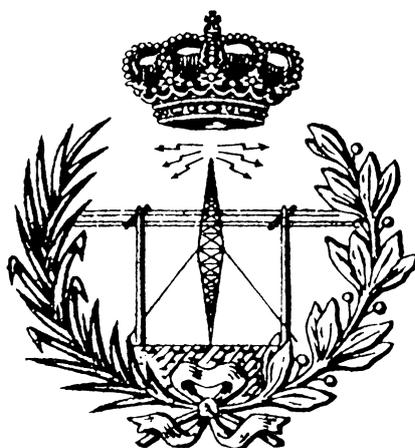


## ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



### PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO DE TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE LLUVIA A PARTIR  
DE NIVELES DE POTENCIA DE RADIOENLACES**

**Autor: Patricia del Carmen González Gómez**  
**Tutores: Dr. D. Juan L. Navarro Mesa**  
**Iván D. Guerra Moreno**  
**Titulación: Ingeniero de Telecomunicación**  
**Fecha: Junio 2017**



# ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



## PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO DE TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE LLUVIA A PARTIR  
DE NIVELES DE POTENCIA DE RADIOENLACES

## HOJA DE FIRMAS

**Alumno/a**

Fdo.: Patricia del Carmen González Gómez

**Tutor/a**

**Tutor/a**

Fdo.: Dr. D. Juan L. Navarro Mesa

Fdo.: D. Iván D. Guerra Moreno

**Fecha: Junio 2017**



# ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



## PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO DE TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE LLUVIA A PARTIR  
DE NIVELES DE POTENCIA DE RADIOENLACES

## HOJA DE EVALUACIÓN

**Calificación:** \_\_\_\_\_

**Presidente**

Fdo.:

**Vocal**

**Secretario/a**

Fdo.:

Fdo.:

**Fecha: Junio 2017**



# ÍNDICE GENERAL

<b>Capítulo 1: Introducción .....</b>	<b>3</b>
1.1    Sistemas de observación meteorológica .....	3
1.2    Alternativas basadas en radioenlaces de comunicación.....	5
1.3    Objetivos.....	7
1.4    Estructura de la memoria .....	8
<b>Capítulo 2: Fundamentos teóricos sobre causas de atenuación y efecto particular de la lluvia.....</b>	<b>11</b>
2.1    Estudio de las causas de atenuación en señales de radiofrecuencia.....	11
2.1.1    Atenuación por gases atmosféricos .....	12
2.1.2    Atenuación por nubes y niebla .....	14
2.1.3    Atenuación por tempestades de arena y polvo .....	15
2.1.4    Atenuación por hidrometeoros .....	16
2.2    Estructura de la lluvia .....	17
2.2.1    Tipos de precipitación .....	17
2.2.2    Estructura horizontal de la lluvia.....	18
2.2.3    Estructura vertical de la lluvia.....	19
2.2.4    Altura de la lluvia .....	20
2.3    Atenuación específica de la lluvia .....	21
2.3.1    Distribución del tamaño de las gotas.....	22
2.3.2    Forma y orientación de los hidrometeoros .....	22
2.3.3    Velocidad terminal .....	23
2.3.4    Temperatura de las gotas de lluvia .....	24

2.3.5	Fórmula de la atenuación específica de la lluvia.....	24
<b>Capítulo 3: Preparación entorno trabajo y adquisición de datos.....</b>		<b>29</b>
3.1	Base de datos .....	29
3.1.1	Tipos de datos.....	30
3.1.2	Diagrama de flujo de la inserción de registros en la base de datos.....	30
3.1.3	Aplicación web para la inserción de registros en la base de datos.....	33
3.1.4	Conexión de la base de datos con Matlab .....	35
3.2	Adquisición de datos .....	35
3.2.1	Adquisición de los datos de radioenlaces.....	35
3.2.2	Adquisición de los datos de meteorología.....	36
3.2.3	Región de trabajo .....	38
<b>Capítulo 4: Preprocesado y procesado de los datos. ....</b>		<b>39</b>
4.1	Tratamiento de los datos meteorológicos de referencia .....	39
4.1.1	Lectura de datos .....	40
4.1.2	Localización de datos omitidos y estudio de la continuidad temporal de los datos.....	40
4.1.3	Estudio de las causas de generación de GAPS .....	41
4.2	Tratamiento de los datos de radioenlaces .....	42
4.2.1	Lectura de datos .....	43
4.2.2	Localización y estudio de continuidad temporal de la señal de radioenlace .	43
4.2.3	Transformación de señal quinceminutal a horaria .....	44
4.2.4	Eliminación baja frecuencia de la señal .....	45
4.2.5	Sincronismo entre señales de radioenlaces y de estaciones meteorológicas .	47
4.3	Telemetría y geo-localización .....	48
4.3.1	Telemetría.....	48
4.3.2	Geo-localización.....	49
4.4	Procesado de los datos meteorológicos y de radioenlaces .....	51

<b>Capítulo 5: Algoritmos de detección de precipitación. ....</b>	<b>53</b>
5.1 Detectabilidad de precipitaciones a partir de la atenuación.....	54
5.2 Uso de la curva ROC en los métodos de detección .....	56
5.3 Detección mediante SVM.....	59
5.3.1 Clasificación mediante SVM.....	60
5.3.2 Experimentos de detección.....	64
5.4 Detección por sustracción de componentes de baja frecuencia .....	65
5.4.1 Cálculo del nivel de precipitación .....	66
5.4.2 Eliminación de GAPS de los datos de meteorología y de los datos de radioenlaces .....	67
5.4.3 La detección.....	67
5.5 Experimento 1: Utilización de la curva ROC para la elección de la mejor ventana en el método de detección por sustracción de componentes de bajas frecuencias .....	69
5.6 Detección por comparación de patrones .....	72
5.6.1 Correlación .....	73
5.6.2 Eliminación de GAPS de los datos de meteorología y de los datos de radioenlaces .....	73
5.6.3 La detección.....	73
5.7 Experimento 2: Variación de la amplitud de la máscara para la obtención de mejores resultados en el método por comparación de patrones .....	77
5.8 Experimento 3: Variación de la longitud de la máscara para la obtención de mejores resultados con el método por comparación de patrones .....	78
5.9 Experimento 4: Variación de la máscara para la obtención de mejores resultados en el método de detección por comparación de patrones .....	79
5.10 Experimento 5: Utilización de la curva ROC y su área para la elección del mejor umbral para cada máscara en el método de detección por comparación de patrones.....	80

<b>Capítulo 6: Experimentos y Resultados de Estimación de Lluvia</b> .....	<b>85</b>
6.1 Experimentos para la detección por sustracción de componentes de baja frecuencia .....	86
6.1.1 Radioenlace Pico II – Moriscos .....	86
6.1.2 Radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	95
6.2 Experimentos para la detección por comparación de patrones.....	104
6.2.1 Radioenlace Pico II – Moriscos .....	105
6.2.2 Radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	112
6.3 Detección en dos etapas.....	120
6.3.1 Detección por sustracción de componentes de baja frecuencia .....	121
6.3.2 Detección por comparación de patrones .....	123
<b>Capítulo 7: Conclusiones.</b> .....	<b>125</b>
7.1 Conclusiones.....	125
7.2 Líneas futuras .....	127
<b>Apéndice A: Conexión de la base de datos con matlab</b> .....	<b>129</b>
<b>Apéndice B: Datos de los radioenlaces.</b> .....	<b>133</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>135</b>
<b>Pliego de condiciones</b> .....	<b>141</b>
<b>Presupuesto</b> .....	<b>147</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1-1. Imagen de radar meteorologicos (izq.) y de un satelite meteorologico (drch.) de las Islas Canarias .....	5
Fig. 2-1. Atenuación específica debida a los gases atmosféricos .....	14
Fig. 2-2. Media Anual de la isoterma a 0°C por encima del nivel del mar (km).....	21
Fig. 2-3. Relción entre altura, radio y ángulo de inclinación de las gotas.....	23
Fig. 2-4. Velocidad de caída terminal de las gotas de lluvia en función de su radio. Modelode Gunn y Kinzer .....	24
Fig. 2-5. Variación de los parametros $k$ y $\alpha$ en función de la frecuencia para las polarizaciones horizontal.....	27
Fig. 3-1. Diagrama de flujo de la inserción de registros en nuestra base de datos .....	31
Fig. 3-2. Aplicación web para la carga de datos en la base de datos.....	33
Fig. 3-3. Aplicación web para la visualización de datos .....	34
Fig. 3-4. Ejemplo de consulta usando la aplicación web.....	34
Fig. 3-5. Mapa de cobertura TETRA para la isla de Gran Canaria .....	36
Fig. 4-1. Etapas del preproceso de los datos de radioenlaces.....	42
Fig. 4-2. 1 – Señal enlace Monteluz – Hospital Militar. 2 – Baja frecuencia. 3 – Alta frecuencia.....	46
Fig. 4-3. Señal original y envolvente Monteluz – Hospital Militar.....	47
Fig. 4-4. Mapa de las estaciones meteorologicas y radioenlaces de la isla de Gran Canaria .....	48
Fig. 5-1. Ejemplo de parámetros de diseño de un radioenlace en términos de balance de potencias extremo .....	55
Fig. 5-2. Señales registradas en un receptor de radar; I, II y III corresponden a misiles ....	57
Fig. 5-3. Ejemplo de curva ROC .....	59
Fig. 5-4. SVM Linealmente separable.....	61
Fig. 5-5. SVM no linealmente separable inducida por una función kernel .....	62
Fig. 5-6. SVM con margen blando .....	62

Fig. 5-7. Esquema general de la detección por sustracción de baja frecuencias.....	65
Fig. 5-8. Señal de alta frecuencia y niveles de precipitación obtenidos aplicando la ITU .	66
Fig. 5-9. Detección de precipitación para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	68
Fig. 5-10. Valor de la AUC frente al valor de la ventana de promedio .....	69
Fig. 5-11. Curva ROC para una ventana promedio $w= 45$ .....	70
Fig. 5-12. Gráfica con diferentes factores dependientes de la ROC y AUC.....	70
Fig. 5-13. Comparativa de valor AUC y ventana promedio para diferentes enlaces.....	71
Fig. 5-14. Esquema general del método de detección por comparación de patrones .....	72
Fig. 5-15. Detección de precipitación para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar usando el método de comparación de patrones.....	75
Fig. 5-16. Precipitación detectada para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar.....	75
Fig. 5-17. Zoom de la precipitación detectada para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar.....	76
Fig. 5-18. Máscara inicial con forma de pulso para la detección por comparación de patrones .....	76
Fig. 5-19. Gráficas de las diferentes señales que utilizamos como máscaras .....	79
Fig. 5-20. Precipitación recogida y detectada utilizando máscara Hamming .....	82
Fig. 5-21. Precipitación recogida y detectada utilizando máscara Barthannwin .....	82
Fig. 6-1. Gráfica del valor de la AUC frente al valor de la ventana de promedio del entrenamiento 1 .....	87
Fig. 6-2. Curva ROC del entrenamiento 1 para el radioenlace Pico II – Moriscos con una ventana de valor 3 .....	87
Fig. 6-3. Precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 1 para el radioenlace Pico II - Moriscos.....	89
Fig. 6-4. Zoom de la precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 1 para el radioenlace Pico II – Moriscos.....	89
Fig. 6-5. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Pico II – Moriscos para el test 1 .....	90
Fig. 6-6. Gráfica del valor de la AUC frente al valor de la ventana de promedio del entrenamiento 2 .....	91
Fig. 6-7. Curva ROC del entrenamiento 2 para el radioenlace Pico II – Moriscos con una ventana de valor 3 .....	92

Fig. 6-8. Precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 2 para el radioenlace Pico II - Moriscos .....	93
Fig. 6-9. Zoom de la precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 2 para el radioenlace Pico II – Moriscos .....	94
Fig. 6-10. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Pico II – Moriscos para el test 2.....	94
Fig. 6-11. Gráfica del valor de la AUC frente al valor de la ventana de promedio del entrenamiento 1 .....	96
Fig. 6-12. Curva ROC del entrenamiento 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar con una ventana de valor 45 .....	96
Fig. 6-13. Precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	98
Fig. 6-14. Zoom de la precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	98
Fig. 6-15. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Monteluz – Hospital Militar para el test 1 .....	99
Fig. 6-16. Gráfica del valor de la AUC frente al valor de la ventana de promedio del entrenamiento 2 .....	100
Fig. 6-17. Curva ROC del entrenamiento 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar con una ventana de valor 53 .....	101
Fig. 6-18. Precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	102
Fig. 6-19. Zoom de la precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	103
Fig. 6-20. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Monteluz – Hospital Militar para el test 2.....	103
Fig. 6-21. Precipitación detectada por el método de comparación de patrones con la máscara Hamming en el test 1 para el radioenlace Pico II - Moriscos.....	107
Fig. 6-22. Zoom de la precipitación detectada por el método comparación de patrones con la máscara Hamming en el test 1 para el radioenlace Pico II – Moriscos .....	108

Fig. 6-23. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Pico II –Moriscos para el test 1 y máscara Hamming .....	108
Fig. 6-24. Precipitación detectada por el método de comparación de patrones con la máscara Nuttallwin en el test 2 para el radioenlace Pico II – Moriscos.....	110
Fig. 6-25. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Pico II –Moriscos para el test 2 y máscara Nuttallwin .....	111
Fig. 6-26. Precipitación detectada por el método de comparación de patrones con la máscara Hamming en el test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	115
Fig. 6-27. Zoom de la precipitación detectada por el método comparación de patrones con la máscara Hamming en el test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	115
Fig. 6-28. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Monteluz –Hospital Militar para el test 1 y máscara Hamming .....	116
Fig. 6-29. Precipitación detectada por el método de comparación de patrones con la máscara Hamming en el test 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	119
Fig. 6-30. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Monteluz –Hospital Militar para el test 2 y máscara Pulso .....	119
Fig. A-1. Captura de pantalla del Administrador de origen de datos ODBC.....	130
Fig. A-2. Captura de pantalla de creación de nuevo origen de datos .....	130
Fig. A-3. Configuración del Conector/ODBC .....	131
Fig. A-4. Resultado del Test de la conexión del Conector/ODBC .....	132

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Coeficientes de las ecuaciones (3) y (4) para polarización horizontal.....	26
Tabla 2-2. Coeficientes de las ecuaciones (3) y (4) para polarización vertical.....	26
Tabla 4-1. Estaciones meteorológicas de Gran Canaria.....	50
Tabla 5-1. Explicación términos predicción y valores reales.....	58
Tabla 5-2. Resultados de clasificación para dos radioenlaces.....	65
Tabla 5-3. Datos de ventana óptima y valor de AUC para 5 radioenlaces.....	71
Tabla 5-4. Resultados para diferentes amplitudes de pulso.....	77
Tabla 5-5. Resultados para diferentes longitudes de pulso.....	78
Tabla 5-6. Resultados para diferentes máscaras de correlación.....	80
Tabla 5-7. Valores AUC y umbrales para diferentes máscaras.....	81
Tabla 5-8. Resultados de diferentes máscaras para umbrales establecidos mediante ROC y AUC.....	81
Tabla 6-1. Resultados test 1 radioenlace Pico II - Moriscos.....	88
Tabla 6-2. Resultados test 1 radioenlace Pico II – Moriscos aplicado el factor de corrección de 0,6711 en la cuantificación de la lluvia.....	90
Tabla 6-3. Resultados test 2 radioenlace Pico II – Moriscos.....	92
Tabla 6-4. Resultados test 2 radioenlace Pico II – Moriscos aplicado el factor de corrección de 0,6637 en la cuantificación de la lluvia.....	95
Tabla 6-5. Resultados test 1 radioenlace Monteluz – Hospital Militar.....	97
Tabla 6-6. Resultados test 1 radioenlace Monteluz – Hospital Militar aplicado el factor de corrección de 0.994 en la cuantificación de la lluvia.....	100
Tabla 6-7. Resultados test 2 radioenlace Monteluz – Hospital Militar.....	101
Tabla 6-8. Resultados test 2 radioenlace Monteluz – Hospital Militar aplicado el factor de corrección de 0.6371 en la cuantificación de la lluvia.....	104
Tabla 6-9. Valores de AUC y umbral para diferentes máscaras del entenamiento 1 del radioenlace Pico II – Moriscos.....	105

Tabla 6-10. Resultado máscara Nuttallwin del test 1 para el radioenlace Pico II - Moriscos .....	106
Tabla 6-11. Resultado máscara Hamming del test 1 para el radioenlace Pico II - Moriscos .....	106
Tabla 6-12. Resultados test 1 con máscara Hamming del radioenlace Pico II – Moriscos aplicado el factor de corrección de 0.6371 en la cuantificación de la lluvia.....	109
Tabla 6-13. Valores de AUC y umbral para diferentes máscaras del entenamiento 2 del radioenlace Pico II – Moriscos.....	109
Tabla 6-14. Resultado máscara Nuttallwin del test 2 para el radioenlace Pico II - Moriscos .....	110
Tabla 6-15. Resultados test 2 con máscara Nuttallwin del radioenlace Pico II – Moriscos aplicado el factor de corrección de 0,6001 en la cuantificación de la lluvia.....	112
Tabla 6-16. Valores de AUC y umbral para diferentes máscaras del entenamiento 1 del radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	112
Tabla 6-17. Resultado máscara Pulso del test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar.....	113
Tabla 6-18. Resultado máscara Barthannwin del test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	113
Tabla 6-19. Resultado máscara Hamming del test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	114
Tabla 6-20. Resultados test 1 con máscara Hamming del radioenlace Monteluz – Hospital Militar aplicado el factor de corrección de 0,7073 en la cuantificación de la lluvia .....	116
Tabla 6-21. Valores de AUC y umbral para diferentes máscaras del entenamiento 2 del radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	117
Tabla 6-22. Resultado máscara Pulso del test 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar.....	118
Tabla 6-23. Resultado máscara Nuttallwin del test 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital .....	118
Tabla 6-24. Resultados test 2 con máscara Pulso del radioenlace Monteluz – Hospital Militar aplicado el factor de corrección de 0.68582 en la cuantificación de la lluvia .....	120
Tabla 6-25. Resultados 1º etapa y 2º etapa para el radioenlace Pico II – Moriscos.....	122
Tabla 6-26. Resultados 1º etapa y 2º etapa para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	122

Tabla 6-27. Resultados 1º etapa y 2º etapa para el radioenlace Pico II – Moriscos .....	124
Tabla 6-28. Resultados 1º etapa y 2º etapa para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar .....	124
Tabla B-1. Datos de distancia, frecuencia y polarización de los radioenlaces de la isla de Gran Canaria.....	134



# ACRÓNIMOS

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
AUC	Área bajo la curva
FN	False Negative
FP	False Positive
ITU	Organización Internacional de las Telecomunicaciones.
ODBC	Open Data Base Connectivity
PFC	Proyecto de final de carrera
RESCAN	Red de Emergencias y Seguridad de Canarias
ROC	Característica operativa del receptor
RSL	Received Signal Level
SVM	Support Vector Machine
TN	True Negative
TP	True Positive



# **Parte I**

# **Memoria**



# CAPÍTULO 1:

## INTRODUCCIÓN

En este capítulo vamos a realizar una breve introducción sobre los sistemas de observación meteorológica actuales. También realizamos un estudio sobre las alternativas para dicha observación basadas en radioenlaces a frecuencias de microondas, y describimos los objetivos de este proyecto. Además, presentamos la estructura de esta memoria.

### 1.1 Sistemas de observación meteorológica

En la actualidad, datos como la temperatura, viento, precipitación, etc., se obtienen enteramente gracias a los sistemas diseñados específicamente para meteorología. Particularmente, el problema de las mediciones precisas de la cantidad de lluvia –que es lo que abarcará este proyecto fin de carrera– tiene un importante impacto, no sólo en meteorología, sino también en hidrología, agricultura, políticas medioambientales y predicción del tiempo.

Estos sistemas, que podemos denominar como sistemas de observación meteorológica, consisten en:

- Estaciones de meteorología: Se encuentran en la superficie terrestre y pueden medir temperatura, precipitación, humedad, viento, etc. Todos los datos de meteorología con los que trabajaremos en este PFC han sido recogidos de estaciones de este tipo.
- Radares meteorológicos: Permiten localizar precipitaciones, calcular sus trayectorias y estimar si se trata de lluvia, nieve, granizo, etc. También se puede estimar la dirección y velocidad del viento de las zonas bajas de la atmósfera.
- Satélites meteorológicos: Proporcionan datos actualizados permanentemente, de las condiciones meteorológicas que afectan a grandes áreas geográficas. Los servicios de predicción meteorológica dependen del flujo constante de imágenes tomadas por estos satélites. Los satélites meteorológicos se sitúan en dos tipos de órbitas: geoestacionarias (por ejemplo, METEOSAT de la Agencia Espacial Europea) y polares.

Hay más sistemas de observación entre los que se encuentran las boyas meteorológicas, los buques de observación marítima, las radiosondas, etc. Estos sistemas forman parte de la red de observación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) [1] que lleva a cabo proyectos para la evolución y mejora del Sistema Mundial de Observación (SMO).

En la figura 1-1 podemos observar una imagen de un radar meteorológico sobre las Islas Canarias (imagen de la izquierda) y una imagen de un satélite meteorológico también sobre las Islas Canarias (imagen de la derecha). Si bien no son simultáneas, sí permite ver cómo es la observación en la región que más nos ocupa.

El principal problema de estos sistemas es que son costosos en su instalación, funcionamiento y mantenimiento. Además hay otras series de desventajas asociadas a muchos de estos sistemas. Destacamos, entre otros, que los datos que recogen son en puntos muy específicos, no proporcionan con exactitud la hora de inicio y de fin de los eventos meteorológicos (p.e., ofrecen datos cada hora sin especificar qué ha pasado a lo largo de la misma), necesitan de constante mantenimiento de forma específica, transmiten sus datos en las bandas libres de frecuencia (son vulnerables a interferencias), en muchos casos no se puede verificar la recepción de los mismos, etc.

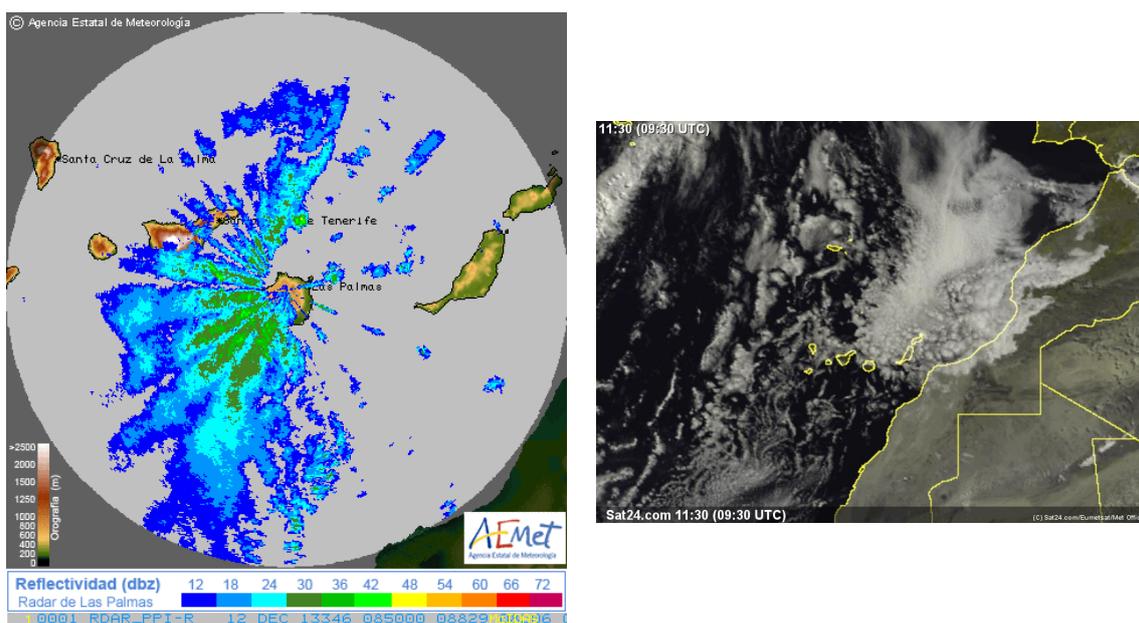


Fig. 1-1. Imagen de radar meteorológicos (izq.) y de un satélite meteorológico (drch.) de las Islas Canarias

## 1.2 Alternativas basadas en radioenlaces de comunicación

Ante los problemas reseñados en el apartado anterior, desde hace aproximadamente una década, hay un interés creciente en aprovechar el efecto de las condiciones meteorológicas sobre los niveles de potencia en las comunicaciones por radio a frecuencias superiores a 1 GHz para superar las limitaciones de los sistemas convencionales. Una posible solución para mejorar la toma de mediciones meteorológicas es utilizar los enlaces de microondas para poder detectar eventos meteorológicos y, ulteriormente, identificarlos o seguirlos.

