

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>I Conceptos previos</b>	<b>5</b>
<b>2. Introducción a las redes neuronales</b>	<b>7</b>
2.1. Definición de red neuronal artificial . . . . .	7
2.2. La red neuronal biológica . . . . .	8
2.2.1. Organización general del cerebro . . . . .	8
2.2.2. La neurona . . . . .	9
2.3. Modelo de neurona artificial . . . . .	11
2.3.1. Elementos de una neurona artificial . . . . .	11
2.3.2. Modelo de una neurona . . . . .	13
2.4. Estructuras de red . . . . .	14
2.4.1. Redes de una capa sin realimentación . . . . .	15
2.4.2. Redes multicapa sin realimentación . . . . .	15
2.4.3. Redes recurrentes o realimentadas . . . . .	16
2.4.4. Estructuras reticulares . . . . .	16
2.5. Modos de operación . . . . .	16
2.5.1. Aprendizaje . . . . .	18
2.5.2. Recuerdo . . . . .	19
2.6. Algoritmos de aprendizaje . . . . .	19
2.6.1. Redes con aprendizaje supervisado . . . . .	19
2.6.2. Redes con aprendizaje no supervisado . . . . .	22
2.6.3. Clasificación de los modelos neuronales . . . . .	23
2.7. Ejemplo de aplicación de las RNA . . . . .	24

2.8.	El algoritmo “backpropagation” y la red MLP . . . . .	24
2.9.	Redes RBF . . . . .	29
2.9.1.	Definición y estructura . . . . .	29
2.9.2.	Aprendizaje . . . . .	30
2.9.3.	Comparación entre redes RBF y redes MLP . . . . .	31
2.10.	La red de Hopfield . . . . .	32
2.10.1.	Descripción general del modelo de Hopfield . . . . .	32
2.10.2.	Memoria asociativa y función de energía . . . . .	33
2.10.3.	Mejoras del modelo de Hopfield . . . . .	34
<b>3.</b>	<b>Predicción de pérdidas de propagación</b>	<b>37</b>
3.1.	Introducción al canal radio móvil . . . . .	37
3.1.1.	Caracterización del canal móvil en banda estrecha . . . . .	39
3.1.2.	Caracterización estadística del canal móvil . . . . .	40
3.1.3.	Caracterización del canal móvil en banda ancha . . . . .	43
3.1.4.	Clasificación de canales radio en comunicaciones móviles . . . . .	43
3.2.	Características generales de la propagación radioeléctrica . . . . .	44
3.2.1.	Introducción al modelado de la propagación . . . . .	44
3.2.2.	Mecanismos de propagación . . . . .	45
3.2.3.	Análisis de medidas . . . . .	47
3.3.	Predicción de pérdidas de propagación . . . . .	47
3.3.1.	Evolución de los modelos de propagación . . . . .	48
3.3.2.	Clasificación . . . . .	48
3.4.	Modelos de propagación en entornos rurales . . . . .	48
3.4.1.	Modelos deterministas . . . . .	48
3.4.2.	Modelos empíricos: el modelo de Hata . . . . .	55
3.5.	Modelos de propagación en macroceldas urbanas . . . . .	56
3.5.1.	Modelos empíricos . . . . .	56
3.5.2.	Modelos deterministas . . . . .	58
3.5.3.	Efecto del terreno . . . . .	63
3.6.	Modelos de propagación en microceldas . . . . .	64
3.6.1.	Características generales . . . . .	64
3.6.2.	Predicción de pérdidas . . . . .	65

