de estas matrices. Observando las gráficas de los tres casos, a simple vista, se puede asegurar que al aumentar el valor de  $k$  el punto mínimo que aparece para 4 canales se hace más notable. En los casos de  $k = 2$  y los dos primeros (25% y 50% de ocupación) de  $k = 3$ , las gráficas describen un primer tramo descendente hasta 4 canales para después mantenerse casi constantes los valores de utilidad. Sin embargo, en los casos restantes, la situación es similar al caso de máscara ideal analizado anteriormente, es decir, se produce un mínimo en 4 canales, para crecer un poco en 5 canales, descendiendo suavemente otro tramo hasta quedarse estabilizados los valores. Este aumento de utilidad en 5 canales es menos acusado en este caso que para la matriz con máscara ideal y porcentajes altos de ocupación, de la misma forma que el primer descenso no alcanza valores tan bajos como con la máscara ideal.

c. Factor de *roll-off* = 0,5

i.  $k = 2$

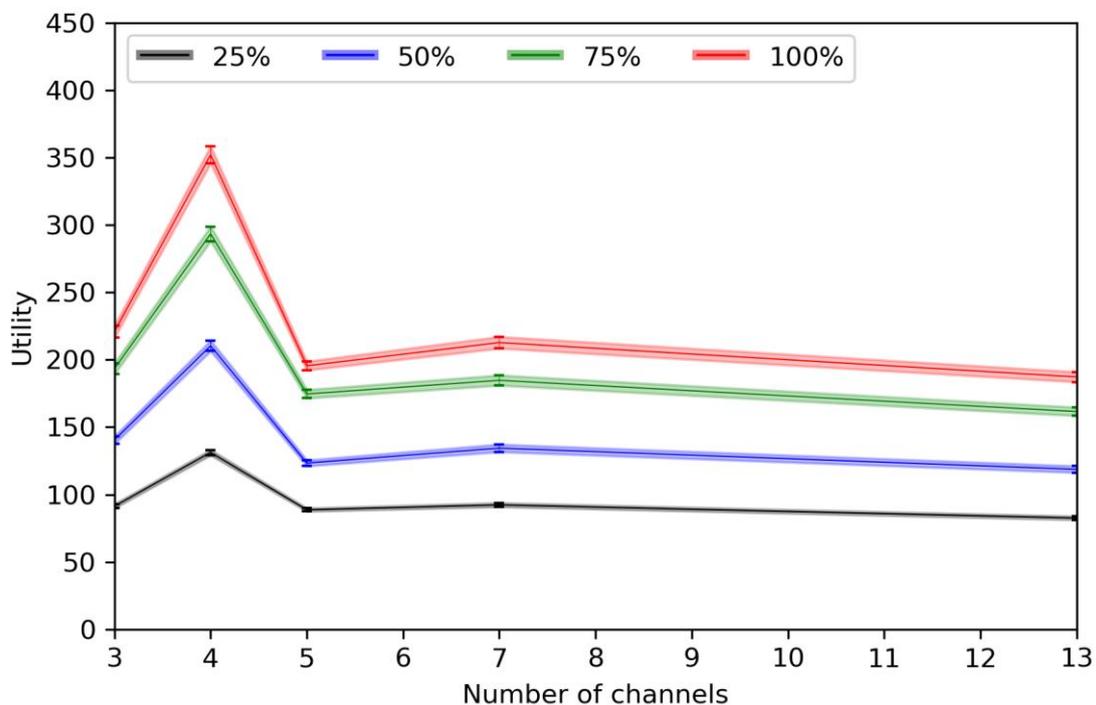


Figura 26 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=0,5 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

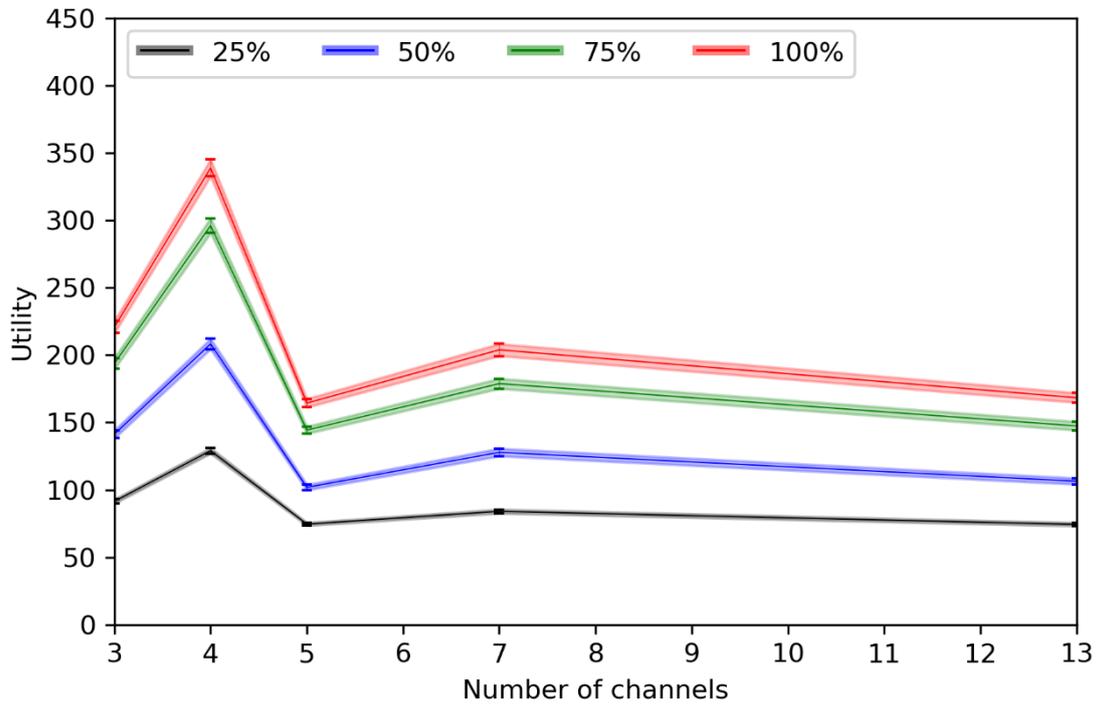


Figura 27 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y  $k=3$  [39]

iii.  $k = 4$

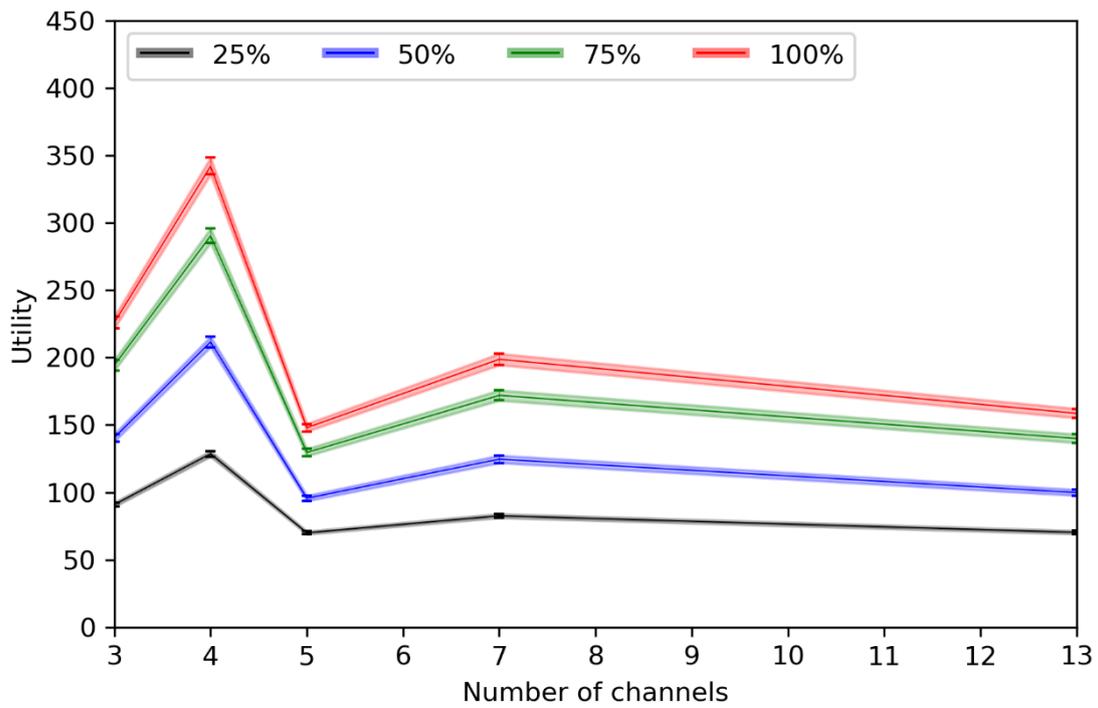


Figura 28 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y  $k=4$  [39]

Con factor de *roll-off* a 0,5 se aprecian, a simple vista, diferencias más evidentes respecto a los dos casos anteriores en lo respectivo a la forma que tienen las gráficas y dónde se ubican los máximos y mínimos, así como su magnitud. En este caso se puede observar que inicialmente la gráfica crece, en contraposición a lo que ocurre en el primer tramo de los casos anteriores. El valor máximo de utilidad se alcanza con 4 canales para todos los porcentajes de ocupación y todos los valores de  $k$ , mientras que el valor mínimo aparece con 5 canales, apreciándose mejor este mínimo en los casos de mayor ocupación y mayores valores de  $k$ . En los casos de  $k = 2$  y el menos ocupado de  $k = 3$ , el último tramo se mantiene en valores estables, mientras que, en el resto, se produce otro aumento con 7 canales, aunque menos pronunciado que para 4 canales, para acabar estabilizándose en el tramo a partir de 7 canales.

d. Factor de *roll-off* = 0,25

i.  $k = 2$

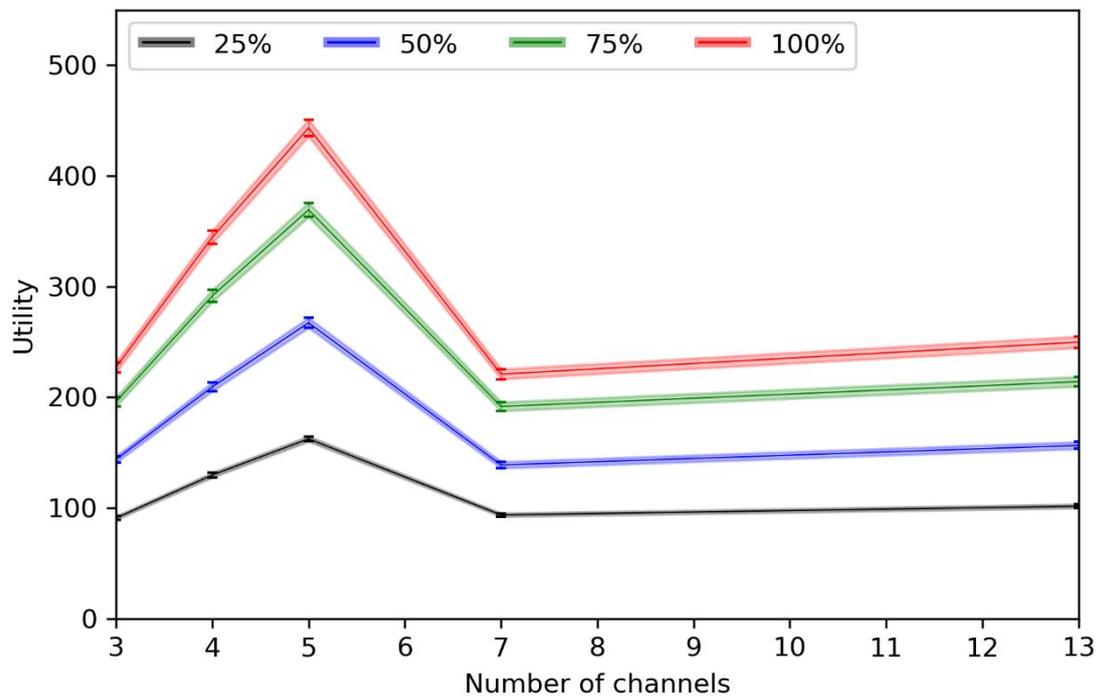


Figura 29 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=0,25 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

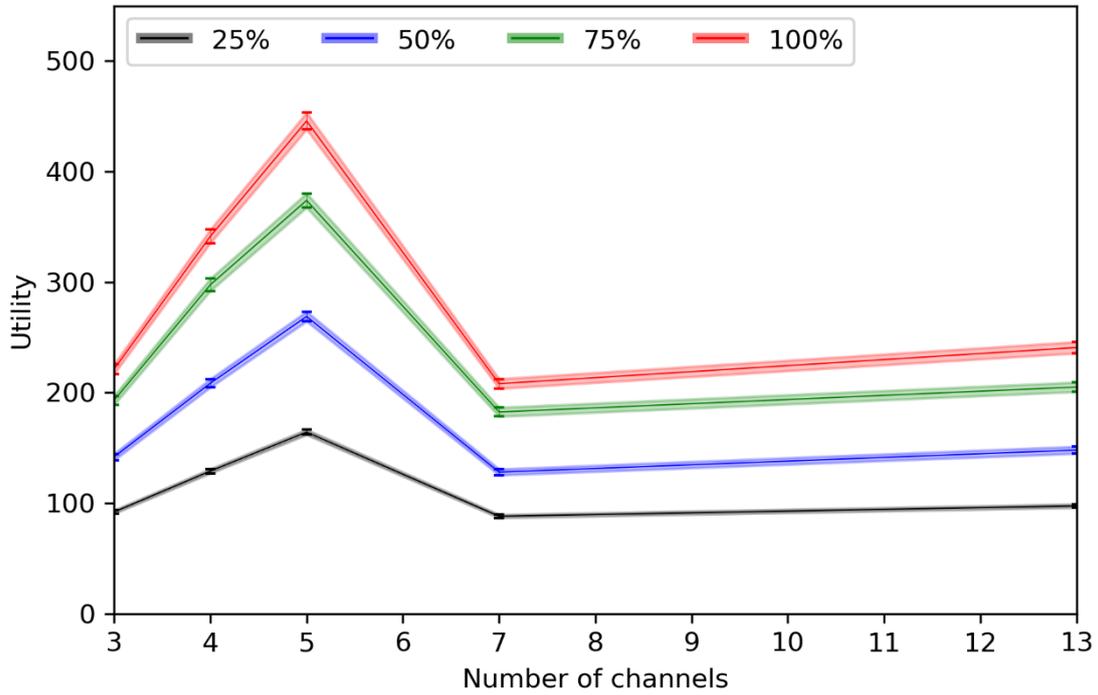


Figura 30 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y  $k=3$  [39]

iii.  $k = 4$

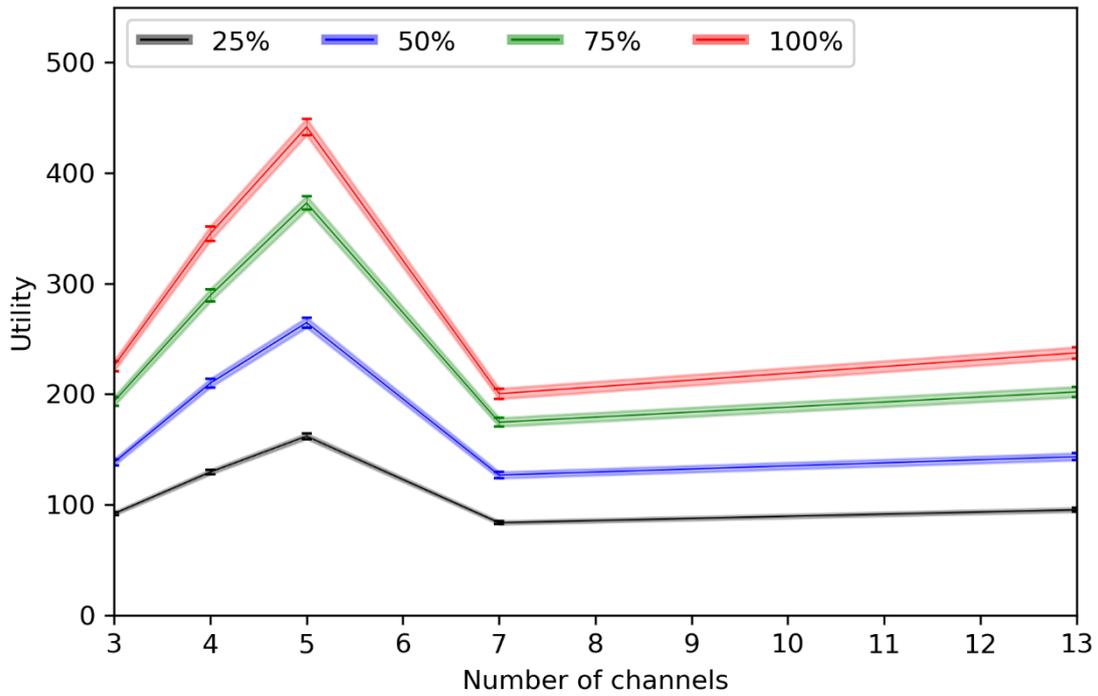


Figura 31 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y  $k=4$  [39]

Las gráficas mostradas para el factor de *roll-off* igual a 0,25 poseen formas bastante similares entre sí, obteniendo diferentes valores de utilidad debido al aumento del porcentaje de ocupación y el aumento del valor de k.

En cierto modo, se asemejan a la forma de las gráficas del caso inmediatamente anterior, con la diferencia de que, en este caso, el tramo inicial de crecimiento de la utilidad finaliza en el punto máximo obtenido para 5 canales en vez de 4. A partir de ahí, el siguiente tramo corresponde con un descenso pronunciado hasta acabar estabilizándose a partir del uso de 7 canales. En los casos de mayor ocupación, incluso se puede apreciar un ligero aumento de la utilidad desde el punto para 7 canales hasta el punto para 13 canales.

## 2. Matriz de M.S.B.A. [24]

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas a partir de la matriz de [24].

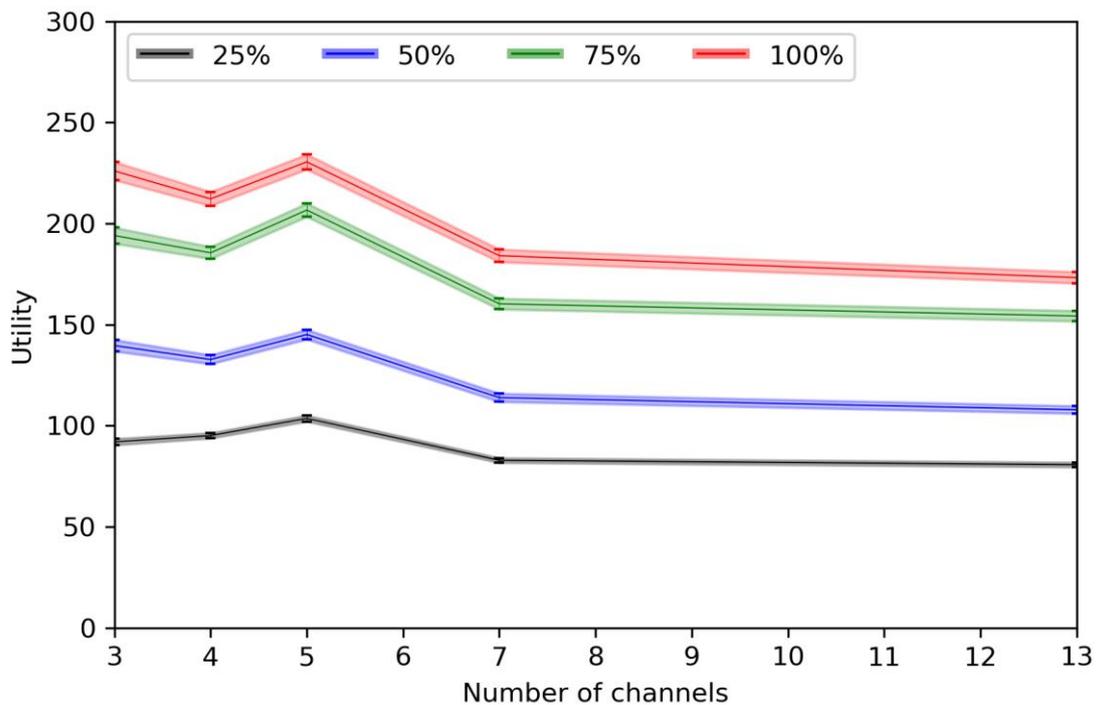


Figura 32 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [24]

En las gráficas obtenidas a partir de la matriz de [24], pasa algo semejante al caso del factor de *roll-off* = 0,25 de la matriz de [39], ya que se produce un máximo con 5 canales para empezar a descender hasta que llega a 7 canales, quedándose más o menos estable a partir de ahí. Las diferencias son que los valores iniciales de utilidad (para 3 canales) son mayores que los valores que se obtienen con 7 canales y que los valores máximos

obtenidos para 5 canales no son tan grandes en comparación con los valores para 3 canales, a diferencia del caso de [39] para el factor de *roll-off* = 0,25 en el que esta diferencia entre dichos valores es más que notable.

### 3. Matriz de Kratz [19]

Los siguientes resultados corresponden con los obtenidos para la matriz de Kratz [19].

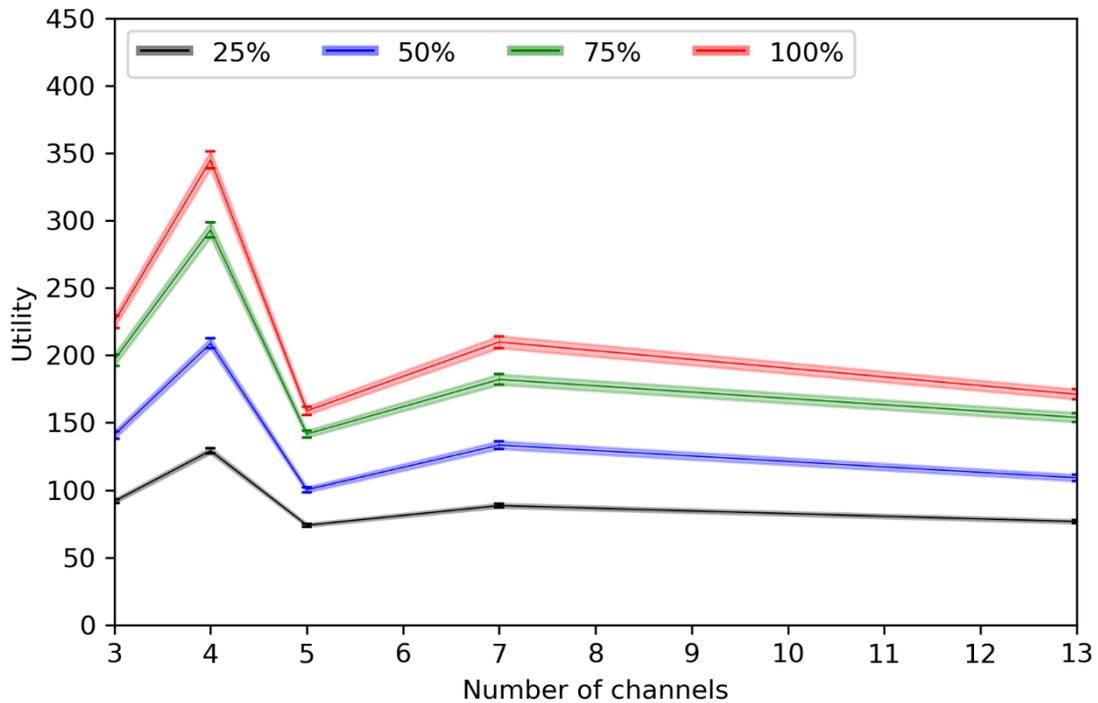


Figura 33 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [19]

Las gráficas obtenidas a partir de la matriz de [19] se asemejan en gran medida a las obtenidas para [39] con un factor de *roll-off* de 0,5, especialmente para los valores de  $k = 3$  y  $k = 4$ . Tanto en forma como en las magnitudes estos dos casos son realmente similares, con el máximo de utilidad para 4 canales y el mínimo cuando se usan 5.

#### 4. Matriz de C.A. [7]

Las gráficas dibujadas según los resultados de la matriz de C.A. [7] son las siguientes.

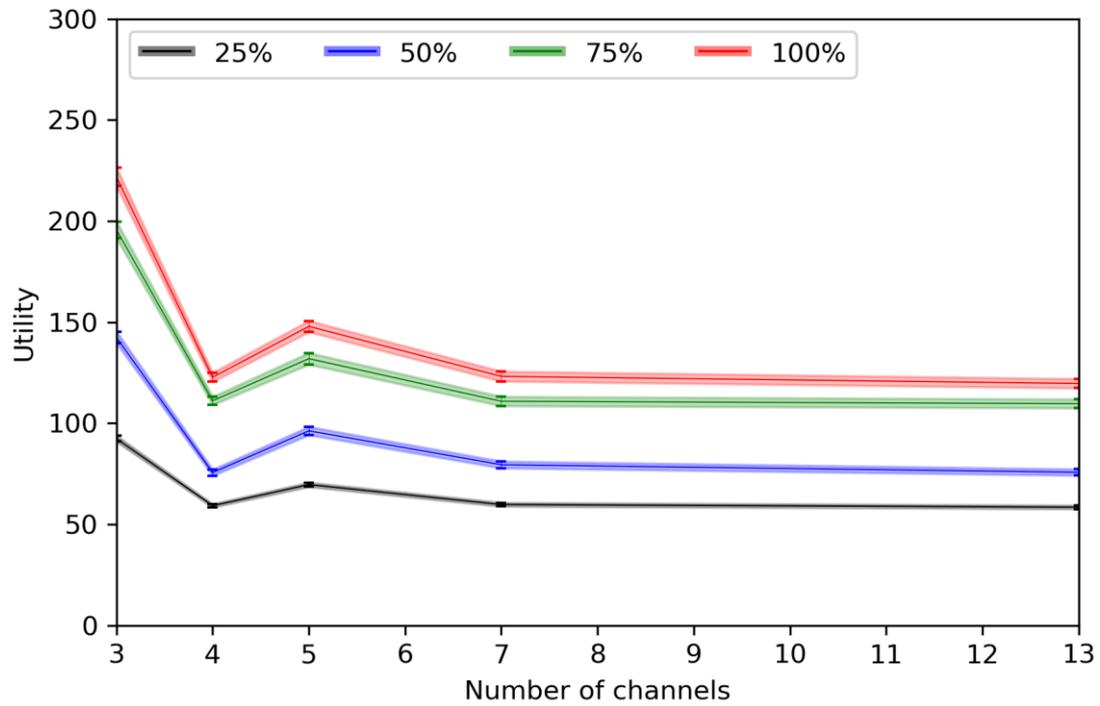


Figura 34 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [7]

Los resultados obtenidos en este caso pueden compararse con los obtenidos con la matriz de [39] en el caso de usar una máscara ideal, ya que del mismo modo que en ese caso, se observa que el punto máximo de utilidad se tiene con 3 canales, el mínimo se produce con 4, para que aparezca un pequeño crecimiento con 5 y acabando con un descenso con 7 canales, estabilizándose a partir de ahí.

## 5. Matriz de S.R.Y.B. [34]

Para terminar, se muestran las gráficas correspondientes a la matriz de [34].

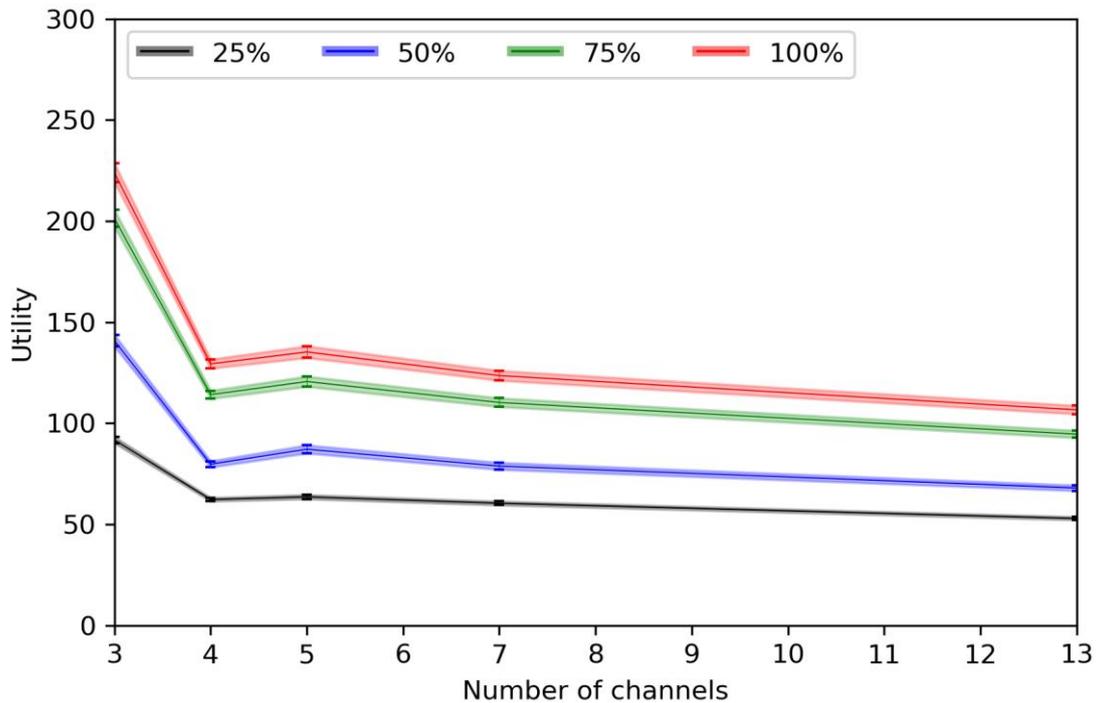


Figura 35 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [34]

Se trata de un caso parecido al de [39] con factor de *roll-off* = 1, analizado anteriormente. El punto máximo de utilidad se tiene con 3 canales, descendiendo con 4 canales y estabilizándose en ese valor, pudiéndose apreciar un ligero crecimiento con 5 canales en los casos de mayor ocupación.

Una vez analizados todos los casos por separado, se pueden extraer las primeras conclusiones a raíz de los resultados obtenidos:

En primer lugar, se puede observar a simple vista que, efectivamente, influye el uso de una matriz u otra en un mismo escenario, no solo en el comportamiento en función del número de canales asignados, sino en la magnitud de la utilidad que se obtiene en cada caso. Esta primera observación es de gran importancia para este estudio, ya que era el punto central del mismo, a partir del cual se analizarán las causas en cada caso de los distintos comportamientos.

Otra observación, aunque esperada, no menos importante es que, al aumentar el grado de ocupación aumenta el valor de la utilidad, tal y como pasaba con el caso ideal y que, además, es un resultado que hace ver que se avanza en la dirección adecuada, debido a que era lo esperado tras el razonamiento teórico. Sin embargo, al incluir las interferencias en estos casos, la utilidad no siempre crece al aumentar el número de canales, dato que pone en valor la importancia que tienen dichas interferencias en una asignación de canales óptima.

8.2.1.1. *Gráficas comparativas según el porcentaje de ocupación*

De forma contraria a lo expuesto en los apartados anteriores, en este caso se ha optado por mostrar todas las gráficas comparativas obtenidas para cada una de las tres distribuciones de los grafos, ya que se trata de, posiblemente, el apartado más importante del trabajo o, al menos, el que permite obtener los razonamientos y conclusiones de mayor importancia tras el estudio realizado. Cada gráfica comparativa incluye las líneas de cada matriz estudiada, diferenciadas por colores. Cada gráfica corresponde a los resultados obtenidos para cada matriz aplicada a un grafo concreto, es decir, están clasificadas según el porcentaje de ocupación y la distribución de los grafos.