Los radioenlaces nos permiten la obtención de datos, en muchos casos, más exactos, que los sistemas meteorológicos. Cuantificar la lluvia en un lugar concreto, medir la velocidad del viento, detectar si hay niebla, detectar calima, la temperatura e incluso detectar conatos de incendio, es posible ya que las mediciones se toman en el área del mismo utilizando las variaciones de la potencia de la señal transmitida. Veamos a continuación algunos trabajos publicados al respecto, y que nos sirven de referencia.

En una investigación realizada por C. Ho [2] se puede observar tres enfoques diferentes de simulación para la predicción del comportamiento de una señal que se encuentra bajo distintas condiciones meteorológicas y topográficas. Mediante una serie de pruebas, se determinó la capacidad y las limitaciones del sistema de simulación y modelos subyacentes.

Asimismo, en una investigación de 2006 de Messer, Zinevich, y Alpert [3] estiman la cantidad de lluvia mediante el uso de datos obtenidos de una red celular. Posteriormente estos tres mismos investigadores [4], utilizando una modificación de la investigación anterior [3], junto con un modelo tomográfico no lineal diseñado sobre una rejilla de densidad variable, logran la medida de intensidad de lluvia cerca de la superficie (en una superficie de  $3.200 \text{ Km}^2$ ) con una desviación menor del 10%.

En trabajos recientes, Alpert, Rayitsfeld et al. [5], comparan dos metodologías utilizadas por otros investigadores. La primera trata de la estimación de la intensidad de lluvia a partir de datos obtenidos de un radioenlace cercano a una estación meteorológica. La segunda, sin embargo, utiliza la interpolación de los datos de varios radioenlaces para la obtención de la intensidad de lluvia en los puntos donde se encuentran las estaciones meteorológicas. Comparando ambas metodologías con los datos obtenidos en estaciones meteorológicas se obtiene una desviación del 6% y del 3%, respectivamente.

Recientemente, Messer, Zinevich y Alpert [6], hicieron uso de una red de comunicaciones inalámbricas, establecieron una serie de sensores ambientales para la medición de la intensidad de lluvia y la velocidad del viento. Asimismo, David, Alpert y Messer [7] introducen un método nuevo para la monitorización de eventos de niebla mediante el uso de infraestructuras de comunicaciones móviles.

Asimismo, este proyecto se engloba dentro de la Tesis Doctoral de uno de mis tutores, D. Iván Guerra [8], cuyo objetivo ha sido investigar sobre la utilización de algoritmos de aprendizaje para la monitorización meteorológica. A su vez, ambos trabajos, se enmarcan dentro del proyecto VIMETRI-MAC [28], aprobado en la Primera convocatoria dentro del Programa de Cooperación Territorial. INTERREG V A España-Portugal. MAC 2014-2020. Este proyecto es desarrollado por investigadores del Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC), División de Procesado Digital de Señales, de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

## 1.3 Objetivos

A continuación, exponemos los objetivos que comprende este Proyecto Fin de Carrera:

- ✓ Objetivo 1: Estudio de trabajos publicados sobre la materia.

Partiendo de la bibliografía sobre sistemas de detección de eventos meteorológicos, y los trabajos previos de los tutores, el objetivo es hacer un estudio de los avances en investigación sobre el uso de métodos basados en niveles de potencia y otros parámetros (temperatura de ODU, niveles de tensión, etc.) aplicados a la detección de eventos meteorológicos, y los pondremos en valor tanto en comparación con otros métodos como en términos del valor añadido que aporta a los sistemas de radioenlaces.

- ✓ Objetivo 2: Procesado de datos obtenidos de radioenlaces y estaciones meteorológicas.

Los datos brutos que se obtienen tanto de radioenlaces como de estaciones meteorológicas, vistas éstas como fuentes primarias de información, y que tomaremos como referencia. Los datos obtenidos son brutos y necesitan de un procesado que permita usar dicha información. Así, este objetivo consiste en dar solución a problemas como el tener datos incompletos, diferencias de periodo de muestro entre radioenlaces y estaciones, ruido o artefactos en las mediciones, etc.

- ✓ Objetivo 3: Estudio de indicadores del nivel de precipitación.

Una vez que tenemos los datos debidamente procesados, el objetivo siguiente es detectar la presencia de precipitaciones e indicadores del nivel de lluvia dados en (mm/h). A tal efecto estudiaremos las recomendaciones de la ITU relativas al efecto de los fenómenos meteorológicos sobre las señales, y aplicaremos técnicas de extracción de características de las ‘señales de nivel de potencia’, clasificadores y la estimación de niveles de cuantificación del nivel de lluvia.

- ✓ Objetivo 4: Desarrollo de un entorno de programas.

Una vez que se tengan todos los programas que permiten alcanzar los objetivos anteriores, procederemos a desarrollar un entorno de programas con el que mostrar los resultados de forma gráfica.

### ✓ Objetivo 5: Redacción de la memoria.

Como objetivo final, se a lo largo del PFC se elaborará una memoria del trabajo que recogerá las aportaciones del mismo.

## 1.4 Estructura de la memoria

La redacción del presente Proyecto Fin de Carrera se ha estructurado en tres partes: memoria, pliego de condiciones y presupuesto.

La memoria consta de siete capítulos, que tratan los siguientes contenidos:

**Capítulo 1 – Introducción.** Realizamos una breve introducción sobre los sistemas de observación meteorológica, un estudio de las alternativas basadas en radioenlaces y describimos los objetivos de este proyecto.

**Capítulo 2 – Fundamentos teóricos sobre causas de atenuación y efecto particular de la lluvia.** Describimos los estudios sobre los diferentes fenómenos que explican la atenuación de la señal de radioenlace y ahondamos en las causas de la atenuación por precipitación.

**Capítulo 3 – Preparación entorno trabajo y adquisición de datos.** Explicamos la creación de la base de datos creada para este proyecto, así como los procedimientos llevados a cabo para la obtención de los datos de interés.

**Capítulo 4 – Preprocesado y procesado de los datos.** Describimos las técnicas y métodos utilizados para la extracción de los datos de interés así como la metodología utilizada para geo-localizar nuestros radioenlaces y estaciones meteorológicas.

**Capítulo 5 – Algoritmos de detección de precipitación.** Explicamos de forma detallada las distintas metodologías para la detección de precipitación así como los resultados de los diferentes experimentos que realizamos.

**Capítulo 6 – Entrenamiento y tests.** Incluye los diferentes entrenamientos realizados con diferentes radioenlaces y las diferentes metodologías de detección, así como los resultados obtenidos en los tests.

**Capítulo 7 – Conclusiones.** Se detallan las conclusiones obtenidas del trabajo llevado a cabo. Así mismo, se presentan posibles líneas futuras de trabajo.

Al final de la memoria se encuentra la **Bibliografía**, en donde se detallan las referencias bibliográficas empleadas como documentación de referencia para el desarrollo del presente PFC.

A continuación, se encuentra el **Pliego de Condiciones**, en el que se describen las especificaciones de los elementos hardware y software a partir de los que se han desarrollado en el presente Proyecto Fin de Carrera.

El **Presupuesto**, dispuesto a continuación de la memoria, detalla el coste de realización del presente PFC.



# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE CAUSAS DE ATENUACIÓN Y EFECTO PARTICULAR DE LA LLUVIA

En este capítulo vamos a realizar un estudio de las causas que provocan atenuación en las señales de radio a frecuencia de microondas, en especial las de tipo meteorológico. También analizaremos la estructura de la lluvia, la atenuación específica que causa y los diferentes modelos de predicción de la atenuación existentes.

### **2.1 Estudio de las causas de atenuación en señales de radiofrecuencia**

Para la mayor parte de los sistemas de radiocomunicaciones en frecuencias superiores a 1 GHz aproximadamente, la principal región de interés es a troposfera, que es la región no ionizada que va desde la superficie terrestre hasta una altura de unos 15 km por encima. En frecuencias por debajo de 1 GHz, la región más importante es la ionosfera, que es la región ionizada de la atmósfera situada por encima de la estratosfera [9].

Nuestra región de interés, debido al rango de frecuencias en las que trabajaremos (de 16 a 32 GHz) se encuentra, por tanto, en la troposfera. A continuación, realizaremos un estudio de las diferentes causas que afectan a la señal en dicha región.

Los principales fenómenos que afectan a la señal en la troposfera son [10]:

- Absorción y dispersión por gases atmosféricos, principalmente oxígeno y vapor de agua.
- Centelleo y dispersión debidos a turbulencia atmosférica.
- Absorción y dispersión por hidrometeoros. Los hidrometeoros tienen lugar en la atmósfera y pueden ser: suspensión (nubes o niebla), precipitación (lluvia, nieve o granizo) o deposición de partículas (rocío, escarcha o helada).
- Absorción y dispersión por arena, en particular de polvo.
- Refracción y reflexión en capas atmosféricas estables.
- Emisiones térmicas de hidrometeoros y gases atmosféricos.

Además, es en las capas altas de la atmósfera el efecto de la anisotropía y retardo en la ionosfera puede no ser despreciable. La atenuación producida por partículas de arena y de polvo parece tener escasa importancia en la mayoría de las regiones del mundo y son poco frecuentes los efectos apreciables en la propagación. Sin embargo, algunos estudios indican que esta atenuación podría ser considerable a frecuencias superiores de 10 GHz en condiciones como las de calima que con frecuencia afectan a las Islas Canarias.

En los siguientes apartados se describirán aquellos fenómenos más interesantes en el contexto de este Proyecto Fin de Carrera, que son todos los que de alguna manera atenúen la potencia de la señal.

### **2.1.1 Atenuación por gases atmosféricos**

La atenuación debida a los gases atmosféricos es causada principalmente por la absorción de las moléculas de oxígeno y vapor de agua. Su importancia aumenta con la frecuencia y es mayor cuanto más bajo es el ángulo de elevación. Los gases residuales (CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, etc.) pueden contribuir significativamente a la atenuación total en frecuencias superiores a 70 GHz.

Las moléculas de oxígeno tienen un momento magnético dipolar que interacciona con el campo magnético de la onda incidente, dando lugar a una absorción de energía. La absorción se produce principalmente en determinadas líneas espectrales. Existe un grupo

de líneas centrado en 60 GHz y una línea aislada en 118,74 GHz. El momento magnético de la molécula de oxígeno produce también una línea a frecuencia cero. A este efecto se le denomina espectro no resonante o Debye.

La molécula de vapor de agua posee un momento eléctrico dipolar permanente. La absorción se produce también en determinadas líneas espectrales por debajo de 350 GHz: en 22,2, 183,3 y 325 GHz como podemos observar en la figura 2-1.

La atenuación provocada por el oxígeno es prácticamente constante en el tiempo y posición debido a que este gas se encuentra uniformemente repartido en la atmósfera. Aunque, debemos mencionar que sufre pequeñas variaciones con la temperatura. En cambio, la atenuación provocada por el vapor de agua sufre más mayores oscilaciones, debido a que los perfiles verticales de humedad son muy variables. En la mayoría de los climas debe considerarse la correlación entre la atenuación producida por el vapor de agua y la producida por la lluvia al estimar las estadísticas de atenuación total. Es decir, que podemos considerar que se sufre la máxima atenuación por gases en el mes de máxima lluvia [9].

Existen varios modelos para la predicción de la atenuación provocada por gases. En algunos casos, los modelos estiman la atenuación a partir de variables meteorológicas obtenidas en superficie, tales como: la humedad, la presión y la temperatura. En otros modelos se requiere el perfil vertical de varios parámetros meteorológicos. Entre estos últimos, destaca el recogido en la Recomendación P.676-10 del UIT-R [11], basada en el modelo MPM (Millimetre Wave Propagation) de Liebe, el cuál desarrolla de forma precisa los cálculos de la refractividad del aire para frecuencias entre 1 y 1000 GHz.

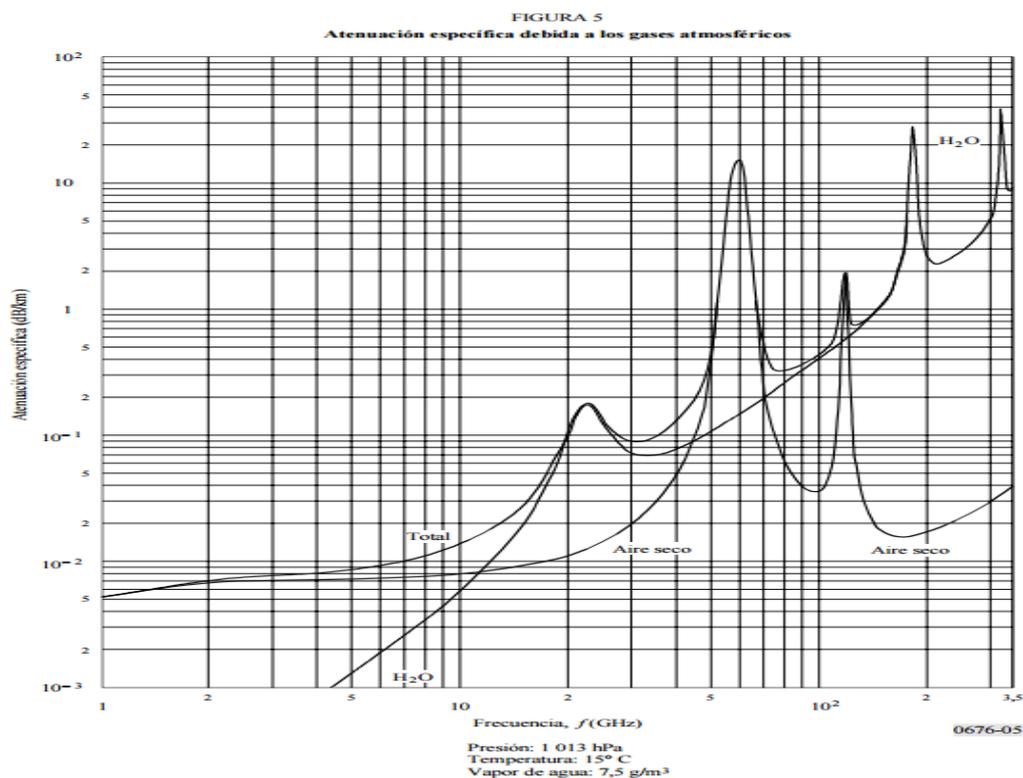


Fig. 2-1. Atenuación específica debida a los gases atmosféricos

## 2.1.2 Atenuación por nubes y niebla

Las nubes y la niebla consisten en pequeñas partículas de agua líquida, con diámetros entre 10 y 100  $\mu\text{m}$  [12]. Las nubes pueden dar lugar a valores apreciables de atenuación en frecuencias milimétricas pudiendo ser la degradación predominante en sistemas de baja disponibilidad. Por otra parte, las nubes de hielo no causan atenuación significativa, pero pueden llegar a causar despolarización.

La base para la predicción de la atenuación por nubes es la teoría de dispersión para partículas aisladas [10], más en concreto, la aproximación de Rayleigh para partículas inferiores a 100  $\mu\text{m}$ . El problema reside en que su aplicación no es directa debido a la complejidad física del modelado de las nubes y la escasez de datos precisos. La correcta caracterización de la influencia de las nubes sobre la propagación en frecuencias milimétricas requiere de una multitud de características, algunas de las cuales no están suficientemente definidas, como son:

- Distribución del tamaño de las partículas constituyentes de las nubes
- Temperatura de las partículas

- Forma de las partículas
- Extensión vertical y horizontal de la nube
- Distribución espacial en el interior de la nube de las primeras tres características
- Relación entre las características anteriores y el tipo de nube
- Probabilidad de aparición de cada tipo de nube en un clima particular

En general, se prefiere realizar el cálculo de atenuación a partir del contenido de agua líquida en una columna vertical. Este es el procedimiento indicado en la Recomendación P.840-6 del UIT-R [12]. En ella se proporciona un mapa global de contenido de agua líquida y la atenuación específica se calcula mediante un modelado matemático basado en la dispersión de Rayleigh.

En cuanto a la niebla, su composición se basa en vapor de agua saturado, del cual parte del agua ha precipitado en pequeñas gotas, de alrededor de 0.1 mm de diámetro. Esta atenuación sólo es significativa en frecuencias superiores a 100 GHz [12]. Su atenuación específica se calcula en función de la densidad de agua líquida, que toma valores entre 0,05 g/m<sup>3</sup> y 0,5 g/m<sup>3</sup>.

### **2.1.3 Atenuación por tempestades de arena y polvo**

Las ondas electromagnéticas se ven atenuadas mediante los mismos mecanismos por la arena y el polvo que por las precipitaciones de hidrometeoros. Las tempestades de arena y polvo están compuestas de densas nubes formadas por partículas de arena y polvo en suspensión. En los momentos más intensos, la visibilidad durante la tempestad puede reducirse a menos de 10 metros, el polvo llegar a unos 1000 metros de altura y extenderse cientos de kilómetros a lo largo de la región.

Sus características de atenuación pueden evaluarse en longitudes de onda centimétricas, gracias a la teoría de dispersión de Rayleigh y a la teoría de dispersión de Mie para frecuencias más altas. Principalmente, estas nieves están compuestas de arcilla y arena, teniendo unas dimensiones típicas de 0,05 y 0,08 cm. Se puede relacionar la concentración de partículas con la visibilidad óptica y una fuerte dependencia con la humedad.

Debemos tener en cuenta, además, que la atenuación será importante sólo para concentraciones de partículas altas, humedad elevada o ambos factores a la vez. Dichas condiciones solo se cumplen en zonas tropicales, desérticas o semidesérticas.

Aunque se conoce poco de los efectos que la arena y el polvo produce en las señales, se ha podido concretar que, a frecuencias inferiores a 30 GHz, una alta concentración de partículas y/o una alta humedad producen fenómenos en la propagación significativos [9].

### **2.1.4 Atenuación por hidrometeoros**

La precipitación produce absorción y dispersión en las ondas radioeléctricas. Sus efectos deben tenerse en cuenta en frecuencias superiores a varios GHz. Entre los hidrometeoros, el más importante es la lluvia, pero no debe obviarse la importancia de otro tipo de precipitaciones, como la nieve y el granizo [13].

La atenuación por lluvia es, sin duda, el fenómeno atmosférico con un mayor impacto en las comunicaciones troposféricas. Dicha atenuación puede omitirse a frecuencias inferiores de 5 GHz, pero a frecuencias superiores su importancia aumenta rápidamente. En la Recomendación P.838-3 [14] del UIT-R se explica un modelo para la atenuación específica producida por la lluvia a partir de valores de intensidad de lluvia conocidos.

Aunque la lluvia es, a gran distancia, el factor más significativo sobre la propagación en bandas milimétricas, no debe descartarse la influencia de otros hidrometeoros, como son la nieve y el granizo.

Debido a la baja constante dieléctrica, la nieve seca apenas influye en frecuencias inferiores a 30 GHz. La precipitación en forma de nieve húmeda puede provocar mayores atenuaciones que la precipitación equivalente de lluvia. Sin embargo, estos fenómenos son muy poco habituales. La atenuación debida al granizo puede ser importante para frecuencias de hasta 2 GHz, aunque el porcentaje de aparición de este tipo de precipitación suele ser muy bajo.

Este Proyecto Fin de Carrera se centrará en la atenuación de la lluvia en enlaces terrestres para un rango de frecuencias de 16 a 32 GHz. Por lo que en posteriores

apartados, se llevará a cabo un estudio más exhaustivo de la atenuación específica de la lluvia teniendo en consideración la estructura de la misma y las cuatro propiedades de las gotas de lluvia: distribución del tamaño, forma y orientación, velocidad terminal y temperatura.

## 2.2 Estructura de la lluvia

La caracterización de la estructura de los fenómenos de lluvia se lleva a cabo mediante radares meteorológicos y telemetría a bordo de satélite. También las redes de pluviómetros, que registran simultáneamente la intensidad de lluvia en varios emplazamientos, son útiles para este propósito.

Para la predicción de la atenuación por lluvia en un trayecto inclinado se requiere información sobre la estructura horizontal y vertical de las precipitaciones. La lluvia no es uniforme por lo que los modelos de predicción deben aplicar factores de reducción para tener en cuenta la inhomogeneidad espacial.

En general, la estructura dependerá del tipo de precipitación, de la intensidad máxima del fenómeno y del clima. Por ello, el análisis de la estructura comenzará por una revisión de los tipos de precipitaciones más habituales en todo tipo de clima.

Un dato de enorme interés es la altura de lluvia, es decir, la altura sobre la superficie hasta la que existe precipitación. Tiene una gran importancia en los modelos de predicción porque la atenuación total es casi proporcional a esta altura. Existen numerosos estudios sobre este aspecto, que se detallarán más adelante.

### 2.2.1 Tipos de precipitación

Las precipitaciones por lluvia se clasifican en cuatro tipos principalmente [15]:

- *Precipitación estratiforme*: corresponde a regiones extensas de lluvias de baja intensidad (hasta 25 mm/h) y de gran duración (más de 1 hora) o lo que es lo mismo, la precipitación está horizontalmente estratificada con lluvia hasta la altitud de la banda brillante (región estrecha de alta reflectividad de unos 300 m situada alrededor de la isoterma 0 °C).

- *Precipitación convectiva*: caracterizada por fuertes corrientes ascendentes y descendentes que se extienden a través de una región profunda de la troposfera. En este tipo de precipitación, las lluvias pueden ser muy extensas y tener extensiones horizontales de varios kilómetros y de corta duración. En los radares meteorológicos aparecen como regiones en forma de columnas casi verticales de mayor reflectividad.
- *Lluvia monzónica*: son una secuencia de bandas de precipitación convectiva intensa, seguida de una precipitación estratiforme. Suelen tener una extensión de unos 50 km de largo con una duración de varias horas.
- *Tormentas tropicales*: regiones muy extensas, habitualmente de cientos de kilómetros. Se caracterizan por varias bandas en espiral que terminan en regiones de precipitación muy intensa en torno a la región central u ojo del ciclón. Las bandas contienen también regiones de precipitación convectiva intensa.

En climas templados sólo existen los dos primeros tipos, estratiforme y convectiva. Sin embargo, no siempre se dan de manera aislada, sino que muchas veces el fenómeno de precipitación es una combinación de ambos tipos. Es importante recalcar que no siempre resulta sencillo definir un límite a la intensidad de precipitación que puede provocar cada lluvia ni su extensión horizontal.

### 2.2.2 Estructura horizontal de la lluvia

La intensidad de la lluvia varía en función en función del espacio y el tiempo. Los registros de los pluviómetros revelan pequeños intervalos de mayor intensidad de lluvia comprendidos en periodos más largos de lluvia ligera. Se ha podido comprobar lo mismo con radares meteorológicos, es decir, que las zonas de mayor intensidad de lluvia son las que están comprendidas en regiones más extensas de lluvia más suave.

La distribución horizontal de la intensidad de la precipitación se suele modelar mediante un conjunto de células de lluvia distribuidas a lo largo de la región de interés [16]. Una célula de lluvia puede definirse como el área dentro de la cual la intensidad de

lluvia supera u determinado umbral. Podemos hablar de valores típicos de entre 2 y 10 mm/h. En el espacio que dejan las células existe una intensidad de lluvia residual, que se considera uniforme. El modelado mediante células d lluvia es más apropiado para caracterizar fenómenos de lluvia convectiva.

Las células de lluvia se describen según una serie de parámetros característicos: dimensión, forma, orientación, intensidad máxima, dirección y velocidad de movimiento. Varios modelos basados en medidas de radar han caracterizado las células asignando valores a estos parámetros. El más conocido de todos ellos, es el método EXCELL [17]. Este método utiliza células circulares y una expresión exponencial para representar la distribución de la intensidad de lluvia en el interior de la célula. Un modelo más reciente, denominado HYCELL [18], inspirado en el anterior, utiliza células elípticas y una combinación de función exponencial y gaussiana para definir la distribución de intensidades.

### **2.2.3 Estructura vertical de la lluvia**

El modelo más sencillo con el que podemos considerar la estructura vertical es una célula de lluvia verticalmente homogénea y cilíndrica que se extiende desde la superficie de la Tierra hasta la altura de la isoterma de 0 °C<sup>1</sup>. Sin embargo, puede haber una estructura vertical que no sea homogénea y en movimiento durante su formación y durante su debilitamiento. Debe tenerse en cuenta que el tiempo de caída de las gotas es del orden de 5 a 15 minutos. En consecuencia, el modelo de células de lluvia verticalmente homogéneas puede sobrestimar la atenuación en climas con fuertes precipitaciones, como en las regiones tropicales, donde el proceso de formación de la lluvia es distinto.

Mediante observaciones por radar se ha conseguido determinar algunas características interesantes de la estructura vertical de la lluvia en función del tipo de precipitación.

---

<sup>1</sup> nivel de referencia sobre la evolución de las masas de aire.