<b>4. Planificación de Redes Celulares</b>	<b>69</b>
4.1. Proceso de planificación de una red celular . . . . .	69
4.1.1. Evaluación del tráfico . . . . .	70
4.1.2. Grado de servicio . . . . .	70
4.1.3. Restricciones impuestas por el sistema . . . . .	71
4.1.4. Diseño de la red radio . . . . .	72
4.1.5. Asignación de frecuencias . . . . .	73
4.2. Herramientas informáticas de planificación celular . . . . .	75
4.3. Nuevas técnicas en la planificación de redes celulares . . . . .	76
4.3.1. Salto de frecuencia . . . . .	76
4.3.2. Transmisión discontinua . . . . .	76
4.3.3. Antenas adaptativas . . . . .	76
4.3.4. Carga parcial . . . . .	77
4.3.5. Microceldas . . . . .	77
4.4. Planteamientos para UMTS . . . . .	77
4.4.1. Nuevas técnicas . . . . .	78
4.4.2. Planificación automática: el proyecto STORMS . . . . .	79
<b>II Predicción de coberturas con redes neuronales</b>	<b>81</b>
<b>5. Trabajos publicados y definición de objetivos</b>	<b>83</b>
5.1. Estimación de pérdidas en entornos rurales mediante el trazado de perfiles . . . .	83
5.2. Refinamiento de las predicciones de modelos teóricos . . . . .	85
5.2.1. Predicción en entorno urbano en la banda de 170 MHz . . . . .	85
5.2.2. Combinación con un modelo de lanzamiento de rayos . . . . .	85
5.2.3. Adaptación de modelos convencionales . . . . .	86
5.2.4. Predicción en entorno no urbano . . . . .	87
5.3. Estimación con modelos completamente neuronales . . . . .	87
5.3.1. Análisis de los parámetros de entrada . . . . .	87
5.3.2. Predicción con redes RBF . . . . .	88
5.4. Predicción en interiores . . . . .	88
5.4.1. Modelo recursivo . . . . .	88
5.4.2. Predicción punto a punto . . . . .	89
5.5. Conclusiones y definición de objetivos . . . . .	89

<b>6. Modelado de la propagación en entornos rurales</b>	<b>91</b>
6.1. Planteamiento del problema . . . . .	91
6.1.1. Descripción general . . . . .	91
6.1.2. Uso de bases de datos del terreno o modelos digitales del terreno . . . . .	91
6.1.3. Estimación de pérdidas de propagación a partir de perfiles y justificación de los modelos neuronales . . . . .	92
6.1.4. Representación de la información . . . . .	93
6.1.5. Salida de la red . . . . .	95
6.1.6. Datos de entrenamiento, validación y test . . . . .	96
6.2. Selección del modelo neuronal . . . . .	97
6.2.1. Tipo de red . . . . .	97
6.2.2. Arquitectura . . . . .	98
6.2.3. Funciones de propagación y activación . . . . .	98
6.2.4. Normalización . . . . .	99
6.2.5. Aprendizaje . . . . .	101
6.3. Análisis de resultados . . . . .	102
6.3.1. Comparación RBF - MLP . . . . .	102
6.3.2. Entrenamiento con los modelos de Meeks y Máxima Ocultación . . . . .	103
6.3.3. Regresión lineal . . . . .	104
6.3.4. Relación entre error y distancia . . . . .	106
6.3.5. Comportamiento frente a variaciones suaves del terreno . . . . .	108
6.3.6. Tiempo de cálculo . . . . .	108
6.4. Conclusiones . . . . .	109
<b>7. Campañas de medidas en entorno urbano</b>	<b>111</b>
7.1. Descripción general de las campañas de medidas . . . . .	111
7.1.1. Medidas de la red TACS de Telefónica ( <i>Campaña TACS</i> ) . . . . .	111
7.1.2. Medidas en la ciudad de Munich ( <i>Campaña COST</i> ) . . . . .	112
7.1.3. Medidas en la red GSM de Airtel ( <i>Campaña GSM</i> ) . . . . .	114
7.1.4. Medidas microcelulares . . . . .	116
7.2. Estimación de la media local de la potencia recibida . . . . .	117
7.3. Estimación de pérdidas de propagación . . . . .	117
7.3.1. Estimación de pérdidas en macroceldas . . . . .	117