- Distribución 1 de las aulas:

1. **25% ocupación: grafo EPS-0.25-1\_1.**

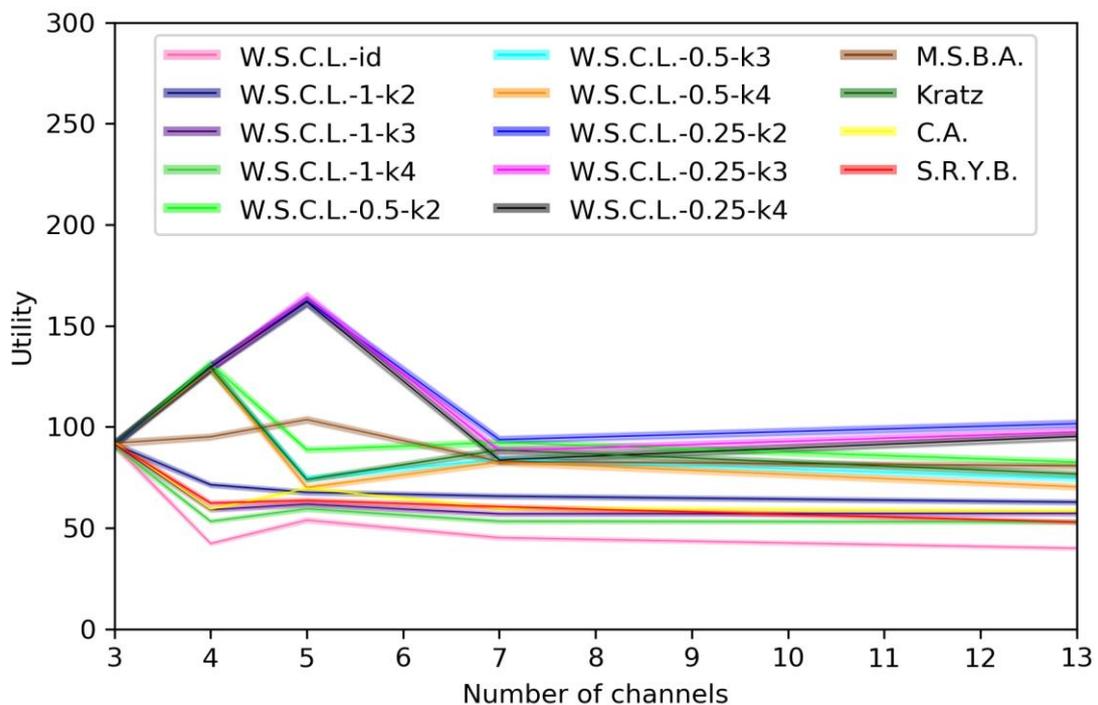


Figura 36 Comparativa entre casos con interferencias 25% ocupación, distribución 1

**2. 50% ocupación: grafo EPS-0.5-1\_1.**

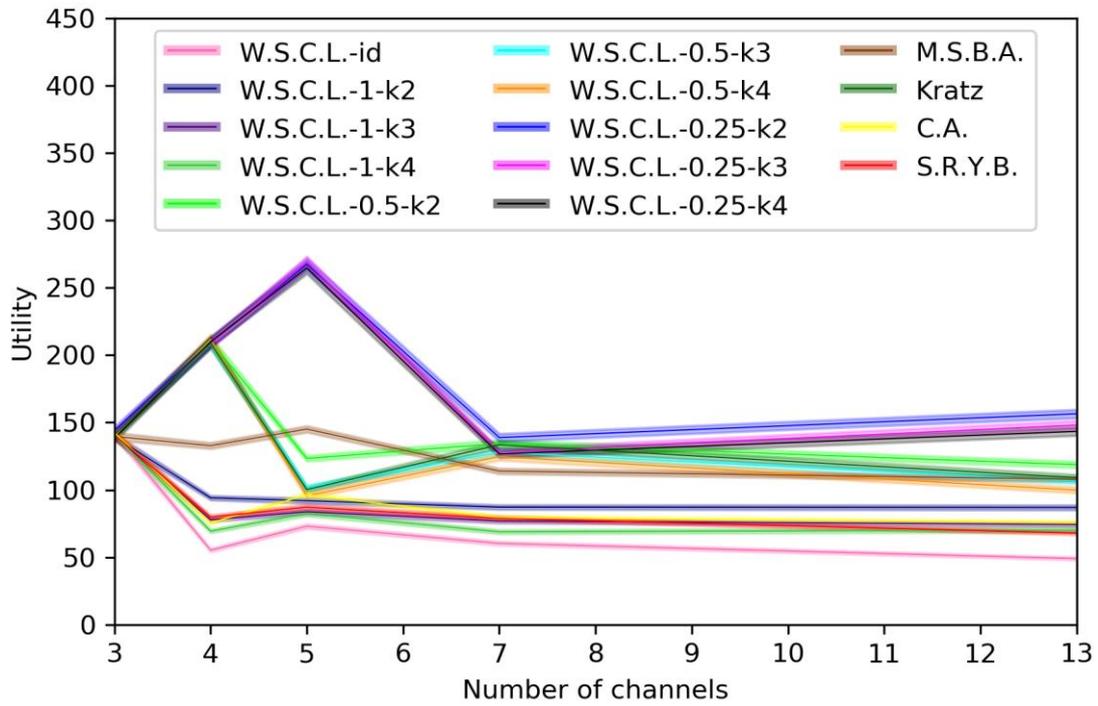


Figura 37 Comparativa entre casos con interferencias 50% ocupación, distribución 1

**3. 75% ocupación: grafo EPS-0.75-1\_1.**

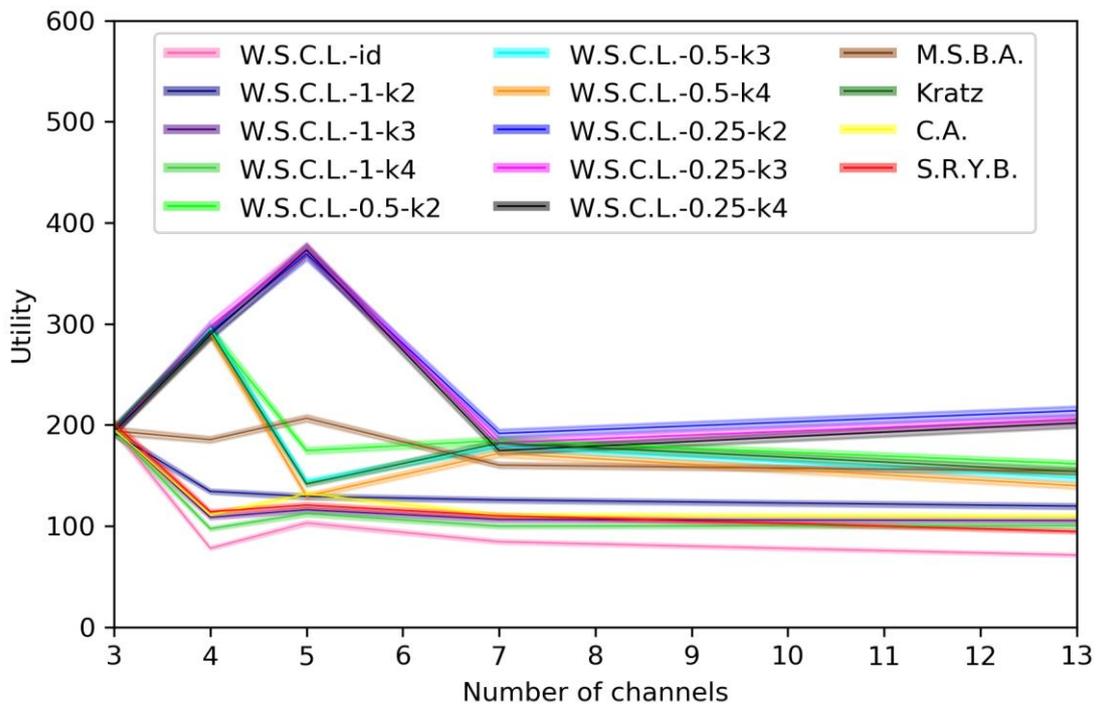


Figura 38 Comparativa entre casos con interferencias 75% ocupación, distribución 1

#### 4. 100% ocupación: grafo EPS-1-1\_1.

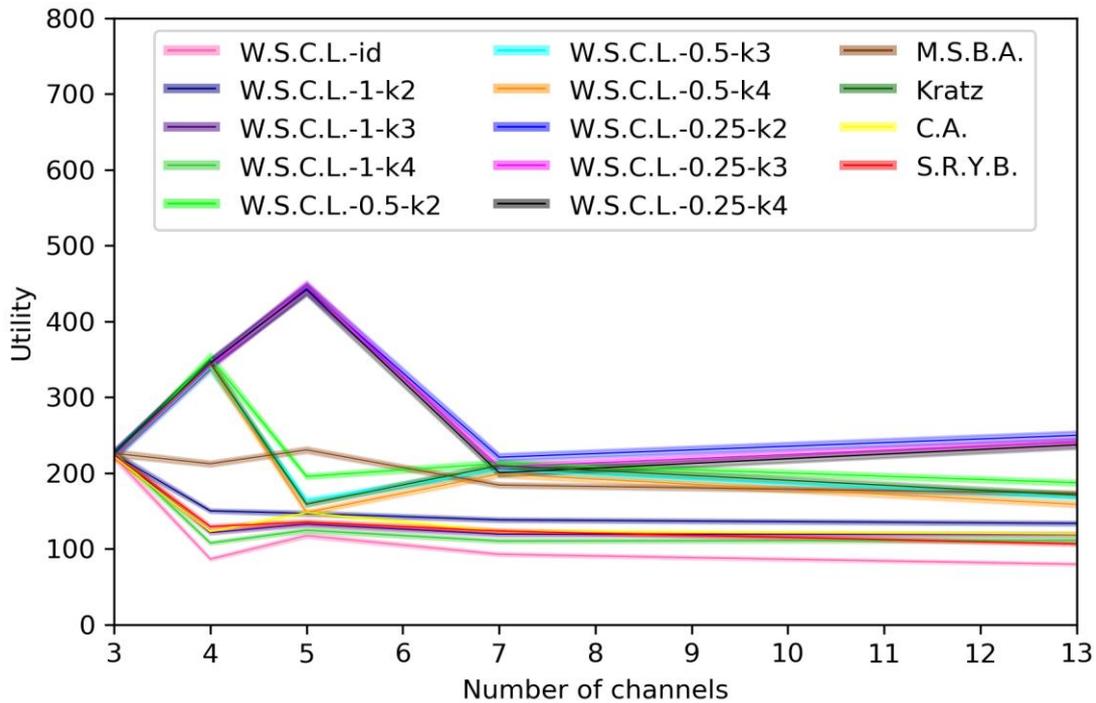


Figura 39 Comparativa entre casos con interferencias 100% ocupación, distribución 1

En estas gráficas en las que se recopilan las líneas correspondientes a cada una de las matrices se pueden observar las características descritas anteriormente, apreciándose claramente las similitudes y diferencias existentes entre los distintos casos.

Una de los detalles interesantes que se pueden extraer de esta comparativa es que el tramo inicial (de 3 a 5 canales) de las gráficas que tienen su punto máximo de utilidad en 5 canales, con valores que rondan los 450, que son las matrices de W.S.C.L. [39] con valor del factor de roll-off = 0,25, junto con el tramo inicial (de 3 a 4 canales) de las gráficas de las matrices de W.S.C.L. [39] con valor del factor de roll-off = 0,5 y la de Kratz [19], coinciden prácticamente de manera idéntica con el tramo inicial que describe la gráfica del caso sin interferencias.

También se puede observar que la matriz de M.S.B.A. [24] es la que presenta valores más estabilizados durante toda su gráfica, manteniéndose en valores mayores de utilidad en todo momento en comparación con las matrices de W.S.C.L. [39] con máscara ideal o factor de roll-off = 1, la matriz de C.A. [7] y la de S.R.Y.B. [34].

- Distribución 2 de las aulas:

1. **25% ocupación: grafo EPS-0.25-2\_1.**

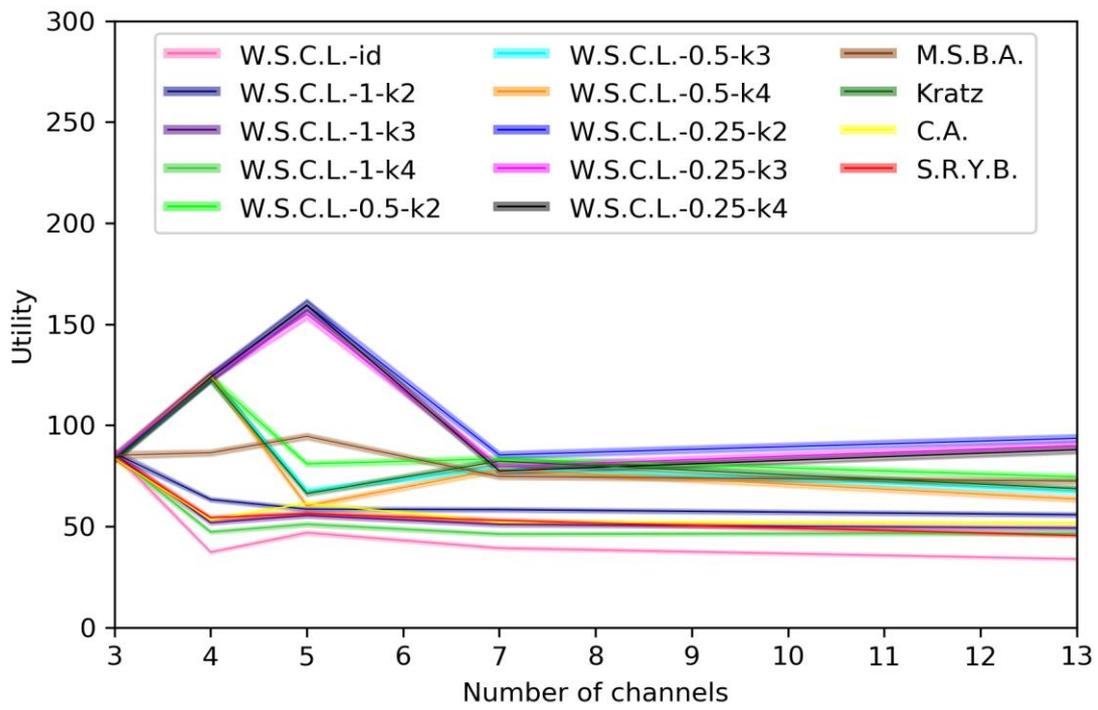


Figura 40 Comparativa entre casos con interferencias 25% ocupación, distribución 2

**2. 50% ocupación: grafo EPS-0.5-2\_1.**

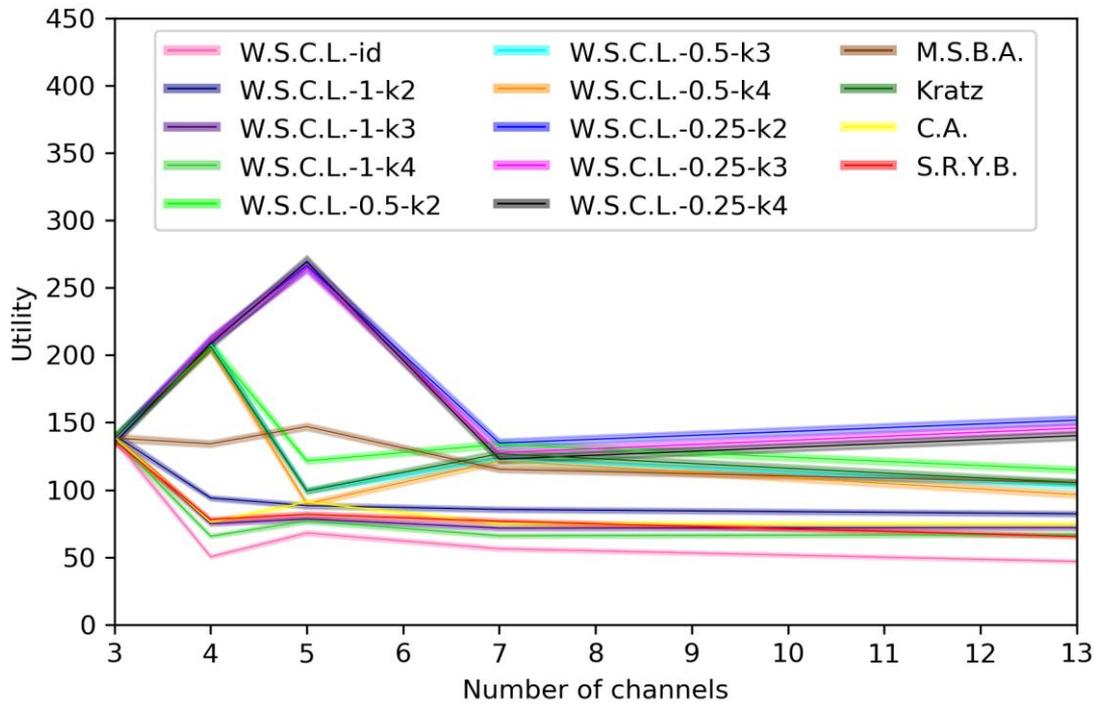


Figura 41 Comparativa entre casos con interferencias 50% ocupación, distribución 2

**3. 75% ocupación: grafo EPS-0.75-2\_1.**

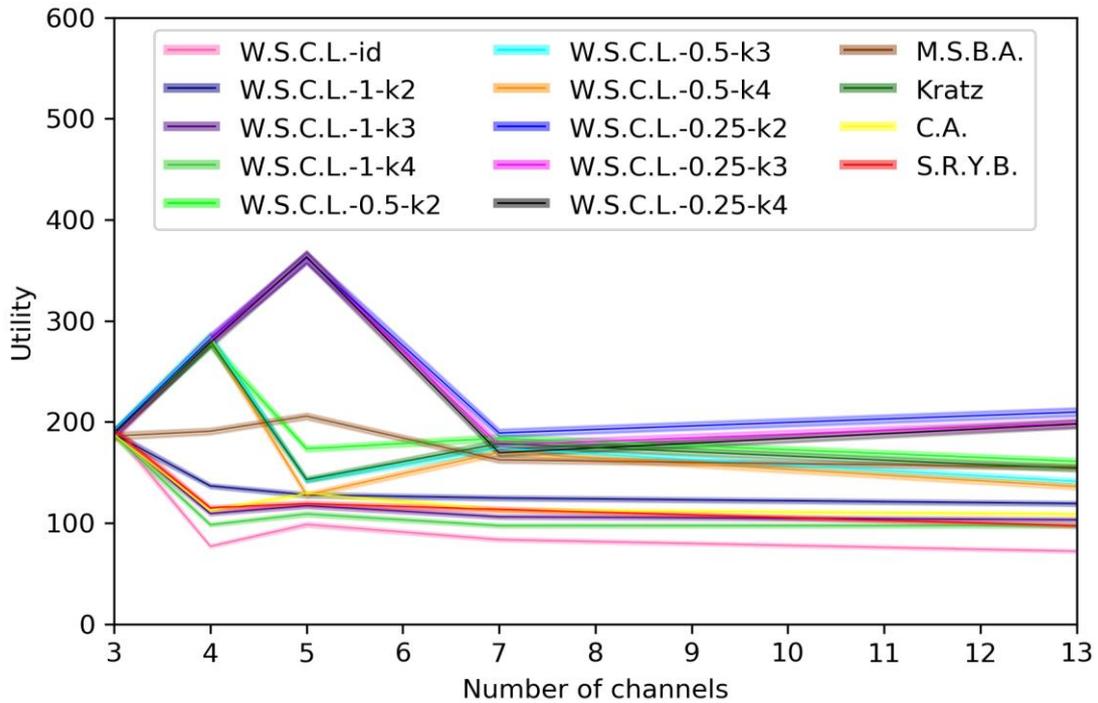


Figura 42 Comparativa entre casos con interferencias 75% ocupación, distribución 2

4. 100% ocupación: grafo EPS-1-2\_1.

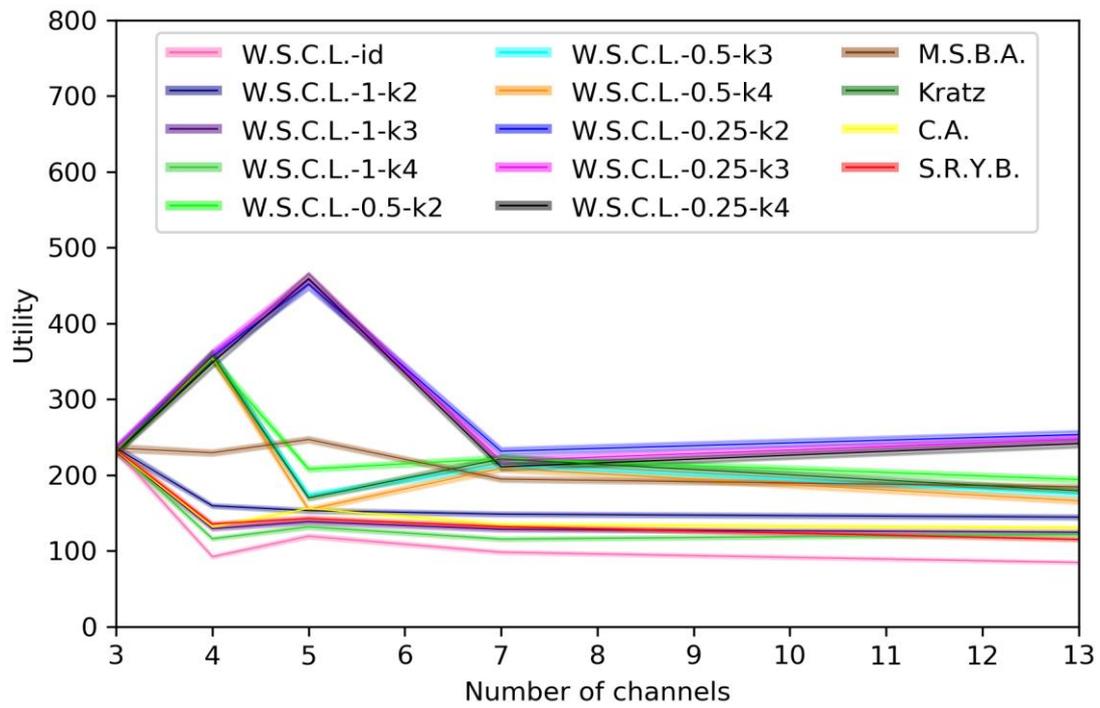


Figura 43 Comparativa entre casos con interferencias 100% ocupación, distribución 2

- Distribución 3 de las aulas:

1. **25% ocupación: grafo EPS-0.25-3\_1.**

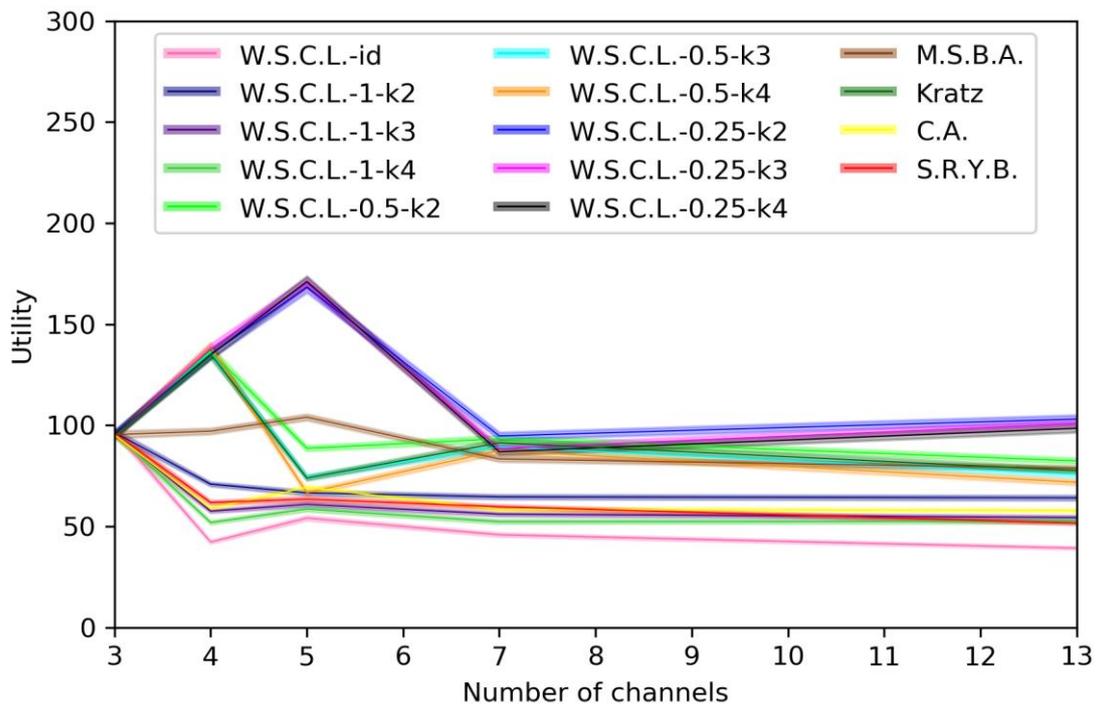


Figura 44 Comparativa entre casos con interferencias 25% ocupación, distribución 3

**2. 50% ocupación: grafo EPS-0.5-3\_1.**

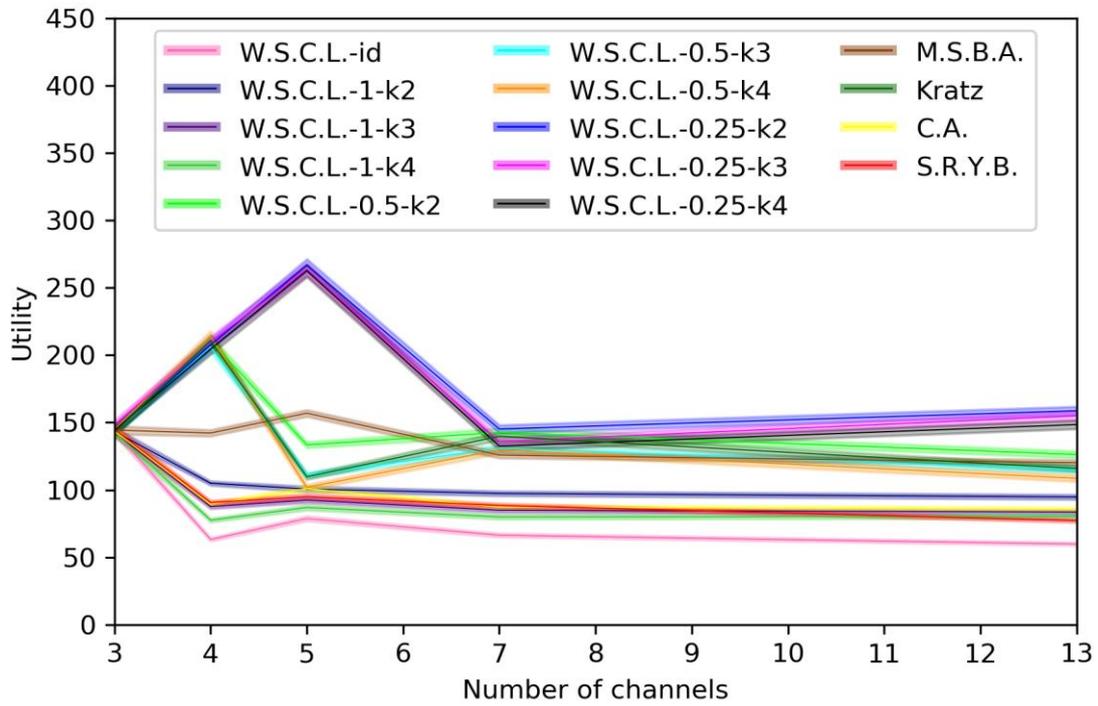


Figura 45 Comparativa entre casos con interferencias 50% ocupación, distribución 3

**3. 75% ocupación: grafo EPS-0.75-3\_1.**

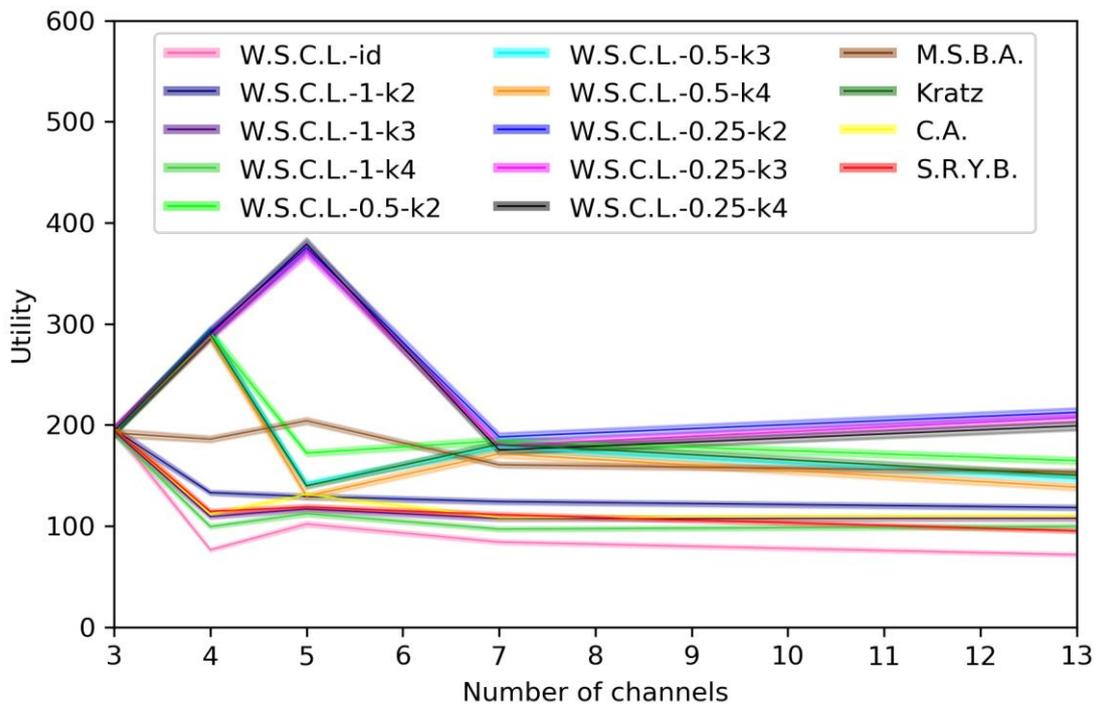


Figura 46 Comparativa entre casos con interferencias 75% ocupación, distribución 3

**4. 100% ocupación: grafo EPS-1-3\_1.**

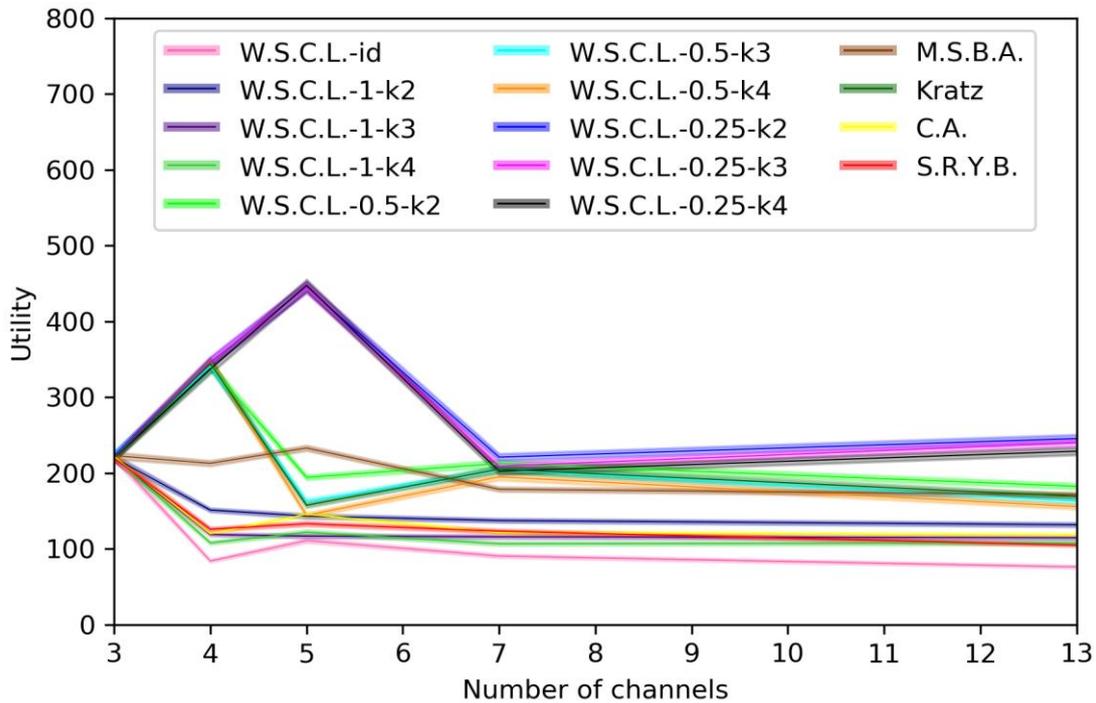


Figura 47 Comparativa entre casos con interferencias 100% ocupación, distribución 3

Tanto para las gráficas de la distribución 2 como para las de la distribución 3 de las aulas, se aplican las mismas conclusiones y observaciones realizadas en las gráficas pertenecientes a la distribución 1, ya que, como se ha venido comentando a lo largo de los apartados anteriores, no se aprecian diferencias significativas entre las gráficas de las distintas distribuciones, tanto en lo respectivo a la forma que describen como en las magnitudes que se obtienen para los distintos números de canales utilizados.