- Las precipitaciones estratiformes se caracterizan por una delgada capa horizontal de mayor reflectividad. Tienen un espesor de unos 300 m, aunque puede alcanzar valores de hasta 1 km. Esta capa está compuesta en su mayor medida por nieve y nieve en fusión, por lo que también se la conoce como banda brillante o capa de fusión por el aspecto que provoca en la imagen radar. Causa también una atenuación adicional a la de la lluvia. La región superior a la banda brillante es una mezcla de hielo y nieve que no produce atenuación importante en frecuencias por debajo de los 60 GHz. La altura a la que se produce la transición entre ambas regiones, denominada altura de transición, está estrechamente relacionada con la altura de la isoterma 0 °C.
- Las precipitaciones convectivas están caracterizadas por regiones en forma de columnas casi verticales de mayor reflectividad. Se producen fuertes movimientos verticales de aire que dan lugar a la mezcla en gran escala de los distintos tipos de partículas. En algunas células de este tipo se pueden encontrar gotas de lluvia superfrías por encima de la isoterma 0 °C.

### 2.2.4 Altura de la lluvia

La altura de la lluvia,  $h_R$ , supone el límite para la extensión vertical de la atenuación. Es decir, es la altura máxima a la que se produce precipitación y, por lo tanto, atenuación. Normalmente la altura de la lluvia no coincide con la isoterma 0 °C, aunque está relacionada. Por otra parte, existen modelos que consideran la altura de la isoterma 0 °C como la máxima altura de la lluvia para precipitaciones estratiformes.

La altura de la isoterma 0 °C es fácil de determinar mediante radiosondas. Depende de diversos factores tales como la altitud, el tipo de clima y el tipo de precipitación. También existe una significativa variabilidad de este parámetro en climas templados, alcanzando el máximo de altura en verano. En la zona de los trópicos, la variación es prácticamente inexistente.

La recomendación de la ITU P.839-4 [19] propone unos mapas mundiales estacionales para el cálculo de la isoterma 0 °C para áreas del mundo donde no hay información específica disponible. Dichos mapas ofrecen un valor medio anual de la altura de la lluvia sobre el nivel del mar para cada emplazamiento. Sin embargo, esta no es la

## Fundamentos teóricos sobre causas de atenuación y efecto particular de la lluvia

altura de la lluvia, sino que la recomendación asume que hay lluvia hasta la isoterma  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por lo que es necesario sumar un pequeño término que equivale a la diferencia de alturas entre las dos isotermas. Teniendo en cuenta que el gradiente de temperatura vertical es ( $6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ), la altura de la lluvia resulta ser:

$$h_R = h_0 + 0.36 \text{ km} \quad (2-1)$$

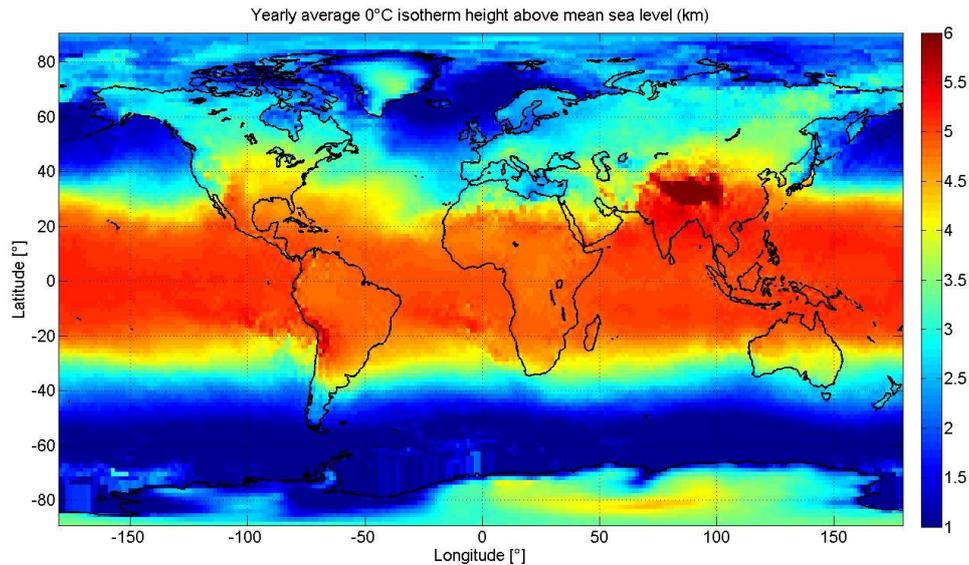


Fig. 2-2. Media Anual de la isoterma a  $0^{\circ}\text{C}$  por encima del nivel del mar (km)

### 2.3 Atenuación específica de la lluvia

La lluvia se compone de un conjunto de gotas de diferentes tamaños, formas y temperaturas. Para el cálculo de la atenuación específica suelen considerarse estas cuatro propiedades de las gotas de lluvia:

- Distribución del tamaño
- Forma y orientación
- Velocidad terminal
- Temperatura

En los siguientes apartados se describen estos cuatro parámetros que caracterizarán la distribución de gotas de lluvia presentes en una precipitación.

### 2.3.1 Distribución del tamaño de las gotas

Aunque los tamaños, formas y orientaciones de las propias gotas pueden variar dentro de una lluvia, podemos suponer que la distribución del tamaño de las gotas de lluvia es relativamente estable, siendo lo que varía la intensidad de la precipitación.

La primera determinación experimental fiable del tamaño de las gotas de lluvia fue de Laws y Parson en 1943 [20]. Estaba basado en mediciones para intensidades de lluvia de hasta 50 mm/h, aunque su modelo puede extrapolarse para intensidades superiores. Posteriormente en 1948 Marshall y Palmer [21] y en 1968 Joss [22] sugirieron una distribución del tamaño de las gotas representada por una exponencial negativa. La distribución de Joss se diferencia del modelo de Marshall y Palmer en que reconoce diferencias básicas en las distribuciones de tamaño para tres tipos de lluvia: convectiva, estratiforme y llovizna. En frecuencias superiores a 10 GHz y para intensidades de lluvia elevadas, la distribución de Laws y Parsons proporciona atenuaciones específicas superiores a la distribución de Joss para lluvia convectiva.

La mejora de la instrumentación en las últimas décadas ha permitido determinar con mayor exactitud el tamaño de las gotas. Se han propuestos varios modelos basados en distribuciones log-normal, gamma o Weibull. Pero las medidas de distribución de gotas por encima de 0.5 mm parecen confirmar la precisión de la distribución de Laws y Parson.

Existe una gran incertidumbre en cuanto a la ponderación de las gotas de lluvia de diámetro muy pequeño, ya que son difíciles de detectar por los instrumentos y su densidad puede estar sometida a mayores variaciones. Esta incertidumbre aumenta en frecuencias elevadas puesto que este tipo de gotas tiene una gran influencia en el cálculo de la atenuación específica.

### 2.3.2 Forma y orientación de los hidrometeoros

Al caer las gotas de lluvia adquieren una forma esferoidal debido al efecto de la gravedad y la tensión superficial del agua. Suelen mantener un eje de simetría casi vertical, aunque su orientación media puede inclinarse unos grados debido a la fuerza horizontal generada por el viento.

El modelo más utilizado procede de los experimentos realizados por Pruppacher y Pitter en túneles de viento [23], que permitió determinar las formas de las gotas de lluvia en función de su tamaño. En la figura 3 podemos ver la forma que, según este modelo, toman las gotas para varios tamaños. El tamaño de las gotas varía entre 100  $\mu\text{m}$  y 3.5 mm de radio. El tamaño máximo viene determinado por la estabilidad: las gotas con diámetros muy grandes suelen ser inestables y tienden a romperse durante su caída.

Para caracterizar la orientación de las gotas se utiliza el modelo físico de Brussaard [10], que tiene en cuenta las fuerzas gravitacionales y aerodinámicas. Este modelo supone que el ángulo de inclinación disminuye al aumentar la altura, debido a que la cizalladura vertical del viento es también menor. En la figura 2-3 se muestran los resultados obtenidos por este modelo para varias alturas y tamaños de gotas. El ángulo de inclinación aumenta el radio hasta unos 2 mm. Para gotas más grandes, el ángulo se mantiene casi constante.

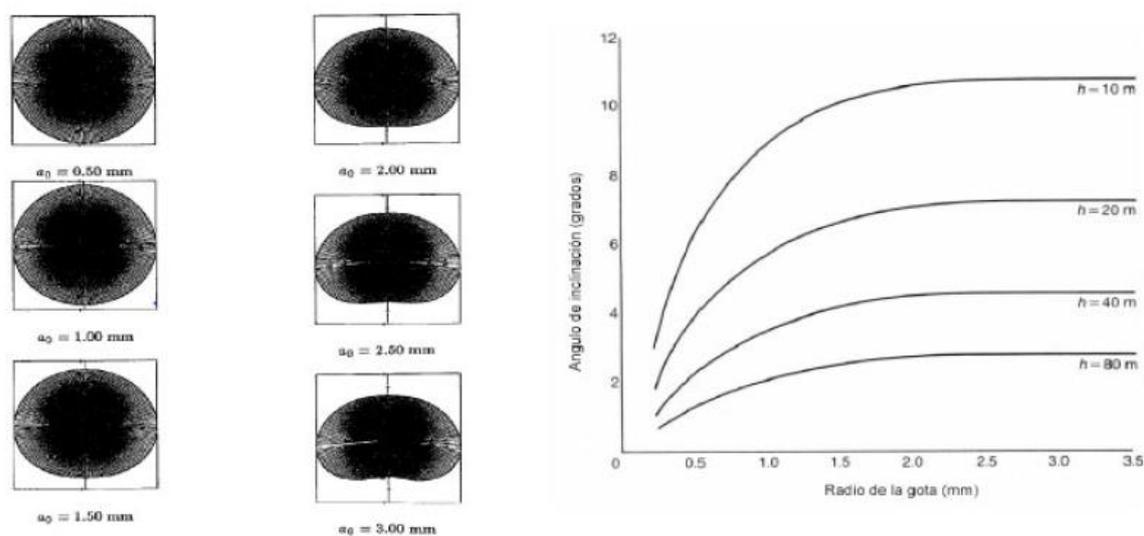


Fig. 2-3. Relción entre altura, radio y ángulo de inclinación de las gotas

### 2.3.3 Velocidad terminal

Para poder determinar la intensidad de lluvia a partir de la distribución de gotas, es necesario modelar las velocidades de caída de las partículas de lluvia. Se suele utilizar el modelo de Gunn y Kinzer [24] de 1949, que relaciona la velocidad terminal de las gotas de lluvia con su tamaño con aire en calma (ver figura 2-4). Según este modelo, la velocidad terminal aumenta con el radio de la gota de lluvia hasta un máximo de 9ms en mm aproximadamente.

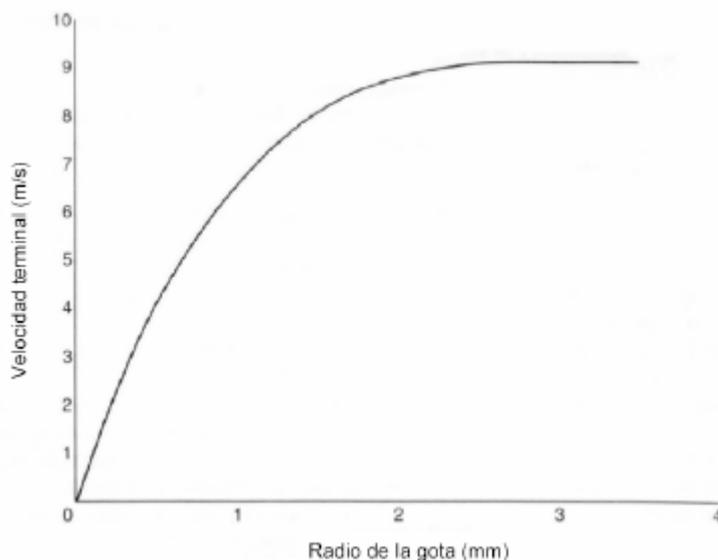


Fig. 2-4. Velocidad de caída terminal de las gotas de lluvia en función de su radio. Modelode Gunn y Kinzer

### 2.3.4 Temperatura de las gotas de lluvia

Las gotas de lluvia que caen tienen una temperatura que se aproxima a la temperatura del aire circundante. Pueden existir pequeñas gotas de lluvia a temperaturas por debajo de 0 °C, especialmente en regiones de corrientes ascendientes de tormentas convectivas y en nieblas muy frías. También pueden producirse mezclas de hielos y agua en regiones de corrientes descendentes por debajo de la altura de la isoterma 0 °C.

Las variaciones de la temperatura de las gotas con respecto al valor supuesto sólo tienen importancia en frecuencias inferiores a 20 GHz, pudiendo ser causa de divergencias de hasta un 20 % en la atenuación específica.

### 2.3.5 Fórmula de la atenuación específica de la lluvia

A partir de la teoría de la dispersión de Mie y, teniendo en cuenta los parámetros analizados en los apartados anteriores, la atenuación específica puede expresarse como [15]:

$$\gamma = 0,434 \int_0^{Dmax} \sigma(D) * N(D) * dD \quad \text{dB/km} \quad (2-2)$$

Siendo  $N(D) * dD$  el número de gotas de lluvia de diámetro comprendido entre  $D$  y  $D + dD$  por unidad de volumen y  $\sigma$  es la sección transversal de extinción, expresada en  $\text{cm}^2$ .

En la práctica, es necesario conocer la relación entre la atenuación y la intensidad de lluvia,  $R$ , que es el único parámetro fácilmente medible. En la Recomendación 838-3 [14] se recoge una relación aproximada entre la atenuación  $\gamma_R$  y la intensidad de lluvia,  $R$ , mediante la siguiente formula exponencial:

$$\gamma_R = k * R^\alpha \quad \text{dB/km} \quad (2-3)$$

donde los coeficientes  $k$  y  $\alpha$  se obtienen a partir de las fórmulas (2-4) y (2-5). Los restantes coeficientes, necesarios para estas fórmulas figuran en la tabla 2-1 para polarización horizontal y en la tabla 2-2 para polarización vertical.

$$\log_{10}K = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10}f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10}f + c_k \quad (2-4)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^5 a_i \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10}f - b_i}{c_i} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10}f + c_\alpha \quad (2-5)$$

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b><math>m_k</math></b>	<b><math>c_k</math></b>	<b><math>m_\alpha</math></b>	<b><math>c_\alpha</math></b>
<b>j=1</b>	-5.33980	-0.10008	1.13098				
<b>2</b>	-0.35351	1.26970	0.45400	-0.18961	0.71147	-	-
<b>3</b>	-0.23789	0.86036	0.15354				
<b>4</b>	-0.94158	0.64552	0.16817				
<b>i=1</b>	-0.14318	1.82442	-0.55187				
<b>2</b>	0.29591	0.77564	0.19822				
<b>3</b>	0.32177	0.63773	0.13164	-	-	0.67849	-1.95537
<b>4</b>	-5.37610	-0.96230	1.47828				
<b>5</b>	16.1721	-3.29980	3.43990				

Tabla 2-1. Coeficientes de las ecuaciones (3) y (4) para polarización horizontal

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b><math>m_k</math></b>	<b><math>c_k</math></b>	<b><math>m_\alpha</math></b>	<b><math>c_\alpha</math></b>
<b>j=1</b>	-3.80595	0.56934	0.81061	-0.16398	0.63297	-	-
<b>2</b>	-3.44965	-0.22911	0.51059				
<b>3</b>	-0.39902	0.73042	0.11899				
<b>4</b>	0.50167	1.07319	+0.27195				
<b>i=1</b>	-0.07771	2.33840	-0.76284	-	-	-0.053739	0.83433
<b>2</b>	0.56727	0.95545	0.54039				
<b>3</b>	-0.20238	1.14520	0.26809				
<b>4</b>	-48.2991	0.791669	0.116226				
<b>5</b>	48.5833	0.791459	0.116479				

Tabla 2-2. Coeficientes de las ecuaciones (3) y (4) para polarización vertical

La figura 2-5 representa gráficamente la variación de los parámetros  $k$  y  $\alpha$  para frecuencias de 1 a 500 GHz y con polarización horizontal y vertical. Las diferencias entre ambas polarizaciones se deben a la no esfericidad de las gotas. En general, esto se traduce en una mayor atenuación en la polarización horizontal.

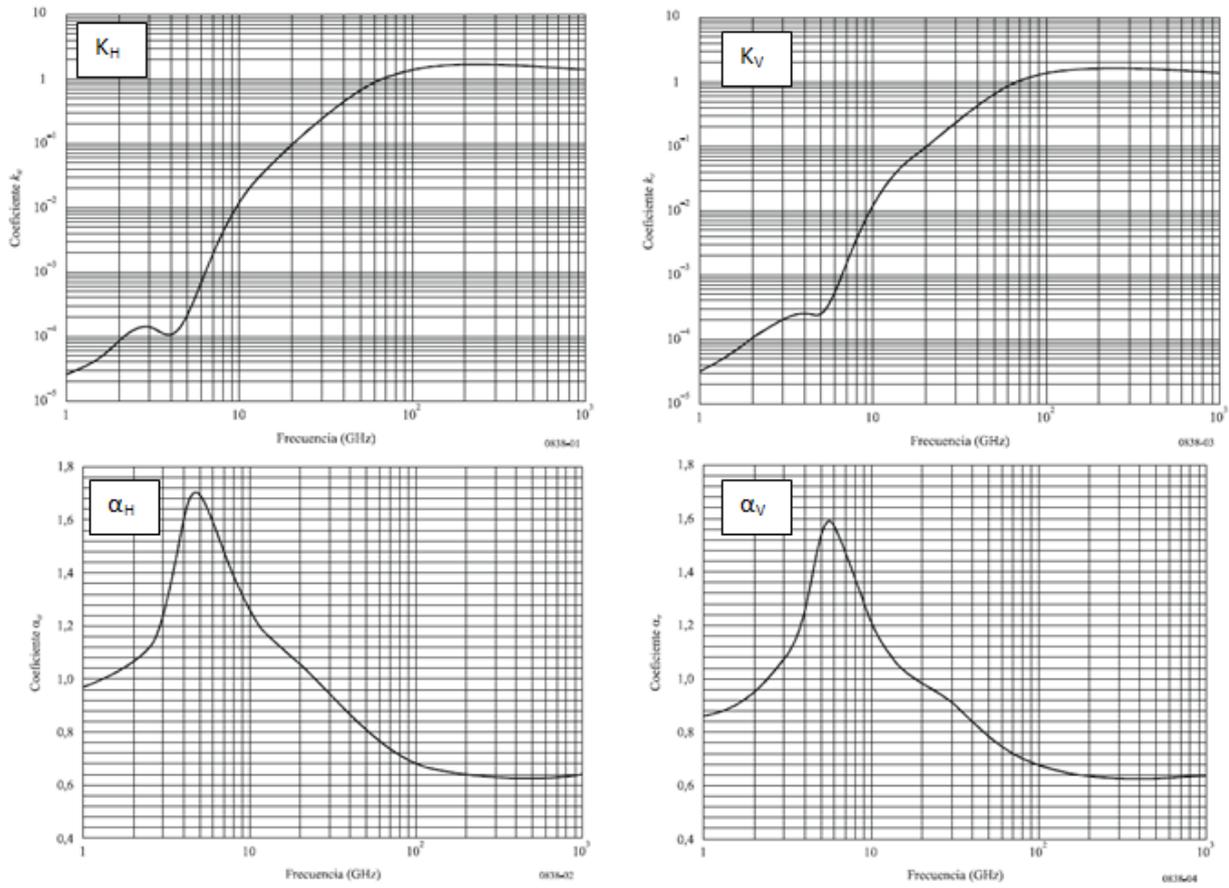


Fig. 2-5. Variación de los parámetros  $k$  y  $\alpha$  en función de la frecuencia para las polarizaciones horizontal y vertical

Para polarizaciones lineales y circulares, y para cualquier geometría del trayecto, los coeficientes de la ecuación (2-3) pueden calcularse mediante los valores de las ecuaciones (2-4) y (2-5) utilizando las siguientes ecuaciones:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2 \quad (2-6)$$

$$k = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2k \quad (2-7)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de elevación del trayecto y  $\tau$  es el ángulo de inclinación de la polarización con respecto a la horizontal ( $\tau = 45^\circ$  para la polarización circular).



# CAPÍTULO 3.

## PREPARACIÓN ENTORNO TRABAJO Y ADQUISICIÓN DE DATOS

En este capítulo explicamos la creación de la base de datos necesaria para poder trabajar con los datos de meteorología y de radioenlaces. Asimismo, explicamos la forma de obtención de los mismos.

### 3.1 Base de datos

Se ha elegido desarrollar la base de datos utilizando un entorno web y ayudándonos del lenguaje PHP para su programación. Para ello, hemos tenido que familiarizarnos con los lenguajes MySQL [25] y con el propio PHP [26].

Otra posible opción era desarrollar la base de datos ayudándonos del entorno de Matlab y todas sus posibilidades. Pero se decidió por PHP por ser un lenguaje construido alrededor de MySQL y por la posibilidad de hacer un entorno web sencillo que nos permite consultar de forma fácil y sencilla los datos esta primera etapa del PFC.

### 3.1.1 Tipos de datos

En este proyecto, utilizaremos únicamente dos tipos de datos: meteorológicos y de radioenlaces.

- ✚ *Datos meteorológicos*: son los datos recogidos por las estaciones de meteorología. Son archivos .csv que contienen una serie de parámetros: fecha y hora, temperatura (°C), velocidad del viento (km/h), dirección del viento, racha (km/h), dirección de racha, precipitación (mm), presión (hPa), tendencia (hPa) y humedad (%). De todos estos datos, los que nos interesan son: fecha, hora y precipitación, puesto que son los que necesitamos para la realización de este proyecto, aunque se introducirán todos en la base de datos.
- ✚ *Datos de radioenlaces*: son los datos recogidos por los equipos de las antenas emisoras. Son archivos .txt que contienen una serie de parámetros: fecha, hora, 15 min snr, 15 min rsl mean, 15 min odu temp y 15 min odu volt. De todos estos datos, los que nos interesan son: fecha, hora y 15 min rsl mean, puesto que son los que necesitamos para la realización de este proyecto. Pero, al igual que con los datos meteorológicos, se introducirán todos los valores en la base de datos. Hemos de precisar que “15 min” significa que los valores utilizados para estimar estos datos se recogen en intervalos de 15 minutos a lo largo de los cuales se hacen mediciones cada 100 ms. Y, finalmente, se obtiene un valor medio (mean).

Una cosa muy importante a tener en cuenta es que los datos de meteorología son tomados cada hora en punto, mientras que los datos de radioenlaces son muestras tomadas cada quince minutos empezando por la hora en punto. Es decir, cuatro muestras equivalen a una muestra de meteorología. Así, será necesario o bien juntar las cuatro muestras de radioenlaces en una sola, o bien extrapolar y dividir en cuatro la muestra horaria de meteorología. En futuros capítulos se desarrollará y se explicará las diferentes posibilidades.

### 3.1.2 Diagrama de flujo de la inserción de registros en la base de datos

En la figura 3-1 presentamos un pseudo-código en forma de diagrama de flujo del proceso que utilizamos para insertar los registros en nuestra base de datos.