7.3.2. Estimación de pérdidas en microceldas . . . . .	119
7.4. Regresiones lineales . . . . .	121
7.4.1. Variación de las pérdidas con la distancia . . . . .	121
7.4.2. Dependencia de las pérdidas respecto a la altura de la antena . . . . .	123
7.5. Distribución estadística . . . . .	125
7.6. Conclusiones . . . . .	125
<b>8. Modelado de la propagación en entornos urbanos</b>	<b>127</b>
8.1. Adaptación de modelos a medidas . . . . .	127
8.1.1. Planteamiento del problema . . . . .	127
8.1.2. Reformulación de los modelos tipo Walfisch . . . . .	130
8.1.3. Ajuste por retropropagación de errores . . . . .	131
8.1.4. Resultados . . . . .	133
8.2. Predicción de pérdidas con redes neuronales . . . . .	134
8.2.1. Introducción . . . . .	134
8.2.2. Comparación entre las redes RBF y MLP . . . . .	138
8.2.3. Análisis de resultados . . . . .	139
8.3. Conclusiones . . . . .	147
<b>9. Propagación en microceldas</b>	<b>149</b>
9.1. Introducción . . . . .	149
9.1.1. Mecanismos de propagación e información geográfica . . . . .	149
9.1.2. Modelo de rayos . . . . .	149
9.1.3. Modelo de Lee . . . . .	150
9.2. Modelo neuronal . . . . .	151
9.2.1. Descripción del entorno. Entradas de la RNA . . . . .	151
9.2.2. Salida de la red neuronal . . . . .	152
9.2.3. Arquitectura y normalización . . . . .	153
9.3. Resultados . . . . .	153
9.3.1. Comparación de las medidas con el modelo de rayos . . . . .	153
9.3.2. Datos de entrenamiento de la red . . . . .	154
9.3.3. Sensibilidad respecto a los parámetros de entrada . . . . .	155
9.3.4. Error de predicción de la red neuronal . . . . .	155
9.3.5. Características de las predicciones . . . . .	156
9.3.6. Tiempo de cálculo . . . . .	158
9.4. Conclusiones . . . . .	158

<b>10. Conclusiones</b>	<b>159</b>
<b>A. DC-CELL: Planificación de sistemas celulares</b>	<b>161</b>
A.1. Introducción . . . . .	161
A.1.1. Nociones sobre Sistemas de Información Geográfica . . . . .	162
A.1.2. Organización de la información en DC-CELL . . . . .	164
A.2. Cálculos básicos en DC-CELL: Coberturas y sistemas . . . . .	167
A.2.1. Iniciando DC-CELL . . . . .	167
A.2.2. Cálculo de coberturas . . . . .	168
A.2.3. Planificación de un Sistema Celular . . . . .	170
A.3. Representación gráfica de los resultados . . . . .	171
A.4. Planificación de sistemas celulares . . . . .	173
A.4.1. Sistema celular . . . . .	174
A.4.2. Mapas de interferencias . . . . .	174
A.4.3. Plan de frecuencias . . . . .	175
A.5. Otros cálculos en DC-CELL . . . . .	178
A.5.1. Adaptar modelo a medidas . . . . .	178
A.5.2. Cobertura a partir de medidas . . . . .	179
A.5.3. Mapas de tasa de error . . . . .	179
A.5.4. Filtrar cobertura . . . . .	180
A.5.5. Obtener perfil . . . . .	180
A.5.6. Distancia entre dos puntos . . . . .	180
A.5.7. Niveles de valores . . . . .	180
A.6. Base de datos . . . . .	180
A.6.1. Base de datos de emplazamientos . . . . .	181
A.6.2. Base de datos de sectores . . . . .	181
A.6.3. Base de datos de antenas . . . . .	181
A.6.4. Base de datos de equipos transmisores . . . . .	181
<b>B. La fórmula de Keller</b>	<b>183</b>
<b>C. Interpolación bilineal</b>	<b>187</b>
<b>D. La regla <i>delta-bar-delta</i></b>	<b>189</b>
<b>E. Aprendizaje supervisado en redes RBF</b>	<b>191</b>