8.2.2. Asignación LCCS: Gráficas para cada matriz con distribución 1 de las aulas

Como ya se ha comentado anteriormente, para el caso de LCCS solo se ha trabajado con los grafos de la distribución 1 de las aulas de la EPS. De manera análoga al caso de la asignación *Random*, se muestran primero las gráficas obtenidas para cada matriz incluyendo las líneas obtenidas para cada porcentaje de ocupación. Finalmente, se presentan las gráficas comparativas entre todas las matrices de interferencia, clasificadas según el porcentaje de ocupación del grafo.

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas de la representación de los valores de utilidad e intervalos de confianza para uno de los casos estudiados.

- **Caso sin interferencias**

Se presentan los valores de utilidad con intervalos de confianza en función del número de canales, obtenidos para cada uno de los cuatro porcentajes de ocupación considerados. De la misma forma que ocurría con *Random*, debido a la ausencia de interferencias, se produce un aumento de la utilidad a medida que aumenta el número de canales utilizados. Además, se puede apreciar que aumenta al crecer el grado de ocupación, es decir, el número de WDs. Como ya se ha explicado, este resultado es la que se esperaba a partir de los razonamientos teóricos.

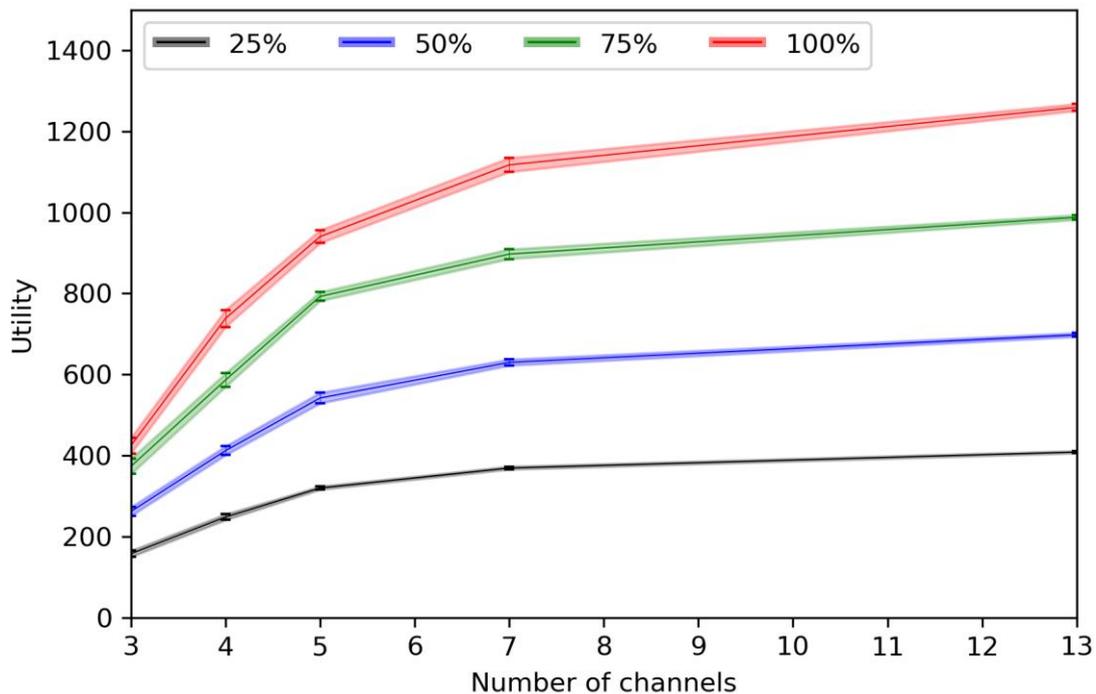


Figura 48 Gráfica caso sin interferencias

- **Casos con interferencias**

Durante este apartado se muestran las gráficas correspondientes a los resultados obtenidos de incluir las interferencias en los cálculos, a través de las matrices de interferencia estudiadas, representando las gráficas siguiendo el ejemplo del caso ideal. En cada uno de los casos se analizará individualmente el comportamiento de las gráficas correspondientes además de las conclusiones que nos permiten extraer estos resultados.

Siguiendo el mismo esquema que en el caso de la asignación aleatoria, en primer lugar, se va a realizar un análisis de las gráficas obtenidas para cada caso en función del número

de canales y del porcentaje de ocupación, para realizar un análisis comparativo entre las gráficas de cada una de las matrices en el próximo apartado.

1. Matrices de W.S.C.L. [39]

Para comenzar, se observan las gráficas obtenidas a partir de la aplicación de las matrices de [39].

a. Máscara ideal

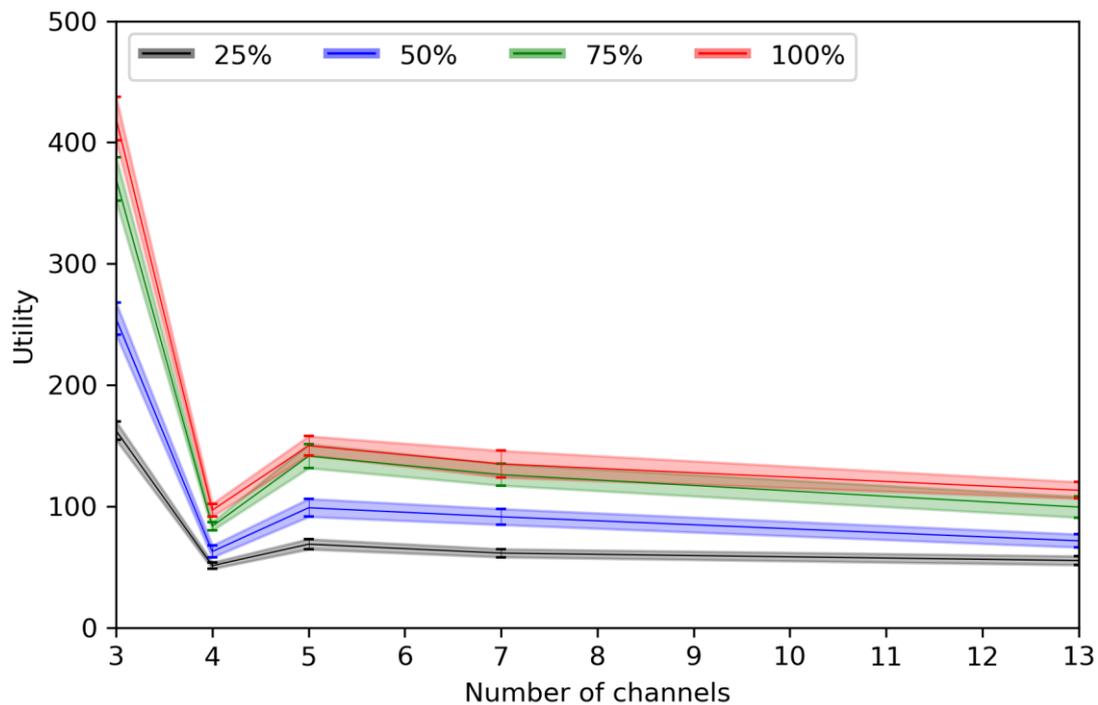


Figura 49 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, máscara ideal [39]

Como se ha repetido varias veces en los casos anteriores y de la misma forma que se observa en los casos siguientes, la utilidad crece al aumentar el número de clientes.

A diferencia del caso ideal y de la misma forma que en los casos siguientes, debido a las interferencias, las líneas ya no son crecientes, de hecho, excepto en el tramo de 4 a 5 canales, en el resto de los tramos las pendientes son decrecientes. Se aprecia que el máximo de utilidad se obtiene para 3 canales y el mínimo cuando se usan 4, un ligero crecimiento con 5 canales y a partir de ahí decrece, manteniéndose relativamente estable. Se puede observar una cierta similitud en la forma de este mismo caso en asignación *Random*, aunque las

pendientes son ahora más acusadas y los intervalos de confianza también son mayores, diferencias que se mantendrán en los casos consiguientes.

b. Factor de *roll-off* = 1

i.  $k = 2$

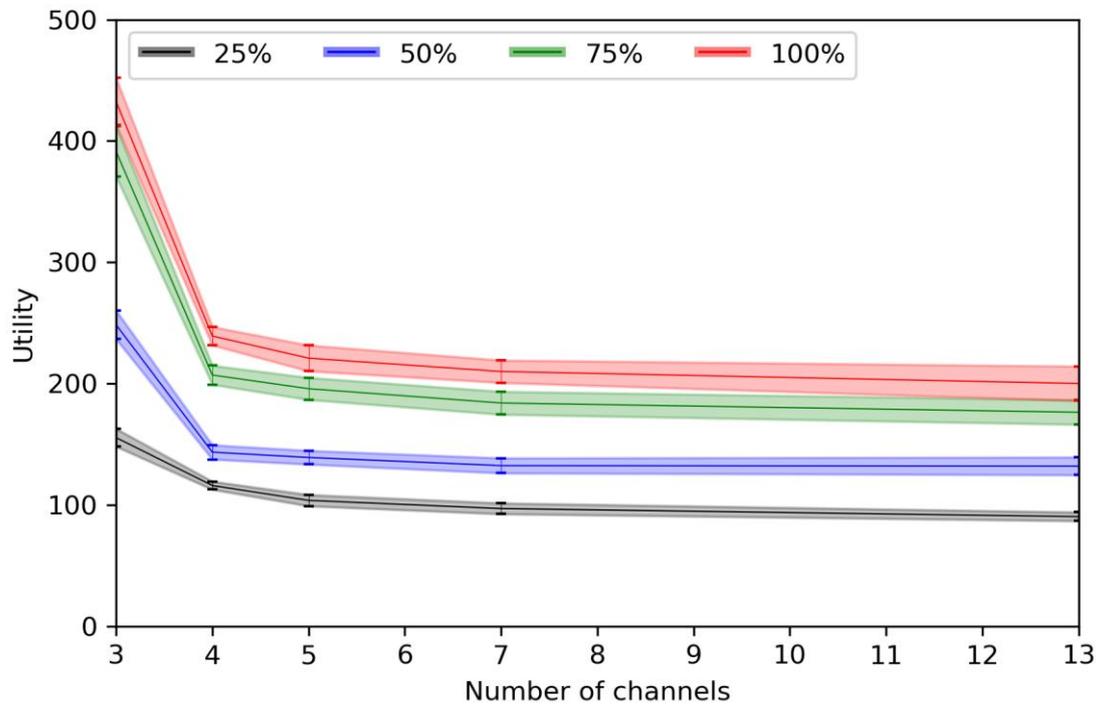


Figura 50 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=1 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

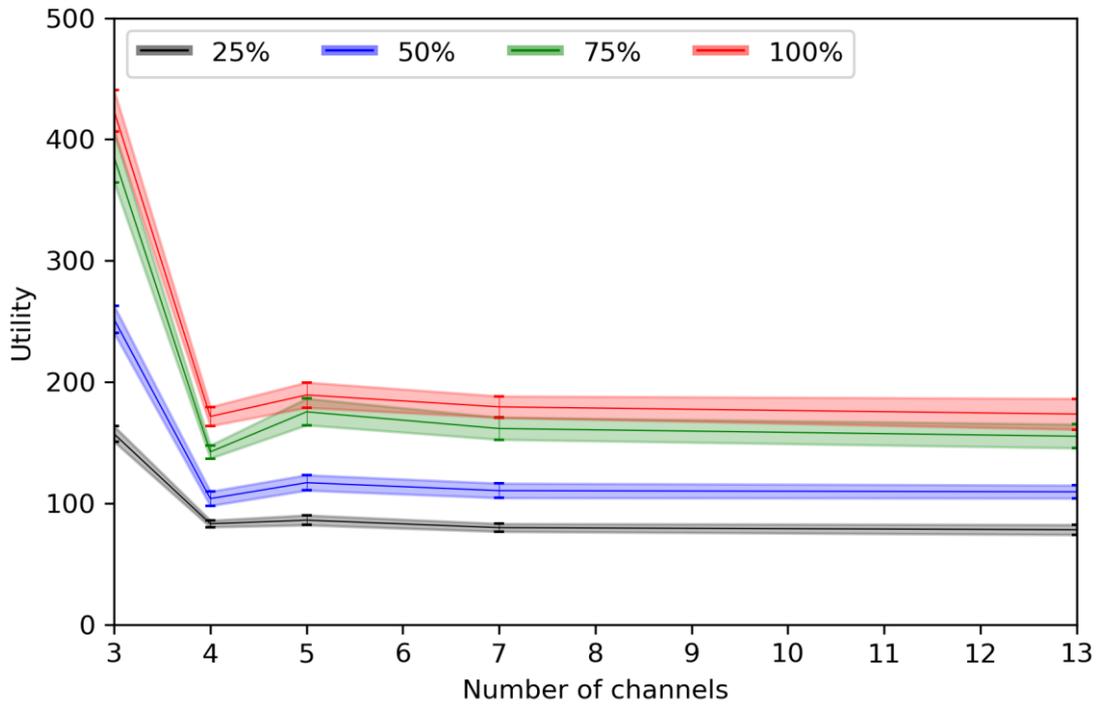


Figura 51 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y  $k=3$  [39]

iii.  $k = 4$

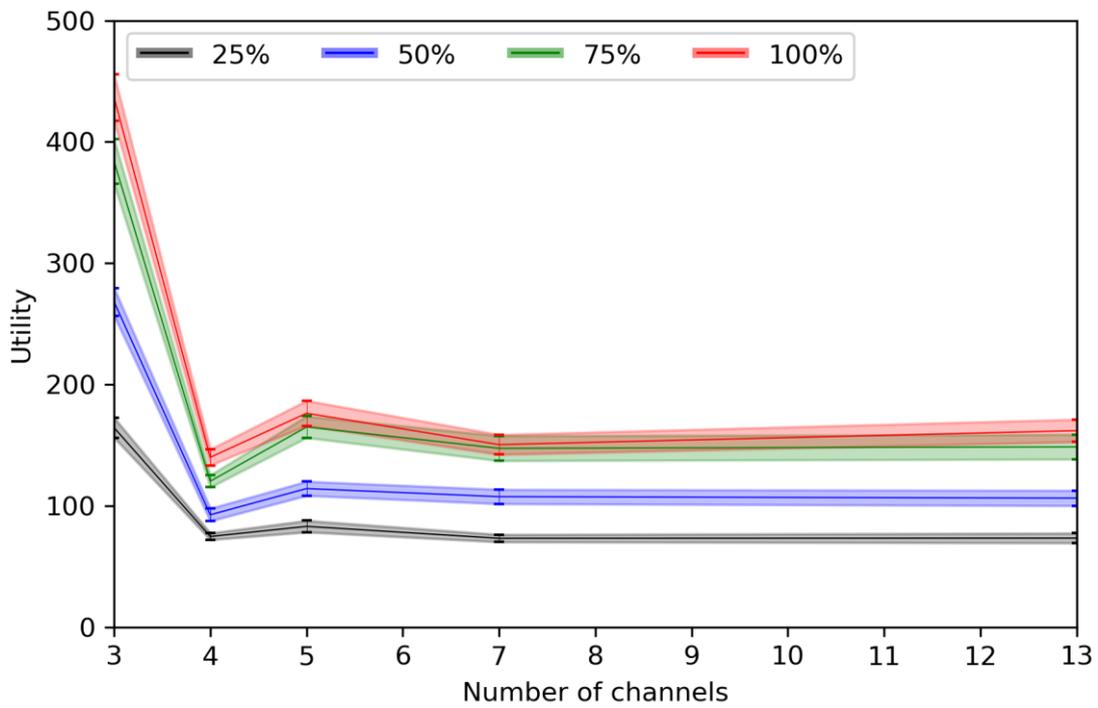


Figura 52 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y  $k=4$  [39]

A simple vista se puede observar que, igual que en el caso de *Random*, tanto para las matrices con factor de *roll-off* de valor 1 como para el resto de las matrices de [39], las gráficas obtenidas son diferentes en función del valor de  $k$ . Tal y como ocurría con *Random*, se aprecia que, al aumentar el valor de  $k$ , el mínimo de la gráfica ubicado en 4 canales se hace más pronunciado, pasando de gráficas descendientes hasta 4 canales y estabilizándose en el resto de los tramos con valor de  $k = 2$ , a obtener gráficas con un pequeño incremento de la utilidad con 5 canales posterior al primer descenso abrupto. En los casos con mayor valor de  $k$ , se aprecian similitudes en la forma de la gráfica respecto a la obtenida con máscara ideal, ya que el mínimo se produce para 4 canales, con un pequeño incremento en 5 después del descenso inicial. Además, los valores de la utilidad en el caso de  $k = 4$  respecto a los obtenidos con máscara ideal son bastante similares.

c. Factor de *roll-off* = 0,5

i.  $k = 2$

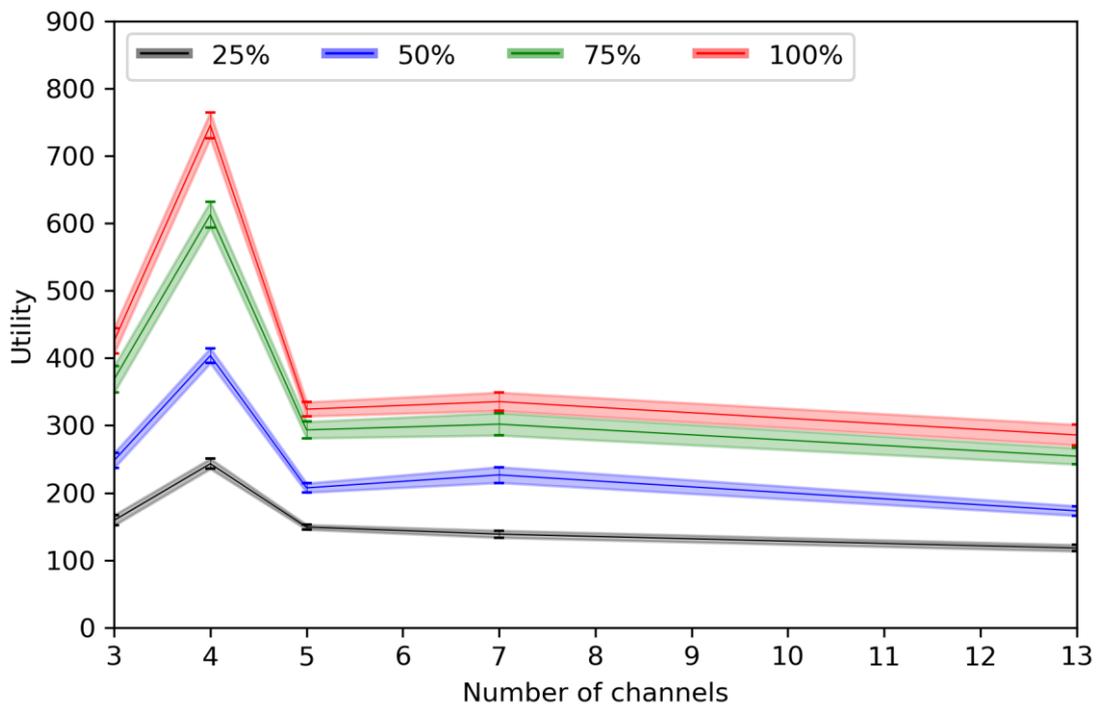


Figura 53 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=0,5 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

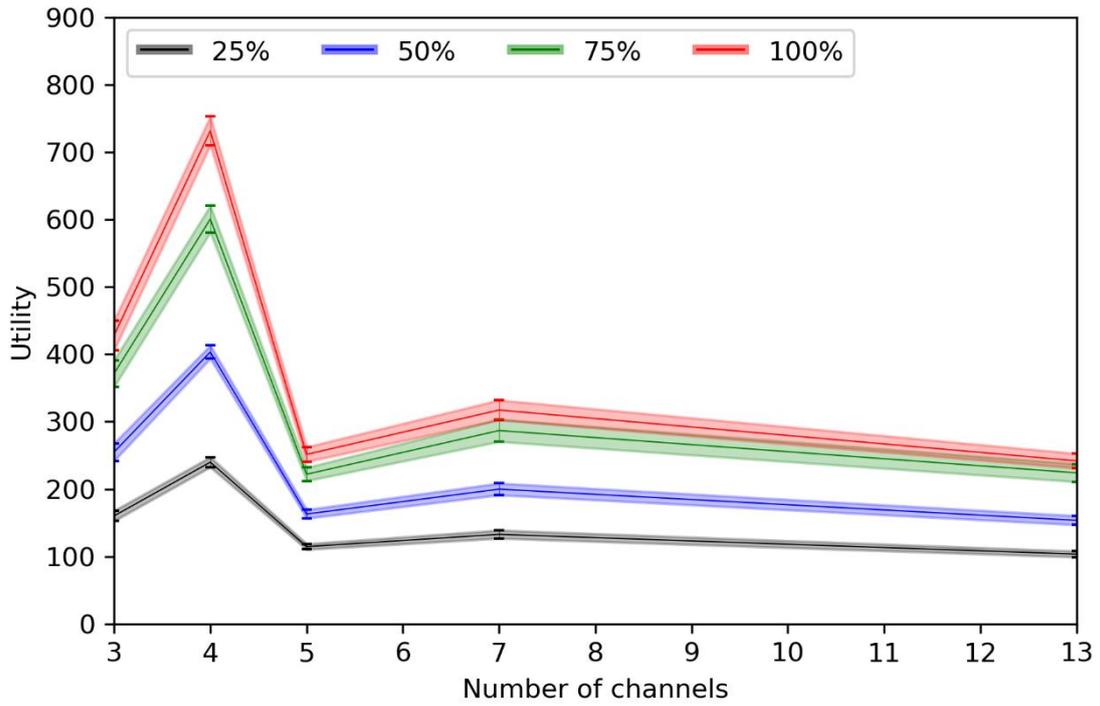


Figura 54 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=3 [39]

iii. k = 4

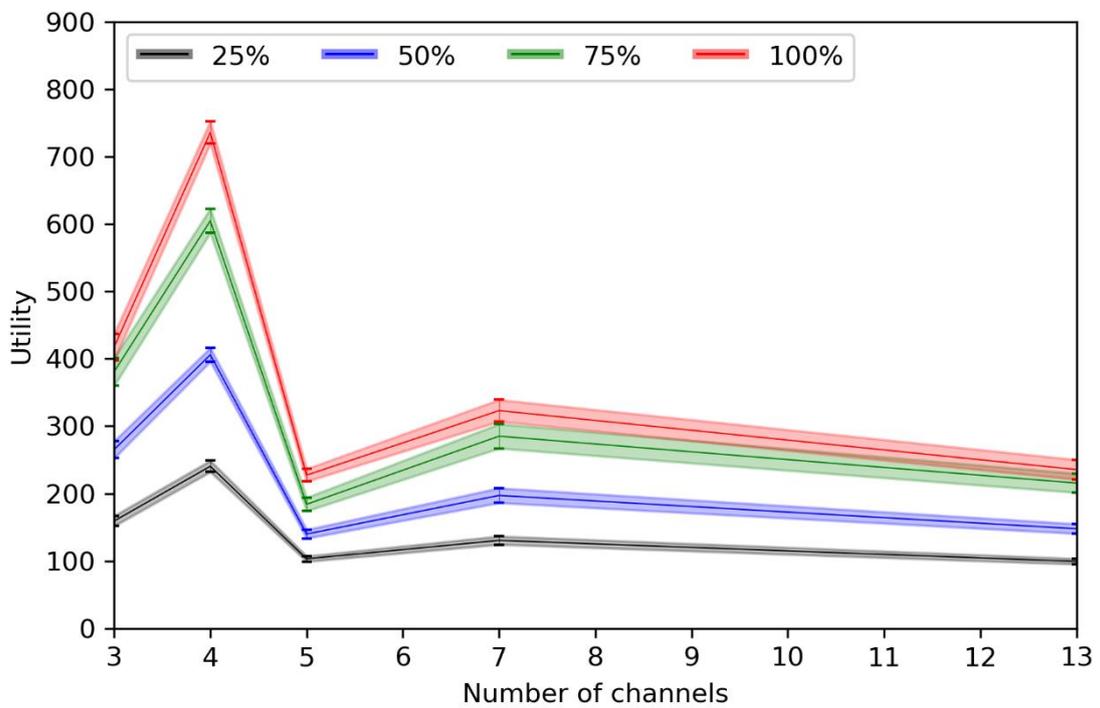


Figura 55 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y k=4 [39]

A primera vista se observan grandes diferencias con respecto a los casos analizados anteriormente. Para empezar, el punto más alto de la gráfica no se encuentra en 3 canales sino en 4, siendo el primer tramo ascendente hasta ese punto. Después, se produce un descenso tan marcado como el crecimiento inicial, deteniéndose a partir de utilizar 5 canales, donde se encuentra el valor mínimo en la mayoría de los casos. Además, la magnitud máxima de utilidad alcanzada está cerca de doblar a la máxima obtenida en los casos anteriores. En las gráficas relativas a las matrices con valor de  $k$  igual a 3 o 4, se puede ver un ligero incremento de utilidad con 7 canales, estabilizándose los valores a partir de ahí.

d. Factor de *roll-off* = 0,25

i.  $k = 2$

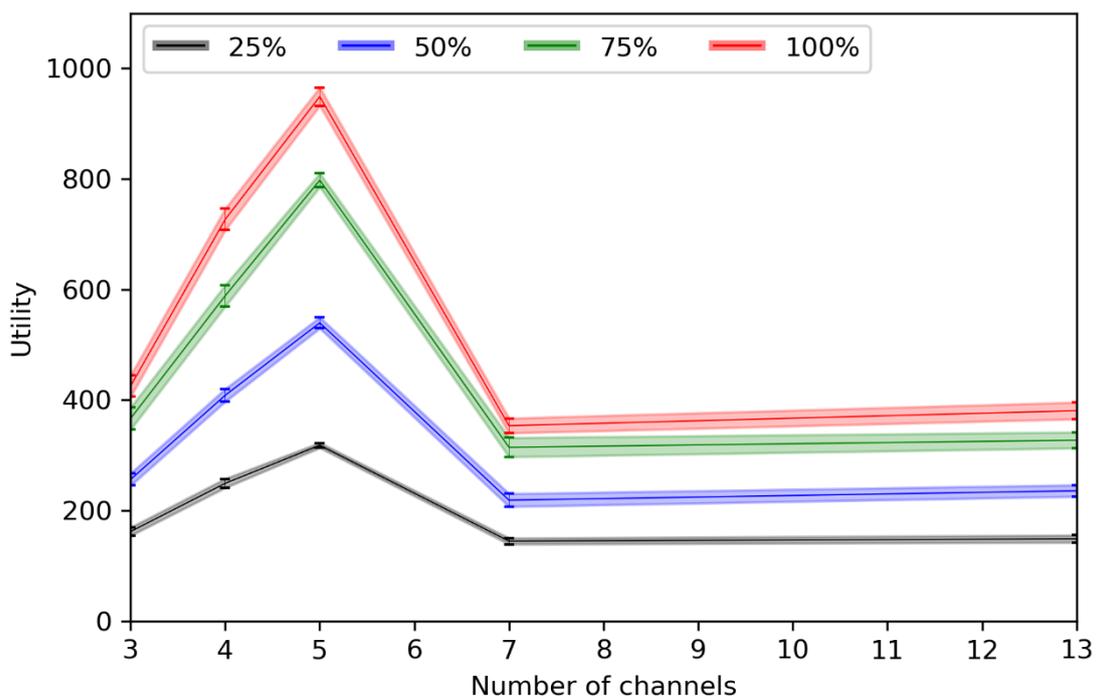


Figura 56 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=0,25 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

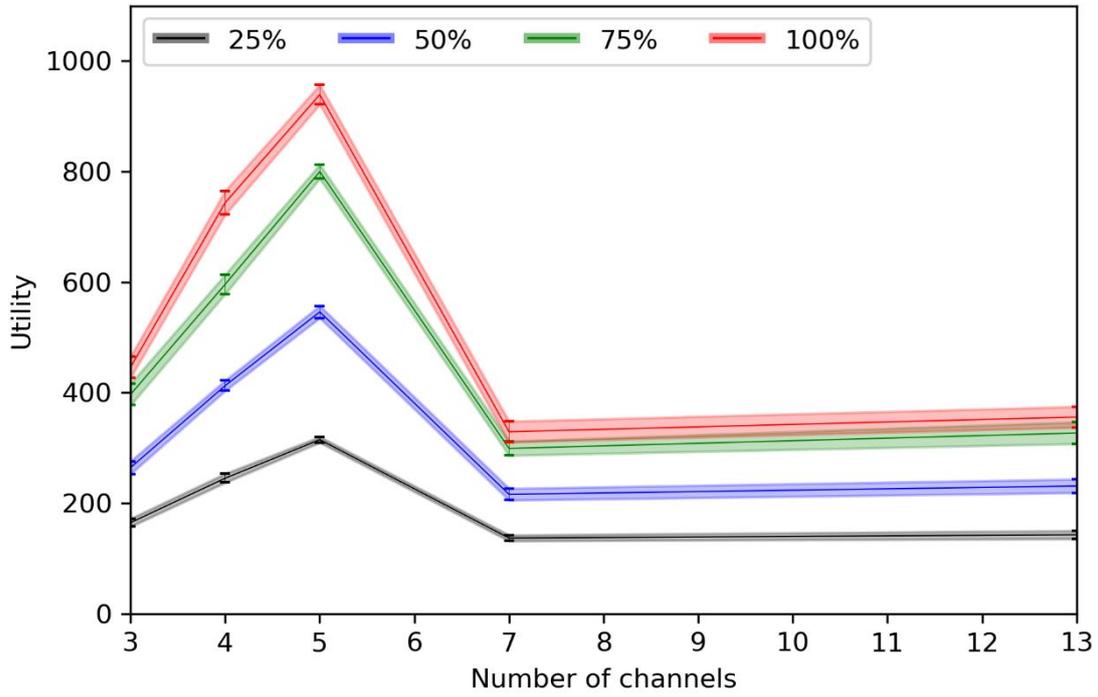


Figura 57 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y  $k=3$  [39]

iii.  $k = 4$

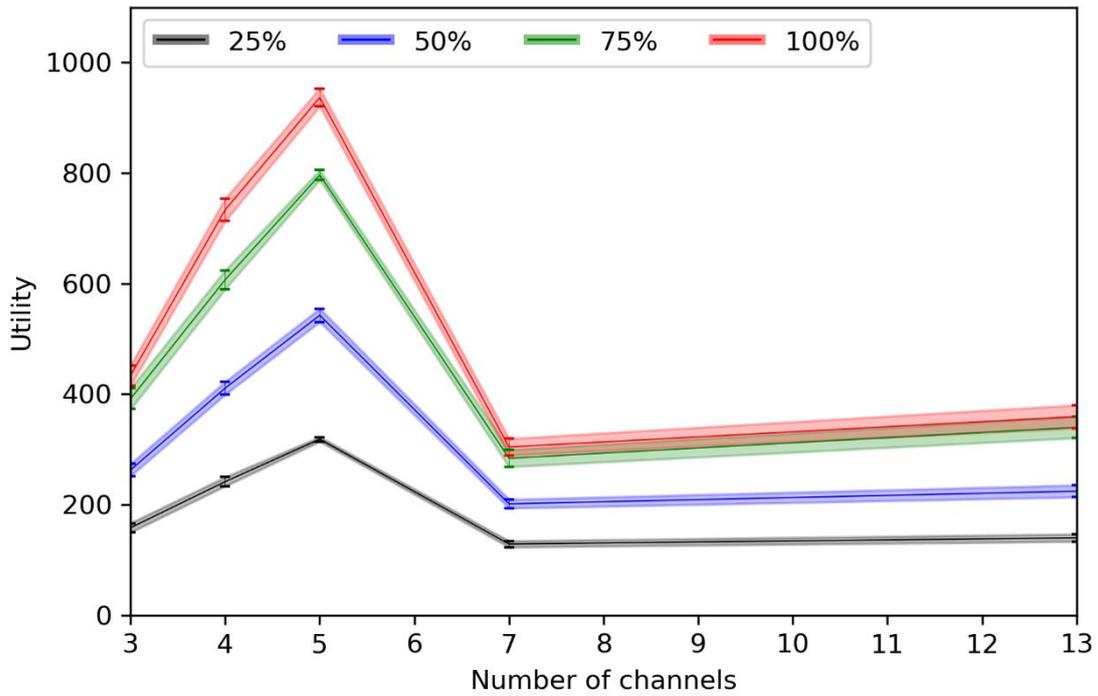


Figura 58 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y  $k=4$  [39]

Las gráficas obtenidas en este caso se asemejan en cierto modo a las analizadas para el factor de *roll-off* de 0,5. Sin embargo, hay diferencias claras, tales como que, aunque también se trata de una gráfica inicialmente creciente, el máximo lo alcanza con 5 canales llegando a magnitudes mayores que en el caso anterior y mucho mayores (doblando con holgura) que en los dos primeros casos. Otra diferencia es que el mínimo se produce en 7 canales, momento en el cual se estabilizan las gráficas. En este caso no existen grandes diferencias entre las gráficas de los distintos valores de *k*, tanto en lo respectivo a la forma como en lo referente a los valores de utilidad.