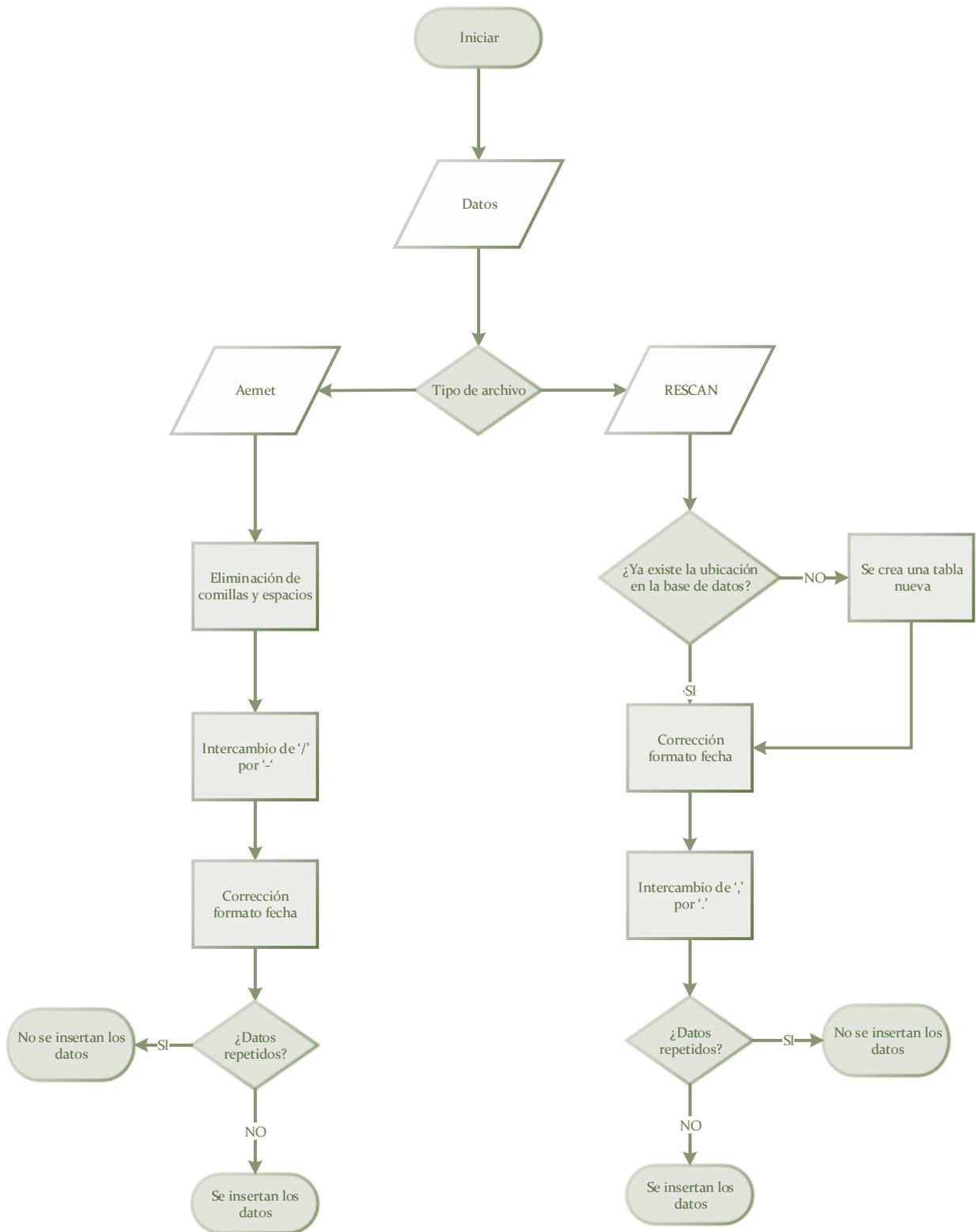


Fig. 3-1. Diagrama de flujo de la inserción de registros en nuestra base de datos

Como podemos observar en el diagrama, lo primero es saber si los datos que vamos a cargar son de tipo AEMET (meteorología) o RESCAN (radioenlace). En nuestro caso, el usuario señala que tipo de archivo es en el entorno web. Aun así, en una primera versión de nuestro código hacíamos una comprobación de la primera línea del fichero para asegurarnos que el tipo de archivo elegido era el correcto. Según avanzamos tuvimos que desechar esta comprobación pues conllevaba un tiempo de carga muy elevado.

### 3.1.2.1 Corrección del formato de fecha

Un problema que nos encontramos a la hora de introducir ficheros de ambos tipos en nuestra base de datos fue los diferentes formatos de fechas que utilizaban los archivos. Nos encontramos desde ficheros que utilizaban el formato día-mes-año en número a ficheros que utilizaban mes-día-año escribiendo el mes con las tres primeras letras (por ejemplo ‘*abr*’, ‘*sep*’ o ‘*nov*’). Por lo tanto, llegamos a la conclusión de que la fecha proporcionada en los ficheros no era válida, al no seguir siempre el mismo formato.

Debido a esto, ha sido necesario escribir una rutina que, antes de cargar los datos a la base de datos, convierte la fecha al formato americano ‘year-month-day’.

### 3.1.2.2 Datos duplicados

Nuestro código de carga de datos realiza una comprobación mediante una llamada MySQL a nuestra base de datos para asegurarse que los datos que vamos a insertar en la tabla correspondiente no se encuentren ya en la misma. Esto nos permite asegurarnos que todos los datos cargados son únicos y que no nos encontramos con duplicados.

Otra forma de realizarlo podría haber sido cargar todos los datos y eliminar duplicados en la etapa de preprocesado de los datos. Finalmente se consideró que era más favorable hacer la comprobación de duplicados según se hace la carga a pesar de que aumente el tiempo de carga. Puesto que de esta manera eliminamos un paso en la siguiente etapa.

### 3.1.3 Aplicación web para la inserción de registros en la base de datos

Tal y como se explicó al principio del capítulo, al utilizar PHP junto a MySQL para la construcción de la base de datos, tenemos la posibilidad de configurar una aplicación web sencilla que nos ayude con la visualización de nuestros datos.

En la Fig. 3-2 podemos observar que nuestra aplicación web consta básicamente de dos partes. La primera en la que indicamos el tipo de fichero que deseamos cargar: RESCAN o AEMET. Y la segunda en la que seleccionamos los ficheros que queremos importar.

**Proyecto Fin de Carrera**

**DISEÑO DE TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE LLUVIA A PARTIR  
DE NIVELES DE POTENCIA DE RADIOENLACES**

Patricia González Gómez

[Explorar Base Datos](#)

Tipo de fichero	Ficheros a importar
<input type="radio"/> RESCAN  <input type="radio"/> AEMET	<input type="button" value="Elegir archivos"/> Ningún archivo seleccionado  <input type="button" value="Importar"/>

Fig. 3-2. Aplicación web para la carga de datos en la base de datos

Asimismo, y como consecuencia de la gran cantidad de datos que vamos a manejar durante este PFC, se decidió realizar otra aplicación web que nos permitiera visualizar los mismos.

En la siguiente figura podemos observar dicha aplicación, que consta de cuatro apartados. Al igual que en la carga de datos, lo primero es seleccionar el tipo de datos que queremos visualizar. A continuación, se recarga la página ofreciéndonos las diferentes ubicaciones disponibles de ese tipo que tenemos en nuestra base de datos. Después, seleccionamos la fecha inicial y final de los datos que queremos visualizar.

### Proyecto Fin de Carrera

#### DISEÑO DE TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE LLUVIA A PARTIR DE NIVELES DE POTENCIA DE RADIOENLACES

Patricia González Gómez

[Volver](#)

Tipo de fichero	Ubicacion	Desde	Hasta
<input type="radio"/> RESCAN <input checked="" type="radio"/> AEMET	- Seleccione Tipo de Fichero - ▾	- Seleccione Ubicacion - ▾	- Seleccione Fecha Inicial - ▾

Fig. 3-3. Aplicación web para la visualización de datos

En la Fig 3-4 podemos observar un ejemplo de una visualización de datos utilizando nuestra aplicación web creado para este PFC.

### Proyecto Fin de Carrera

#### DISEÑO DE TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE LLUVIA A PARTIR DE NIVELES DE POTENCIA DE RADIOENLACES

Patricia González Gómez

[Volver](#)

Tipo de fichero	Ubicacion	Desde	Hasta
<input type="radio"/> RESCAN <input checked="" type="radio"/> AEMET	Agaete ▾	2013-12-17 ▾	2013-12-17 ▾

Fecha	Hora	Temp.	Vel Viento	Dir Viento	Rachas	Dir. Rachas	Precip.	Pres.	Tend.	Hum.
2013-12-17	23:00:00	18.2	12	Nordeste	20	Este	0.0			66.7
2013-12-17	22:00:00	18.2	14	Nordeste	26	Nordeste	0.0			65.7
2013-12-17	21:00:00	18.2	15	Nordeste	29	Este	0.0			65.9
2013-12-17	20:00:00	18.0	17	Nordeste	27	Nordeste	0.0			64.2
2013-12-17	19:00:00	18.2	20	Nordeste	35	Nordeste	0.0			62.0
2013-12-17	18:00:00	18.8	19	Nordeste	36	Nordeste	0.0			60.9
2013-12-17	17:00:00	20.5	21	Nordeste	31	Nordeste	0.0			50.1
2013-12-17	16:00:00	21.6	17	Nordeste	30	Nordeste	0.0			44.8
2013-12-17	15:00:00	21.5	20	Nordeste	35	Nordeste	0.0			48.1
2013-12-17	14:00:00	21.3	25	Nordeste	39	Nordeste	0.0			48.4
2013-12-17	13:00:00	21.9	22	Nordeste	40	Nordeste	0.0			40.0

Fig. 3-4. Ejemplo de consulta usando la aplicación web

### 3.1.4 Conexión de la base de datos con Matlab

Una vez terminada la carga de datos en la base de datos y, como el proyecto se realizará con Matlab, es necesario crear una conexión con el mismo. Por sencillez y comodidad, se ha decidido utilizar el ‘*Administrador de origen de datos ODBC*’ de Windows. Otra posibilidad era realizar la conexión con java.

Para realizar la conexión, ha sido necesario descargar el *Connector/ODBC* de MySQL [27]. Puesto que la última versión disponible daba problemas, se ha utilizado la versión anterior, la 5.2.7 de 64 bits.

A continuación, simplemente ha hecho falta configurar la conexión con los datos de nuestra base de datos para tener la conexión correctamente funcionando. Para una información más detallada sobre este proceso, consultar apéndice A.

## 3.2 Adquisición de datos

### 3.2.1 Adquisición de los datos de radioenlaces

Los datos de radioenlaces que utilizaremos a lo largo de este PFC han sido proporcionados por el Gobierno de Canarias, Dirección General de Telecomunicaciones, en el contexto del proyecto VIMETRI-MAC [28], obtenidos dentro de su plan de Red de Emergencias y Seguridad de Canarias, también conocido como RESCAN [29] basados en el estándar TERrestrial Trunked Radio (TETRA, por sus siglas en inglés).

#### 3.2.1.1 El Estándar TETRA

TETRA [30] es un estándar del Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicación (ETSI), que define un sistema móvil digital de radio. Nace por decisión de la Unión Europea con el objeto de poder utilizarse para garantizar comunicaciones críticas seguras, confiables y robustas en sectores críticos como lo son servicios de emergencias (policía, bomberos, ambulancias, etcétera) y para transmisión de otros datos.

La figura 3.5 ilustra la cobertura que proporciona RESCAN [31].

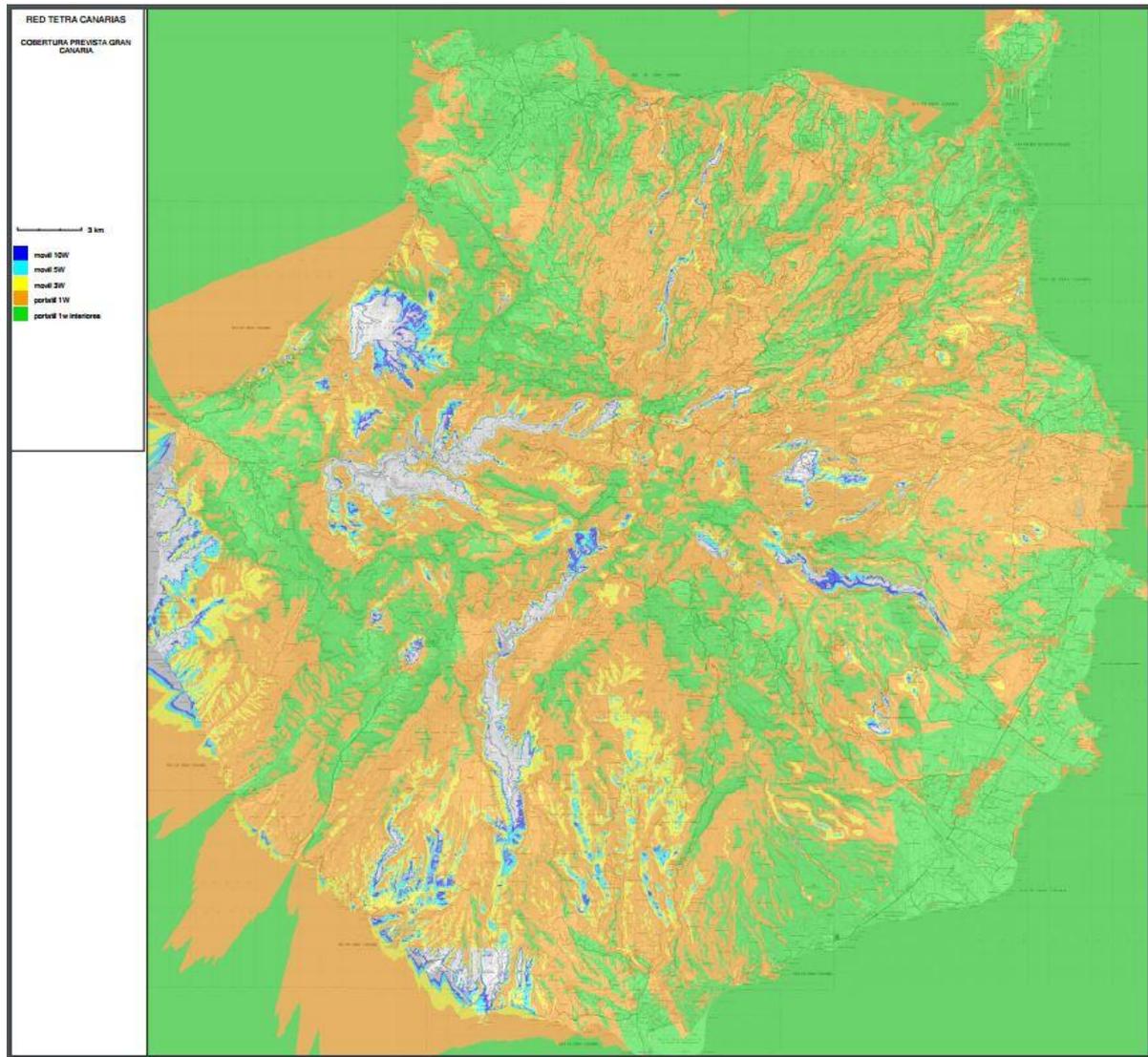


Fig. 3-5. Mapa de cobertura TETRA para la isla de Gran Canaria

### 3.2.2 Adquisición de los datos de meteorología

Los datos de meteorología se han obtenido de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), en el contexto del proyecto VIMETRI-MAC [28], utilizando web scraping en su página oficial [32]. A continuación, explicaremos en qué consiste esta técnica y como la hemos utilizado en este proyecto.

### 3.2.2.1 Web Scraping

Es una técnica que emplea programas de software para extraer datos de sitios webs. Los datos expuestos en la web solo son accesibles a través de un navegador, y no ofrecen la posibilidad de guardar los datos para uso personal. Una opción para guardar dichos datos es copiar y pegar esa información de manera manual, lo cual puede resultar muy tedioso. *Web scraping* es la técnica que automatiza ese proceso.

Esta técnica simula el uso del navegador por un ser humano para la obtención de estos datos y poder almacenarlos en bases de datos o en hojas de cálculo. La opción más utilizada es analizar sintácticamente el código fuente de la web a la que deseamos hacer scraping para que nuestro software sepa qué buscar. Algunos ejemplos de uso de *web scraping* son los comparadores de seguros, vuelos, hoteles, etc.

### 3.2.2.2 Uso de Web Scraping en este PFC

La Agencia Estatal de Meteorología, a través de su página web, actualiza todos los días los datos de sus diferentes estaciones meteorológicas. Estos datos están disponibles para su visualización. Nuestro objetivo es guardarlos en un fichero .txt en nuestro ordenador.

Para ello, se ha realizado un estudio del código fuente de la web. De esta manera, hemos observado una serie de patrones en la construcción de los enlaces. Por ejemplo, si quisiéramos descargar los datos de las últimas 24 h de la estación situada en Agaete, sabiendo que su número de identificación es C619X, simplemente tendríamos que acceder a la siguiente dirección web:

[http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos\\_C619X\\_datos-horarios.csv?k=coo&l=C619X&datos=det&w=0](http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos_C619X_datos-horarios.csv?k=coo&l=C619X&datos=det&w=0).

Es importante destacar que los datos con los que trabajaremos en este PFC son datos antiguos (en algunos casos de 2012) en adelante, tanto meteorológicos como de radioenlaces. Por lo que no es un objetivo de este PFC la captura actualizada de los datos AEMET.

### **3.2.3 Región de trabajo**

Hemos elegido que la región de interés con la que trabajaremos a lo largo de este PFC se centre únicamente en Gran Canaria. Cuenta con una superficie de 1560 km<sup>2</sup> y con un desnivel de 1956 m. Dentro de esta región contamos con 22 estaciones de meteorología y con 26 radioenlaces bidireccionales.

A pesar de ello, nuestra base de datos cuenta con información de meteorología y datos de radioenlaces de todo el archipiélago canario.

# CAPÍTULO 4.

## PREPROCESADO Y PROCESADO DE LOS DATOS

En este capítulo describimos el proceso necesario para transformar los dos tipos de datos con los que trabajaremos, que llamaremos preprocesado. También describiremos la metodología utilizada para obtener los datos de telemetría de todas nuestras estaciones meteorológicas y nuestros radioenlaces y poder así, geo-localizarlas.

### 4.1 Tratamiento de los datos meteorológicos de referencia

El siguiente paso después de la adquisición de los datos es el preprocesado, que es realizar un tratamiento sobre nuestros datos meteorológicos de referencia. Es importante destacar que este tratamiento se realizará para cada una de las estaciones meteorológicas disponibles en nuestra región de trabajo, en este caso Gran Canaria. Estos datos tratados servirán como referencia a la hora de implementar las técnicas que se desarrollarán a lo largo de este PFC.

El bloque de preprocesado comprende dos etapas. La primera es la lectura de los datos desde la base de datos. A continuación, realizamos un estudio de los datos de

precipitación para buscar esos momentos e intervalos temporales en los que no hay datos, que llamaremos GAPS.

Como resultado, obtenemos un fichero de extensión MAT con los datos de cada estación meteorológica debidamente preprocesados.

### 4.1.1 Lectura de datos

Nuestra base de datos contiene los datos de todas las estaciones meteorológicas de las Islas Canarias. Pero, como hemos constatado con anterioridad, nuestra región de trabajo para este PFC es solo la isla de Gran Canaria.

Nuestra solución, para que sea sencillo cambiar de región de trabajo sin que suponga modificar mucho código, ha sido crear un fichero TXT que contiene el indicativo de todas las estaciones con las que queremos trabajar. Dicho indicativo es un número de identificación de la estación meteorológica y que es único para cada una. De tal manera, que solo con modificar el contenido de este archivo, podemos trabajar con otras estaciones de otras regiones.

### 4.1.2 Localización de datos omitidos y estudio de la continuidad temporal de los datos

El objetivo de esta etapa es encontrar aquellos intervalos temporales de los que no tenemos datos de precipitación o de los que no tenemos ningún dato. Esto se puede producir por diferentes motivos que exponemos en el siguiente subapartado. Esto es lo que de aquí en adelante denominaremos GAPS.

Como hemos explicado, tenemos dos tipos de GAPS, y para cada uno realizaremos una acción diferente. El primer tipo es aquel en el que, por algún motivo, no tenemos el dato de precipitación. En estos casos, rellenamos con valor aberrante, de tal manera que más adelante sepamos que no es un dato real de precipitación, sino un dato falso. El segundo tipo es aquel que encontramos al analizar las fechas de los datos que tenemos. Podemos encontrarnos con nos faltan datos de una hora, un día o semanas. Para poder localizarlos desarrollamos una rutina que analiza las fechas y guarda en un vector la fecha de inicio de la interrupción temporal y la fecha fin del mismo. Así mismo, guardamos la

---

fecha de inicio de nuestros datos y su fecha fin. También contabilizamos el número de GAPs de este tipo totales.

Más adelante, al trabajar con datos de radioenlaces para buscar indicadores de precipitación, utilizaremos este vector para descartar aquellas fechas que coincidan con las contenidas en este vector. Y así evitar problemas de no poder contrastar si se ha producido precipitación o no.

### 4.1.3 Estudio de las causas de generación de GAPs

Los tipos de GAPs de datos meteorológicos que explicamos en el subapartado anterior se pueden producir por diferentes factores que explicaremos a continuación:

- Vida útil de la batería: Todas las estaciones de meteorología cuentan con una batería para que se puedan transmitir los datos. El problema reside en la antigüedad de esta, puesto que cuanto más antigua sea, los ciclos de carga y descarga serán menores y se producirán periodos temporales en los que la estación no transmita los datos.
- Placas solares muy pequeñas: Cuanto más pequeña es una placa solar, menos luminosidad capta. Algo en lo que también influye el hecho de que estas se ensucian y solo se limpian cuando llueve.
- Lluvias torrenciales: La ganancia de la antena con la que se transmiten los datos es muy baja y si llueve demasiado dicha señal no llega al receptor.

También es importante mencionar que las estaciones de meteorología transmiten en MHz en banda libre. Por lo que incluso una persona con un walkie-talkie puede causar interferencias y que la señal transmitida no llegue al receptor.

En la figura 4-1 podemos observar como es una estación meteorológica estándar utilizada por AEMET.



Fig. 4-1. Imagen de una estación meteorológica estándar de AEMET

## 4.2 Tratamiento de los datos de radioenlaces

En este bloque del trabajo realizamos un tratamiento sobre los datos de los radioenlaces. De nuevo, se ha de tener en cuenta que esto se realizará para cada uno de los radioenlaces disponibles en nuestra región de interés, Gran Canaria.

Este bloque del preprocesado comprende varias etapas que se realizan de forma secuencial, como podemos apreciar en la siguiente figura.



Fig. 4-1. Etapas del preprocesado de los datos de radioenlaces

---

El resultado de dichas etapas es la obtención de una señal ordenada de forma temporal en la que los valores corresponden a niveles de potencia dados en dBm, o mW cuando proceda. Es lo que denominamos señal de niveles de potencia o señal a secas. En los siguientes apartados explicaremos con más detenimiento cada una de estas etapas.

### **4.2.1 Lectura de datos**

Nuestra base de datos contiene, en tablas individuales, los datos de todos los radioenlaces de las Islas Canarias. Y al igual que con los datos de meteorología, solo nos interesan aquellos de nuestra región de trabajo. Es decir, los que se encuentran en la isla de Gran Canaria.

Es importante tener en cuenta que la cantidad de entradas que se manejan por radioenlace es muy grande, siendo en muchos casos del orden de 50000 entradas. Por eso, y al contrario de los que hicimos con los datos de meteorología, al extraer los datos de la base de datos se hará con una fecha de inicio y una fecha fin, siendo estas el inicio y el fin de cada mes. De esta manera conseguimos que la ejecución de nuestro programa sea mucho más rápida y eficiente.

Como resultado de esta etapa obtenemos una señal cuyos valores representan niveles de potencia (RSL) dados en dBm (o lineales, según se necesite), y ordenados temporalmente. En adelante, cuando hablemos de señal nos estaremos refiriendo a este tipo de señales o derivadas de la misma (componentes de alta o baja frecuencia, promedios, etc.).

### **4.2.2 Localización y estudio de continuidad temporal de la señal de radioenlace**

La segunda etapa en nuestro tratamiento de los datos de radioenlaces es realizar un estudio de la continuidad temporal. Este paso es de suma importancia, debido a que carecer de una muestra o de varias, sería determinante en los resultados de los siguientes pasos.

La metodología es la misma que la utilizada con los datos de las estaciones meteorológicas. Guardamos en un vector la fecha de inicio de la interrupción temporal y la

fecha fin del mismo. Así como guardamos la fecha de inicio de nuestros datos y su fecha fin. También contabilizamos el número de interrupciones totales.

### 4.2.3 Transformación de señal quinceminutal a horaria

Tal como ya hemos explicado en apartados anteriores, las muestras de los radioenlaces son cada quince minutos y los meteorológicos cada hora en punto.

Antes de seguir es necesario precisar más para qué necesitamos hacer la transformación y cómo la hacemos. Los valores de precipitación que dan las estaciones meteorológicas son acumulados durante un hora. Por tanto, de la señal buscamos indicadores de lluvia acumulada durante una hora. Como estos indicadores van asociados a atenuaciones, la transformación se hace sobre la señal de alta frecuencia. De esta forma, acumulando debidamente las atenuaciones obtenemos la atenuación total durante la hora bajo estudio, y de ella podremos inferir el valor de precipitación en la hora.

Por eso, hay que realizar un algoritmo que convierta las cuatro muestras de los radioenlaces en una sola y compararla así con las muestras meteorológicas. Es decir, sumar todas las muestras de *xx.15*, *xx.30*, *xx.45* y *xx.00* y guardarlas en esta última.

Antes de explicar los posibles métodos a utilizar para dicho algoritmo, es importante comentar que los picos negativos de nuestra señal de alta frecuencia son los que nos dicen que algo ha pasado en ese periodo de tiempo. Esto nos permitirá resolver más adelante la pregunta de si se trata o no de lluvia.

A continuación, vamos a explicar algunas posibles formas de realizar dicho algoritmo:

- Suma de cuatro muestras: Un problema que puede acarrear esta forma, es que se puede dar el caso de que valores positivos cancelen los valores negativos. Imposibilitando así saber si se ha producido lluvia.
- Suma de los picos negativos: La diferencia con el método anterior es que solamente sumariamos los valores negativos, despreciando así los valores positivos. Es decir, los valores positivos se sumarian como un 0. De esta manera eliminamos la posibilidad de que se cancelen los picos.

- Suma de distancias en absoluto: En vez de sumar los valores de las muestras, sumáramos sus distancias con respecto a la muestra anterior.

Hemos considerado que la implementación del segundo método, suma de los picos negativos, es la mejor opción. Esto se debe a que es una solución sencilla y en la que eliminamos los riesgos de cancelar atenuaciones reales.

#### 4.2.4 Eliminación baja frecuencia de la señal

A continuación, realizamos un promedio de nuestra señal para eliminar los saltos de potencia y la baja frecuencia. Esto es así porque son las atenuaciones sobre las que podemos detectar los picos de lluvia. Dicho de otra manera, las variaciones debidas a las atenuaciones se manifiestan como componente de alta frecuencia sobre pedestales o sobre componentes de baja, por ejemplo, debidos a variaciones día-noche.

El promedio lo realizamos mediante la función promediado móvil. Esta función utiliza una ventana, cuya longitud prefijamos nosotros. Centrando esa ventana en una muestra, coge  $x$  datos anteriores y otros tantos datos posteriores, y realiza un promedio, guardando el resultado en la misma posición en la que estaba centrado.

En la figura 4-2 podemos observar 3 gráficas comparativas sobre daos horarios. Corresponden al radioenlace entre la urbanización Monteluz – Hospital Militar. En la gráfica superior (4-2.1) encontramos la señal del radioenlace mencionado tal cual sacamos los datos de la base de datos. La gráfica central (4-2.2) representa la baja frecuencia resultante de hacer el promedio utilizando la función mencionada al inicio de este apartado. Y la última (4-2.3) es la alta frecuencia, que se obtiene restando la componente de baja frecuencia a la señal original.

Para estas primeras pruebas iniciales, hemos decidido que nuestra ventana sea de 21 muestras para que así coja 10 muestras anteriores y 10 posteriores. Podríamos haber cogido 19 o 20 muestras. Pero tras revisar todas las opciones, desechamos la opción de coger 20 muestras pues significaría que nuestra ventana no es simétrica por ambos lados. Y descartamos coger 19 muestras puesto que observamos que no había variaciones

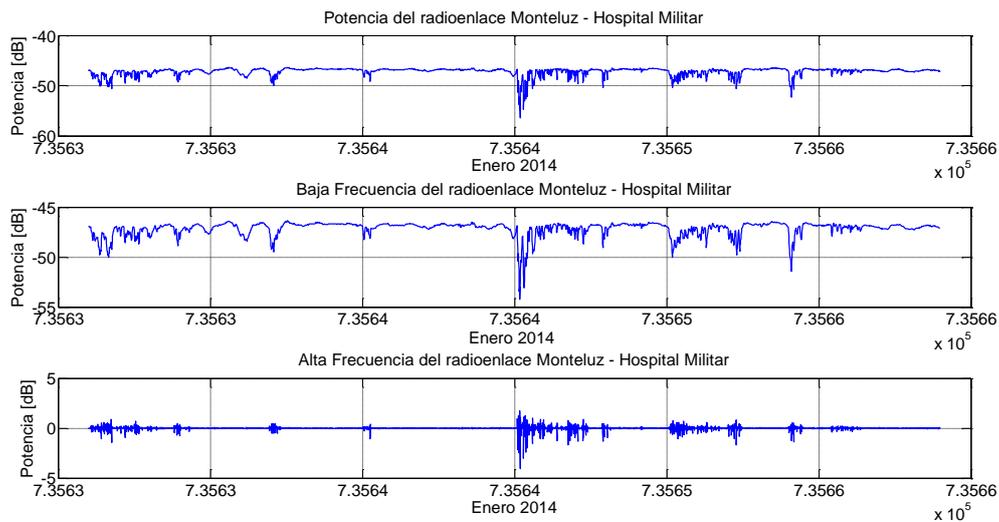


Fig. 4-2. 1 – Señal enlace Monteluz – Hospital Militar. 2 – Baja frecuencia. 3 – Alta frecuencia

En la figura 4-3 mostramos en color azul nuestra señal original con el promedio que hemos realizado en color rojo.

Es importante recordar que nuestra señal viene dada en dBm, y que para operar con ellos es necesario pasarlos a potencia lineal. Para esto, nos ayudamos de las funciones integradas en Matlab que nos permiten pasar de decibelios a potencia lineal, y viceversa.

Cabe mencionar que trabajamos con un retardo debido al tamaño de la ventana de análisis. En el ejemplo anterior, el retardo es de unas 2 horas pues hemos usado una ventana de 21 muestras. Si deseamos trabajar en “tiempo real”, esto es, sin retardo, a la hora de realizar el promedio deberíamos usar la muestra actual y muestras pasadas para realizar el mismo.

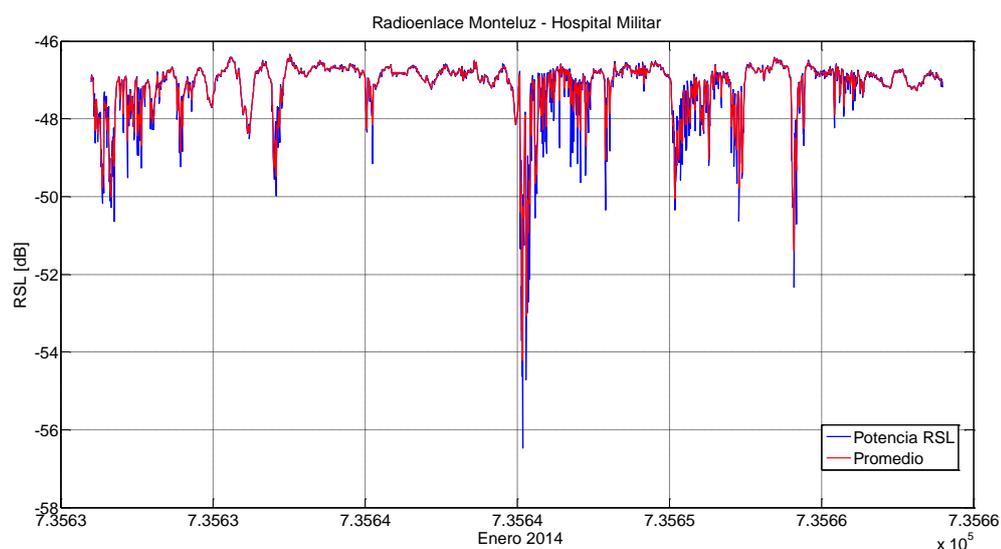


Fig. 4-3. Señal original y envolvente Monteluz – Hospital Militar

#### 4.2.5 Sincronismo entre señales de radioenlaces y de estaciones meteorológicas

Es muy importante que los datos de las estaciones meteorológicas y los datos de los radioenlaces estén sincronizados. Esto es así porque vamos a utilizar los primeros como referencia para buscar indicadores de precipitaciones en los segundos. También es importante que se corrijan los saltos asociados a los dos cambios de horario cada año.

Una consideración muy importante a la hora de estudiar el sincronismo entre nuestras señales de radioenlaces y de meteorología son las interrupciones temporales ya que no podemos simplemente ignorarlas pues necesitamos mantener la base temporal. El procedimiento que hemos seguido para estos casos ha sido añadir un 0 como si de un valor positivo se tratase. Así, no tiene efecto en procesados posteriores.

Asimismo, sobre la señal de alta frecuencia, hemos aprovechado la conversión de los datos de radioenlaces a horaria para transformar nuestros datos de negativos a positivos. Esto se hace por necesidades de cálculo, de lo contrario nos encontraríamos con operaciones de raíz cuadrada sobre valores negativos.

## 4.3 Telemetría y geo-localización

### 4.3.1 Telemetría

La RAE define la telemetría como el conjunto de técnicas para la medida a distancia de magnitudes físicas. Es decir, la medida de ciertos valores necesarios para el desarrollo de una actividad.

Para el desarrollo de este proyecto, es necesario conocer los valores de la localización exacta (latitud, longitud y altitud), tanto de las estaciones de meteorología como de las antenas de radioenlaces. Utilizando Google Earth y ayudándonos de la información que tenemos de las localizaciones, hemos situado las diferentes estaciones y antenas en un mapa de nuestra región de interés que podemos ver en la figura 4-4.

A continuación, hemos obtenido los valores de latitud, longitud y altitud introduciendo dichos mapas en una herramienta online llamada *gpsvisualizer* [33], que nos permite obtener dichos datos en texto plano.

Nuestro último paso ha sido realizar diferentes rutinas en Matlab para ser capaces de rescatar dichos datos y utilizarlos para nuestro siguiente apartado.

En la tabla 4-1 se pueden leer los nombres de todas las estaciones de meteorología de la islas de Gran Canaria de las que tenemos datos. Además, los datos de frecuencia, polarización y distancia de los diferentes radioenlaces de nuestra región de interés se encuentran el apéndice 2.



Fig. 4-4. Estaciones meteorológicas y radioenlaces de la isla de Gran Canaria

### 4.3.2 Geo-localización

Debido a que nuestro se basa, en un primer paso, en los datos de meteorología para ayudarnos a buscar indicadores de precipitación, es crucial conocer qué estación es la más cercana para un radioenlace dado.

Para ella hemos creado una rutina de geo-localización que, utilizando los datos de longitud y latitud de los nodos del radioenlace, encuentra la estación más cercana a ambos. Hay diferentes tipos de teoremas o fórmulas que se pueden utilizar para este tipo de casos. Nosotros hemos revisado el *teorema de Pitágoras*, la *fórmula de Haversine* y la *Ley de los Cosenos para Trigonometría*. Esta última no es recomendable para pequeñas

Agate – Casco	Las Palmas de G.C. - San Cristóbal	San Bartolomé de Tirajana – Hotel Las Tirajanas
Agüimes - El Milano	Maspalomas	San Bartolomé de Tirajana - Lomo Pedro Alfonso
Aucas - Bañaderos	Mogán - Puerto	San Mateo - Corral de los Juncos
Gran Canaria - Aeropuerto	Mogán - Puerto Rico	Tejeda – Cruz de Tejeda
La Aldea De San Nicolás - Depuradora	San Bartolomé de Tirajana - Cuevas del Pinar	Telde – Centro Forestal Doramas
La Aldea De San Nicolás - Tasarte	San Bartolomé de Tirajana - El Matorral	Telde – Melenara
Las Palmas de G.C. - Tafira	San Bartolomé de Tirajana – Centro Insular de Turismo	Teror - Osorio
Las Palmas de G.C. - Plaza de la Feria		

Tabla 4-1. Estaciones meteorológicas de Gran Canaria

distancias puesto que el arco coseno presenta un mal comportamiento. La *fórmula de Haversine* asume que la Tierra es una esfera de radio  $R$  y con las coordenadas de dos puntos (longitud y latitud) en esféricas, podemos hallar la distancia  $d$  entre ambos puntos. El *teorema de Pitágoras* asume un modelo de tierra plana con errores dependientes de las latitudes en las que se vaya a trabajar. Dichos errores tienen en cuenta los efectos de convergencia de los meridianos y la curvatura de los paralelos y la distancia en tierra plana  $d$  vendrá expresada en las mismas unidades que las coordenadas.

Puesto que las coordenadas obtenidas en el apartado de arriba ya están dadas en coordenadas cartesianas y, para ahorrarnos errores computacionales, hemos decidido utilizar el *teorema de Pitágoras* para nuestra rutina de geo-localización.

$$d = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (4-1)$$

siendo  $X_1$  y  $X_2$  las latitudes y  $Y_1$  e  $Y_2$  las longitudes de nuestros dos puntos. Todos ellos en coordenadas cartesianas.

---

## 4.4 Procesado de los datos meteorológicos y de radioenlaces

A la hora de iniciar la etapa de procesado de los datos meteorológicos debemos conocer con qué radioenlace trabajaremos. Por ejemplo, para nuestras primeras pruebas hemos elegido el radioenlace Monteluz – Hospital Militar.

Una vez elegido el radioenlace que vamos a estudiar, debemos localizar su estación más cercana. Con la función de *geolocalización* descrita en el apartado anterior determinamos que la estación más cercana es la que se encuentra en Tafira.

El siguiente paso es buscar y guardar en una variable separada el periodo de tiempo con el que vamos a trabajar. Para estas primeras pruebas hemos elegido el mes de Febrero de 2014. Hay que considerar que los datos de meteorología extraídos de la base de datos corresponden a todos los datos que tenemos de esa estación y, en algunos casos, son varios años.

Una vez que hemos localizado y guardado los datos de nuestra estación meteorológica para un periodo determinado de tiempo, es fundamental que volvamos a realizar una segunda vuelta sobre el algoritmo de interrupciones temporales. Puesto que tenemos que detectar y guardar las interrupciones exclusivamente para este periodo temporal.

En la figura 4-6 podemos observar los datos del radioenlace Monteluz – Hospital Militar (gráfica superior) y los datos de la estación meteorológica de Tafira (gráfica inferior). Como vemos, a simple vista podemos apreciar que se producen precipitaciones en los mismos intervalos de tiempo.

En los próximos capítulos se ahonda en la detección de lluvia y en los procesos que hay que seguir para detectarla.

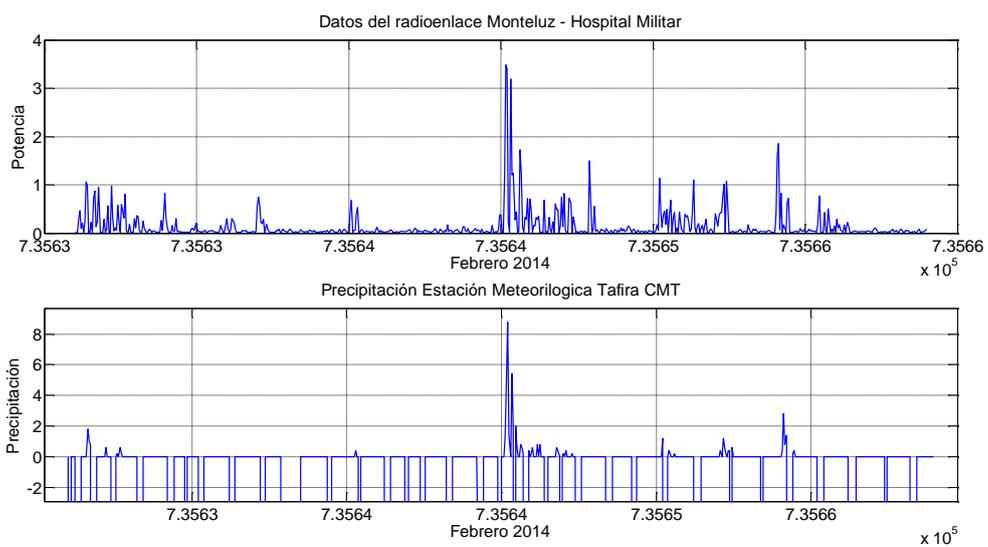


Fig. 4-6. Datos radioenlace Monteluz – Hospital Militar (superior) y datos de la estación meteorológica de Tafira (inferior)

# CAPÍTULO 5.

## ALGORITMOS DE DETECCIÓN DE PRECIPITACIÓN

En este capítulo presentamos una serie de aportaciones que hemos hecho para detectar precipitaciones en forma de eventos de lluvia. Estos son fruto de un análisis detallado del fenómeno y de cómo se manifiesta en las señales de niveles de potencia recibida. A partir de ese análisis y de los conceptos teóricos expuestos en capítulos anteriores hemos desarrollado y depurado varios algoritmos de detección. En una primera aproximación usamos los niveles para alimentar un clasificador mediante SVM con el que abordar una tarea de detección. A continuación, usamos técnicas de filtrado en dos versiones. La primera se basa en la detección trabajando sobre la señal de alta frecuencia obtenida al sustraer la componente de baja frecuencia. Y en la segunda vamos un paso más allá, e incorporamos el conocimiento de patrones característicos que hemos observado en periodos en que no hay precipitación, hasta llegar a un detector basado en la comparación de dichos patrones mediante correlación.

## 5.1 Detectabilidad de precipitaciones a partir de la atenuación

En el apartado 2.3.5 vimos la relación entre la intensidad de lluvia y la atenuación que es el único parámetro medible directamente. Recordemos que según la Recomendación 838-3 se recoge una relación aproximada entre la atenuación  $\gamma_R$  y la intensidad de lluvia,  $R$ , mediante la fórmula exponencial:

$$\gamma_R = k * R^\alpha \quad \text{dB/km} \quad (5-1)$$

Se desprende de la expresión anterior que si queremos estimar  $R$  debemos medir la atenuación.

Vamos a desarrollar un poco más la idea que subyace en nuestro trabajo, pues además de la lluvia hay otros factores que causan atenuaciones, y debemos hacer las consideraciones pertinentes. Para ello, es importante tener en cuenta cómo se diseña un radioenlace atendiendo a la fórmula de Friis expresada en dB:

$$P_R = P_T + G_R + G_T - \sum \gamma \quad (5-2)$$

donde  $P_T$  es la potencia transmitida, y  $G_R$  y  $G_T$  son las ganancias de recepción y transmisión, respectivamente.  $\sum \gamma$  representa todas las pérdidas que se puedan dar lugar en un radioenlace dado. Estas son, pérdidas por espacio libre ( $\gamma_{OS}$ ), pérdidas por atenuación ( $\gamma_{ATT}$ ), pérdidas por vegetación ( $\gamma_{veg}$ ), pérdidas por niebla ( $\gamma_{Fog}$ ), pérdidas por precipitaciones de lluvia ( $\gamma_{Rain}$ ), etc. La relación anterior de pérdidas no es exhaustiva, puede haber de otros tipos, y según el caso podría no darse alguna de ellas.

Para resaltar la importancia de la atenuación debida a la lluvia,  $\gamma_{Rain}$ , ponemos a continuación un ejemplo numérico en la figura 5-1 [34]. En ella podemos ver algunos parámetros de diseño típico de un radioenlace de comunicaciones donde, para un radioenlace dado, se especifican valores extremos que garantizan un buen funcionamiento durante al menos el 99 % del tiempo.

Nos vamos a centrar en las pérdidas en función de si son constantes o no, sus rangos de valores, y posibilidad de presencia. Por conveniencia a efectos de explicar la

relación entre lluvia y atenuación en los niveles de potencia, haremos una clasificación en función de si las pérdidas son constantes, variables o súbitas. Veamos a qué nos referimos.

Tx power	20 dBm				
Tx loss	-1.5 dB				
Tx antenna gain	36 dB				
Radome loss	-2 dB				
<b>EIRP</b>	<b>52.5 dBm</b>				
		freq =	38.6 GHz	lambda =	0.007772
Path loss (FSL)	-125 dB	d =	1.1 km	PL =	-125.001
Alignment error	-2 dB				
Rain fade	-51 dB				
Multipath	-2 dB				
Atmospheric loss	-0.13 dB			Gamma =	0.12 dB/km
Interference	-1 dB				
<b>Total path losses</b>	<b>-181.1 dB</b>				
Radome loss	-2 dB				
Rx antenna gain	36 dB			Link gain =	181.5
Rx loss	-1 dB				
<b>Total Rx gain</b>	<b>33 dB</b>			Adjusted link gain =	176.4
RSL	-95.6 dBm				
Sensitivity	-96.0 dBm				
<b>Net margin</b>	<b>0.4 dB</b>				

Fig. 5-1. Ejemplo de parámetros de diseño de un radioenlace en términos de balance de potencias extremo

Observando la figura 5-1 [34] podemos distinguir las siguientes pérdidas (loss o error) considerándolas como:

- **Constantes:** En este grupo podemos incluir las pérdidas de trasmisión (Tx loss), propagación en espacio libre (Path loss) y recepción (Rx loss).
- **Variables:** En este grupo incluimos pérdidas de variabilidad lenta como multicamino (Multipath) o atmosféricas (Atmospheric). Podemos considerar variabilidad más difícil de clasificar como las aleatorias en transmisión o recepción (Random).
- **Súbitas:** Este es un caso particular del anterior, esto es, de pérdidas variables que comparten el hecho de que aparecen de repente, esto es, de forma súbita. Es el caso de las debidas a interferencias (Interference), desapuntamiento (Alignment error) o desvanecimientos por lluvia (Rain fade).

A efectos de lo que nos interesa, hay que precisar que las atenuaciones que hemos denominado Constantes o Variables pueden ser permanentes, o producirse y mantenerse características durante horas, puede que días o más. Veremos que con un filtrado adecuado el efecto de estas atenuaciones se puede suprimir o hacer negligibles, dejando así al descubierto las Súbitas, justo las que nos interesa detectar. Abundemos un poco más en esta idea.

Las atenuaciones que hemos denominado Súbitas aparecen como un evento repentino. Es fácil ver que es el caso de la lluvia cuando llega una columna de agua, por ejemplo, entrando en alguna de las Islas Canarias. También los desapuntamientos pueden ser súbitos, por ejemplo, debido a rachas de viento. Las interferencias pueden ser súbitas y permanecer durante un tiempo hasta desaparecer.

Ahora haremos algunas suposiciones que consideramos realistas:

- **Interferencia:** Las bandas frecuenciales en las que trabajan nuestros radioenlaces son exclusivas y no hay interferencias (ni siquiera por no-linealidades de radioenlaces próximos). Por tanto, podemos despreciar el efecto de sistemas interferentes.
- **Desapuntamiento:** Suelen darse con viento suficientemente fuerte para mover las antenas de transmisión o de recepción. En principio, podemos considerar que no se va a dar porque las antenas están debidamente ancladas y sujetas.
- **Lluvia:** Se da cuando una columna de agua ocupa total o parcialmente el espacio intermedio entre las antenas emisora y receptora.

Finalmente, debemos hacer la consideración de que los desapuntamientos y la lluvia pueden producir efectos similares en los niveles de potencia, dando lugar a confusiones (falsas alarmas, falsos positivos) cuando buscamos lluvia. En cualquier caso, en este PFC trabajamos considerando que solo hay lluvia.

## 5.2 Uso de la curva ROC en los métodos de detección

Una curva ROC (Receiver Operating Characteristic Receptor) es una representación gráfica de la sensibilidad frente a la especificidad para un sistema clasificador binario según se varía un umbral de discriminación. El umbral, en nuestro

caso, es el valor con el que discriminamos qué consideramos lluvia (se encuentra por encima de un valor de umbral establecido) de lo que no es lluvia (se encuentra por debajo de ese valor del umbral).

Las curvas ROC se desarrollaron en los años cincuenta como herramientas para el estudio de detección e interpretación de señales de radar. El objetivo de los operadores de radar era distinguir las verdaderas señales del ruido de fondo [35]. Si se observa la pantalla de un receptor de radar (figura 5-2), puede verse cómo al variar la amplitud de la señal definida para considerar un pico como misil, varían la sensibilidad y la especificidad del sistema de recepción.

Si I, II y III son señales emitidas por misiles, al situar la amplitud A como punto de corte detectaremos los 3 misiles (sensibilidad 100 %), pero también consideraremos misiles señales que no lo son. Al cambiar el nivel de decisión a la amplitud B no consideraremos misil ninguna señal de ruido (especificidad 100 %) pero no habremos detectado el misil II, por lo que la sensibilidad desciende.

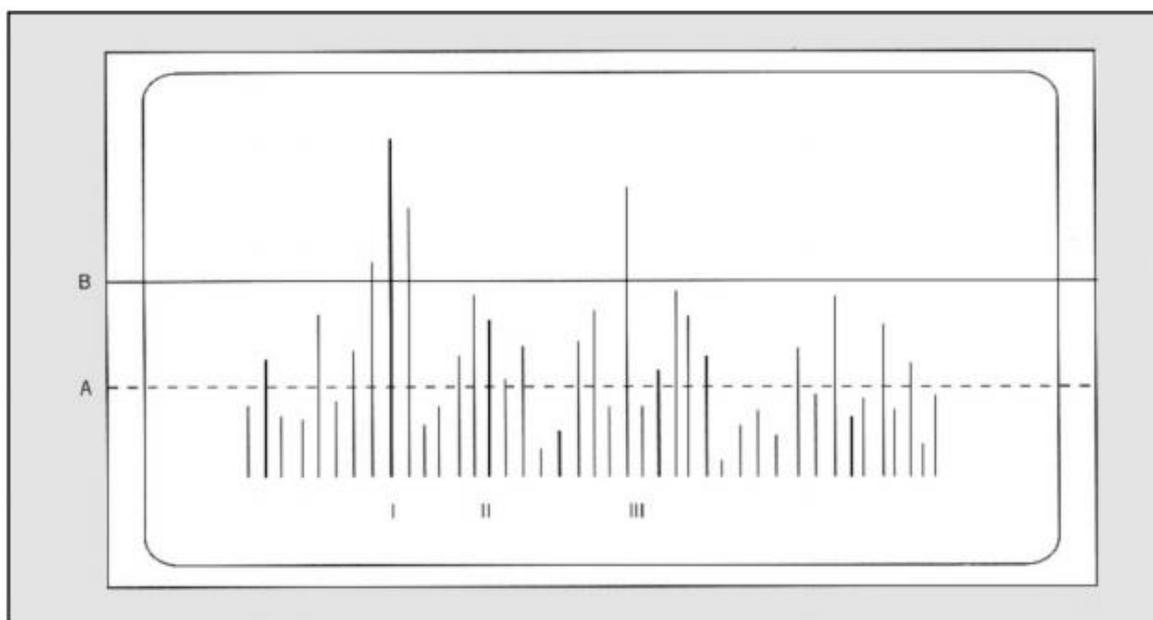


Fig. 5-2. Señales registradas en un receptor de radar; I, II y III corresponden a misiles

La curva ROC es un gráfico en el que se observan todos los pares sensibilidad/1-especificidad resultantes de la variación continua de los puntos de corte (umbrales) en todo el rango de resultados observados. En el eje y de coordenadas se sitúa la *sensibilidad* o

## Algoritmos de detección de precipitación

razón de verdaderos positivos (VPR), definida por la ecuación 5-3. En el eje x se sitúa la razón de falsos positivos o 1-especificidad (SPC), definida por la ecuación 5-4.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{n^{\circ} \text{ eventos detectados}}{n^{\circ} \text{ eventos meteorología}} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5-3)$$

$$\text{Especificidad} = \frac{n^{\circ} \text{ falsas alarmas}}{n^{\circ} \text{ totales de muestras sin evento}} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (5-4)$$

donde TP: True Positive, FN: False Negative, TN: True Negative y FP: False Positive.