## 2. Matriz de M.S.B.A. [24]

La gráfica siguiente corresponde a las obtenidas a partir de la matriz de [24].

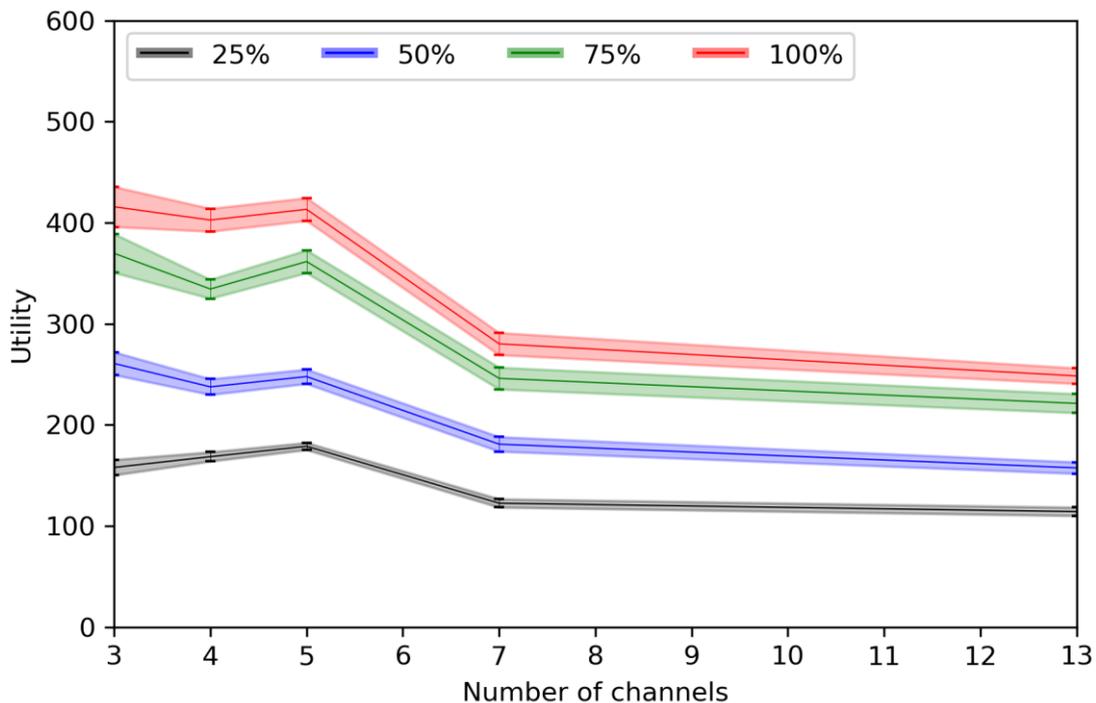


Figura 59 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [24]

Lo que se puede observar en este caso es que, aunque la forma parece distinta a lo mostrado en los casos anteriores, guarda alguna similitud con respecto al caso de las matrices con factor de *roll-off* = 0,25 de [39]. Estos casos se semejan en que el máximo se produce con 5 canales y que, a partir de ahí, la gráfica descende hasta encontrar valores estables a partir de 7 canales. Sin embargo, la principal diferencia radica en que, en este caso, el valor inicial de utilidad, es decir, la utilidad para 3 canales es mayor que

la que se obtiene con 7 canales y se acerca bastante e incluso supera en algún caso al valor de utilidad con 5 canales.

### 3. Matriz de Kratz [19]

La siguiente figura representa los resultados obtenidos para la matriz de Kratz [19].

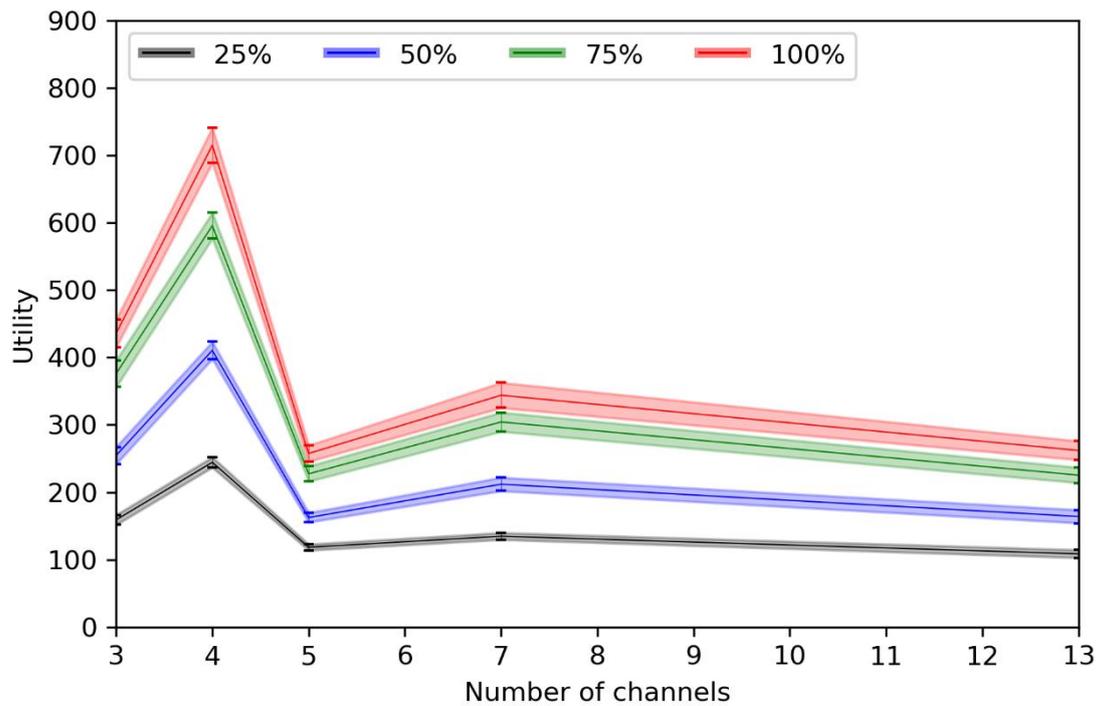


Figura 60 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [19]

Como se puede observar, la gráfica dibujada a partir de la matriz de [19] es muy similar a la correspondiente al *paper* [39] con factor de *roll-off* = 0,5, concretamente para los casos de  $k = 3$  y  $k = 4$ . En lo relativo a la forma, ambas tienen el máximo en 4 canales y el mínimo en 5, además de tener valores de utilidad muy similares.

#### 4. Matriz de C.A. [7]

La gráfica dibujada a partir de los resultados de la matriz de C.A. [7] se muestran a continuación.

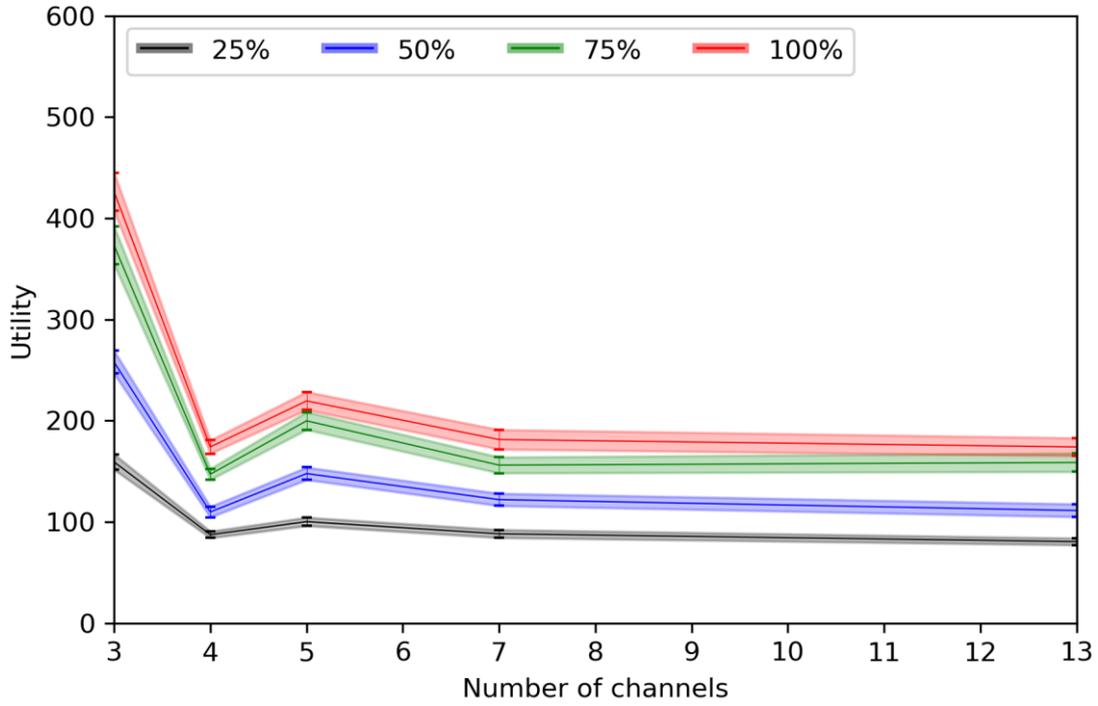


Figura 61 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [7]

La relación que se puede analizar en este caso es la existente con la gráfica obtenida de la matriz de [39] con máscara ideal, ya que, en ambos casos, el máximo valor de utilidad se encuentra con 3 canales, descendiendo hasta el mínimo que aparece con 4 canales. Se aprecia un ligero crecimiento con 5 canales, finalizando con un pequeño descenso en 7 canales para acabar estabilizándose de ahí en adelante.

5. Matriz de S.R.Y.B. [34]

Para terminar, se muestran las gráficas correspondientes a la matriz de [34].

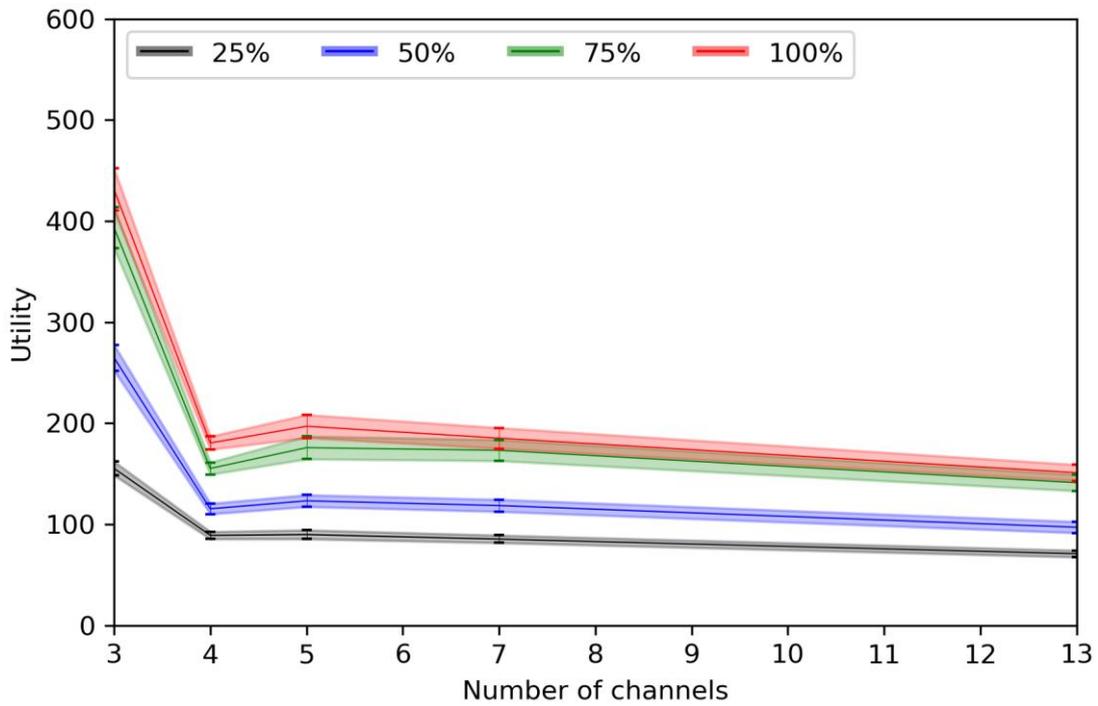


Figura 62 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [34]

Este último caso se asemeja al mostrado anteriormente para la matriz de [39] con factor de *roll-off* = 1. Ambos comienzan con el máximo de utilidad en 3 canales descendiendo en 4 canales y manteniéndose más o menos estable, pudiéndose observar un ligero aumento de utilidad con 5 canales en los casos del 75% y 100% de ocupación.

De igual manera que para el caso de *Random*, en este punto se pueden sacar las primeras conclusiones tras el análisis de los resultados de todas las matrices que componen el estudio al realizar la asignación de canales mediante LCCS.

Para empezar, se puede asegurar que, de la misma forma que ocurre en el caso de *Random*, el uso de una matriz de interferencia u otra influye en el cálculo de la utilidad de la red, obteniendo distintos resultados para los mismos escenarios. Por tanto, esta conclusión sigue la línea marcada con la asignación aleatoria.

Otra conclusión sacada durante la asignación *Random* y que se mantiene con LCCS, es que, como se esperaba, al aumentar el grado de ocupación de las aulas, es decir, al haber mayor número de clientes aumenta la utilidad de la red.

Por último, se tratan de resultados muy similares respecto a *Random* únicamente en la forma que describen las gráficas. Sin embargo, la magnitud de la utilidad haciendo uso de LCCS es mucho mayor, lo que concuerda con los conocimientos teóricos de que LCCS presenta un mejor comportamiento y unos mejores resultados que *Random*.

8.2.2.1. *Gráficas comparativas según el porcentaje de ocupación*

Como ya se ha comentado anteriormente, para LCCS solo se ha trabajado con la distribución 1 de las aulas del escenario. Por tanto, a diferencia de *Random*, donde se mostraban las gráficas comparativas de las tres distribuciones, a continuación, se presentan y analizan las gráficas comparativas de todas las matrices que han sido detalladas en los apartados anteriores según el porcentaje de ocupación únicamente de los grafos de la distribución 1. Aquí es donde se aprecian claramente las similitudes y diferencias descritas entre las gráficas de las distintas matrices comentadas anteriormente.

1. **25% ocupación: grafo EPS-0.25-1\_1.**

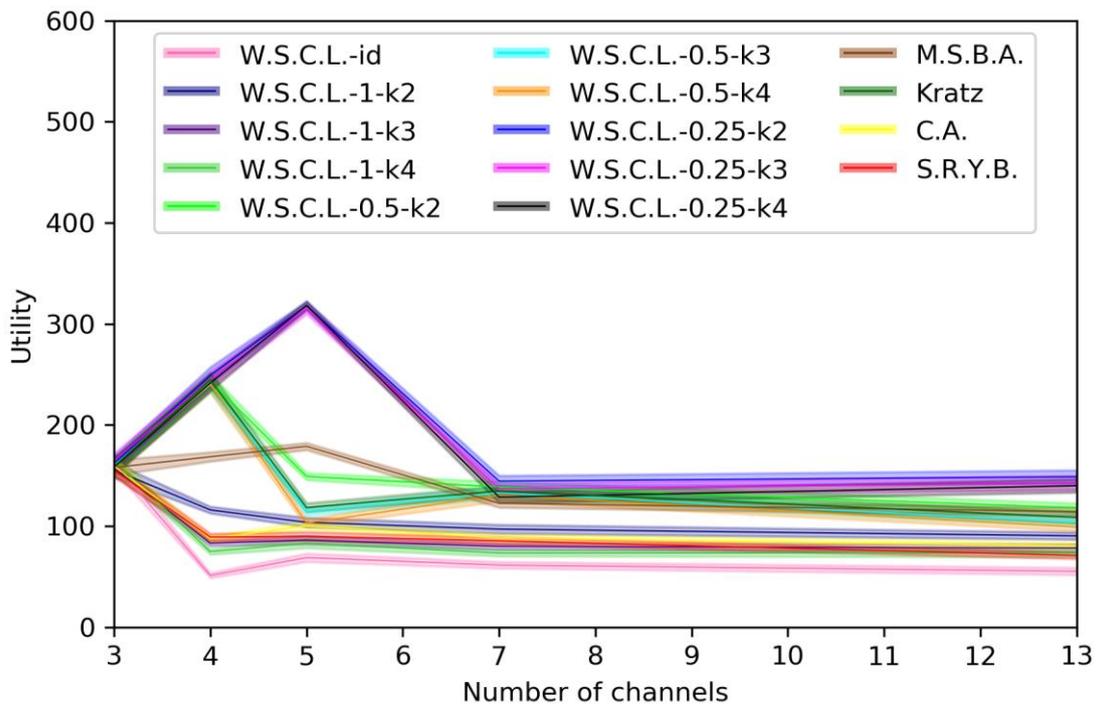


Figura 63 Comparativa entre casos con interferencias 25% ocupación, distribución 1

**2. 50% ocupación: grafo EPS-0.5-1\_1.**

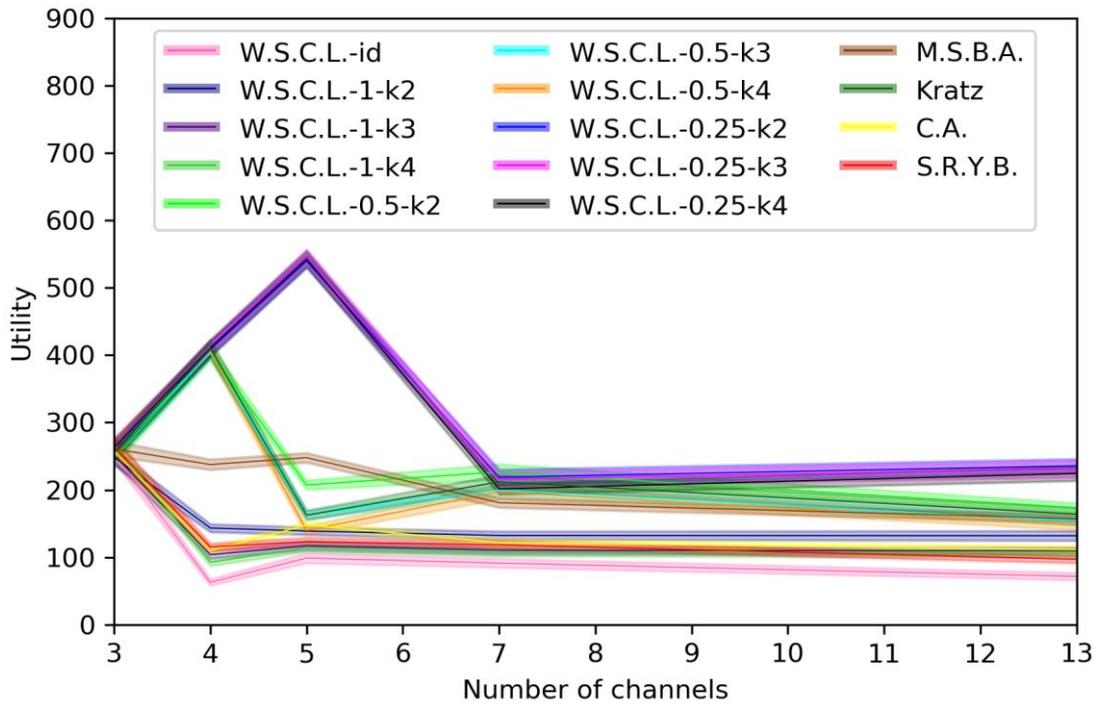


Figura 64 Comparativa entre casos con interferencias 50% ocupación, distribución 1

**3. 75% ocupación: grafo EPS-0.75-1\_1.**

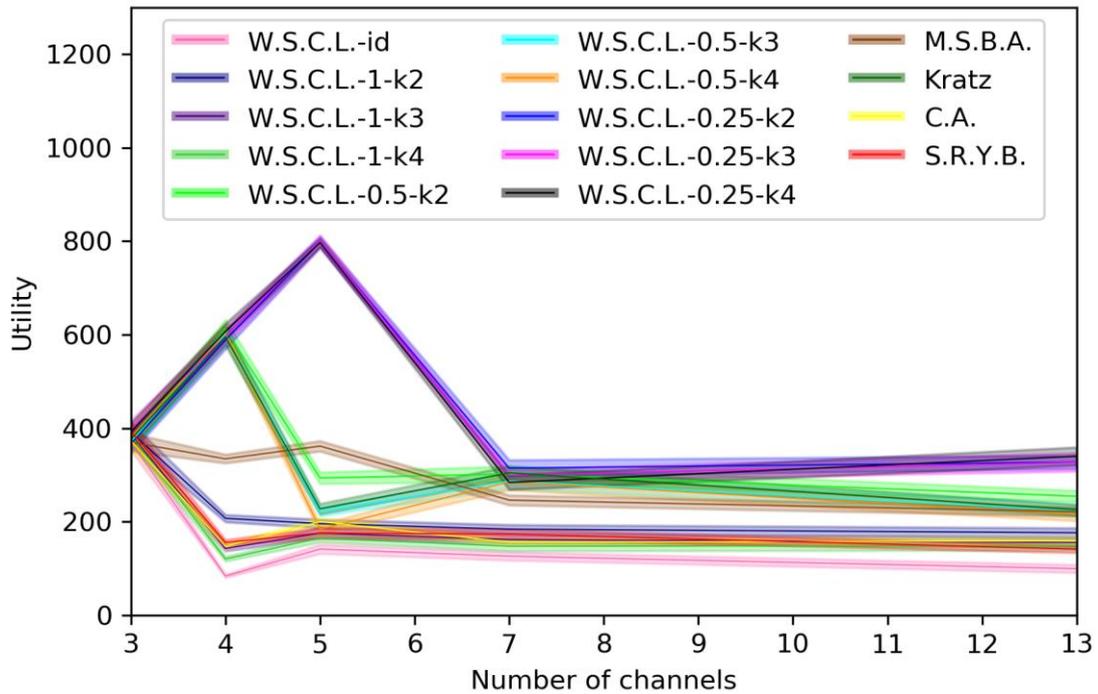


Figura 65 Comparativa entre casos con interferencias 75% ocupación, distribución 1

4. **100% ocupación: grafo EPS-1-1\_1.**

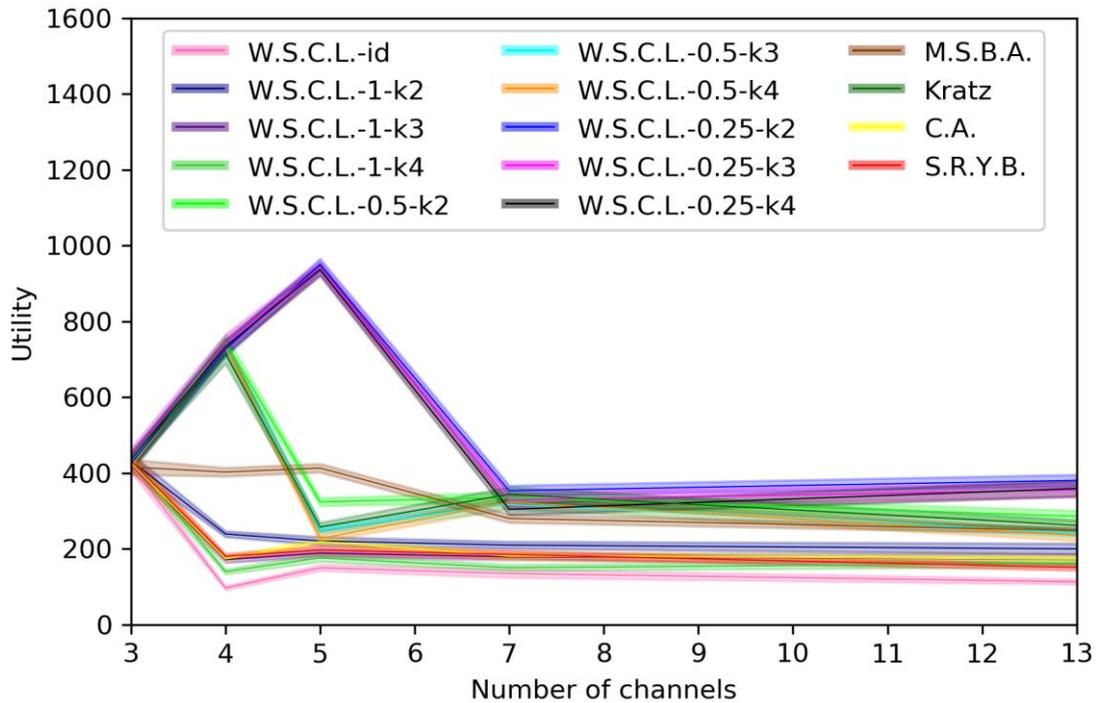


Figura 66 Comparativa entre casos con interferencias 100% ocupación, distribución 1

En lo respectivo a las gráficas presentadas, resultado de la aplicación de LCCS, se puede decir que la mayoría de las observaciones realizadas para el caso de *Random* se pueden volver a utilizar aquí, con la diferencia evidente de las mayores magnitudes de utilidad que se obtienen en el caso de LCCS.

De nuevo, las gráficas de las matrices de W.S.C.L. [39] con factor de roll-off = 0,25 son las que alcanzan el pico máximo de utilidad, que se obtiene usando 5 canales. El segundo mayor valor se observa en las matrices de W.S.C.L. [39] con factor de roll-off = 0,5 y la matriz de Kratz [19], obtenido con 4 canales. La matriz de M.S.B.A. [24] sigue siendo la que presenta una línea con valores más estables, quedando por debajo de esos valores las gráficas de las matrices de W.S.C.L. [39] con factor de roll-off = 1, la matriz de C.A. [7] y la de S.R.Y.B. [34].

Queda a la vista de esta manera el mejor comportamiento que se esperaba de LCCS en comparación con *Random*.

### 8.3. Comparativa

A partir de las gráficas obtenidas para *Random* y LCCS se han podido explicar las primeras conclusiones y observaciones, sin embargo, en este apartado se pretende realizar una comparativa más profunda entre los dos casos.

Para empezar, como se había adelantado en la explicación del método *Random*, los resultados obtenidos para ese método de asignación de canales sirven de base para la posterior comparativa, es decir, la comparación de los resultados de las matrices se va a realizar mediante los valores de utilidad normalizados de LCCS respecto a los de *Random*.

Como se ha mencionado, el valor de la utilidad obtenido a partir de *Random* será utilizado como valor de referencia (denominado  $U_{ref}$ ) para obtener un valor normalizado ( $\bar{U}_{LCCS}$ ) a partir de la utilidad obtenida mediante LCCS ( $U_{LCCS}$ ):

$$\bar{U}_{LCCS} = \frac{U_{LCCS}}{U_{ref}} \quad (8)$$

Las tablas con los nuevos resultados se pueden consultar en el ANEXO III, ya que esta sección se va a centrar en la comparación mediante las gráficas dibujadas a partir de los nuevos valores normalizados. Cabe destacar que esta comparativa se ha realizado respecto a los grafos de la distribución 1 de las aulas, debido a que, como se ha explicado ya, el caso de LCCS sólo se ha realizado con dicha distribución al no apreciarse diferencia entre los resultados entre distribuciones para el caso *Random*.

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas a partir de los valores normalizados de la utilidad, como siempre en función del número de canales y para los cuatro porcentajes de ocupación que se han considerado durante todo el estudio.