Mediante la siguiente tabla explicamos que consideramos que es cada valor en nuestro caso:

		Valores señal Radioenlaces	
		Predicción 1	Predicción 0
Valores de meteorología	Valor real 1	<u>True Positive (TP)</u> Detectamos lluvia y hay precipitación recogida en los datos de meteorología.	<u>False Negative (FN)</u> Hay precipitación en meteorología, pero no la detectamos.
	Valor real 0	<u>False Positive (FP)</u> Detectamos lluvia, pero no hay precipitación recogida en los datos de meteorología.	<u>True Negative (TN)</u> No detectamos lluvia y tampoco hay en los datos de meteorología.

Tabla 5-1. Explicación términos predicción y valores reales

En la figura 5-3, cada punto de la curva representa un par S/1-E correspondiente a un nivel de decisión determinado. El mejor método posible de predicción se situaría en un punto en la esquina superior izquierda representando un 100 % de sensibilidad (ningún falso negativo) y un 100 % también de especificidad (ningún falso positivo). A este punto también se le llama una clasificación perfecta. Por el contrario, una clasificación totalmente aleatoria (o adivinación aleatoria) daría un punto a lo largo de la línea diagonal, que se llama también línea de no-discriminación, desde el extremo inferior izquierdo hasta

la esquina superior. Cualitativamente, cuanto más próxima es una curva ROC a la esquina superior izquierda, más alta es la exactitud global de la prueba.

Algunas de las ventajas de utilizar las curvas ROC son:

- El enfoque tan sencillo facilita la interpretación visual de los datos.
- Representa la precisión como una medida sobre todo el rango del test.
- Independiente de la frecuencia y, por lo tanto, del muestreo.
- Al determinar el umbral puede considerar todos los posibles puntos de corte.
- Permite el cálculo de otras medidas complementarias útiles (por ejemplo, el área bajo la curva).
- Permite comparar dos o más curvas.

A partir de las curvas ROC se desarrolló la Teoría de Detección de Señales (TDS). El análisis ROC se aplicó posteriormente en medicina, radiología, psicología y otras áreas durante varias décadas. Recientemente ha encontrado aplicación en áreas como aprendizaje automático (*machine learning*) y minería de datos (*data mining*).

Un valor que obtenemos calculando una curva ROC y que nos ayudará en este primer experimento es la obtención del área bajo la curva (*Area Under the Curve*, en inglés), de aquí en adelante AUC. Este valor es una medida de la exactitud de nuestro predictor.

### 5.3 Detección mediante SVM

En el apartado 2.3.5, y posteriormente en 5.1, vimos la relación entre la intensidad de lluvia y la atenuación que es el único parámetro medible directamente. En consecuencia, una primera aproximación al problema de detección y estimación de lluvia

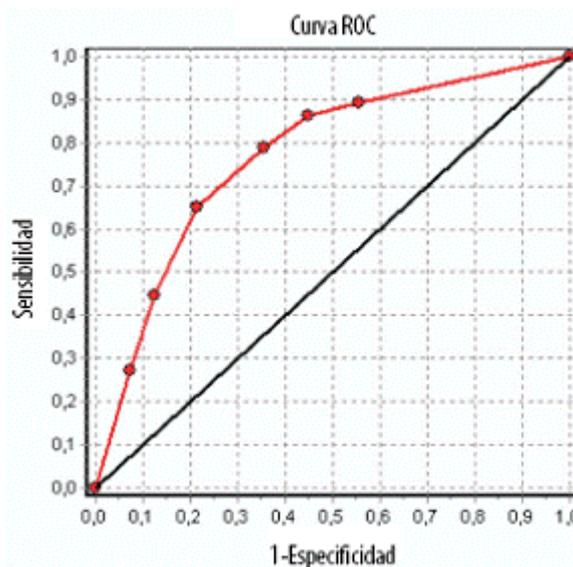


Fig. 5-3. Ejemplo de curva ROC

puede estar basada en la detección propiamente dicha, esto es, sin entrar a cuantificar. Es lo que haremos en este apartado sobre la base de que tendremos diferentes niveles de señal cuando hay lluvia y cuando no. Para ello, aplicaremos una clasificación binaria mediante SVM.

La aproximación que vamos a seguir va en la línea de explotar la riqueza anteriormente dicha, y lo haremos aplicando técnicas de clasificación [36]. Hemos optado por el uso de Máquinas de Vectores Soporte (Support Vector Machine, SVM) [37]. El kernel usado es de tipo polinomial de orden 3.

### 5.3.1 Clasificación mediante SVM

El clasificador utilizado en este PFC es un SVM con kernel polinomial de orden 3. Los SVM son por naturaleza clasificadores biclase y a continuación, expondremos los fundamentos del SVM [37][38].

La teoría de Máquinas de Vectores de Soporte (*Support Vector Machine*, SVM, en su acepción inglesa) fue desarrollada por Vapnik apoyándose en el principio de Minimización del Riesgo Estructural (SRM); ya que en muestra un mejor desempeño que al utilizar el principio de Minimización del Riesgo Empírico (ERM). Esto se debe a que la SVM minimiza un límite superior al riesgo esperado, mientras que el ERM minimiza el error sobre los datos de entrenamiento.

Se trata de un clasificador lineal que mapea los puntos de entrada a un espacio de características de una dimensión mayor (introducidos por funciones núcleo o kernel), para luego encontrar el hiperplano que los separe y así maximice el margen entre las clases. Se pueden utilizar para resolver tanto problemas lineales como no lineales.

Los SVM han sido desarrollados como una técnica robusta para clasificación y regresión aplicada a grandes conjuntos de datos complejos con ruido; es decir, con variables inherentes al modelo que para otras técnicas aumentan la posibilidad de error en los resultados pues resultan difíciles de cuantificar y observar.

### 5.3.1.1 Separador lineal

Para este caso el SVM crea hiperplanos que separan los datos de entrada en dos subgrupos que poseen etiqueta propia (ver figura 5-4). En medio de todos los posibles planos de separación de las dos clases etiquetadas como  $\{-1, +1\}$ , existe sólo un hiperplano de separación óptimo, por lo que la distancia entre el hiperplano óptimo y el valor de entrada más cercano sea máxima (maximización del margen) para que se generalice la máquina que se está creando. Los puntos en los que se apoya el margen máximo se denominan vectores soporte.

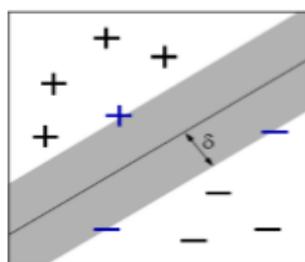


Fig. 5-4. SVM Linealmente separable

### 5.3.1.2 Separador no lineal

Existen dos posibles soluciones para resolver este problema:

- El primero es usar una función kernel cuando los datos se pueden separar con margen máximo en un espacio de características, siendo este de mayor dimensión y que se obtiene mediante una transformación a las variables de entrada.
- El segundo caso es utilizar el *Soft Margin* o Margen Blando, que se emplea cuando no se puede transformar los datos para conseguir una separación lineal, ya sea en el espacio de entrada o de características.

### SVM con margen máximo en el espacio de características

Como se ha mencionado, la transformación de los datos de un espacio inicial a otro de mayor dimensión se logra mediante el uso de la función kernel (por ejemplo, ver la figura 5-5). La función núcleo o kernel es un producto interno en el espacio de características que tiene su equivalente en el espacio de entrada

$$k(x, x') = \langle \Phi(x), \Phi(x') \rangle \quad (5-5)$$

donde  $k$ , es una función simétrica positiva definida que cumple las condiciones de Mercer.

De manera gráfica se puede observar en la figura como la función kernel permite realizar la separación y el traslado de los datos al espacio de características.

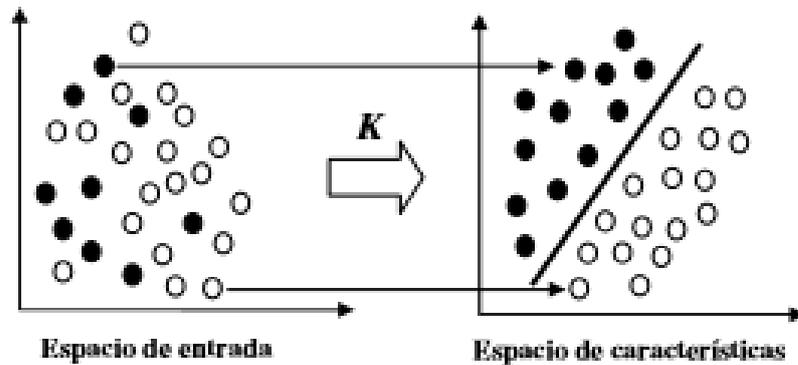


Fig. 5-5. SVM no linealmente separable inducida por una función kernel

Entre los kernels más comunes, se encuentran: la función lineal, polinomial, RBF (*Radial Basis Function*), ERBF (*Exponential Radial Basis Function*), entre otros.

### SVM con Margen Blando

Este tipo particular de los SVM trata aquellos casos donde existe datos de entrada erróneos, ruido o alto solapamiento de las clases en los datos de entrenamiento, donde se puede ver afectado el hiperplano clasificador, por esta razón se cambia un poco la perspectiva y se busca el mejor hiperplano clasificador que pueda tolerar el ruido en los datos de entrenamiento. En la figura 5-6 podemos ver un ejemplo de caso de este tipo.

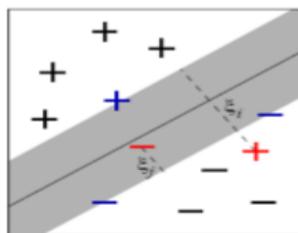


Fig. 5-6. SVM con margen blando

De manera que, matemáticamente el problema queda definido como:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar} && \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^l \xi_i \\ &\text{sujeto a} && y_i(\langle w, x_i \rangle + b) \geq 1 - \xi_i \quad \xi_i \geq 0, i = 1, \dots, l \end{aligned}$$

Se incluye un término de regularización que depende de las variables de holgura, que a su vez depende de la magnitud de las mismas y del margen. Este término incluye también una constante  $C$ , que determina la holgura del margen blando.

El valor de este parámetro  $C$ , que debe ser estimado a priori, depende del evaluador. La elección de un valor para este parámetro y el tipo de función kernel influyen en el desempeño de las MVS.

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado en el caso linealmente separable, la resolución de este problema viene dada por la búsqueda de los multiplicadores de Lagrange, para esto se construye un Lagrangiano y se resuelve en el problema dual:

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar} && \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N y_i y_j \alpha_i \alpha_j K(x_i, x_j) \\ &\text{sujeto a} && \sum_{i=1}^N y_i \alpha_i = 0 \\ &&& 0 \leq \alpha_i \leq C \quad 1 \leq i \leq N \end{aligned}$$

La función a maximizar es la misma que para el caso de margen máximo, a diferencia de la restricción  $0 \leq \alpha_i \leq C$ . Esto implica que los datos o patrones que cumplen la condición de tener valores  $\alpha_i \geq C$  tienen el mismo comportamiento en la SVM con margen máximo. Es decir, que las SVM con margen máximo se pueden obtener con  $C = \infty$ . Esto significa que cuanto más grande es el valor de  $C$ , más estricta es la SVM al momento de permitir errores, penalizándolos con mayor rigurosidad.

Las ventajas de SVM son que pertenece a disciplinas de aprendizaje automático o estadístico; consiguiendo así que las máquinas vayan aprendiendo las salidas correctas para ciertas entradas mediante ejemplos.

Asimismo, este clasificador aplica un nuevo principio inductivo, que busca minimizar el riesgo estructural, además del uso de una función núcleo o kernel, atribuyendo una gran capacidad de generalización.

Por otro lado, uno de los problemas que presenta este clasificador es el *Overtraining* o sobre entrenamiento, que da a una mala generalización del modelo. Este inconveniente consiste en aprender los datos de entrenamiento, pero es capaz de clasificar bien ejemplos nuevos (datos de verificación). Otro problema es realizar una mala clasificación al no aprender de forma correcta los datos de entrenamiento.

### 5.3.2 Experimentos de detección

Para conocer la capacidad de las señales desde un punto de vista discriminativo, y de los SVM como separador de clases entre lluvia y no-lluvia, hemos desarrollado unos experimentos de detección como se explican a continuación.

Las condiciones de los experimentos son:

- Radioenlace participante: Monteluz - Hospital Militar.
- Total de eventos usados 7659, de los cuales 237 son de lluvia.
- Datos de tipo quinceminutal.
- Vectores de características, 4 componentes cada 15 minutos, p.e., 01:00-00:45-00:30-00:15.
- Fase de entrenamiento, 75% de los datos. De ellos, 75% para entrenamiento, 25% para validación sobre el entrenamiento.
- Fase de test: 25% para test con datos que no se usaron para entrenar-validar.
- El proceso de diseño del clasificador se repite en 21 iteraciones seleccionando aleatoriamente los datos de entrenar-validar, y de test.
- Los 21 clasificadores entrenados se usan para el clasificador final bajo la fórmula de ‘majority voting’.

En la tabla 5-2 mostramos los resultados en términos de True Positives y True Negatives (TP+TN), False Positives (FP) y False Negatives (FN). Los resultados se dan en porcentajes sobre los datos usados en el Test. Podemos observar que las tasas de error sobre verdaderos positivos y negativos (TP+TN) es muy baja, igual pasa con las falsas alarmas (FP). Sin embargo, la tasa de falsos negativos (FN) tiene un comportamiento diferente. En uno de los radioenlaces la tasa de FN es del 25 % con FP y TP+TN razonablemente bajos. Es un ejemplo de ajuste en el que la detección se puede dar por buena, o muy buena. Aprovecharemos este resultado en el Capítulo 6 para desarrollar una detección en dos etapas.

	TP+TN	FP	FN
Monteluz - Hospital Militar	3,55%	1.55%	25%

Tabla 5-2. Resultados de clasificación para dos radioenlaces

## 5.4 Detección por sustracción de componentes de baja frecuencia

En el apartado 5.1 hemos argumentado la necesidad de suprimir o hacer negligibles las atenuaciones que no interesan, y resaltar las debidas a la lluvia. En este apartado veremos el primero de los algoritmos de detección de lluvia que hemos diseñado teniendo en cuenta esta premisa.

En la figura 5-7 mostramos el esquema del detector basado en una sustracción de componentes de baja frecuencia. A continuación explicamos el cometido de cada uno.

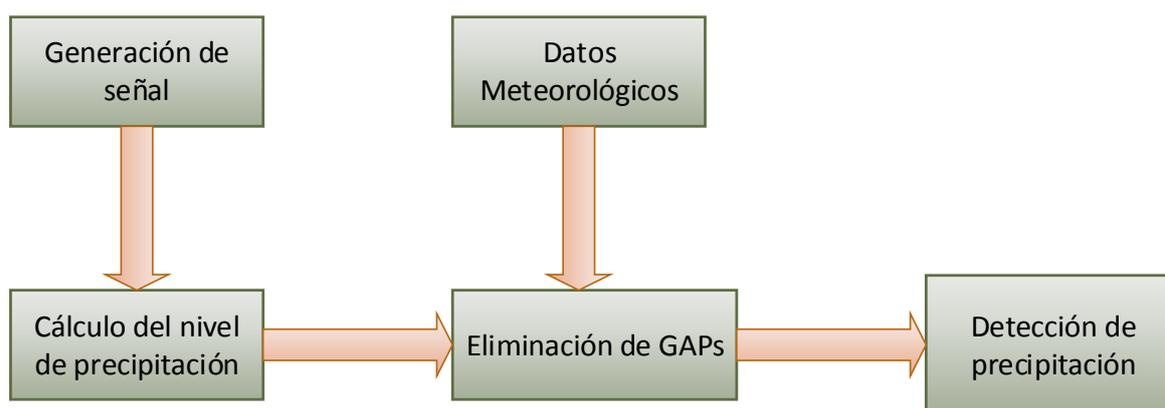


Fig. 5-7. Esquema general de la detección por sustracción de baja frecuencias

- **Generación de señal:** En este bloque se toman los niveles de potencia recibida en cada receptor, y se hace respetando el orden en que se han extraído. Este paso se explicó en el apartado 4.2.
- **Datos meteorológicos:** Son los datos de la estación meteorológica más cercana a un radioenlace dado, y se obtienen cada hora en punto. Entre estos datos también contamos con la información de los GAPS que utilizaremos en el bloque de *Eliminación de GAPS* y que explicamos cómo los hallamos en el apartado 4.1.2.

En los siguientes subapartados explicamos el resto de bloques de la figura anterior en detenimiento.

### 5.4.1 Cálculo del nivel de precipitación

Como vimos en el apartado 5.1 de este capítulo, podemos simplificar las atenuaciones de nuestros radioenlaces a la atenuación causada por las pérdidas por precipitación. Así, a la hora de utilizar la recomendación UIT-R P.838-3 [14] para calcular los niveles de precipitación, tenemos que (ver fórmula 5.1):

$$\gamma_R = k * R^\alpha \quad \rightarrow \quad R = \sqrt[\alpha]{\frac{\gamma_R}{k}} \quad (5-6)$$

siendo  $\gamma_R$  la señal de componente de alta frecuencia tal como se describió en el apartado 4.3.4, y  $K$  y  $\alpha$  coeficientes que se calculan a través de unas formulas descritas y explicadas en el apartado 2.3.5.

En la siguiente figura podemos ver un ejemplo del cálculo de los niveles de precipitación para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar en Febrero de 2014. En la gráfica superior podemos observar nuestra señal de altas frecuencias. Cabe recordar, que obtenemos esta señal después de calcular mediante una ventana un promedio de nuestra señal original y restar está a la señal original. En la figura siguiente podemos ver la señal de alta frecuencia (gráfica superior) sobre la que aplicaremos la ecuación 5-5 y los niveles de precipitación que obtenemos como resultado (gráfica inferior).

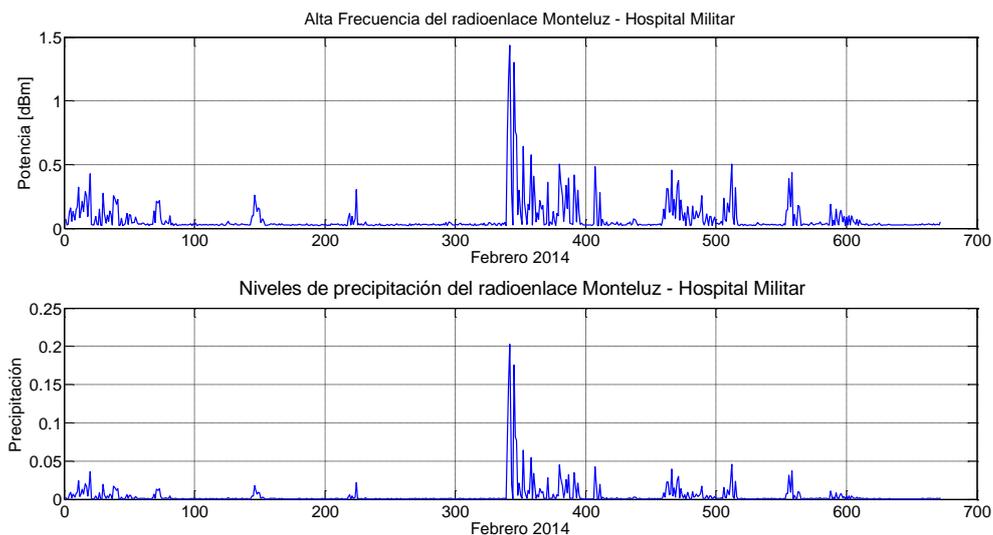


Fig. 5-8. Señal de alta frecuencia y niveles de precipitación obtenidos aplicando la ITU

## 5.4.2 Eliminación de GAPS de los datos de meteorología y de los datos de radioenlaces

Un paso muy importante a realizar antes de la detección de precipitación es eliminar todos los GAPS, tanto de los datos de radioenlace como de los meteorológicos.

En los apartados 4.1.2 y 4.2.2 estudiamos la continuidad temporal de ambos datos. Ayudándonos en ese estudio y de las rutinas que escribimos en Matlab para ello, hemos eliminado todos los GAPS de ambos datos. Es decir, que hemos eliminado intervalos de señal de potencia en los casos en los que no teníamos datos meteorológicos y eliminados datos de meteorología para aquellos intervalos en los que no poseíamos señal de potencia.

Al finalizar este proceso, tenemos el mismo número de muestras en cada tanda de datos, es decir que nuestra señal de potencia y nuestros datos meteorológicos coinciden.

## 5.4.3 La detección

Una vez realizado todo el proceso anterior, entramos en la detección de precipitación propiamente dicha. Recordemos que en el apartado 5.1 apuntábamos a la idea de que trabajamos con la suposición de que es la lluvia la principal causante de las atenuaciones que hemos extraído. Para ello es muy importante discriminar lo que consideramos precipitación de lo que no.

Así, para nuestras pruebas iniciales decidimos utilizar un umbral que nos permita discernir lo que es precipitación de lo que no. En un primer momento se decidió adoptar como valor de umbral el valor de resolución de los datos obtenidos con las estaciones meteorológicas, que es 0,1.

De esta manera, a la hora de realizar la detección, nos encontramos con que se han detectado precipitaciones a las mismas horas en las que hay recogidas en los datos meteorológicos. Lo que llamamos True Positive (TP) en la tabla 5-1. De la misma manera, nos encontramos con que detectamos precipitaciones y en los datos meteorológicos no aparecen. Es lo que llamamos False Positive (FP) en la tabla 5-1.

Con respecto a las falsas alarmas, es importante recalcar que no podemos saber con seguridad si se han producido por precipitaciones reales o no. Diferentes factores como la cercanía de la estación meteorológica, dirección del viento o la topografía del lugar son

factores muy importantes. Puede darse el caso de que este lloviendo donde está situado el radioenlace y no en el lugar de la estación o viceversa. Además, debido a la topografía y a la dirección del viento podemos detectar precipitaciones en un radioenlace a una hora, y en la estación meteorológica está recogido una hora antes (o una después) de la detectada.

En la figura 5-9 podemos observar las detecciones de precipitación una vez aplicado el umbral (señal azul) y los datos de lluvia recogidos por la estación de meteorología más cercana (señal roja), que para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar es la estación situada en Tafira. Como podemos observar, sobre la muestra 73564 detectamos precipitación, si bien es cierto, que los niveles que detectamos no son parecidos, por lo que hay cierto error y cosas a mejorar en nuestro algoritmo.

En la figura además, señalamos dos ejemplos de False Positive: detectamos lluvia pero nuestros datos meteorológicos no la han recogido; y True Positive que recordemos que se da cuando detectamos precipitación y los datos meteorológicos nos indican que ha llovido.