- **25% ocupación: grafo EPS-0.25-1\_1.**

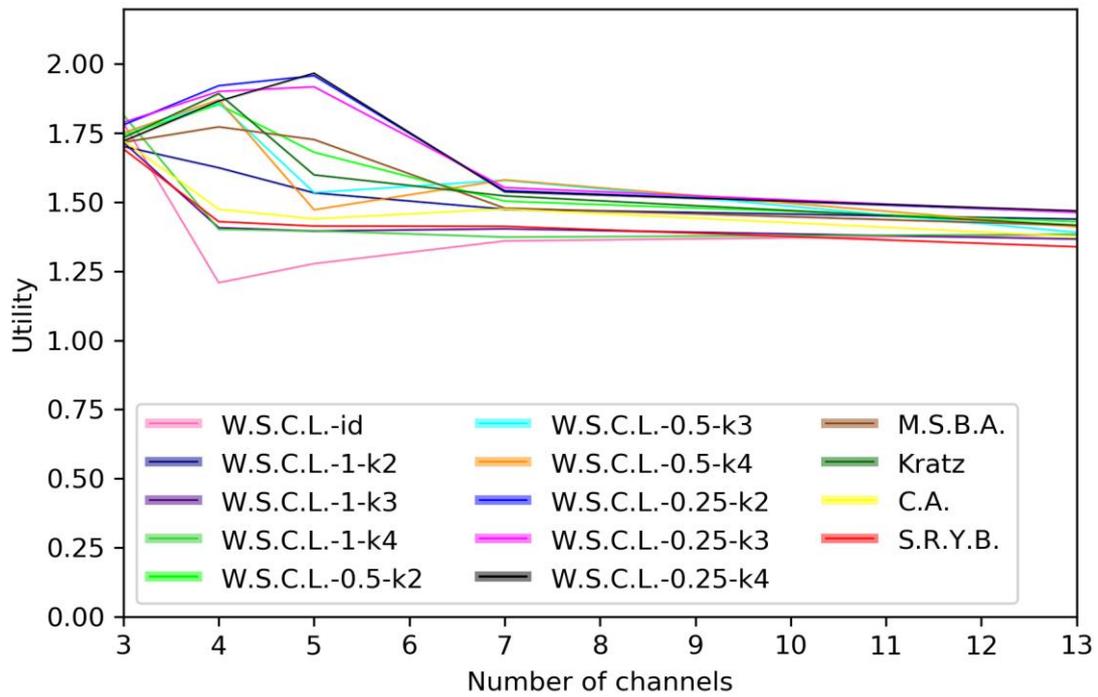


Figura 67 Comparativa resultados normalizados 25% ocupación

- **50% ocupación: grafo EPS-0.5-1\_1.**

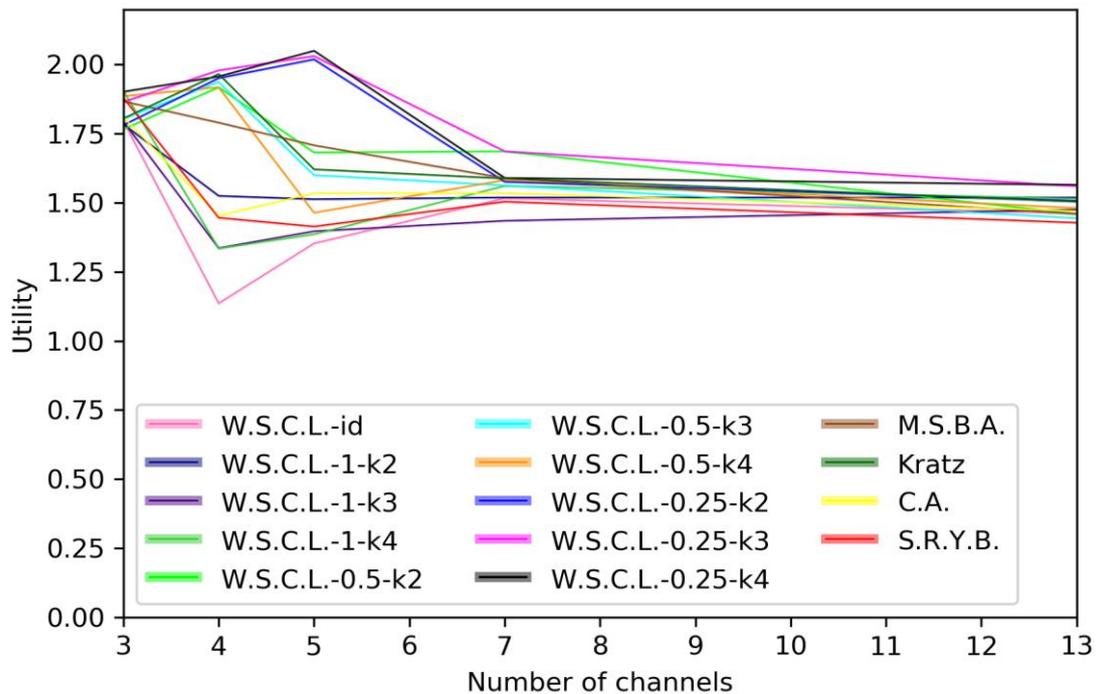


Figura 68 Comparativa resultados normalizados 50% ocupación

- **75% ocupación: grafo EPS-0.75-1\_1.**

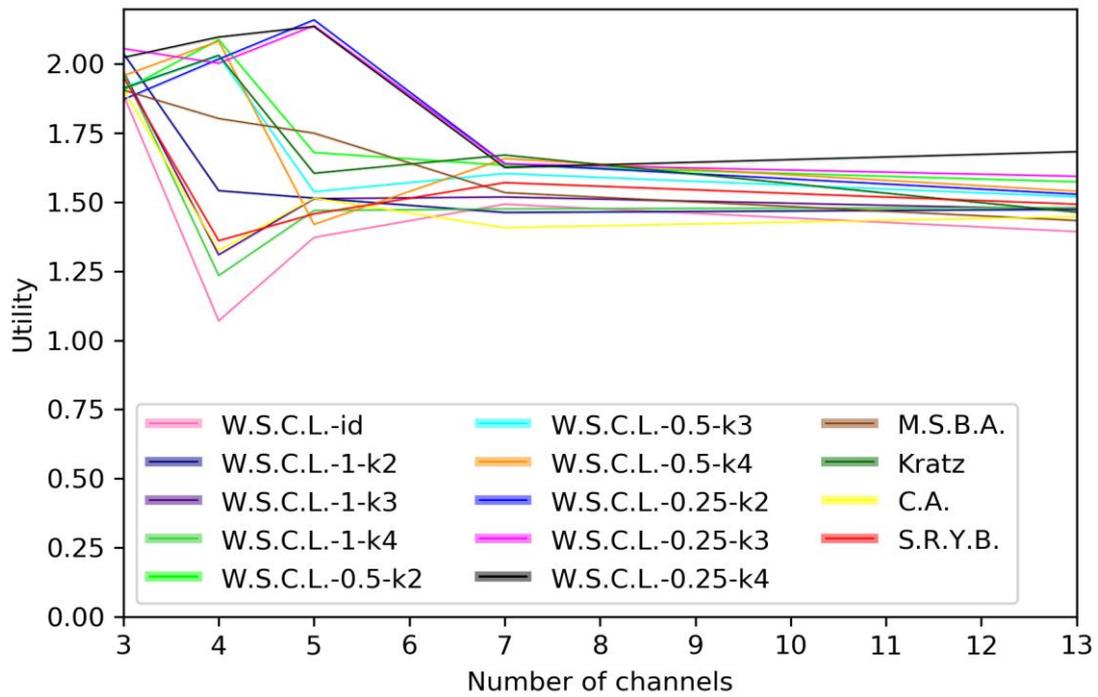


Figura 69 Comparativa resultados normalizados 75% ocupación

- **100% ocupación: grafo EPS-1-1\_1.**

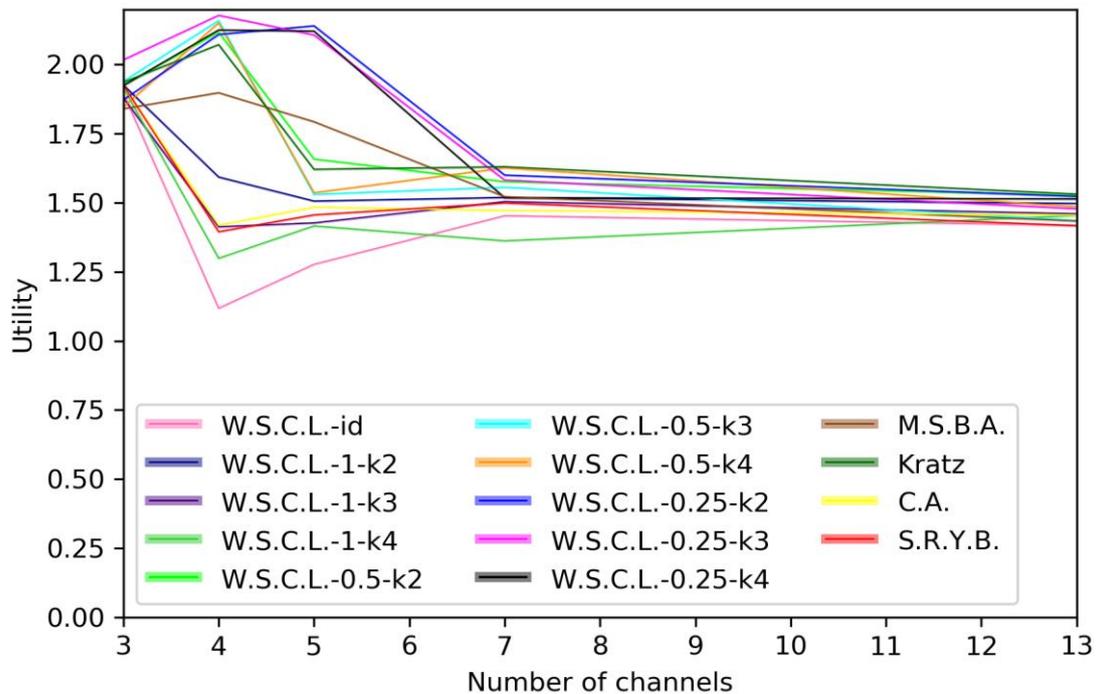


Figura 70 Comparativa resultados normalizados 100% ocupación

Tal y como se ha podido apreciar ya en los casos individuales de *Random* y LCCS, las diferencias más notables entre las distintas matrices aparecen cuando se usan entre 3 y 7 canales, siendo las matrices de W.S.C.L. [39] con factor de roll-off = 0,25 con las que se obtienen los valores máximos de utilidad cuando se usan 5 canales. Las matrices de W.S.C.L. [39] con factor de roll-off = 1, la matriz de C.A. [7] y la de S.R.Y.B. [34] son las que presentan los valores de utilidad más bajos con 3 canales asignados, mientras que las matrices de W.S.C.L. [39] con factor de roll-off = 0,5 y la matriz de Kratz [19] presentan altos valores de utilidad con 4 canales, aunque no llegan a los observados con las matrices de W.S.C.L. [39] con factor de roll-off = 0,25. Quedando, por tanto, la matriz de M.S.B.A. [24] con valores intermedios y presentando menos picos que el resto de casos.

En el tramo final, a partir de los 7 canales, en todos los casos se aprecia una tendencia clara a la estabilización de los valores de utilidad, quedando todos los casos en un margen de valores relativamente estrecho.

Entre los distintos porcentajes de ocupación, las diferencias que se aprecian están en el tramo inicial (de 3 a 7 canales), observándose pendientes más abruptas alrededor de los puntos máximos y mínimos a medida que crece la ocupación del escenario.

A partir de esta comparativa se pueden obtener varias conclusiones adicionales a las ya comentadas en el caso de *Random* y de LCCS por separado.

Una observación muy importante, ampliando lo que se comenta en el *paper* [13], es que, en cada una de las matrices, tanto para LCCS como para *Random*, a medida que el número de canales disponibles crece, la utilidad decrece. Es decir, es preferible usar pocos canales (3, 4 o 5 canales según el caso) que no se solapen o que apenas lo hagan (en función de la distancia entre canales que presente la matriz de interferencia), ya que utilizando una cantidad mayor de canales supondrá una cantidad de interferencias mayor.

## 9. Conclusiones

Durante el desarrollo del trabajo, a través del estudio de la diversa documentación consultada y mediante los experimentos realizados, se han ido adquiriendo una serie de conocimientos y se han podido extraer diversas conclusiones, tanto en lo referente a la experiencia del trabajo en general, como en la temática y los objetivos que se planteaban en particular.

Partiendo de los objetivos que se marcaban al inicio de este estudio comparativo, se puede concluir que:

- Dada la cantidad de dispositivos que comparten las frecuencias de la banda de 2,4 GHz con las redes Wi-Fi, cobra especial importancia el problema de la asignación de canales.
- A la vista de los resultados obtenidos, resulta notable la influencia que tienen las matrices de interferencia en el cálculo de la utilidad de una red y son claras las diferencias entre usar una matriz u otra, de igual manera que se han detectado casos de distintas matrices con similitudes claras.
- Existe una clara relación entre los valores de utilidad obtenidos y la distancia entre canales definida en la matriz de interferencia, ya que se observan los mayores picos de utilidad para las matrices cuyos canales interfieren con menos canales adyacentes, por ejemplo, los casos ya comentados de las matrices de W.S.C.L. [39] con factor de roll-off = 0,25, seguidas de las matrices de W.S.C.L. [39] con factor de roll-off = 0,5 y la matriz de Kratz [19], continuando por la de M.S.B.A. [24], quedando con los peores valores de utilidad las de W.S.C.L. [39] con factor de roll-off = 1, la matriz de C.A. [7] y la de S.R.Y.B. [34], que son las que interfieren a un mayor número de canales.
- Como ya se ha explicado anteriormente, se observa claramente un aumento de la utilidad a medida que crece la ocupación de la red.
- El primer tramo (de 3 a 5 canales) para las matrices de W.S.C.L. [39] con factor de roll-off = 0,25 y (de 3 a 4 canales) con factor de roll-off = 0,5 coincide casi con exactitud con ese mismo tramo inicial en el caso ideal en el que no se consideran las interferencias. Esto es debido, como se ha comentado, a la distancia entre canales de esas matrices, ya que, por ejemplo, teniendo 3 canales (1, 7 y 13) el canal 1 llega a interferir al canal 3 o al 4 respectivamente, es decir, que entre esos 3 canales que entran en juego en la asignación, no se producen interferencias.
- Como se esperaba, el algoritmo LCCS presenta un mejor comportamiento que *Random*.

Además, de manera más general, también se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Al ser el primer trabajo de tal cantidad de horas que se lleva a cabo, la experiencia ha sido muy fructífera en lo que a conocimientos adquiridos se refiere, así como a la organización, documentación y solución de problemas de manera autónoma (aunque siempre con la valiosa ayuda del tutor cuando ha sido necesario).
- Se han adquirido nuevos conocimientos, además de haber profundizado en otros, además de la interrelación entre distintos campos en los que se había trabajado por separado durante el Grado.
- La importancia que tiene el tema que se ha tratado durante el TFG, más teniendo en cuenta el avance que se produce diariamente en este tipo de tecnologías y más cuando se habla constantemente de la tecnología 5G y el problema que supone la reasignación de las frecuencias.

Por último, también se aportan líneas futuras de trabajo para continuar con el que se ha empezado durante este TFG:

- Podría realizarse la misma comparación utilizando la asignación de canales mediante SA (*Simulated Annealing*), ya que se comporta de mejor manera que *Random* y LCCS. Este caso no se ha podido incluir en este trabajo debido a la complicación que supone trabajar con SA y el número de horas extra que supondría completarlo.
- Tratar de averiguar en profundidad las causas que provocan descensos abruptos de utilidad en las distintas matrices de interferencia, más allá de la relación con la distancia entre canales y los canales concretos que se usan en cada asignación.
- Además, si el lector está interesado por el tema tratado en este trabajo, se proponen en la bibliografía varios artículos y estudios con los que continuar ampliando los conocimientos sobre este campo. Estos documentos son los correspondientes a las referencias [9], [21], [27], [28] y [33].

## 10. Pliego de condiciones

Durante esta sección se van a presentar y detallar todos los aspectos concernientes a la planificación, tareas realizadas y recursos utilizados durante este trabajo, así como el presupuesto que sería necesario para llevar a cabo este estudio.

### 10.1. Material utilizado

En este apartado se van a mostrar todos los recursos técnicos, tanto hardware como software, que han sido utilizados durante la realización del trabajo, junto con sus características y tareas en las que han sido necesarios.

#### 10.1.1. Recursos Hardware

A continuación, se enumeran los dispositivos hardware utilizados, así como sus especificaciones.

##### 1. **Ordenador portátil:**

Un ordenador portátil ASUS K55VD de 15,6" con sistema operativo Windows 10 Pro de 64 bits, procesador Intel Core i7-3610QM, memoria RAM de 8 GB y tarjeta gráfica NVIDIA GeForce 610M de 2 GB.



*Figura 71 Portátil utilizado [18]*

Este portátil va a ser el dispositivo principal con el que se va a realizar el trabajo, ya que será el encargado de procesar todas las pruebas que se realizarán para obtener los cálculos de utilidad y representar las gráficas, a través de las

herramientas software que se han mencionado en capítulos anteriores y que serán descritas de nuevo en el siguiente apartado. Además, es el responsable de la escritura de esta memoria mediante programas de ofimática, así como de la documentación y consulta a través de documentos en formato digital, ya sea online o no.

**2. Conexión Wi-Fi inalámbrica:**

Permite la búsqueda de información y documentación a través del ordenador portátil, además de la comunicación mediante correo electrónico con el tutor del TFG, siendo estos aspectos de gran importancia durante el desarrollo del trabajo.

### 10.1.2. Recursos Software

La mayor parte de estas herramientas han sido explicadas detalladamente en capítulos anteriores, sin embargo, se nombran de nuevo en este apartado para disponer de una lista completa de los recursos que han sido necesarios para completar este estudio. Esto puede ser de referencia para futuros proyectos similares o en caso de querer continuar con el que se presenta en esta memoria.

**1. Windows 10 Pro:**

Como ya se ha mencionado, es el sistema operativo que tiene instalado el ordenador portátil utilizado, que soporta el resto de software nombrado a continuación.

**2. Anaconda:**

Es una distribución libre de Python, que permite gestionar todos los paquetes disponibles mediante su interfaz gráfica. Soporta computaciones de alto rendimiento, aspecto importante en lo que concierne a este trabajo.

**3. Spyder:**

Es un entorno de desarrollo para Python que dispone de editor gráfico, de gran utilidad para la utilización y manejo de los scripts utilizados durante el desarrollo del trabajo.

**4. NetworkX:**

Se trata de un *framework* de Python que permite trabajar con redes complejas, siendo especialmente útil en este caso en lo que respecta al uso y manejo de grafos.

#### **5. Scripts de Python:**

Son los ficheros que contienen el código en Python que recoge todas las operaciones necesarias para llevar a cabo el trabajo, concretamente los cálculos de utilidad con intervalos de confianza y la obtención de las gráficas de la utilidad en función del número de canales. Estos scripts y los resultados obtenidos de su ejecución ya han sido explicados con detalle en capítulos anteriores.

#### **6. Office 365: Microsoft Word y Microsoft PowerPoint:**

Son los programas de ofimática que se han utilizado para la redacción de esta memoria y la posterior presentación del estudio.

#### **7. Adobe Acrobat Reader:**

Se trata del lector de archivos PDF utilizado para consultar gran parte de la documentación manejada, ya que la mayoría de los archivos digitales se encontraban en este formato.

### 10.2. Planificación

A continuación, se van a desgranar las fases y tareas en las que se ha dividido el desarrollo del trabajo, así como el tiempo empleado en cada una de ellas. Como ya se ha explicado anteriormente, el desarrollo se puede dividir en tres grandes fases, aunque en este apartado se va a añadir una cuarta fase, la referente a la elaboración de la documentación del trabajo:

#### **1. Documentación y aprendizaje.**

- a. Lectura y comprensión de los artículos [10] y [13].
- b. Lectura y comprensión de los artículos [7], [19], [24], [34] y [39].
- c. Instalación y familiarización con el entorno Anaconda y el editor Spyder y primeras pruebas de los scripts de Python.

#### **2. Simulaciones y experimentos.**

- a. Simulaciones de los scripts con asignación *random*. Resultados de utilidad e intervalos de confianza.
- b. Obtención de las gráficas de utilidad en función del número de canales para la asignación *random*.
- c. Simulaciones de los scripts con asignación LCCS. Resultados de utilidad e intervalos de confianza.
- d. Obtención de las gráficas de utilidad en función del número de canales para la asignación LCCS.

**3. Obtención de conclusiones.**

- a. Análisis y comparativa de los resultados obtenidos.

**4. Elaboración de la memoria y de la presentación.**

- a. Redacción de la memoria del TFG.
- b. Elaboración de la presentación del TFG.

Una vez desglosadas las principales tareas llevadas a cabo durante el desarrollo del trabajo, se presenta, a continuación, un diagrama de Gantt en el que se pueden visualizar los tiempos que han ocupado cada una de estas actividades.

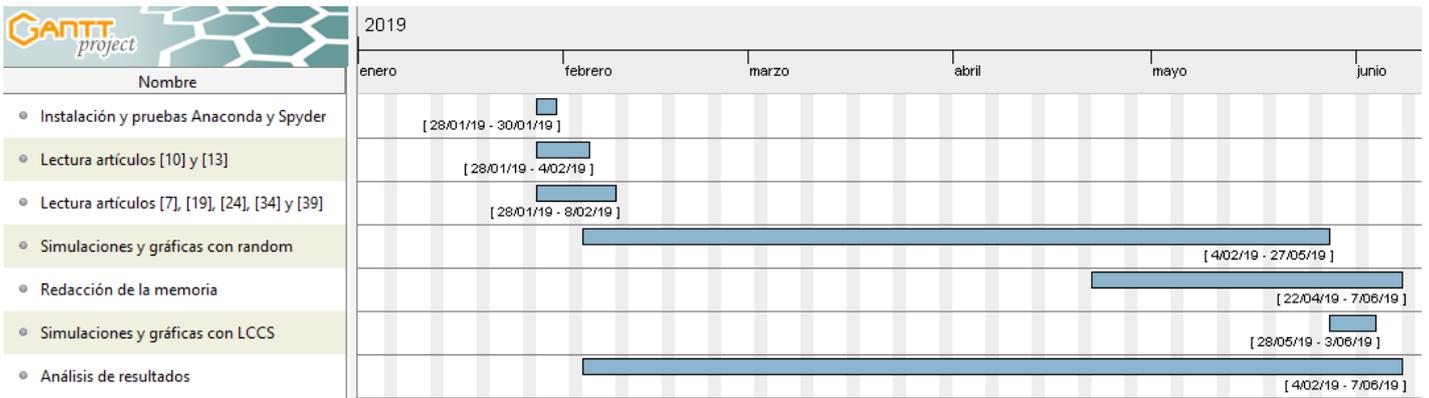


Figura 72 Diagrama de Gantt del TFG [12]

### 10.3. Presupuesto

Durante la extensión de este apartado se mostrará en detalle cada uno de los gastos que se deben llevar a cabo para la realización de este estudio de manera satisfactoria. Los gastos incluyen los precios de los materiales, así como las licencias de software utilizado durante el desarrollo del trabajo. A partir de estos gastos, se calcula el presupuesto total que se debe manejar para efectuarlo, el cual se presenta desglosado en la siguiente tabla.

Tipo	Concepto	Precio (con IVA)	Información
Hardware	Portátil ASUS K55VD de 15,6"	729 € <sup>1</sup>	Windows 10 Pro, procesador Intel Core i7, RAM 8 GB y tarjeta gráfica 2 GB.
Software	Licencia Office 365 para Windows	149,00 € <sup>2</sup>	Office Hogar y Estudiantes 2019
	Licencia Windows 10	0 €	Preinstalado, incluido en el precio del portátil
	Anaconda	0 €	Software libre
	Spyder	0 €	Software libre
	NetworkX	0 €	Software libre
Personal	Sueldo técnico de diseño	2.589,43 €	1.208,40 €/mes <sup>3</sup> , 140 h/mes, 300 horas totales
	<b>TOTAL</b>	<b>3.467,43 €</b>	

Tabla 40 Desglose y cálculo del presupuesto

<sup>1</sup> Precio obtenido de PcComponentes [4]

<sup>2</sup> Este gasto podría evitarse, ya que en este caso se ha utilizado la licencia de estudiantes de la Universidad de Alcalá de Henares, siendo esta gratuita. En cuyo caso el presupuesto sería de 3.318,43 €.

<sup>3</sup> Sueldo obtenido de [32]

# 11. Bibliografía

- [1] "11.1. pickle — Python object serialization — Python 2.7.16 documentation", *Docs.python.org*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://docs.python.org/2/library/pickle.html>. [Accedido: 28- May- 2019].
- [2] M. Achanta, "Method and apparatus for least congested channel scan for wireless access points," US 2006/0072602 A1, 6-abr-2006.
- [3] D. Amoedo, "Spyder, un potente entorno de desarrollo interactivo para Python", *Ubunlog*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://ubunlog.com/spyder-entorno-desarrollo-python/>. [Accedido: 04- Jun- 2019].
- [4] "Asus K55VD-SX441H i7-3630/8GB/1TB/GT 610/15.6" | PcComponentes", *Pccomponentes.com*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.pccomponentes.com/asus-k55vd-sx441h-i7-3630-8gb-1tb-gt-610-15-6->. [Accedido: 03- Jun- 2019].
- [5] "Biblioguías: RefWorks: Presentación", *Uah-es.libguides.com*, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://uah-es.libguides.com/refworks/que\\_es\\_refworks](https://uah-es.libguides.com/refworks/que_es_refworks). [Accedido: 30- May- 2019].
- [6] "Changing the "tick frequency" on x or y axis in matplotlib?", *Stack Overflow*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://stackoverflow.com/questions/12608788/changing-the-tick-frequency-on-x-or-y-axis-in-matplotlib>. [Accedido: 08- Mar- 2019].
- [7] K. R. Chowdhury and I. F. Akyildiz, "Cognitive wireless mesh networks with dynamic spectrum access," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 26, (1), pp. 168-181, 2008.
- [8] "color example code: named\_colors.py — Matplotlib 2.0.2 documentation", *Matplotlib.org*, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://matplotlib.org/examples/color/named\\_colors.html](https://matplotlib.org/examples/color/named_colors.html). [Accedido: 24- Abr- 2019].
- [9] E. De La Hoz *et al*, "Multi-agent nonlinear negotiation for wi-fi channel assignment," in *Proceedings of the 16th Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, 2017, pp. 1035-1043.
- [10] E. De la Hoz *et al*, "Automated Negotiation for Resource Assignment in Wireless Surveillance Sensor Networks," *Sensors (Basel)*, vol. 15, (11), pp. 29547-29568, 2015. . DOI: 10.3390/s151129547 [doi].

- [11] "Digitizelt - Software de digitalización - digitaliza un gráfico o diagrama escaneados y los convierte en datos-(x,y).", *Digitizeit.de*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.digitizeit.de/es/>. [Accedido: 28- May- 2019].
- [12] "GanttProject", *Ganttproject.biz*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.ganttproject.biz/>. [Accedido: 30- May- 2019].
- [13] J. M. Gimenez-Guzman *et al*, "On the goodness of using orthogonal channels in WLAN IEEE 802.11 in realistic scenarios," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, 2018.
- [14] D. B. Green and A. Obaidat, "An accurate line of sight propagation performance model for ad-hoc 802.11 wireless LAN (WLAN) devices," in *2002 IEEE International Conference on Communications. Conference Proceedings. ICC 2002 (Cat. no. 02CH37333)*, 2002, pp. 3424-3428.
- [15] J. L. Gross and J. Yellen, *Handbook of Graph Theory*. CRC press, 2004.
- [16] "Home - Anaconda", *Anaconda*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.anaconda.com/>. [Accedido: 04- Feb- 2019].
- [17] "Installing — NetworkX 1.11 documentation", *Networkx.github.io*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://networkx.github.io/documentation/networkx-1.11/install.html>. [Accedido: 08- Feb- 2019].
- [18] "K55VD | Portátiles | ASUS", *ASUS*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.asus.com/latin/Laptops/K55VD/gallery/>. [Accedido: 30- May- 2019].
- [19] J. Kratz, *Optimization Models and Algorithms for Designing Wireless Local Area Networks*. Southern Methodist University, 2011.
- [20] J. Ladd, J. Otis, C. Warren and S. Weingart, "Exploring and Analyzing Network Data with Python", *Programminghistorian.org*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://programminghistorian.org/en/lessons/exploring-and-analyzing-network-data-with-python>. [Accedido: 12- Jun- 2019].
- [21] I. Marsa-Maestre *et al*, "Nonlinear negotiation approaches for complex-network optimization: a study inspired by Wi-Fi channel assignment," *Group Decis. Negotiation*, vol. 28, (1), pp. 175-196, 2019.

- [22] "Migration guide from 1.X to 2.0 — NetworkX 2.3 documentation", *Networkx.github.io*, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://networkx.github.io/documentation/stable/release/migration\\_guide\\_from\\_1.x\\_to\\_2.0.html](https://networkx.github.io/documentation/stable/release/migration_guide_from_1.x_to_2.0.html). [Accedido: 15- Feb- 2019].
- [23] A. Mishra, S. Banerjee and W. Arbaugh, "Weighted coloring based channel assignment for WLANs," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 9, (3), pp. 19-31, 2005.
- [24] A. Mishra *et al*, "Partially overlapped channels not considered harmful," in *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 2006, pp. 63-74.
- [25] "NetworkX — NetworkX", *Networkx.github.io*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://networkx.github.io/>. [Accedido: 10-May-2019].
- [26] "networkx.Graph.nodes — NetworkX 2.3 documentation", *Networkx.github.io*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://networkx.github.io/documentation/stable/reference/classes/generated/networkx.Graph.nodes.html>. [Accedido: 10- Jun- 2019].
- [27] D. Orden *et al*, "Spectrum graph coloring and applications to Wi-Fi channel assignment," *Symmetry*, vol. 10, (3), pp. 65, 2018.
- [28] D. Orden *et al*, "Spectrum graph coloring to improve Wi-Fi channel assignment in a real-world scenario via edge contraction," *Discrete Applied Mathematics*, 2019.
- [29] "Los pickles de Python", *Programación en Castellano.*, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://programacion.net/articulo/los\\_pickles\\_de\\_python\\_1860](https://programacion.net/articulo/los_pickles_de_python_1860). [Accedido: 28- May- 2019].
- [30] "Raised-cosine filter", *En.wikipedia.org*, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Raised-cosine\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Raised-cosine_filter). [Accedido: 27-Abr-2019].
- [31] "RefWorks Login", *Refworks.com*, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.refworks.com/refworks2/default.aspx?r=references|MainLayout::init>. [Accedido: 04- Jun- 2019].
- [32] "Resolución de 30 de diciembre de 2016, de la Dirección General de Empleo, por la que se registra y publica el Convenio colectivo del sector de empresas de ingeniería y oficinas de estudios técnicos", *Noticias Jurídicas*, 2019. [En línea]. Disponible en:

[http://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Laboral/589283-convenio-colectivo-del-sector-de-empresas-de-ingenieria-y-oficinas-de-estudios.html#a33](http://noticias.juridicas.com/base_datos/Laboral/589283-convenio-colectivo-del-sector-de-empresas-de-ingenieria-y-oficinas-de-estudios.html#a33). [Accedido: 03- Jun- 2019].

[33] S. Salcedo-Sanz *et al*, "The coral reefs optimization algorithm: a novel metaheuristic for efficiently solving optimization problems," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, 2014.

[34] V. Shrivastava *et al*, "802.11 n under the microscope," in *Proceedings of the 8th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement*, 2008, pp. 105-110.

[35] "Spyder Website", *Spyder-ide.org*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.spyder-ide.org/>. [Accedido: 04- Feb- 2019].

[36] "Tipos de estándares Wi-Fi", *CEMEBlog*, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://blog.cemebe.info/tipos-de-estandares-wi-fi/>. [Accedido: 27-Abr-2019].

[37] L. Toro, "Anaconda Distribution: La Suite más completa para la Ciencia de datos con Python", *Desde Linux*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://blog.desdelinux.net/ciencia-de-datos-con-python/>. [Accedido: 28- May- 2019].

[38] "UsingPickle - Python Wiki", *Wiki.python.org*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://wiki.python.org/moin/UsingPickle>. [Accedido: 12- Feb- 2019].

[39] J. Wang *et al*, "Partially overlapped channel assignment for multi-channel multi-radio wireless mesh networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2015, (1), pp. 25, 2015.

[40] "WiFi de 2,4 GHz vs 5 GHz: cuándo es mejor usar cada banda", *ADSLZone*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.adslzone.net/reportajes/wifi/2-4-5-ghz>. [Accedido: 27- Abr-2019].

[41] M. Zoltowski, "Equations for the Raised Cosine and Square-Root Raised Cosine Shapes," *Communication Systems Division, Linköping University*, 2013.

## 12. ANEXOS

### 12.1. ANEXO I: Tablas de resultados

#### 12.1.1. Distribución 2 de las aulas

- **Caso sin interferencias**

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	83.268	1.588	123.397	2.254	158.108	2.680	207.494	3.003	287.771	3.028
50%	137.361	2.826	205.815	3.822	265.878	4.444	352.899	5.102	493.358	5.106
75%	188.468	3.579	281.808	4.841	364.836	5.872	482.526	7.035	681.261	7.195
100%	232.445	4.655	351.380	6.113	455.075	7.696	617.812	9.000	879.099	9.304

Tabla 41 Resultados de utilidad caso sin interferencias

- **Casos con interferencias**

1. Matrices de W.S.C.L. [39]

- a. Máscara ideal

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	86.036	1.640	37.310	0.667	46.906	0.986	39.322	0.786	33.923	0.605
50%	137.600	2.766	50.478	1.213	68.015	1.691	56.363	1.479	46.976	1.161
75%	191.158	3.684	77.103	1.418	98.596	2.180	83.690	1.771	72.209	1.399
100%	232.876	4.576	92.360	1.958	119.347	2.895	98.294	2.223	84.810	1.843

Tabla 42 Resultados matriz de [39] con máscara ideal

- b. Factor de roll-off = 1

- i.  $k = 2$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	86.321	1.680	63.334	0.914	58.553	1.014	58.335	0.920	55.838	0.927
50%	140.638	2.751	93.997	1.595	88.309	1.867	85.469	1.668	82.270	1.679
75%	187.973	3.383	136.754	1.998	127.782	2.328	124.754	2.104	119.304	2.022
100%	235.615	4.631	159.505	2.522	153.101	2.881	148.483	2.655	144.505	2.834

Tabla 43 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y  $k=2$

ii.  $k = 3$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	85.836	1.625	51.919	0.834	55.491	1.080	50.976	0.917	49.219	0.932
50%	139.617	2.822	74.882	1.371	78.413	1.742	71.645	1.556	72.004	1.610
75%	188.458	3.580	109.513	1.641	117.115	2.239	106.219	1.853	103.247	1.887
100%	230.726	4.453	129.383	2.192	138.298	2.814	128.430	2.590	124.594	2.502

Tabla 44 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	85.195	1.580	47.292	0.816	51.072	1.000	46.236	0.870	46.667	0.899
50%	138.409	2.806	65.651	1.348	76.932	1.826	65.983	1.455	66.789	1.602
75%	187.197	3.599	98.399	1.637	108.969	2.237	97.494	1.799	97.522	1.884
100%	233.677	4.517	116.105	2.065	131.639	2.868	115.592	2.352	121.722	2.709

Tabla 45 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y  $k=4$

c. Factor de roll-off = 0,5

i.  $k = 2$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	84.387	1.514	123.553	2.186	80.973	1.294	83.470	1.521	74.449	1.310
50%	139.358	2.765	207.585	3.936	121.508	2.093	133.770	2.673	114.902	2.339
75%	189.149	3.522	277.908	4.956	173.428	2.684	184.051	3.452	161.006	3.009
100%	233.672	4.523	353.456	6.349	207.838	3.340	221.765	4.328	194.106	3.778

Tabla 46 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=2$

ii.  $k = 3$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	85.035	1.579	123.534	2.162	67.806	1.156	78.854	1.529	67.420	1.331
50%	136.180	2.697	208.066	3.686	99.393	1.924	122.487	2.743	102.913	2.312
75%	190.934	3.583	284.353	4.925	142.262	2.354	173.846	3.506	141.185	2.695
100%	231.592	4.633	357.179	6.332	174.258	3.088	211.860	4.398	174.860	3.471

Tabla 47 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	84.956	1.626	124.678	2.232	60.196	1.080	78.334	1.588	63.536	1.242
50%	138.390	2.772	205.731	3.780	89.605	1.862	121.512	2.715	96.502	2.203
75%	187.440	3.576	282.386	4.978	127.793	2.273	169.990	3.344	136.092	2.704
100%	231.829	4.372	355.145	6.181	154.599	2.958	209.024	4.481	166.086	3.717

Tabla 48 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=4$

d. Factor de roll-off = 0,25

i.  $k = 2$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	83.900	1.575	123.918	2.283	159.585	2.586	85.382	1.538	93.640	1.745
50%	138.130	2.760	210.762	3.773	266.538	4.433	134.801	2.747	151.748	3.050
75%	189.907	3.637	282.291	4.978	362.243	5.704	189.144	3.559	209.902	4.020
100%	235.458	4.435	356.568	6.263	451.929	7.180	231.469	4.550	253.428	5.059

Tabla 49 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y  $k=2$

ii.  $k = 3$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	84.813	1.512	123.925	2.237	155.075	2.559	79.699	1.504	90.027	1.835
50%	136.983	2.783	211.013	3.687	265.316	4.423	127.596	2.703	145.807	3.058
75%	185.058	3.484	281.159	4.934	362.742	5.765	177.131	3.584	198.726	3.940
100%	235.440	4.591	359.404	6.114	459.067	7.434	218.876	4.769	247.324	5.076

Tabla 50 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	82.941	1.602	123.732	2.100	159.309	2.575	77.483	1.552	87.974	1.713
50%	134.937	2.799	208.524	3.835	269.216	4.397	122.867	2.786	140.214	3.060
75%	188.851	3.502	278.517	5.054	363.267	5.938	169.569	3.528	197.939	3.999
100%	229.593	4.292	348.162	6.524	458.770	7.692	210.781	4.442	241.524	4.842

Tabla 51 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y  $k=4$

## 2. Matriz de M.S.B.A. [24]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	85.209	1.676	86.439	1.357	94.588	1.427	74.674	1.190	72.450	1.083
50%	138.431	2.708	134.156	2.181	146.913	2.372	115.248	1.985	105.479	1.877
75%	186.207	3.488	190.805	2.924	205.724	2.939	162.506	2.703	155.153	2.370
100%	235.617	4.616	229.315	3.601	246.871	3.658	194.591	3.228	184.424	2.900

Tabla 52 Resultados matriz de [24]

## 3. Matriz de Kratz [19]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	83.501	1.592	123.242	2.204	66.280	1.106	82.318	1.544	68.755	1.272
50%	138.380	2.705	206.550	3.711	99.263	1.901	126.791	2.696	105.401	2.261
75%	187.407	3.599	279.938	4.988	143.018	2.421	178.658	3.599	154.052	2.891
100%	230.178	4.499	358.133	6.485	169.779	3.048	221.272	4.602	179.270	3.490

Tabla 53 Resultados matriz de [19]

## 4. Matriz de C.A. [7]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	83.896	1.553	53.426	0.876	61.476	1.114	52.223	0.907	51.666	0.876
50%	139.377	2.801	75.994	1.422	91.023	1.841	75.042	1.527	74.641	1.493
75%	187.683	3.424	112.616	1.767	129.362	2.323	113.002	1.974	108.825	1.831
100%	232.212	4.548	131.548	2.127	156.063	2.919	134.670	2.671	130.408	2.316

Tabla 54 Resultados matriz de [7]

## 5. Matriz de S.R.Y.B. [34]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	84.551	1.604	54.351	0.821	56.405	1.033	52.980	0.886	45.558	0.695
50%	136.504	2.760	78.110	1.390	81.833	1.804	76.706	1.609	65.489	1.337
75%	191.995	3.821	115.077	1.777	119.079	2.270	113.472	1.968	97.292	1.598
100%	233.275	4.281	135.601	2.162	142.768	2.780	131.922	2.494	115.125	2.077

Tabla 55 Resultados matriz de [34]

### 12.1.2. Distribución 3 de las aulas

- **Caso sin interferencias**

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	95.072	1.642	136.266	2.248	168.327	2.648	221.252	2.925	296.267	2.973
50%	145.007	3.020	209.159	4.010	272.425	4.544	348.846	5.047	491.351	5.296
75%	195.494	3.885	289.565	5.243	373.634	6.218	493.623	7.128	694.423	7.247
100%	222.627	4.302	342.045	5.991	449.342	7.835	604.953	8.471	871.302	8.929

Tabla 56 Resultados de utilidad caso sin interferencias

- **Casos con interferencias**

1. Matrices de W.S.C.L. [39]

- a. Máscara ideal

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	97.446	1.753	42.324	0.803	54.122	1.136	45.903	0.912	39.310	0.741
50%	143.425	3.002	63.257	1.307	78.725	1.908	66.389	1.463	59.891	1.196
75%	195.366	3.973	76.571	1.664	101.995	2.432	84.215	2.006	71.666	1.656
100%	221.119	4.482	84.110	1.901	110.940	2.757	90.622	2.266	76.306	1.716

Tabla 57 Resultados matriz de [39] con máscara ideal

- b. Factor de *roll-off* = 1

- i.  $k = 2$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	96.499	1.708	70.926	0.998	66.619	1.200	64.622	1.078	64.143	1.192
50%	143.425	2.983	104.923	1.611	100.613	2.033	97.353	1.767	94.707	1.818
75%	195.512	3.785	133.055	2.166	129.202	2.590	124.147	2.293	118.277	2.302
100%	220.009	4.537	151.202	2.550	143.169	2.947	137.424	2.546	131.825	2.681

Tabla 58 Resultados matriz de [39] con factor de *roll-off*=1 y  $k=2$

12.1.3. k = 3

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	95.492	1.677	57.594	0.846	60.884	1.128	56.098	0.974	54.413	0.976
50%	142.436	2.860	87.575	1.566	92.362	1.932	84.916	1.656	83.566	1.667
75%	193.669	3.851	109.351	1.930	116.835	2.483	107.420	2.191	107.660	2.276
100%	219.962	4.579	118.976	2.002	116.835	2.483	116.005	2.414	114.791	2.573

Tabla 59 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=3

12.1.4. k = 4

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	96.360	1.692	51.972	0.855	58.596	1.166	52.390	0.990	52.590	1.016
50%	143.005	3.069	77.529	1.429	86.894	1.915	79.946	1.697	80.326	1.627
75%	192.220	3.708	99.477	1.852	112.220	2.433	97.025	1.997	99.605	2.276
100%	221.337	4.550	107.974	2.078	121.949	2.863	106.784	2.369	107.835	2.438

Tabla 60 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y k=4

c. Factor de roll-off = 0,5

i. k = 2

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	95.291	1.682	136.785	2.268	88.597	1.312	93.357	1.681	82.415	1.434
50%	142.579	3.044	210.669	3.968	133.378	2.234	142.650	3.065	126.230	2.534
75%	192.897	3.761	291.616	5.150	172.169	2.906	184.491	3.692	164.700	3.187
100%	221.136	4.444	341.125	5.971	194.264	3.219	212.569	4.503	182.485	3.726

Tabla 61 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=2

ii. k = 3

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	95.347	1.618	136.014	2.273	74.383	1.249	89.385	1.665	75.738	1.478
50%	143.256	3.036	206.171	3.973	111.148	2.044	130.919	2.725	114.944	2.485
75%	195.001	3.880	290.975	5.422	142.153	2.500	177.974	3.760	146.776	3.052
100%	224.744	4.349	340.653	6.236	162.811	3.078	204.297	4.292	162.928	3.555

Tabla 62 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y k=3

iii.  $k = 4$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	94.784	1.657	138.737	2.267	66.684	1.168	87.528	1.695	71.851	1.353
50%	144.865	3.014	213.826	4.068	101.841	2.002	129.795	2.930	108.572	2.391
75%	193.896	3.963	287.433	5.320	129.636	2.726	171.545	3.718	138.490	3.034
100%	221.876	4.438	346.814	6.237	144.228	2.854	195.012	4.358	155.776	3.499

Tabla 63 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=4$

d. Factor de roll-off = 0,25

i.  $k = 2$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	95.888	1.629	135.225	2.317	168.326	2.595	94.778	1.728	103.154	1.912
50%	143.847	3.061	207.625	3.927	266.751	4.485	145.165	2.933	158.724	3.108
75%	193.608	3.986	291.985	5.246	375.463	6.099	188.292	3.690	212.522	4.294
100%	222.923	4.268	346.200	6.411	445.325	7.165	220.974	4.394	245.591	4.946

Tabla 64 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y  $k=2$

ii.  $k = 3$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	95.034	1.736	137.917	2.253	170.361	2.656	88.528	1.705	100.840	1.887
50%	148.330	3.025	209.768	4.048	263.507	4.540	135.938	2.824	154.964	3.355
75%	196.435	3.957	288.566	5.244	372.304	6.221	179.696	3.776	207.118	4.163
100%	220.945	4.331	346.511	6.292	444.982	7.212	209.089	4.466	240.004	4.948

Tabla 65 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	95.292	1.718	134.835	2.265	171.172	2.631	86.949	1.675	98.537	1.955
50%	144.071	3.070	204.439	3.886	262.612	4.663	132.428	2.937	148.454	3.162
75%	194.387	3.782	290.062	5.138	378.800	6.068	175.113	3.958	199.217	4.284
100%	219.793	4.304	337.060	5.984	447.665	7.573	202.463	4.456	228.806	4.860

Tabla 66 Resultados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y  $k=4$

## 2. Matriz de M.S.B.A. [24]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	95.451	1.714	97.111	1.420	104.029	1.456	83.384	1.305	78.732	1.154
50%	144.390	3.057	142.170	2.366	156.893	2.503	125.795	2.222	120.189	2.018
75%	192.084	3.867	185.982	2.888	204.121	3.046	160.616	2.595	153.644	2.421
100%	222.892	4.442	212.821	3.389	232.919	3.397	178.582	2.917	171.355	2.866

Tabla 67 Resultados matriz de [24]

## 3. Matriz de Kratz [19]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	94.988	1.721	135.321	2.217	73.948	1.151	91.397	1.735	77.644	1.428
50%	142.492	2.935	210.711	3.990	109.723	1.983	139.787	2.905	115.905	2.371
75%	193.326	4.021	289.739	5.279	139.755	2.598	180.871	3.681	150.352	3.070
100%	219.852	4.384	344.495	6.262	157.367	2.971	205.076	4.193	169.227	3.591

Tabla 68 Resultados matriz de [19]

## 4. Matriz de C.A. [7]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	95.306	1.665	59.048	0.905	69.304	1.235	58.415	0.989	57.928	0.969
50%	143.888	3.036	89.339	1.600	100.957	1.988	87.306	1.651	85.726	1.552
75%	196.449	3.818	111.822	1.952	131.168	2.541	108.402	2.117	109.632	2.203
100%	221.959	4.352	119.974	2.163	145.740	2.923	121.632	2.396	118.556	2.290

Tabla 69 Resultados matriz de [7]

## 5. Matriz de S.R.Y.B. [34]

% Ocupación	3 canales		4 canales		5 canales		7 canales		13 canales	
	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c	Util.	i.c
25%	96.303	1.695	61.838	0.932	63.462	1.199	59.708	0.991	51.661	0.837
50%	144.873	2.954	90.587	1.517	94.900	1.939	88.383	1.635	77.245	1.384
75%	195.759	3.860	114.482	1.929	118.747	2.439	111.248	2.149	95.191	1.806
100%	219.914	4.533	126.003	2.277	133.115	2.798	123.396	2.456	104.989	1.979

Tabla 70 Resultados matriz de [34]

## 12.2. ANEXO II: Gráficas distribuciones 2 y 3

### 12.2.1. Distribución 2 de las aulas

- **Caso sin interferencias**

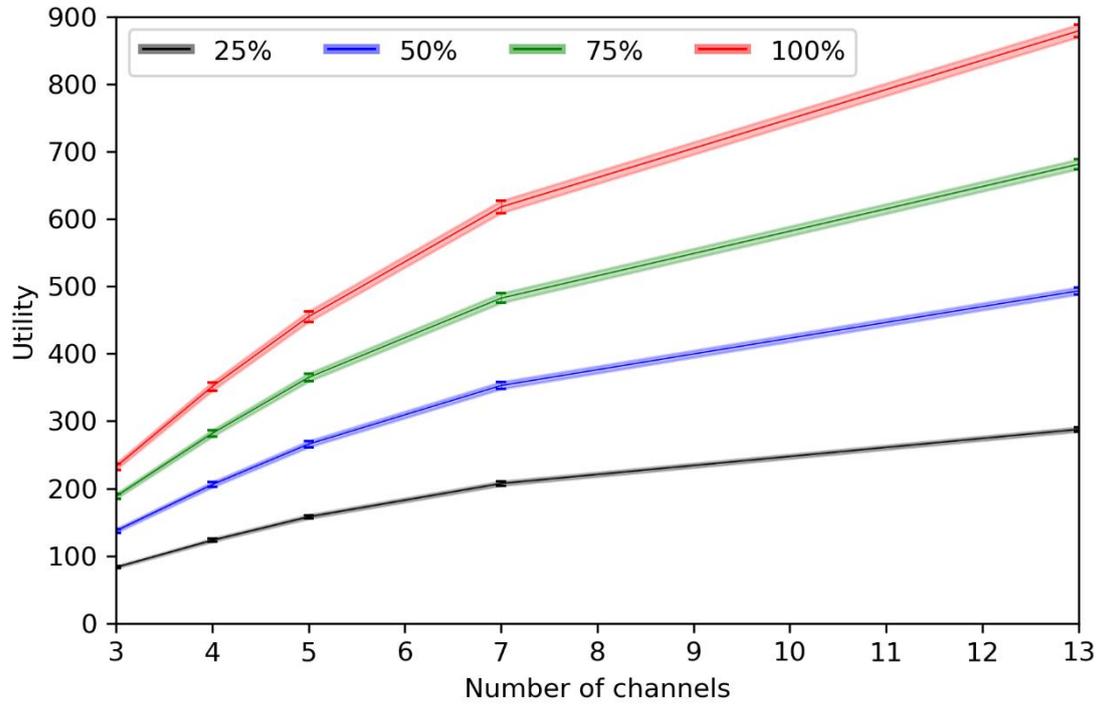


Figura 73 Gráfica caso sin interferencias

- **Casos con interferencias**

1. Matrices de W.S.C.L. [39]

- a. Máscara ideal

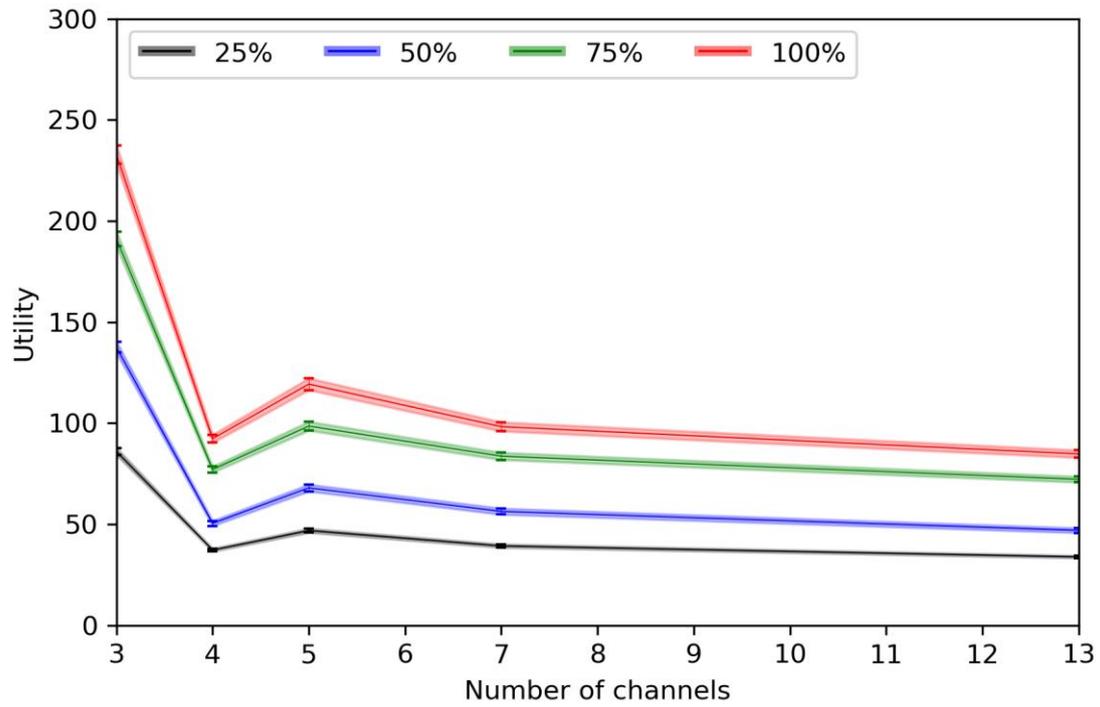


Figura 74 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, máscara ideal [39]

b. Factor de *roll-off* = 1

i.  $k = 2$

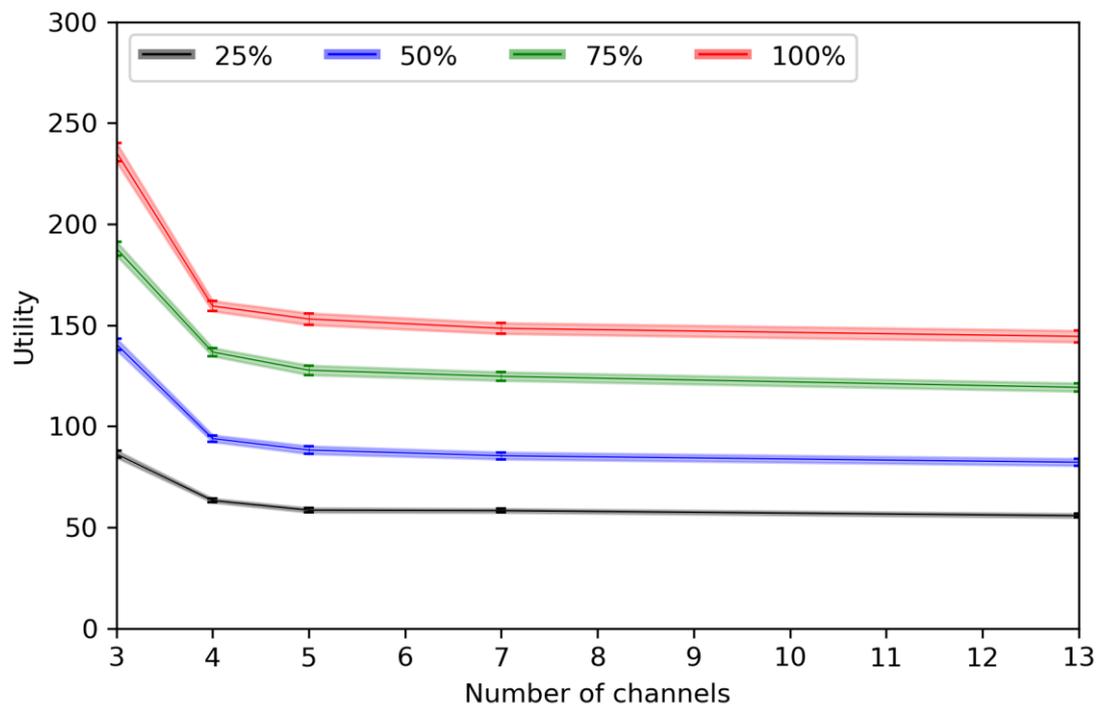


Figura 75 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=1 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

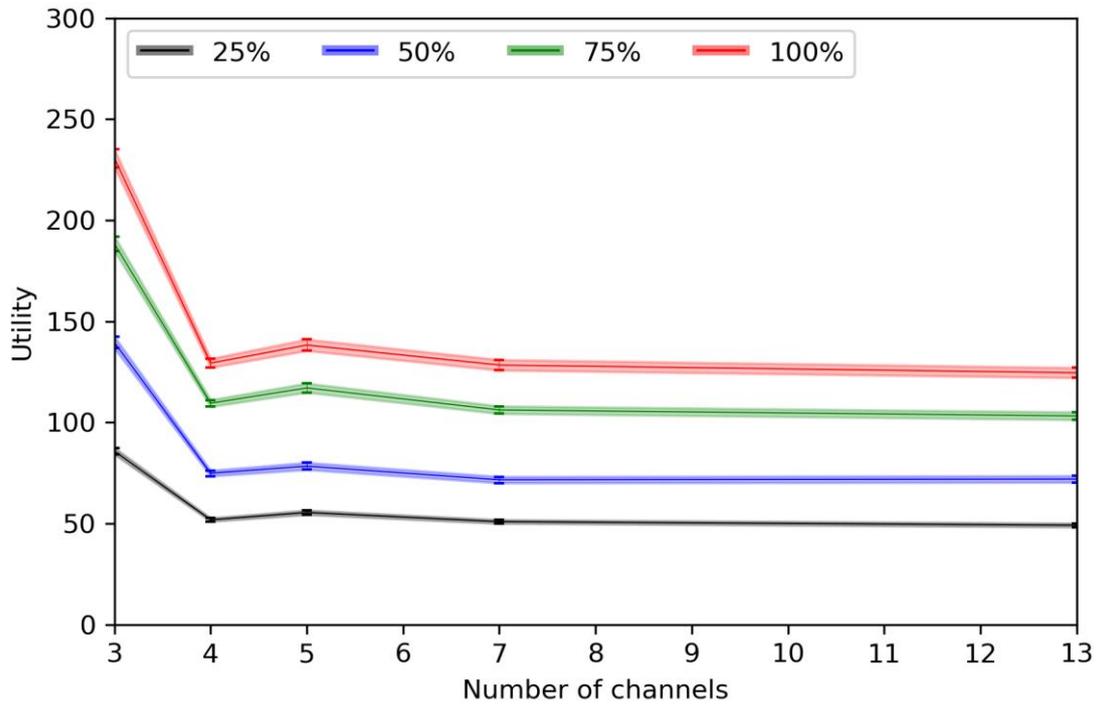


Figura 76 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y  $k=3$  [39]

iii.  $k = 4$

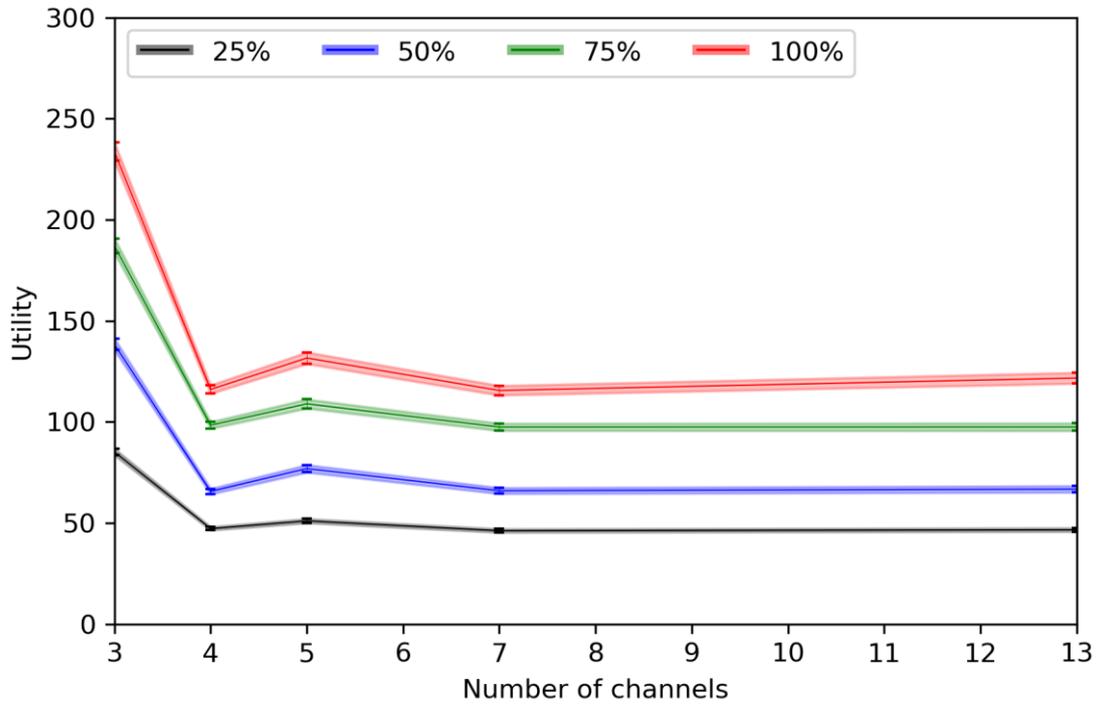


Figura 77 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y  $k=4$  [39]

c. Factor de *roll-off* = 0,5

i.  $k = 2$

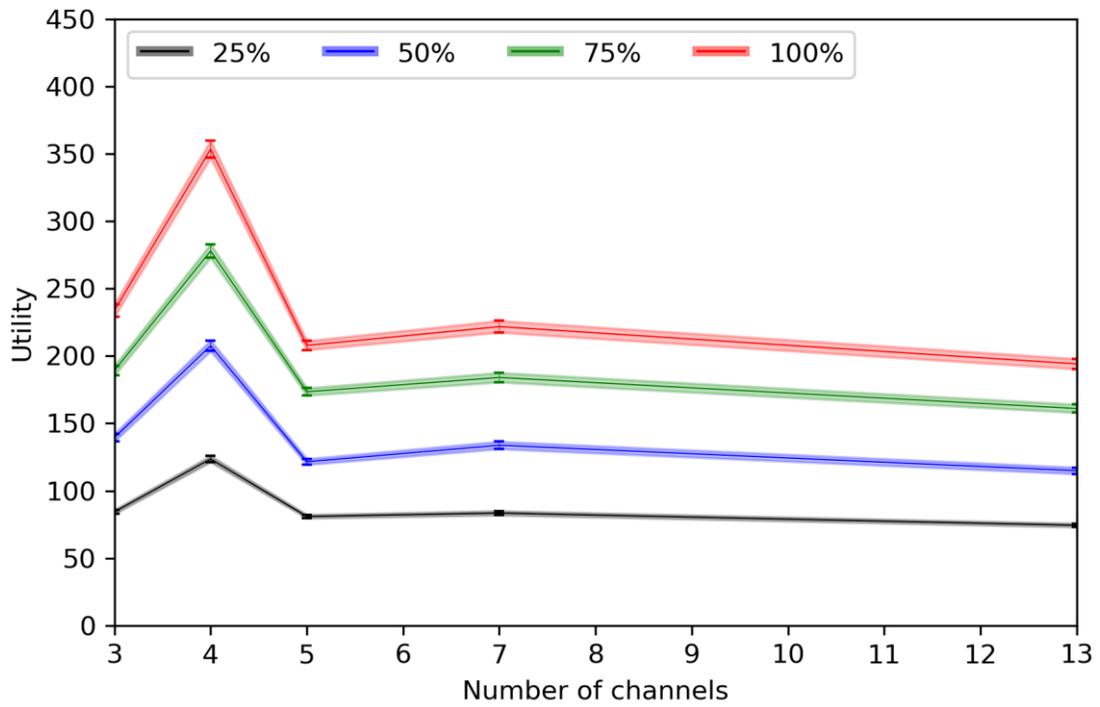


Figura 78 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=0,5 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

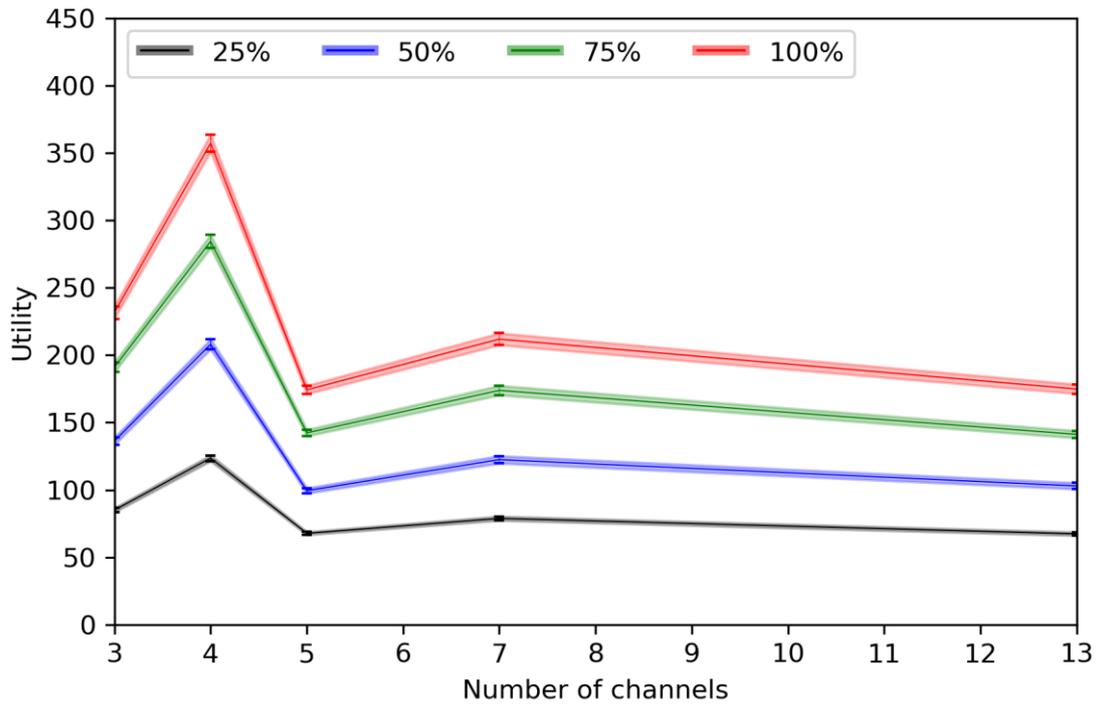


Figura 79 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y  $k=3$  [39]

iii.  $k = 4$

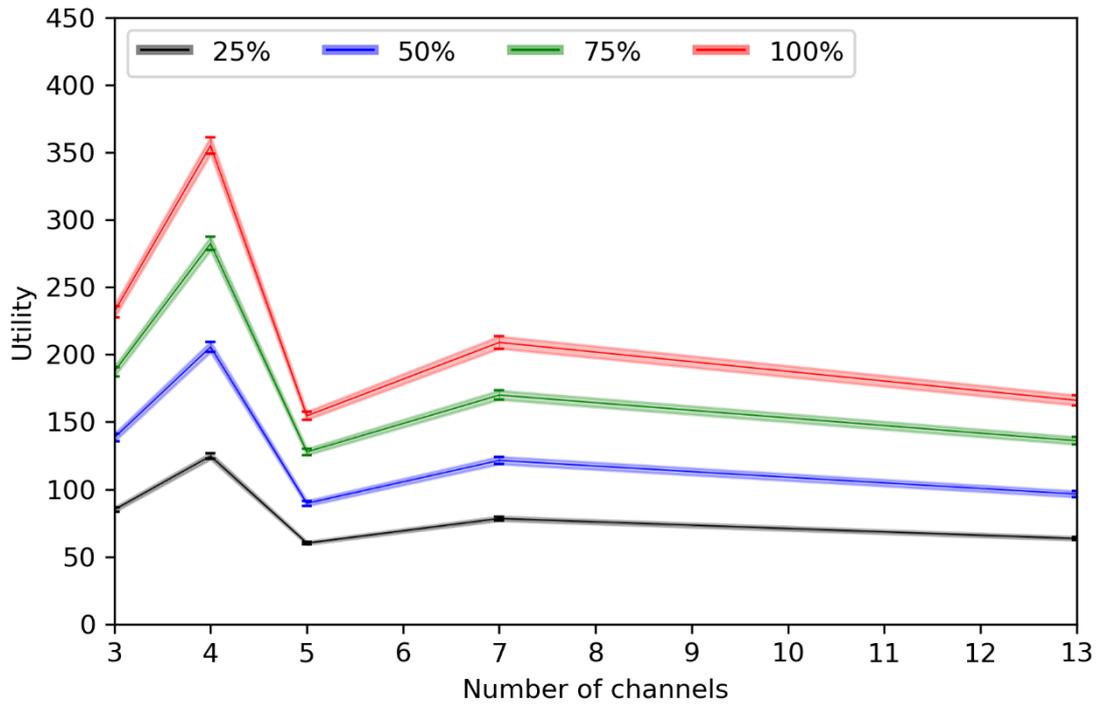


Figura 80 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y  $k=4$  [39]

d. Factor de *roll-off* = 0,25

i.  $k = 2$

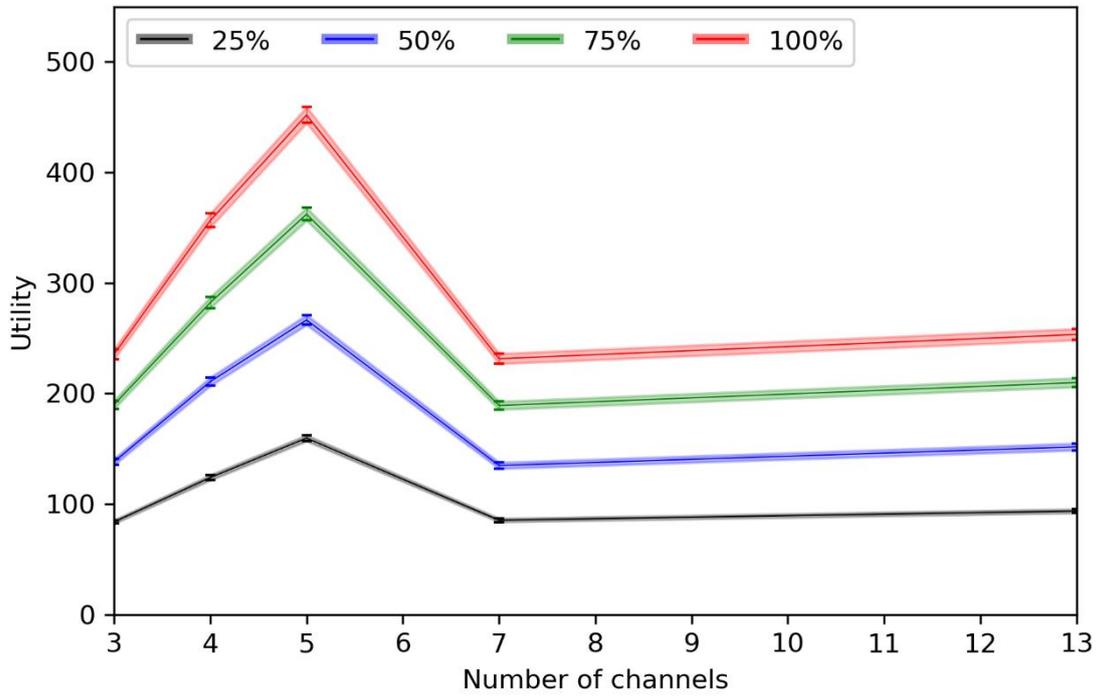


Figura 81 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=0,25 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

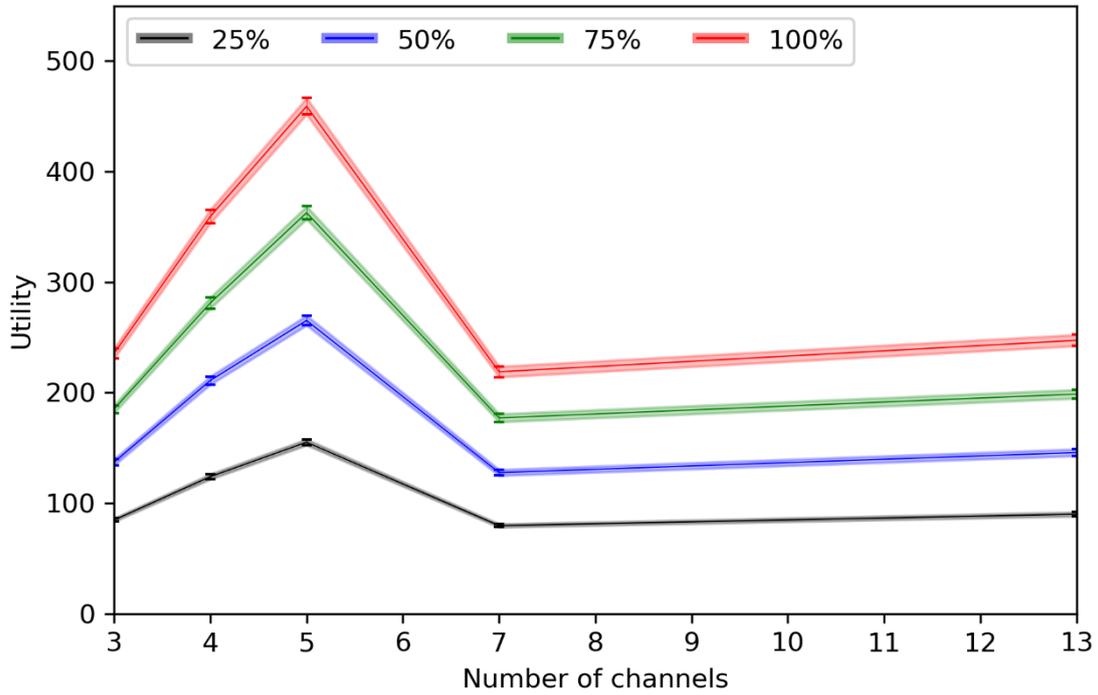


Figura 82 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y  $k=3$  [39]

iii.  $k = 4$

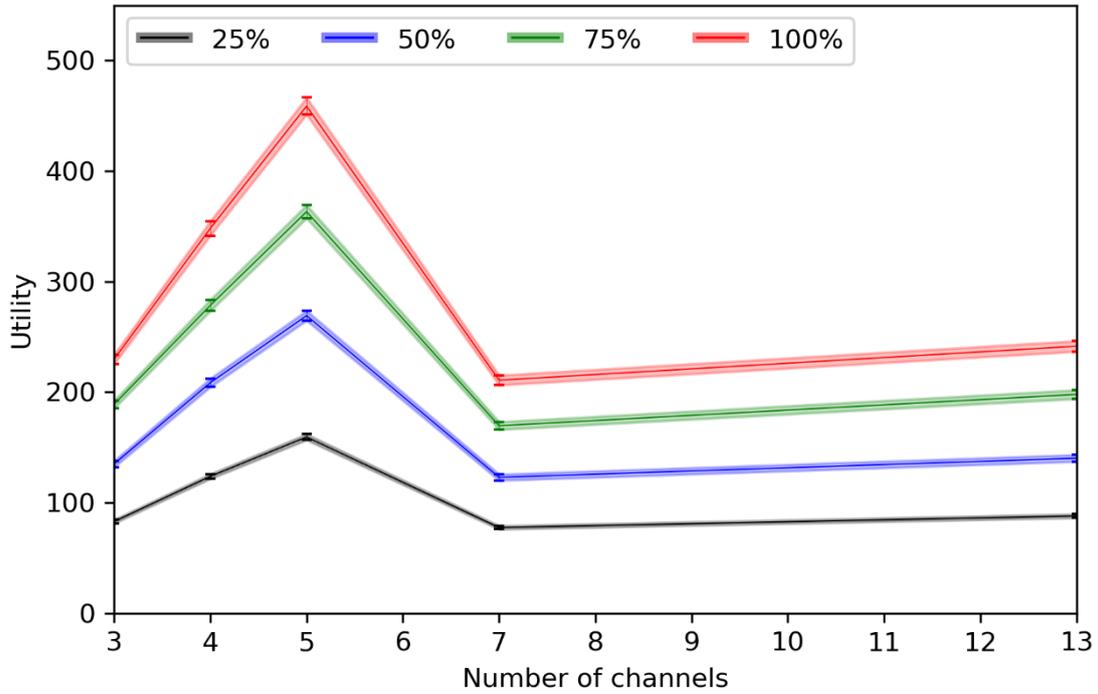


Figura 83 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y  $k=4$  [39]

2. Matriz de M.S.B.A. [24]

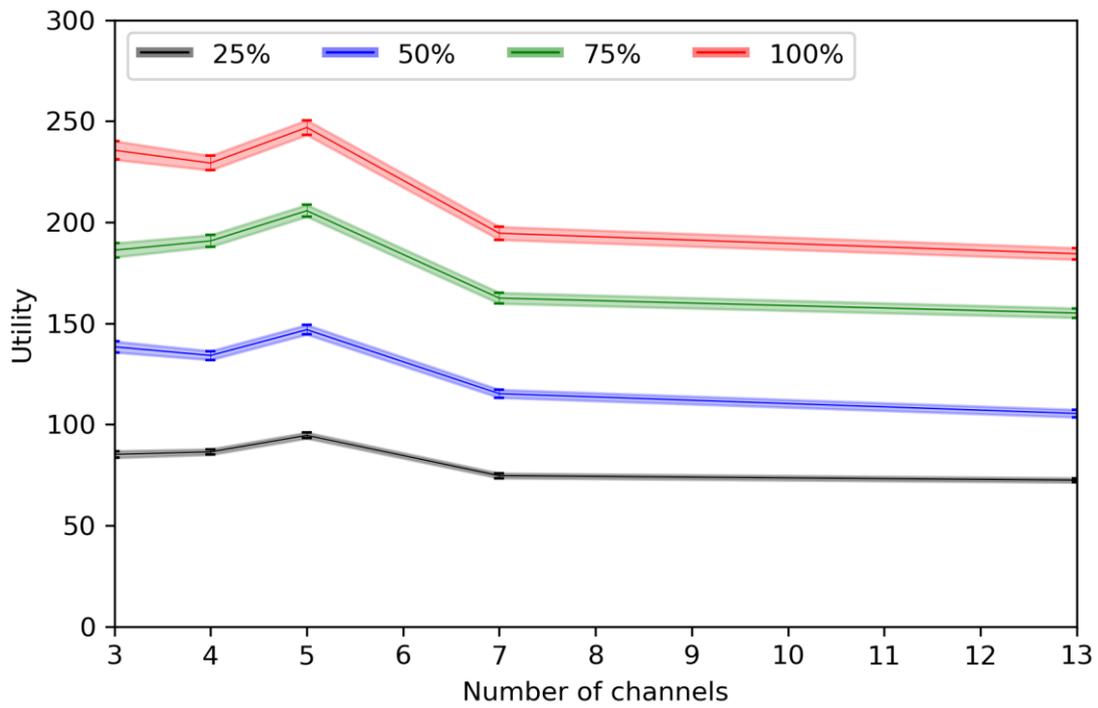


Figura 84 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [24]

3. Matriz de Kratz [19]

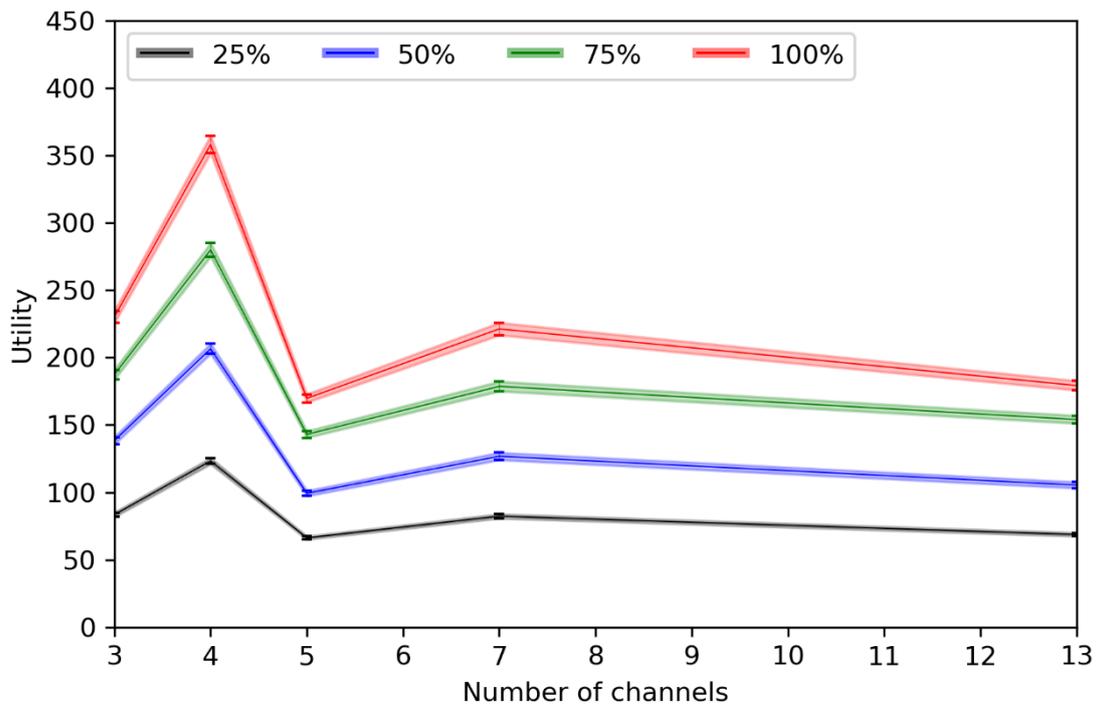


Figura 85 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [19]

4. Matriz de C.A. [7]

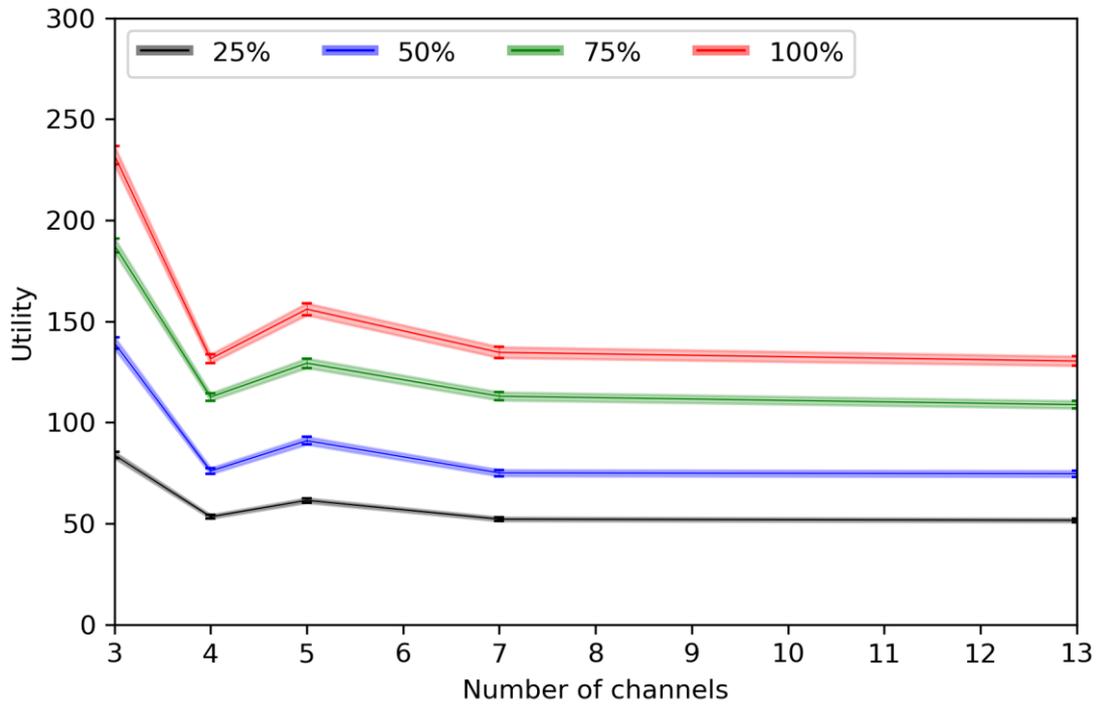


Figura 86 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [7]

5. Matriz de S.R.Y.B. [34]

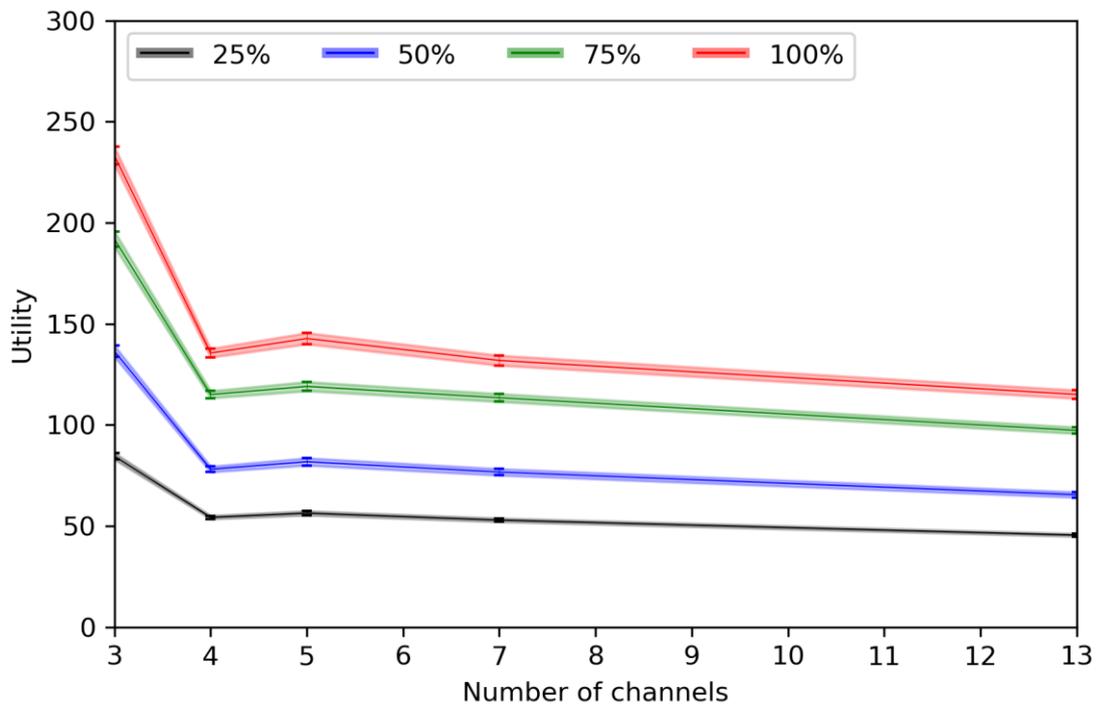


Figura 87 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [34]

### 12.2.2. Distribución 3 de las aulas

- **Caso sin interferencias**

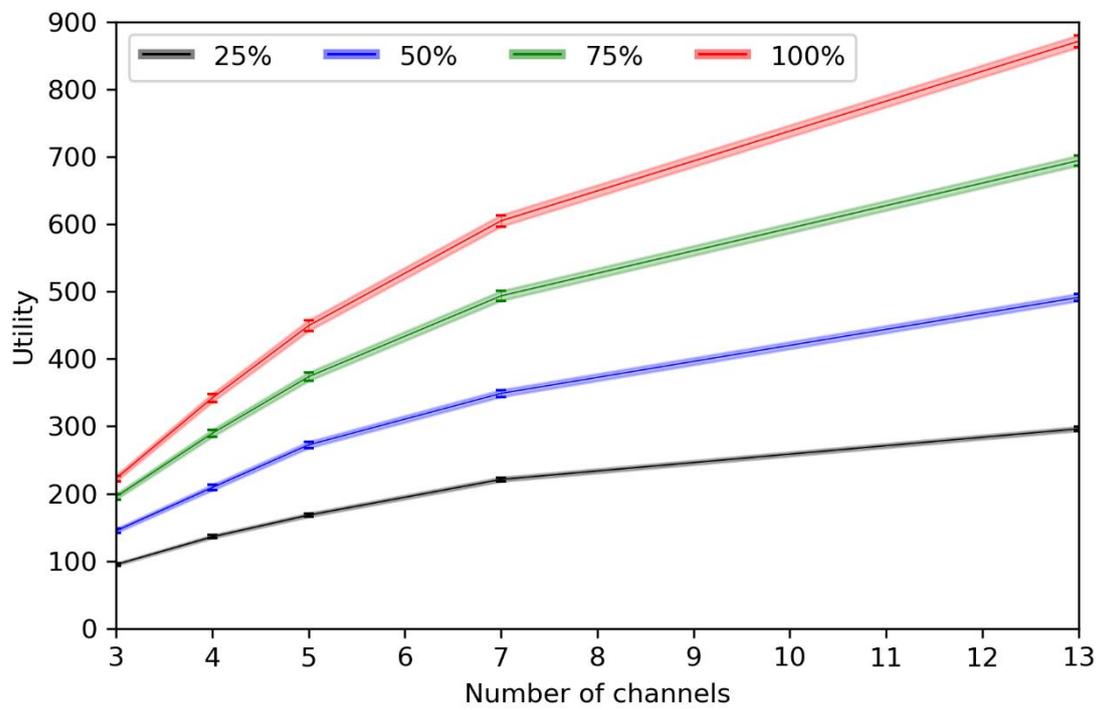


Figura 88 Gráfica caso sin interferencias

- **Casos con interferencias**

1. Matrices de W.S.C.L. [39]

- a. Máscara ideal

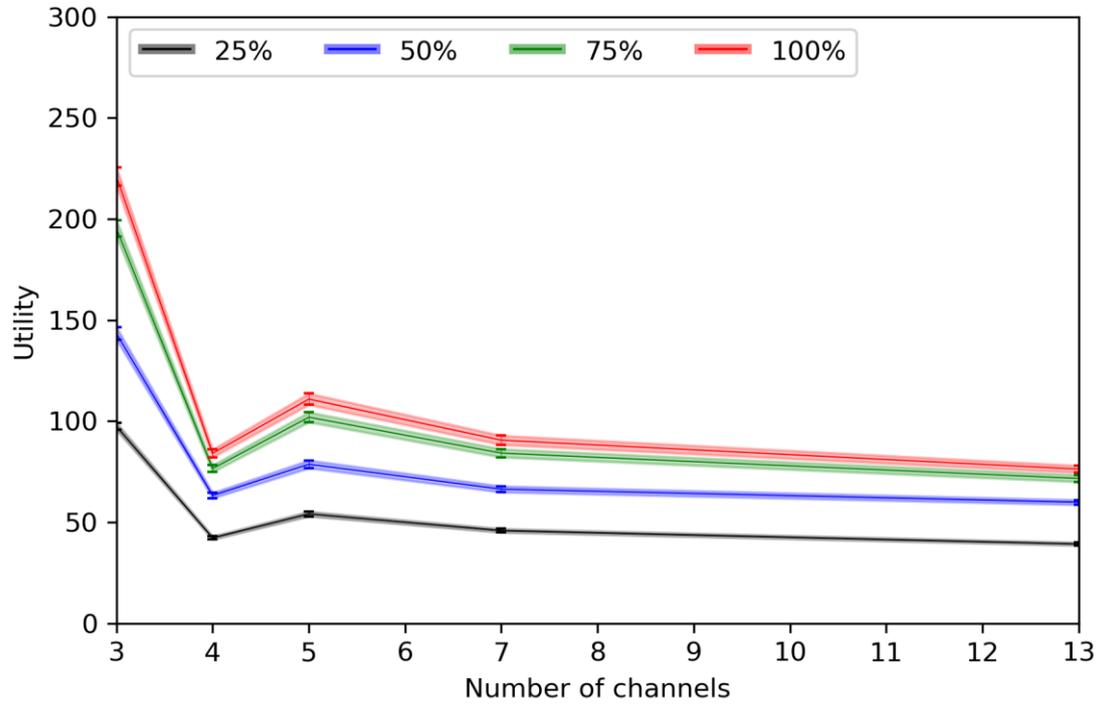


Figura 89 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, máscara ideal [39]

b. Factor de *roll-off* = 1

i.  $k = 2$

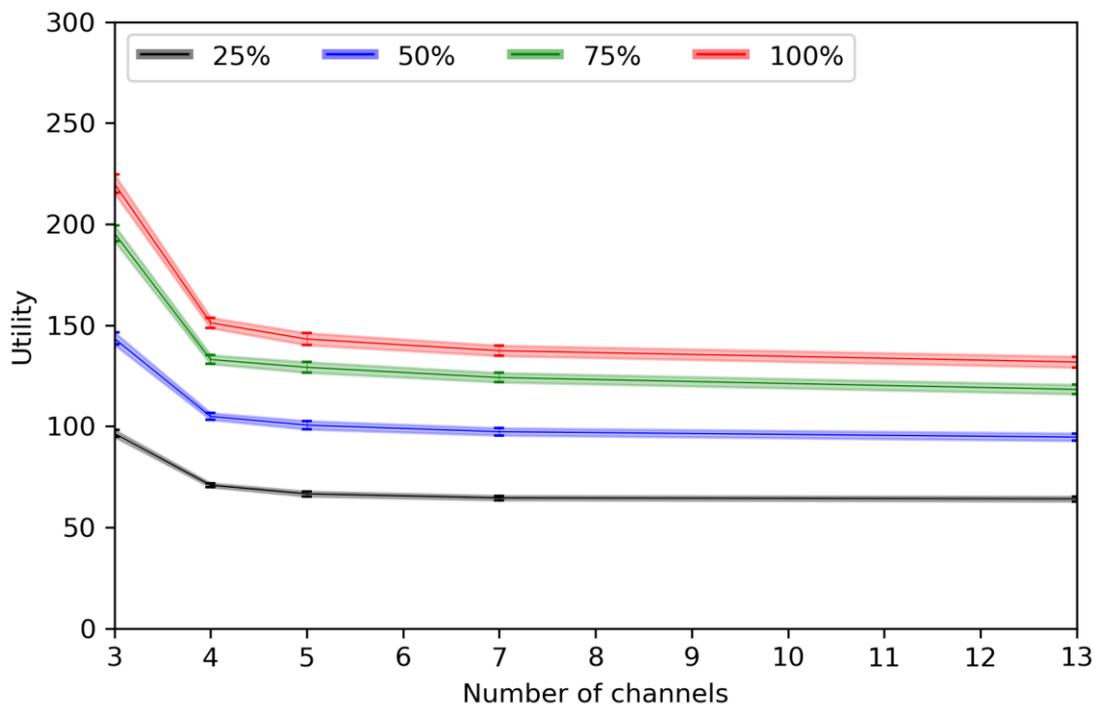


Figura 90 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=1 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

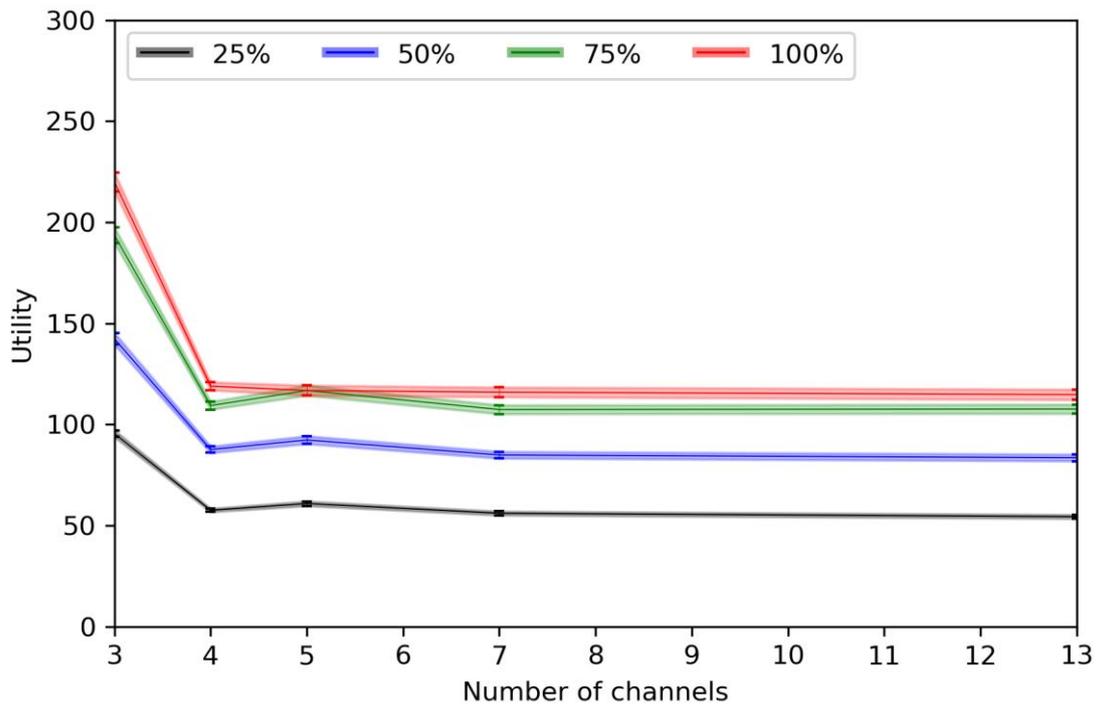


Figura 91 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y  $k=3$  [39]

iii.  $k = 4$

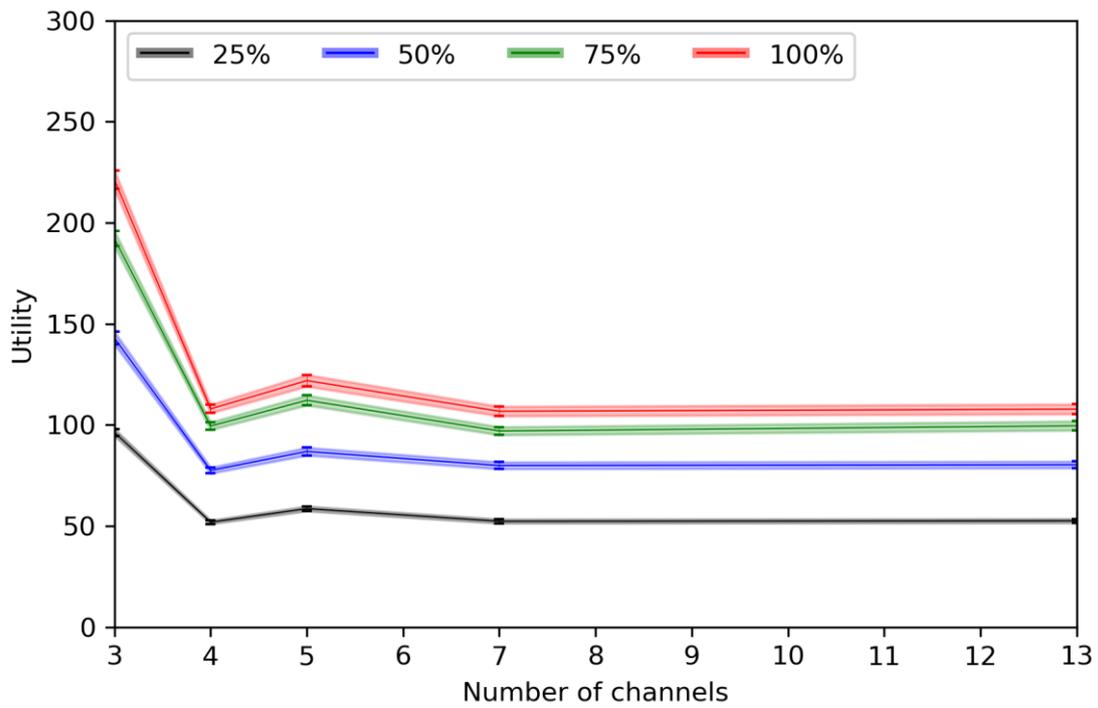


Figura 92 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=1 y  $k=4$  [39]

c. Factor de *roll-off* = 0,5

i.  $k = 2$

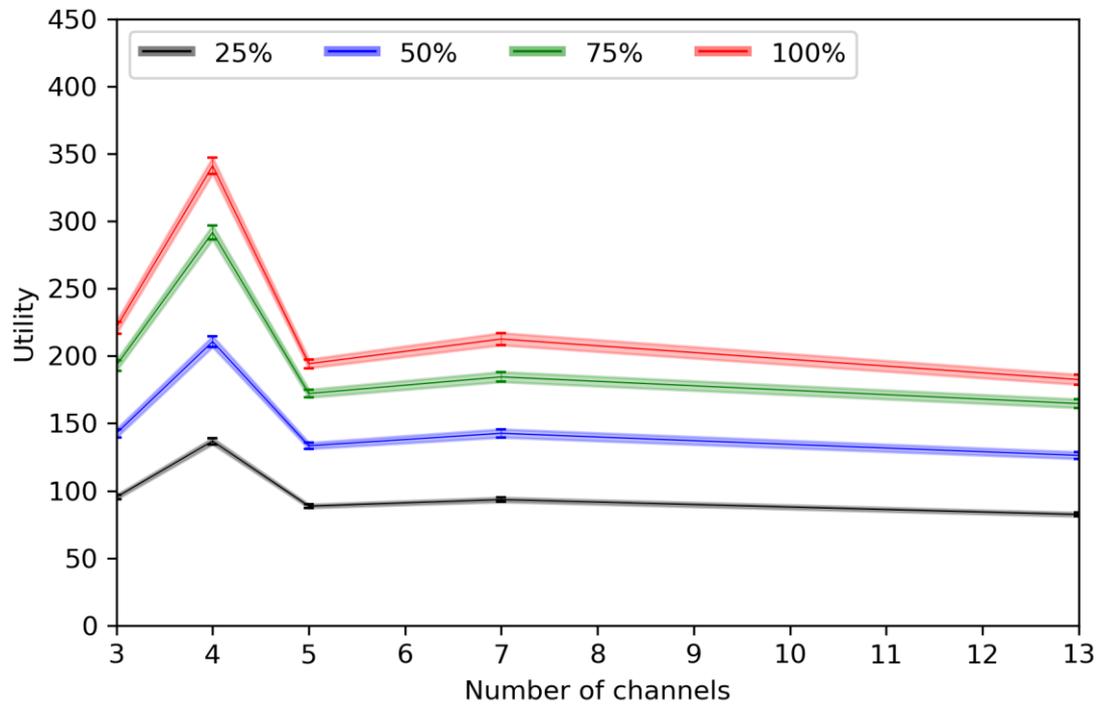


Figura 93 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=0,5 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

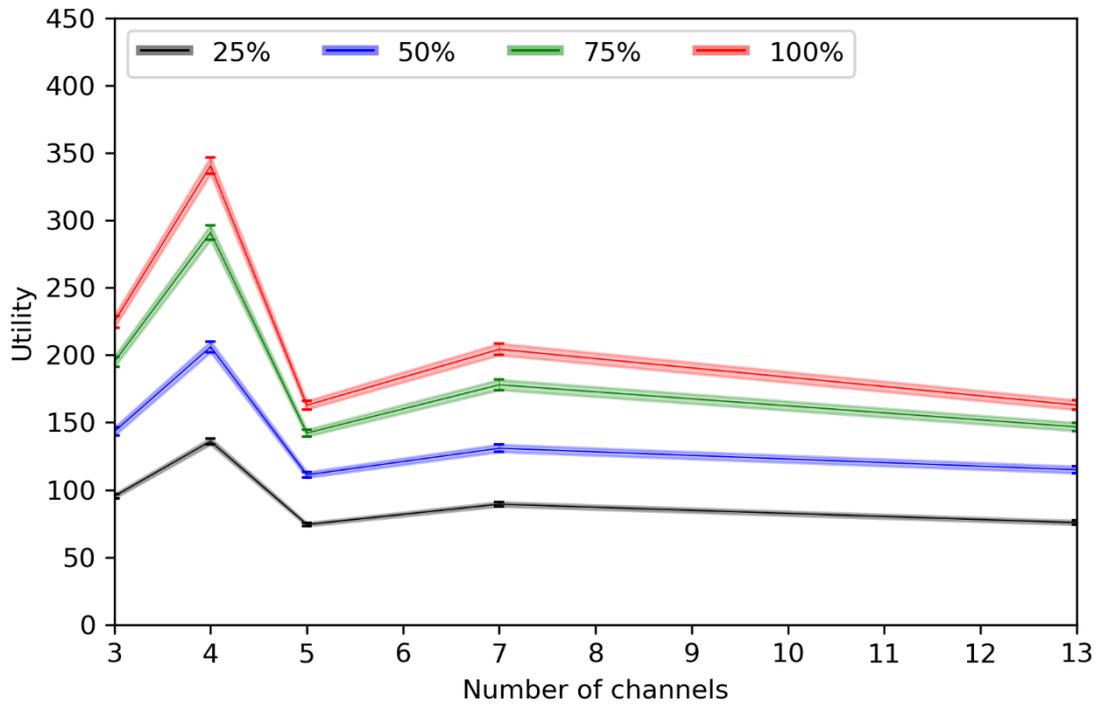


Figura 94 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y  $k=3$  [39]

iii.  $k = 4$

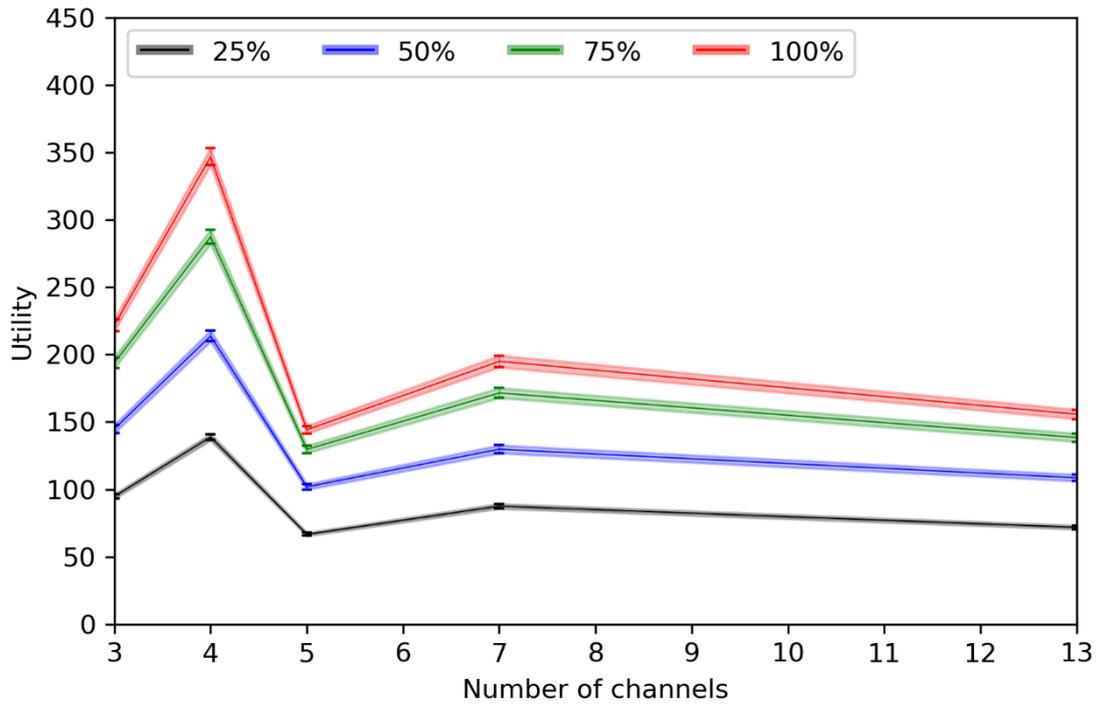


Figura 95 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,5 y  $k=4$  [39]

d. Factor de *roll-off* = 0,25

i.  $k = 2$

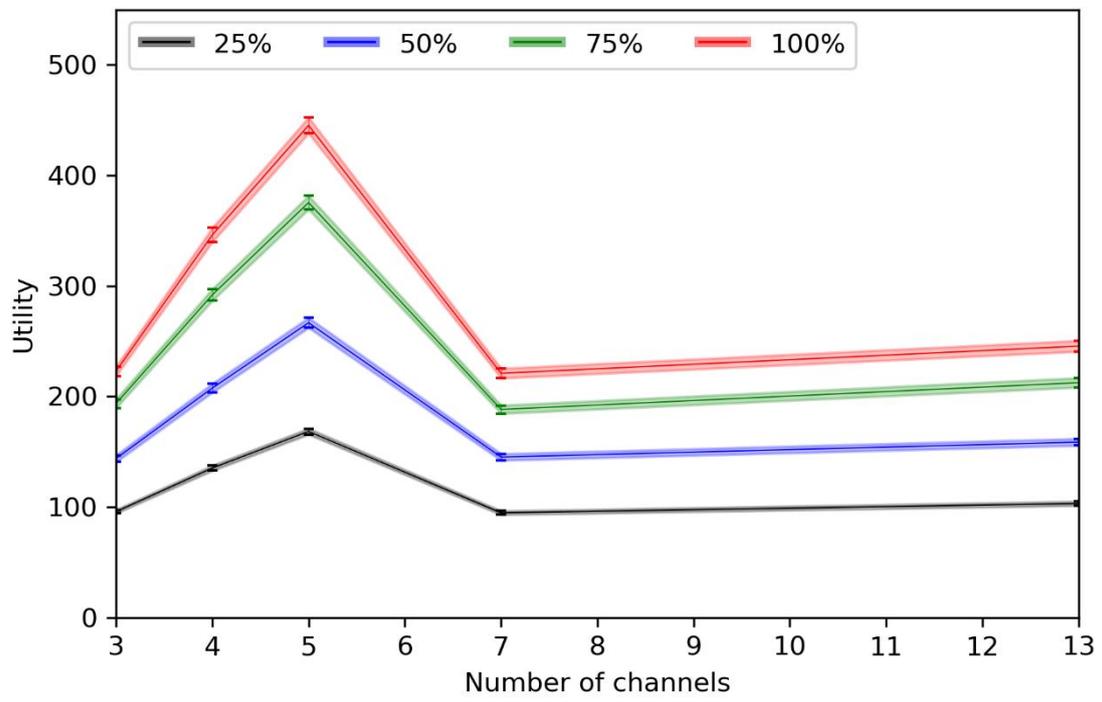


Figura 96 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, *roll-off*=0,25 y  $k=2$  [39]

ii.  $k = 3$

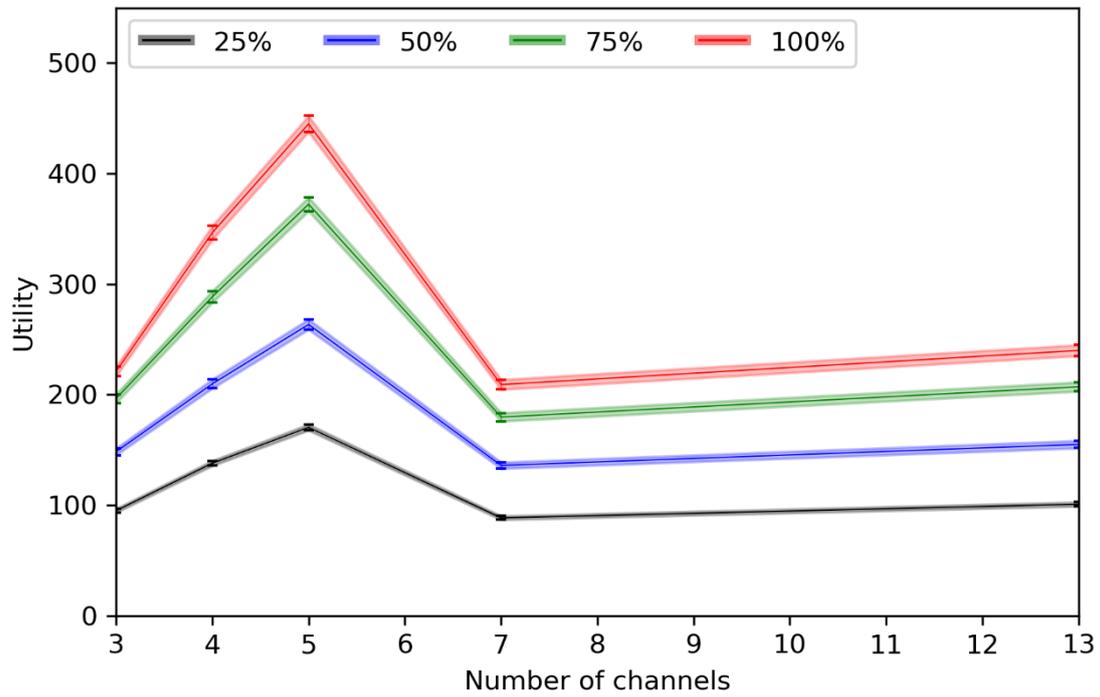


Figura 97 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y  $k=3$  [39]

iii.  $k = 4$

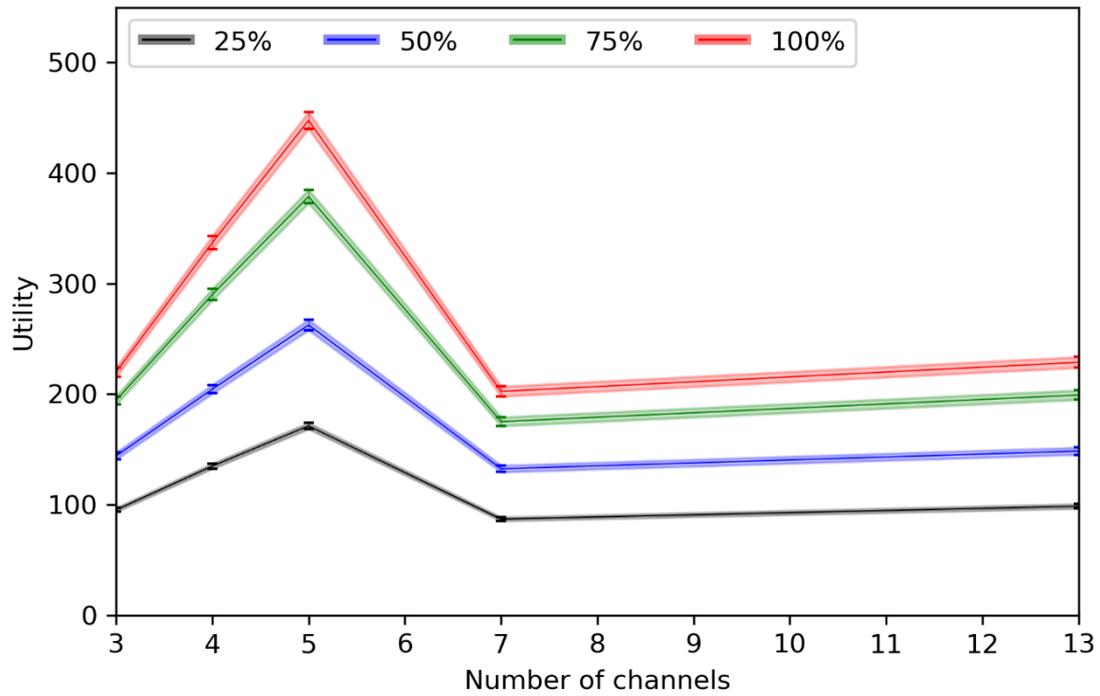


Figura 98 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, roll-off=0,25 y  $k=4$  [39]

2. Matriz de M.S.B.A. [24]

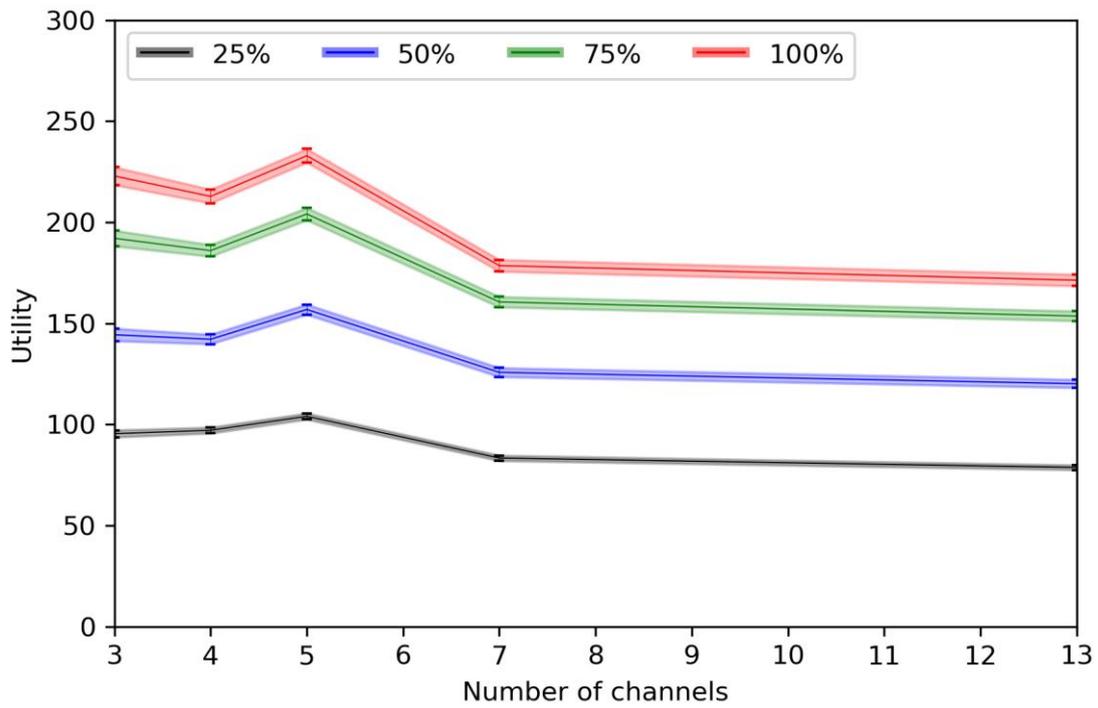


Figura 99 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [24]

3. Matriz de Kratz [19]

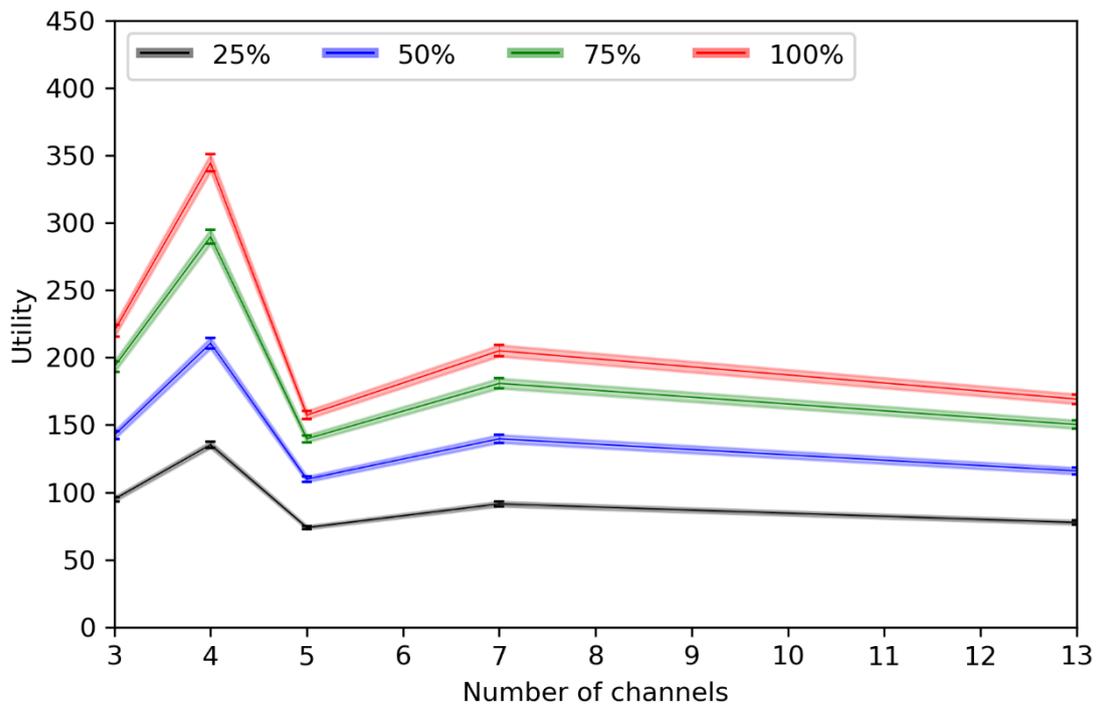


Figura 100 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [19]

4. Matriz de C.A. [7]

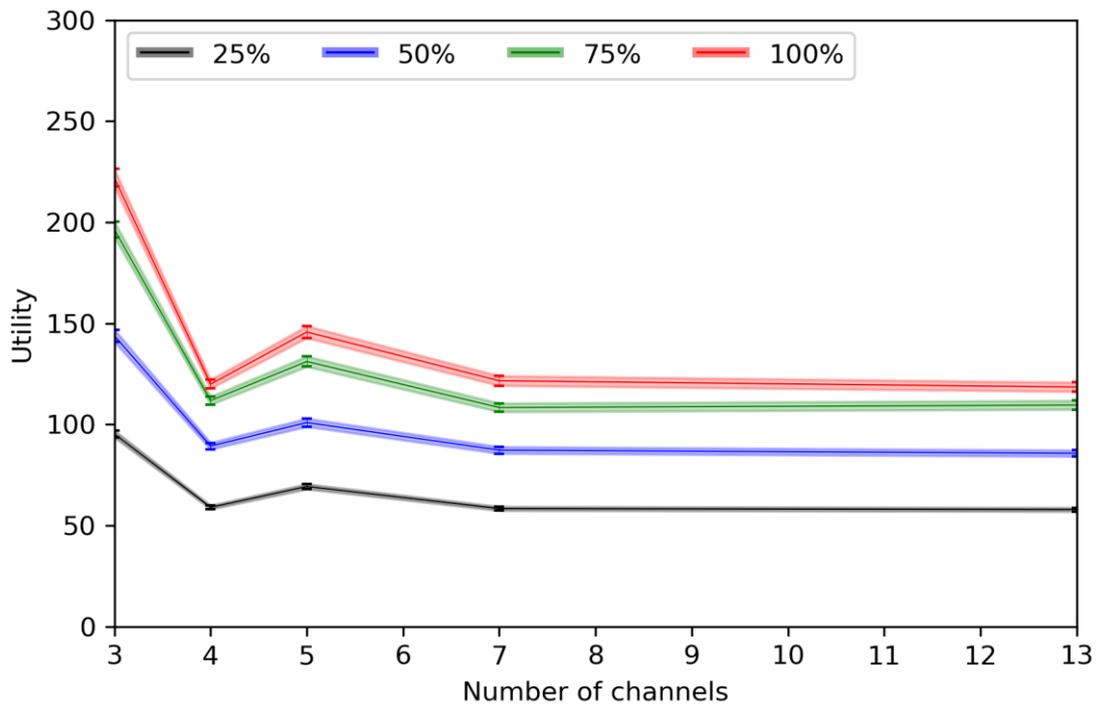


Figura 101 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [7]

5. Matriz de S.R.Y.B. [34]

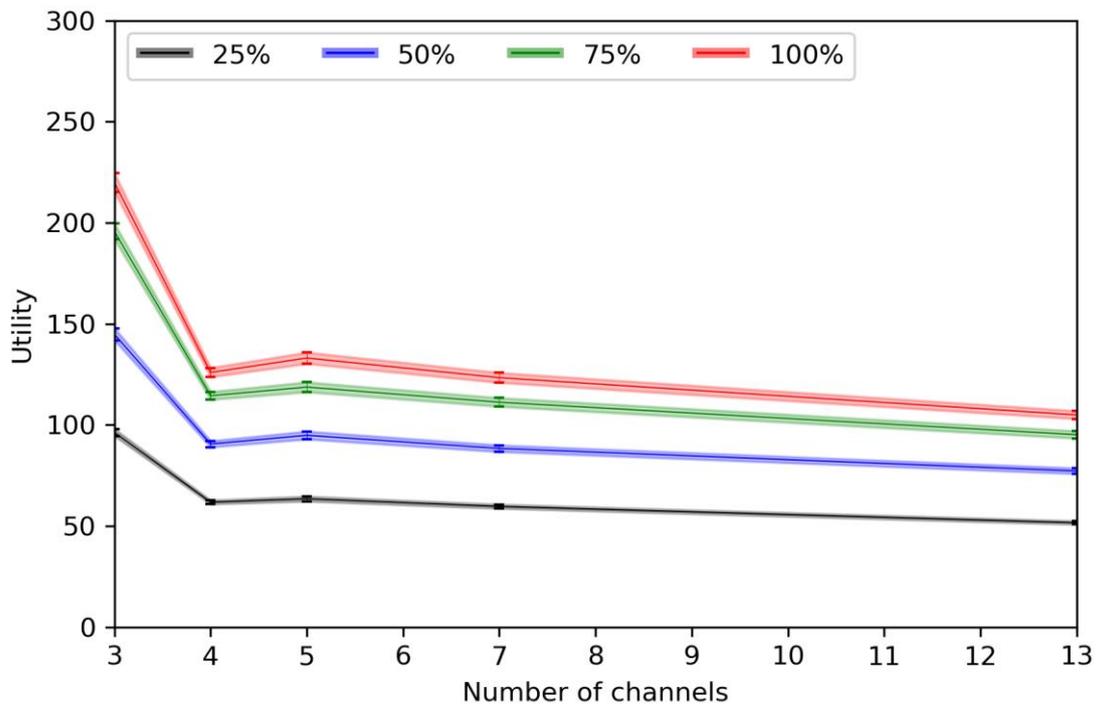


Figura 102 Gráficas para el 25, 50, 75 y 100% de ocupación, matriz de [34]

### 12.3. ANEXO III: Tablas valores de utilidad normalizados

- **Caso sin interferencias**

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.731	1.899	1.980	1.747	1.424
50%	1.863	1.983	2.022	1.791	1.420
75%	1.872	2.027	2.089	1.815	1.419
100%	1.904	2.130	2.069	1.869	1.448

*Tabla 71 Resultados de utilidad normalizados caso sin interferencias*

- **Casos con interferencias**

1. Matrices de W.S.C.L. [39]

- a. Máscara ideal

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.787	1.209	1.278	1.360	1.383
50%	1.796	1.136	1.353	1.516	1.461
75%	1.889	1.071	1.373	1.493	1.394
100%	1.896	1.118	1.277	1.453	1.418

*Tabla 72 Resultados normalizados matriz de [39] con máscara ideal*

- b. Factor de *roll-off* = 1

- i.  $k = 2$

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.702	1.625	1.534	1.475	1.439
50%	1.784	1.525	1.513	1.519	1.519
75%	2.039	1.542	1.515	1.463	1.474
100%	1.926	1.593	1.506	1.519	1.439

*Tabla 73 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de *roll-off*=1 y  $k=2$*

ii.  $k = 3$

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.717	1.408	1.396	1.404	1.367
50%	1.794	1.336	1.397	1.435	1.475
75%	1.972	1.310	1.513	1.519	1.474
100%	1.880	1.413	1.427	1.504	1.460

Tabla 74 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y  $k=3$

iv.  $k = 4$

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.816	1.402	1.397	1.374	1.384
50%	1.905	1.335	1.386	1.561	1.515
75%	1.971	1.235	1.470	1.476	1.481
100%	1.916	1.299	1.416	1.362	1.454

Tabla 75 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=1 y  $k=4$

c. Factor de roll-off = 0,5

i.  $k = 2$

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.742	1.854	1.681	1.504	1.430
50%	1.766	1.918	1.682	1.686	1.460
75%	1.905	2.088	1.680	1.634	1.574
100%	1.927	2.117	1.658	1.576	1.527

Tabla 76 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=2$

ii.  $k = 3$

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.751	1.860	1.535	1.580	1.391
50%	1.804	1.937	1.600	1.563	1.444
75%	1.917	2.029	1.538	1.604	1.520
100%	1.939	2.159	1.530	1.556	1.436

Tabla 77 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.751	1.871	1.473	1.581	1.411
50%	1.886	1.918	1.464	1.582	1.481
75%	1.958	2.083	1.420	1.658	1.540
100%	1.846	2.151	1.536	1.626	1.485

Tabla 78 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,5 y  $k=4$

d. Factor de roll-off = 0,25

i.  $k = 2$

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.780	1.922	1.958	1.542	1.465
50%	1.781	1.951	2.019	1.576	1.507
75%	1.872	2.018	2.160	1.640	1.529
100%	1.872	2.109	2.140	1.600	1.523

Tabla 79 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y  $k=2$

ii.  $k = 3$

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.465	1.901	1.918	1.553	1.464
50%	1.507	1.979	2.031	1.686	1.560
75%	1.529	2.003	2.139	1.639	1.594
100%	1.523	2.178	2.107	1.582	1.478

Tabla 80 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y  $k=3$

iii.  $k = 4$

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.721	1.866	1.967	1.538	1.469
50%	1.902	1.957	2.050	1.590	1.565
75%	2.024	2.098	2.136	1.626	1.683
100%	1.924	2.125	2.121	1.518	1.514

Tabla 81 Resultados normalizados matriz de [39] con factor de roll-off=0,25 y  $k=4$

2. Matriz de M.S.B.A. [24]

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.717	1.773	1.727	1.479	1.416
50%	1.867	1.790	1.708	1.589	1.460
75%	1.906	1.803	1.750	1.535	1.434
100%	1.840	1.898	1.793	1.522	1.434

Tabla 82 Resultados normalizados matriz de [24]

3. Matriz de Kratz [19]

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.733	1.893	1.599	1.523	1.417
50%	1.805	1.966	1.621	1.588	1.504
75%	1.912	2.032	1.605	1.671	1.464
100%	1.936	2.072	1.621	1.639	1.531

Tabla 83 Resultados normalizados matriz de [19]

4. Matriz de C.A. [7]

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.724	1.475	1.440	1.476	1.376
50%	1.810	1.453	1.535	1.535	1.470
75%	1.907	1.325	1.515	1.408	1.448
100%	1.921	1.419	1.484	1.472	1.455

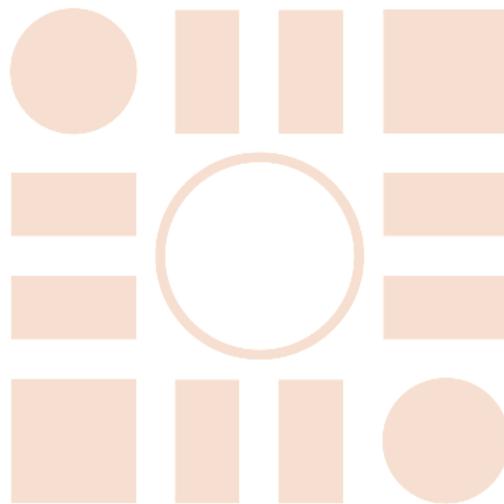
Tabla 84 Resultados normalizados matriz de [7]

5. Matriz de S.R.Y.B. [34]

	3 canales	4 canales	5 canales	7 canales	13 canales
% Ocupación	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad	Utilidad
25%	1.693	1.430	1.414	1.413	1.339
50%	1.880	1.446	1.414	1.504	1.428
75%	1.954	1.361	1.458	1.571	1.493
100%	1.925	1.395	1.456	1.499	1.417

Tabla 85 Resultados normalizados matriz de [34]

Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR