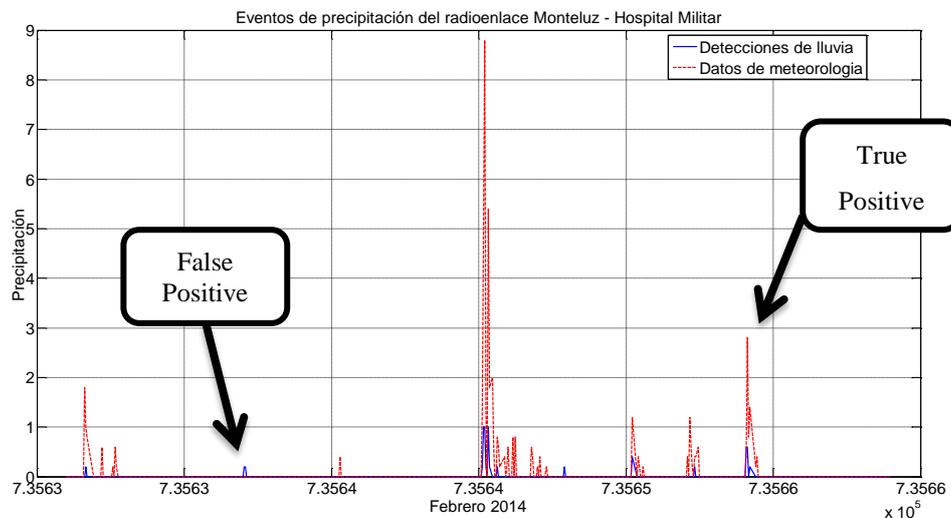


Fig. 5-9. Detección de precipitación para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

Al realizar las primeras pruebas de detección, descubrimos que la ventana con la que realizamos el promedio, que explicamos en el apartado 4.2.4 *Eliminación baja frecuencia de la señal*, influye, pues variando la ventana obtuvimos diferentes números de detecciones. Debido a esto, hemos decidido realizar un experimento para decidir qué

ventana es la que nos ofrece mejores resultados. En el apartado 5.3 describiremos el proceso de elección de ventana.

## 5.5 Experimento 1: Utilización de la curva ROC para la elección de la mejor ventana en el método de detección por sustracción de componentes de bajas frecuencias

Este primer experimento ha consistido en realizar un script en Matlab en el que se ha variado la ventana con la que realizamos el promedio de la señal RSL (ver apartado 4.3.4 *Eliminación baja frecuencia de la señal RSL*) empezando con una ventana de valor 3 y acabando con una de valor 73. De esta manera, para cada ventana dentro de esos dos valores se ha realizado todo el procesado detallado en el apartado 5.3.

Asimismo, para cada valor de ventana se ha calculado una ROC y su valor AUC. Para la primera prueba dentro de este experimento, hemos utilizado el mismo enlace que veníamos utilizando para el preprocesado y procesado, Monteluz – Hospital Militar cuya estación más cercana es la estación de Tafira. Los datos que hemos utilizado corresponden al mes de Febrero de 2014 en su totalidad.

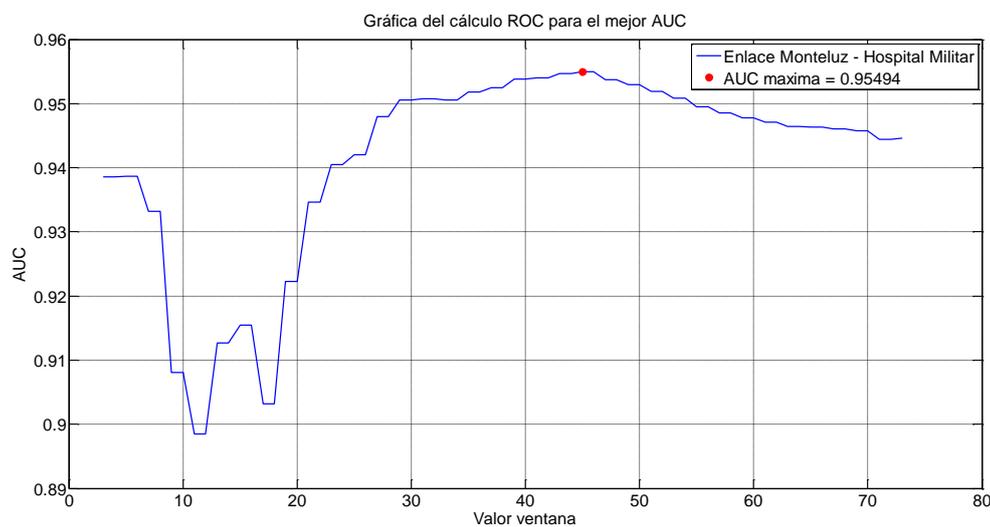


Fig. 5-10. Valor de la AUC frente al valor de la ventana de promedio

En la figura 5-10 podemos ver la evolución del valor AUC dependiendo del valor de la ventana. Como podemos observar la mejor ventana se produce tanto para ventanas con valor 45 y 46 con un AUC de valor 0,9549.

En la figura 5-11 podemos observar la curva ROC para una ventana de promedio 45. En la figura 5-12 podemos observar una gráfica en la que se reflejan la sensibilidad (que nosotros llamamos True Positive), eficiencia y especificidad (que nosotros denominamos True Negative), así como los puntos de corte adecuados según la máxima sensibilidad, máxima especificidad y máxima eficiencia.

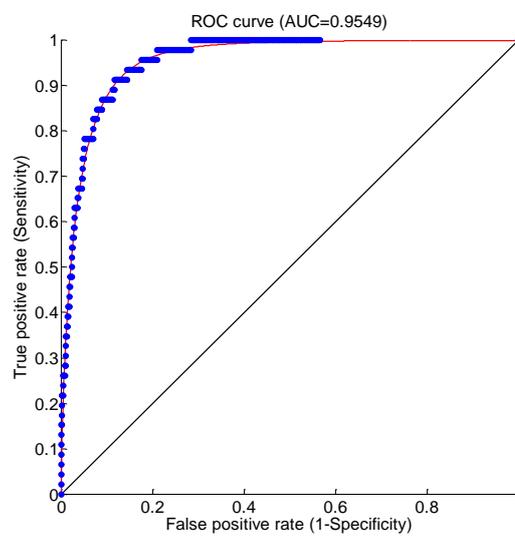


Fig. 5-11. Curva ROC para una ventana promedio  $w=45$

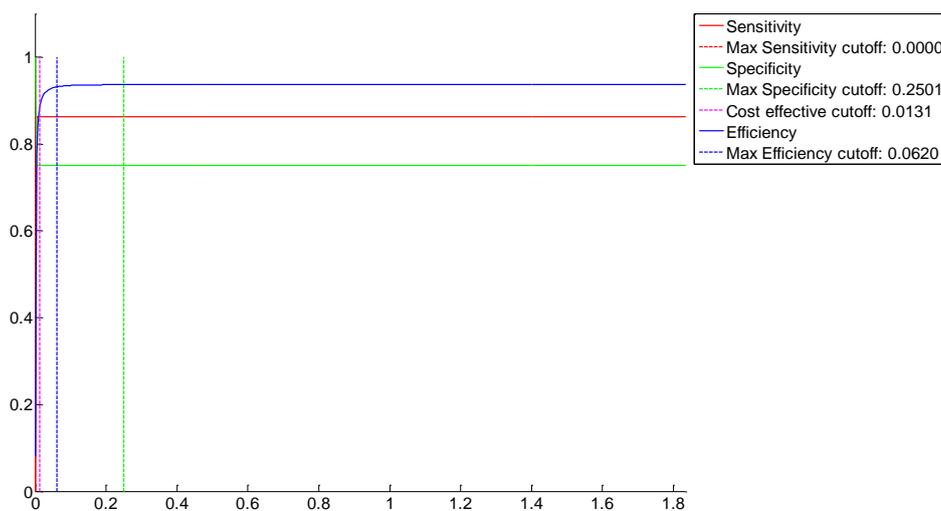


Fig. 5-12. Gráfica con diferentes factores dependientes de la ROC y AUC

Con el objetivo de ver como varían las curvas ROC y sus respectivos AUC en diferentes enlaces, se ha seguido todo el proceso especificado en los capítulos anteriores de preprocesado, geolocalización, procesado, etc para los siguientes radioenlaces: Monteluz – Hospital Militar, Usos Múltiples – Hospital Militar, Pico II – Moriscos, Hierba Huerto – Roque Pernal y Agüimes – Tabaiba. En la siguiente figura podemos observar el resultado obtenido:

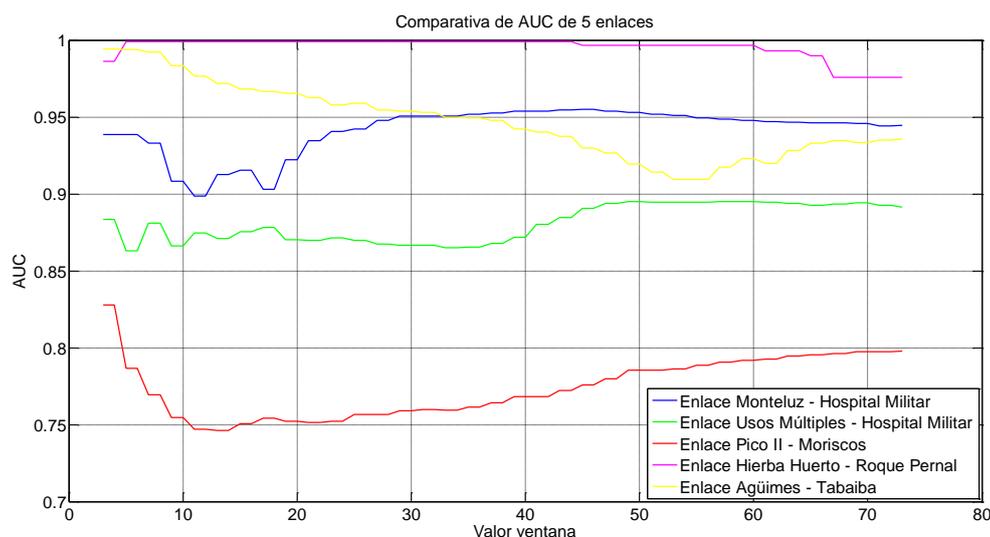


Fig. 5-13. Comparativa de valor AUC y ventana promedio para diferentes enlaces

Como podemos ver en la figura anterior, no hay un valor óptimo único para todos los radioenlaces. Para cada uno, debemos realizar todo el proceso detallado en este experimento con el objetivo de conseguir aquella ventana que nos ofrezca los mejores resultados. En la siguiente tabla detallamos las ventanas óptimas y el valor de su AUC para cada uno de los radioenlaces nombrados anteriormente.

Radioenlace	Ventana óptima	AUC
Monteluz - Hospital Militar	43	0,9549
Usos Múltiples – Hospital Militar	47	0,8951
Pico II – Moriscos	1	0,8278
Hierba Huerto – Roque Pernal	39	0,9990
Agüimes – Tabaiba	1	0,9942

Tabla 5-3. Datos de ventana óptima y valor de AUC para 5 radioenlaces

## 5.6 Detección por comparación de patrones

Este siguiente método de detección de precipitaciones se basa en una detección por comparación de patrones. Este método, al igual que el primero, consta de diferentes etapas de procesado de los datos, tanto meteorológicos como de radioenlaces. En la siguiente figura podemos observar un diagrama del proceso necesario.

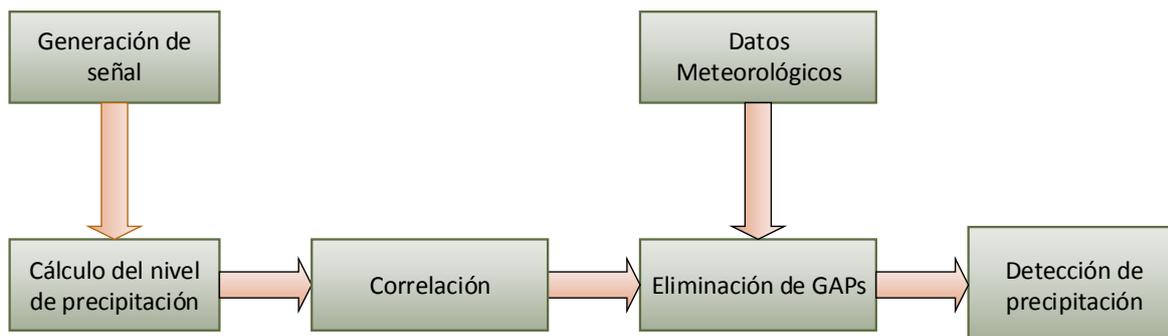


Fig. 5-14. Esquema general del método de detección por comparación de patrones

- **Generación de señal:** En este bloque, al contrario de lo que sucedía con el primer método, se utilizan los datos “crudos” tal cual vienen de nuestra base de datos. El único preprocesado que realizamos es la localización de los diferentes GAPs que tenga nuestra señal.
- **Datos meteorológicos:** Al igual que en el primer método, son los datos de la estación meteorológica más cercana a un radioenlace dado, y se obtienen cada hora en punto. Entre estos datos también contamos con la información de los GAPs que utilizaremos en el bloque de *Eliminación de GAPs* y que explicamos cómo los hallamos en el apartado 4.1.2.
- **Cálculo del nivel de precipitación:** Se calcula de la misma forma que en el apartado 5.2.1 del primer método. La única diferencia reside en que para este método calculamos los valores de la señal de potencia proveniente de la señal original.

En los siguientes subapartados explicamos el resto de bloques que no han sido explicados de la figura anterior en detenimiento.

### 5.6.1 Correlación

Este segundo método de detección se basa en la utilización de la correlación para la detección de lluvia. Pero antes de esto, hay un paso previo muy importante que debemos realizar. Debemos añadir valores en los GAPS detectados en el apartado 4.2.2, puesto que esto afecta a nuestra correlación. En este caso, hallamos el valor medio de nuestros datos y lo insertamos en todos los GAPS detectados.

Una vez realizado este paso previo, realizamos la correlación utilizando la función de Matlab '*xcorr*'. Para las primeras pruebas hemos utilizado como máscara de correlación un pulso de amplitud 10 con un pedestal y longitud de 10 muestras. El resultado es una señal correlada con el doble de muestras que nuestra señal inicial. Por lo que debemos descartar todas las muestras hasta la mitad del vector, que es donde comienza nuestra verdadera señal correlada. Además, igual que explicamos en capítulos anteriores, nos interesa las altas frecuencias, por lo que restamos nuestra señal inicial a nuestra señal correlada para obtener la señal con la que trabajaremos a partir de aquí.

### 5.6.2 Eliminación de GAPS de los datos de meteorología y de los datos de radioenlaces

Al igual que ocurría con el primer método de detección, para poder realizar el siguiente paso, lo primero es eliminar, tanto de la señal de radioenlace como de los datos de meteorología, aquellos intervalos de tiempo que se encuentren nuestro vector de GAPS. En los datos de radioenlaces, recordemos que en el paso anterior los hemos rellenado con un valor medio de nuestros datos para que no nos produjera errores al correlar. En este paso los eliminamos. Al finalizar este paso, tendremos el mismo número de muestras en ambas señales.

### 5.6.3 La detección

La fase de detección en este segundo método de detección se basa, al igual que en el primer método, en decidir qué es lluvia de lo que no lo es. Por ello, establecemos un umbral de 0,2.

Así, cuando realizamos la detección nos encontramos con que hemos detectado precipitaciones a las mismas horas en las que hay recogidas en los datos meteorológicos, True Positive (TP). Y nos encontramos con que detectamos precipitaciones y en los datos meteorológicos no aparecen, False Positive (FP).

Con respecto a los False Positive, es importante recalcar que no podemos saber con seguridad si se han producido precipitaciones o no. Diferentes factores como la cercanía de la estación meteorológica, dirección del viento o la topografía del lugar son factores muy importantes. Puede darse el caso de que este lloviendo donde está situado el radioenlace y no en el lugar de la estación o viceversa. Además debido a la topografía y a la dirección del viento podemos detectar precipitaciones en un radioenlace a una hora, y en la estación meteorológica está recogido una hora antes (o una después) de la detectada.

En la figura 5-15 representamos la precipitación detectada con este segundo método y los datos de meteorología de su estación más cercana. En el eje vertical de la gráfica representamos cantidad de precipitación en mm/h y en el eje horizontal las muestras hora por hora.

La razón principal que nos llevó a pensar en esta metodología de comparación de patrones para la detección de lluvia, es que cuando se produce una precipitación es algo repentino y se refleja casi como un pulso en nuestra señal. En la figura 5-16 podemos ver las detecciones de precipitaciones obtenidas con esta metodología y representadas haciendo uso del 'stem' de Matlab, que nos permite reflejar la señal como muestras.

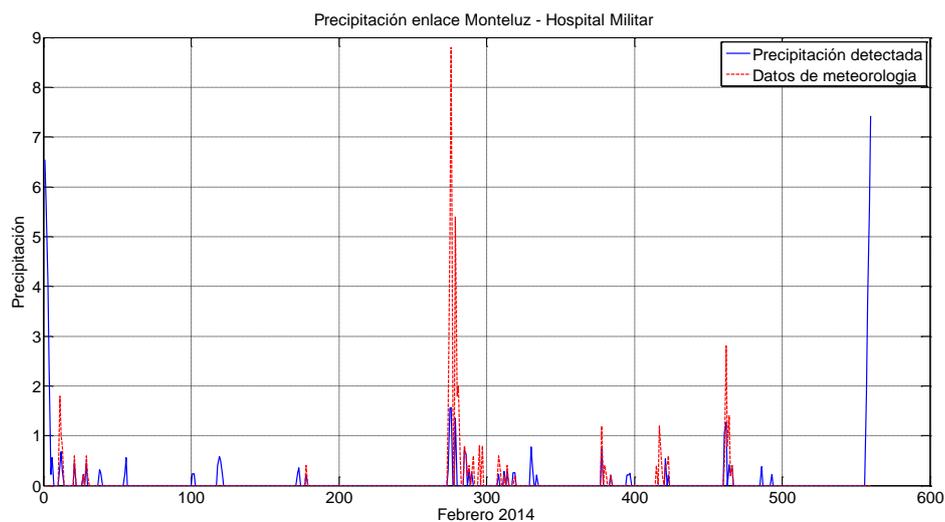


Fig. 5-15. Detección de precipitación para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar usando el método de comparación de patrones

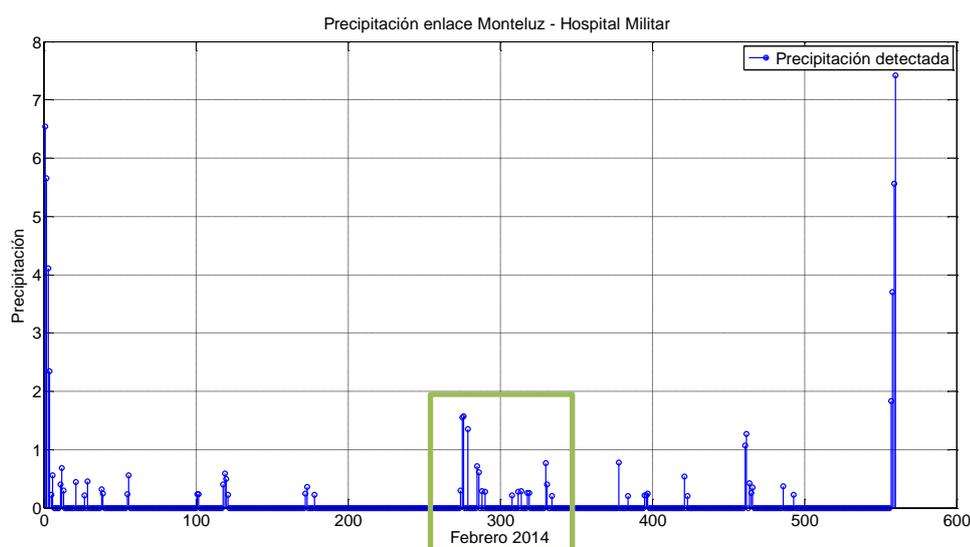


Fig. 5-16. Precipitación detectada para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

Haciendo un zoom sobre la zona de la gráfica anterior que se encuentra enmarcada en el cuadrado rojo, obtenemos la figura 5-17 en la que podemos observar lo que mencionamos anteriormente. Los momentos de lluvia son repentinos y se reflejan como pulsos en nuestra señal.

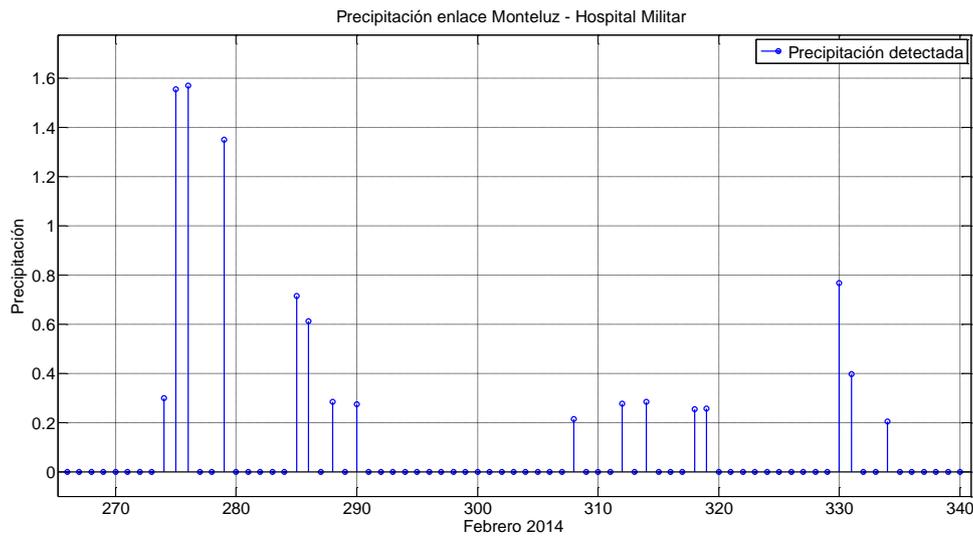


Fig. 5-17. Zoom de la precipitación detectada para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

De esta manera, decidimos hacer nuestras primeras pruebas con este método de detección utilizando un pulso de amplitud 10 y longitud 10 colocado en un pedestal de 1, como podemos ver en la figura inferior.

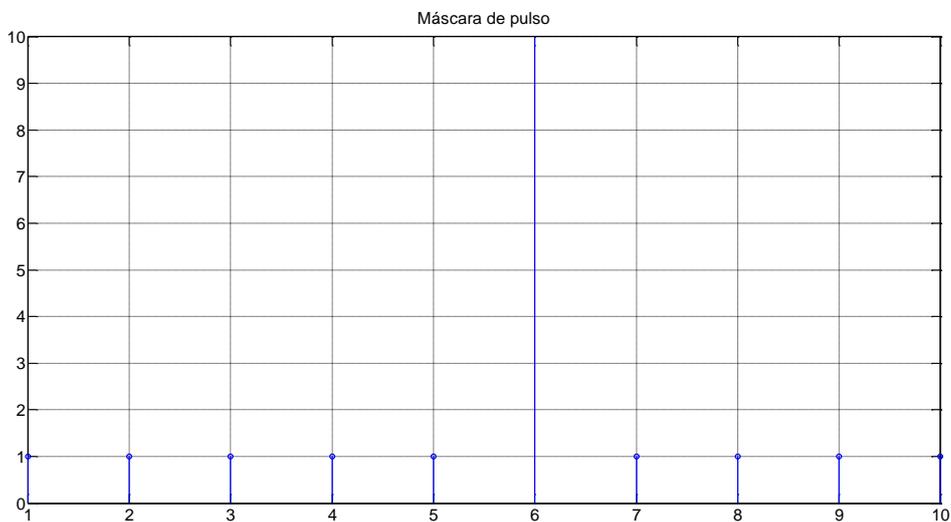


Fig. 5-18. Máscara inicial con forma de pulso para la detección por comparación de patrones

Una vez finalizada la etapa de detección hemos decidido realizar una serie de experimentos cambiando la amplitud del pulso, la longitud, utilizando diferentes señales de correlación para ver cómo se comporta nuestro segundo método de detección.

## 5.7 Experimento 2: Variación de la amplitud de la máscara para la obtención de mejores resultados en el método por comparación de patrones

El primer experimento que realizaremos con el segundo método de detección es la variación de la amplitud de la máscara que utilizamos para correlar nuestra señal. Para este experimento, la única máscara que utilizaremos es la que hemos denominado ‘pulso’ de amplitud 10 colocado céntricamente sobre un pedestal de longitud 10.

Este experimento lo que pretende comprobar es la influencia de la amplitud de dicho pulso a la hora de detectar más o menos lluvia.

Si observamos la siguiente tabla, vemos que la mejor detección la tenemos con una amplitud de 2 habiendo detectado 81 eventos de precipitación, de los cuales 34 son True Positive, es decir, que ocurren a la misma hora en la que hay precipitación en nuestros datos de meteorología. Teniendo pues un 73,91% de tasa de acierto.

Amplitud pulso	Nº eventos reales	Nº eventos detectados	PRA	PEA	TP	% acierto misma hora	FN	FP
2	46	81	41,8	28,37	34	73,91	9	47
3	46	78	41,8	26,01	34	73,91	9	44
4	46	72	39,8	23,44	31	67,39	9	41
5	46	72	39,8	21,77	31	67,39	9	41
6	46	71	39,4	20,12	30	65,22	10	41
7	46	69	39,4	18,87	30	65,22	11	39
8	46	66	39,4	17,76	30	65,22	11	36
9	46	62	37,6	16,57	29	63,04	11	33
10	46	59	37	15,50	28	60,87	11	31
11	46	56	36,2	14,33	26	56,52	11	30
12	46	51	35,4	13,26	24	52,17	11	27
13	46	48	35	12,46	23	50	12	25
14	46	44	35	11,92	23	50	12	21
15	46	42	35	11,42	23	50	12	19
16	46	39	34,6	10,57	21	45,65	14	18
17	46	39	34,6	10,17	21	45,65	15	18
18	46	37	34,2	9,40	19	41,30	15	18
19	46	35	33,4	8,68	17	36,96	15	18
20	46	33	31,2	7,99	15	32,61	15	18

Tabla 5-4. Resultados para diferentes amplitudes de pulso

Donde PRA hace alusión a la Precipitación Real Acumulada, PEA a la Precipitación Estimada Acumulada, TP a True Positive, FN a False Negative y FP a False Positive.

Como podemos observar, la precipitación estimada acumulada desciende a medida que detectamos menos eventos de precipitación.

### 5.8 Experimento 3: Variación de la longitud de la máscara para la obtención de mejores resultados con el método por comparación de patrones

El siguiente experimento consiste en variar la longitud de nuestra máscara de correlación para ver la influencia que tiene está a la hora de detectar precipitación. Y hemos elegido como amplitud la mejor obtenida del experimento anterior, es decir, amplitud 2.

Es importante también destacar que la longitud la iremos agrandando de dos en dos, puesto que está siempre debe ser par. Así empezamos con longitud 4 y terminamos con longitud 20.

Como vemos en la tabla inferior los mejores resultados los obtenemos con una longitud de 12, habiendo detectado 92 eventos de precipitación de los cuales 36 son True Positive y teniendo una tasa de acierto de 78,26%.

Longitud pulso	Nº eventos reales	Nº eventos detectados	PRA	PEA	TP	% acierto misma hora	FN	FP
4	46	56	35,2	16,39	27	58,70	19	29
6	46	67	37,6	21,54	30	65,22	16	37
8	46	75	41,2	25,45	33	71,74	13	42
10	46	81	41,8	28,37	34	73,91	12	47
12	46	92	43,8	30,82	36	78,26	10	56
14	46	93	43,2	32,26	34	73,91	12	59
16	46	94	44	34,58	35	76,09	11	59
18	46	96	43,2	36,69	34	73,91	12	62
20	46	102	44,4	39,29	37	80,43	9	65

Tabla 5-5. Resultados para diferentes longitudes de pulso

Donde PRA hace alusión a la Precipitación Real Acumulada, PEA a la Precipitación Estimada Acumulada, TP a True Positive, FN a False Negative y FP a False Positive.

### 5.9 Experimento 4: Variación de la máscara para la obtención de mejores resultados en el método de detección por comparación de patrones

Este experimento consiste en la utilización de diferentes señales como máscaras de correlación. Las señales que utilizamos para este experimento son: un pulso, una señal cuadrada, doble pulso, triangular, trapecio, Hamming, Barthannwin (es una modificación de la ventana Bartlett-Hann) y Nuttallwin (se definen como mínimo cuatro términos utilizando la ventana Blackman-Harris). En la siguiente figura podemos ver estas ocho señales que utilizamos como máscaras.

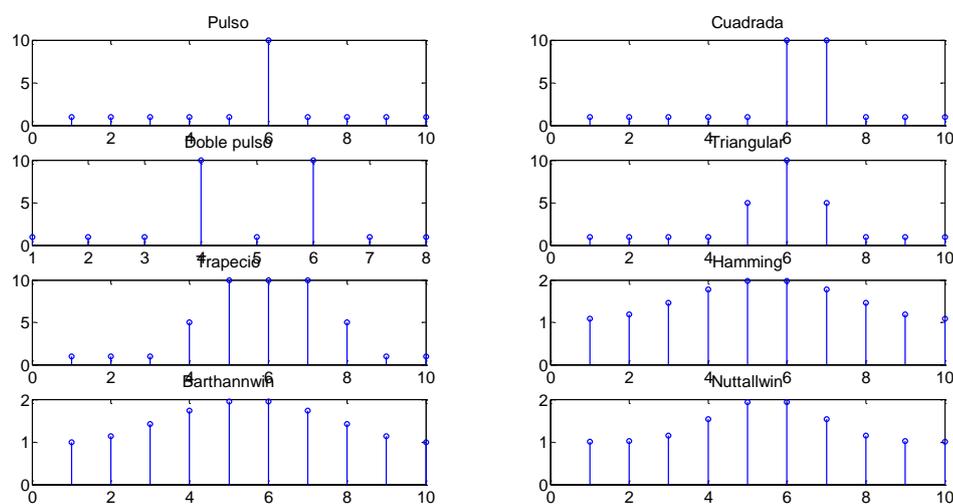


Fig. 5-19. Gráficas de las diferentes señales que utilizamos como máscaras

Como podemos ver en los datos obtenidos expuestos en la tabla 5-6, los mejores resultados los encontramos con las tres últimas máscaras, habiendo detectado 85 eventos de precipitación de los cuales 34 son True Positive, quedándonos con una tasa de acierto del 73,91%.

Señal correlación	Nº eventos reales	Nº eventos detectados	PRA	PEA	TP	% acierto misma hora	FN	FP
<b>Pulso</b>	46	59	37	15,50	28	60,87	18	31
<b>Señal cuadrada</b>	46	60	36,6	18,54	29	63,04	17	31
<b>Sube y baja</b>	46	73	36,4	24,62	28	60,87	18	45
<b>Triangular</b>	46	58	34,6	16,99	25	54,35	21	33
<b>Trapezio</b>	46	69	37,2	21,95	30	65,22	16	39
<b>Hamming</b>	46	85	41,8	29,07	34	73,91	12	51
<b>Barthannwin</b>	46	85	41,8	28,90	34	73,91	12	51
<b>Nuttallwin</b>	46	85	41,8	28,48	34	73,91	12	51

Tabla 5-6. Resultados para diferentes máscaras de correlación

Donde PRA hace alusión a la Precipitación Real Acumulada, PEA a la Precipitación Estimada Acumulada, TP a True Positive, FN a False Negative y FP a False Positive.

## 5.10 Experimento 5: Utilización de la curva ROC y su área para la elección del mejor umbral para cada máscara en el método de detección por comparación de patrones

Debido a los buenos resultados obtenidos en el experimento anterior, hemos decidido realizar otro experimento en el que calculemos el mejor umbral para 5 máscaras: pulso, trapezio, Hamming, Barthannwin y Nuttallwin; utilizando la curva ROC y su AUC para dicha elección.

El mecanismo es semejante al utilizado en el apartado 5.4. Utilizamos una función para estimar al área bajo la curva y obtener el valor del umbral óptimo, con el que obtenemos un valor determinado de aciertos y falsas alarmas.

En la siguiente tabla podemos observar el valor de las AUC para cada máscara y su mejor umbral obtenidos para el mes de Febrero de 2014 en el enlace Pico II – Moriscos.

Nombre Mascara	Valor AUC	Umbral
<b>Pulso</b>	0,955	0,074
<b>Trapezio</b>	0,941	0,004
<b>Hamming</b>	0,939	0,009
<b>Barthannwin</b>	0,950	0,027
<b>Nuttallwin</b>	0,948	0,028

Tabla 5-7. Valores AUC y umbrales para diferentes máscaras

Con el objetivo de comprobar los resultados que obtendríamos con los umbrales anteriores, decidimos utilizar otro mes distinto del mismo umbral. En la siguiente tabla podemos ver los resultados obtenidos para el mes de Abril de 2014.

Señal correlación	Nº eventos reales	Nº eventos detectados	PRA	PEA	TP	% acierto misma hora	FN	FP
<b>Pulso</b>	6	12	2	0,24	2	33,33	4	10
<b>Trapezio</b>	6	220	3	0,36	4	66,67	2	216
<b>Hamming</b>	6	186	3,2	0,57	5	83,33	1	181
<b>Barthannwin</b>	6	56	3	0,54	4	66,67	2	52
<b>Nuttallwin</b>	6	55	3	0,53	4	66,67	2	51

Tabla 5-8. Resultados de diferentes máscaras para umbrales establecidos mediante ROC y AUC

Donde PRA hace alusión a la Precipitación Real Acumulada, PEA a la Precipitación Estimada Acumulada, TP a True Positive, FN a False Negative y FP a False Positive.

La figura 5-20 nos muestra los datos de precipitación recogidos por la estación meteorológica de San Mateo – Corral de los Juncos y las detecciones de precipitación para el radioenlace de Pico II – Moriscos para el mes de Abril 2014, obtenidas utilizando la máscara Hamming con el umbral especificado en la tabla 5-7.

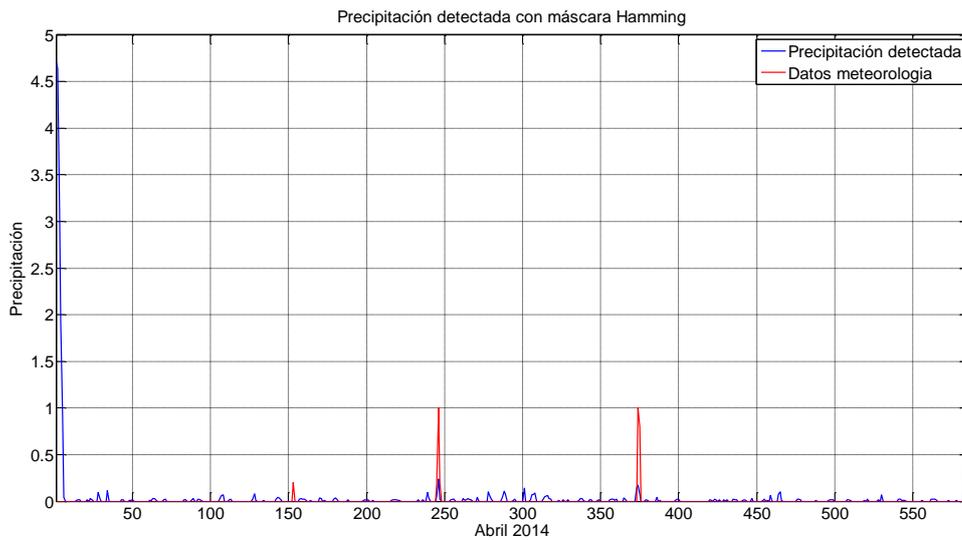


Fig. 5-20. Precipitación recogida y detectada utilizando máscara Hamming

La siguiente figura nos muestra los datos de precipitación recogidos por la estación meteorológica de San Mateo – Corral de los Juncos y las detecciones de precipitación para el radioenlace de Pico II – Moriscos para el mes de Abril 2014, obtenidas utilizando la máscara Barthannwin con el umbral especificado en la tabla 5-7.

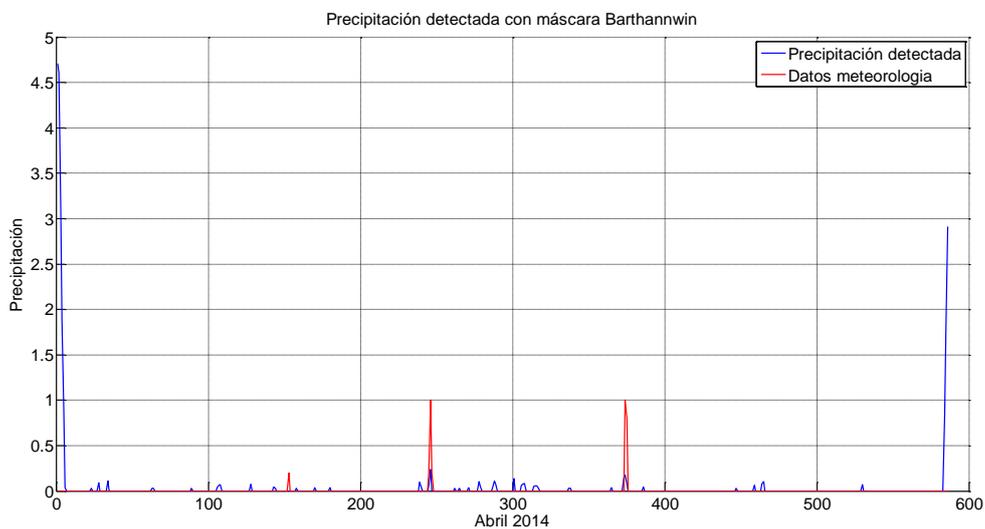


Fig. 5-21. Precipitación recogida y detectada utilizando máscara Barthannwin

En ambas gráficas podemos observar como los niveles de precipitación detectados no se corresponden con los datos de lluvia recogidos por la estación meteorológica, siendo

estos últimos muchos más grandes. Además, podemos observar tanto en las gráficas como en los datos mostrados en la tabla 5-8 que, aunque acertamos en torno al 70% (para algunas máscaras más), obtenemos un número significativo de False Positive. Esto se debe a que establecemos un umbral bajo para poder obtener el mayor número de True Positive posible.



# CAPÍTULO 6.

## EXPERIMENTOS Y RESULTADOS DE ESTIMACIÓN DE LLUVIA

En este capítulo realizamos experimentos de entrenamiento y test para dos radioenlaces utilizando los dos métodos de predicción desarrollados en el capítulo anterior. Para ello, se utilizarán un mes para realizar el entrenamiento y cinco meses, entre los que se encuentra también el de entrenamiento, para realizar el test. En una primera aproximación hacemos detección con posterior cuantificación. Y en una segunda, hacemos una primera detección para luego y a una segunda en la que se abordará reducir el número de falsos positivos (FP).

A continuación, desglosamos las abreviaturas que utilizamos a la hora de mostrar en tablas los resultados obtenidos:

- PRA: Precipitación Real Acumulada
- PEA: Precipitación Estimada Acumulada
- TP: True Positive
- FN: False Negative
- FP: False Positive
- TN: True Negative

## 6.1 Experimentos para la detección por sustracción de componentes de baja frecuencia

En este método de detección que vamos a utilizar en los experimentos es la detección por sustracción de componentes de baja frecuencia. La metodología es la siguiente:

- 1- Entrenamiento: cálculo de la ventana y el umbral óptimo para un radioenlace determinado.
- 2- Test: se realiza con los datos calculados de ventana y umbral del paso anterior. En este paso obtenemos datos como: precipitación detectada, nº total de eventos detectados, precipitación real, nº total de eventos reales, True Positive, False Negative, False Positive, True Negative y porcentaje de acierto todo esto de la misma hora. También obtenemos datos de True Positive y del porcentaje de acierto de una hora y una hora después.

### 6.1.1 Radioenlace Pico II – Moriscos

#### 6.1.1.1 Entrenamiento 1

Hemos elegido para entrenar el mes de Febrero de 2014 ya que era el mes con el que veníamos trabajando. Lo primero que debemos seleccionar, es la mejor ventana. Para esta selección utilizamos como criterio la opción que maximice el Área Bajo la Curva (AUC). De esta forma buscamos maximizar las detecciones correctas y minimizar las falsas alarmas (detecciones). El óptimo sucede con ventana 3, ya que nos proporciona un área de 0.82776 tal y como podemos observar en la figura 6-1. Nuestro código, también nos indica que el umbral óptimo es 0.0021.

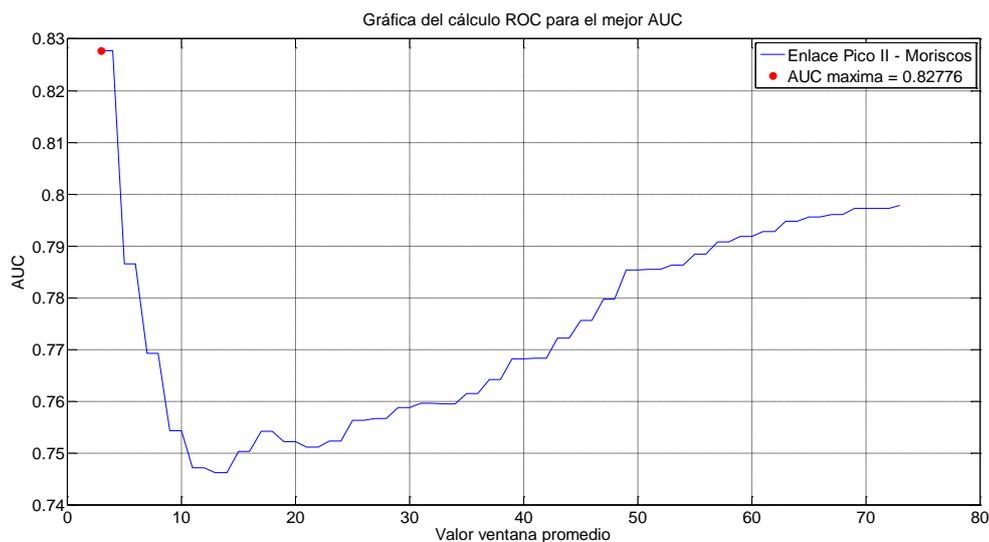


Fig. 6-1. Gráfica del valor de la AUC frente al valor de la ventana de promedio del entrenamiento 1

En la figura 6-2 podemos observar la curva ROC obtenida para la ventana óptima señalada en la figura anterior.

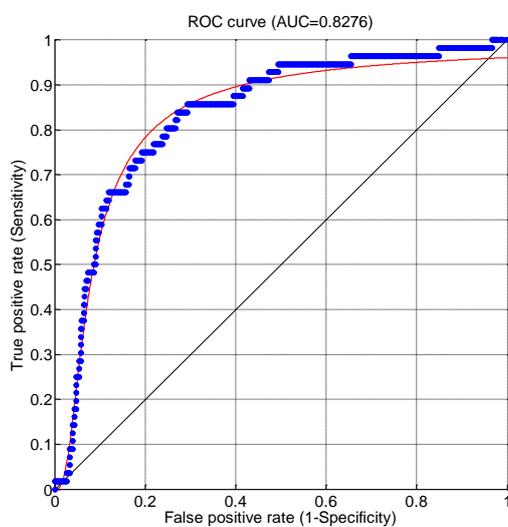


Fig. 6-2. Curva ROC del entrenamiento 1 para el radioenlace Pico II – Moriscos con una ventana de valor 3

### 6.1.1.2 Test 1

Con todo lo indicado en el apartado anterior de entrenamiento, realizamos un test con el que queremos comprobar el comportamiento de este método de detección. El test lo realizaremos desde el 1 de Enero de 2014 hasta el 31 de Mayo de 2014.

<b>Mes</b>		<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>
<b>Misma hora</b>	<b>Nº eventos reales</b>	187	56	15	17	2
	<b>Nº eventos detectados</b>	593	524	404	500	372
	<b>Nº total muestras</b>	612	540	443	539	418
	<b>TP</b>	186	56	15	17	2
	<b>FN</b>	1	0	0	0	0
	<b>FP</b>	407	468	389	483	370
	<b>TN</b>	18	16	39	39	46
	<b>% acierto</b>	99,47	100	100	100	100
	<b>PRA</b>	132,2	30	8,6	15,6	0,4
	<b>PEA</b>	7,37	1,46	0,33	0,63	0,01
<b>+/- 1 hora</b>	<b>TP</b>	187	56	15	17	2
	<b>% acierto</b>	100	100	100	100	100

Tabla 6-1. Resultados test 1 radioenlace Pico II - Moriscos

Observando la tabla anterior vemos que de manera generalizada detectamos una cantidad mucho mayor de eventos de precipitaciones de los que realmente son. Por poner un ejemplo, en Marzo detectamos 404 eventos de precipitación y según los datos recogidos por la estación meteorológica, solo se produjeron 15 eventos de lluvia. Esta cantidad de detecciones nos genera un gran número de False Positive (FP), rondando casi 400 cada mes. A pesar de ello, el número de True Positive (TP), False Negative (FN) y el porcentaje de acierto a la misma hora que hemos obtenido son unos buenos resultados, ya que este método ha conseguido detectar todas las precipitaciones reales a excepción de Enero, en la que hemos obtenido un False Negative. Este False Negative, lo hemos eliminado al examinar los datos meteorológicos una hora antes y una hora después buscando lluvias desplazadas por cuestiones de topografía y dirección de viento.

Asimismo, examinando los datos obtenidos de Precipitación Real Acumulada (PRA) y Precipitación Estimada Acumulada (PEA), vemos que se producen errores en las mediciones de precipitación a la misma hora, puesto que los valores estimados no se corresponden con los reales. Por ejemplo, en el mes de Enero se recogieron 132.2 mm de lluvia y en esas mismas horas, nuestro método de detección solo ha cuantificado 7,37 mm.

En la figuras 6-3 podemos ver las detecciones de precipitación realizadas para el mes de Enero de 2014, utilizando los datos obtenidos en el entrenamiento. Una de las cosas que destaca es que nuestro algoritmo tiene tendencia a subestimar los niveles de lluvia caída, esto es, dar valores menores que los reales. Por otro lado, el número de detecciones

es muy alto. En la figura 6-4 podemos observar dos claros ejemplos de True Positive y False Positive que encontramos en nuestras detecciones.

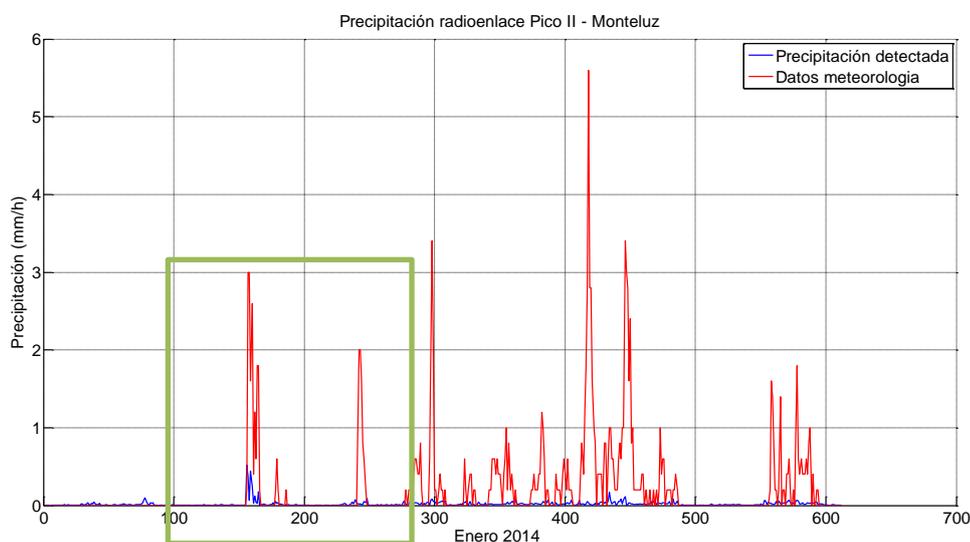


Fig. 6-3. Precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 1 para el radioenlace Pico II - Moriscos

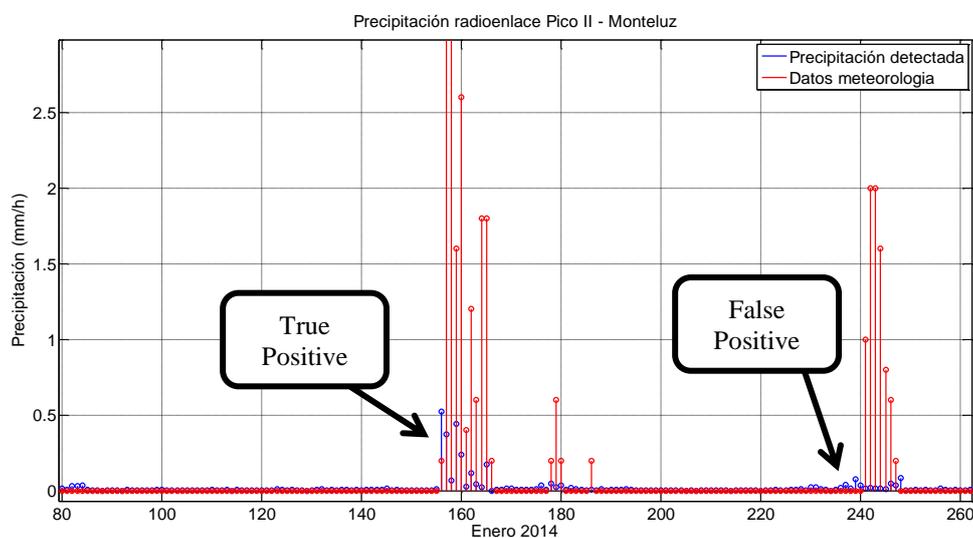


Fig. 6-4. Zoom de la precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 1 para el radioenlace Pico II – Moriscos

Como mencionamos anteriormente, en la tabla 6-1 podemos apreciar que nuestros niveles de cuantificación de lluvia estimada no se corresponden con la precipitación real recogida por la estación meteorológica. Por eso, hemos decidido realizar un histograma del

error de cuantificación producido comparando la lluvia real con la estimada. El resultado se puede ver en la figura siguiente.

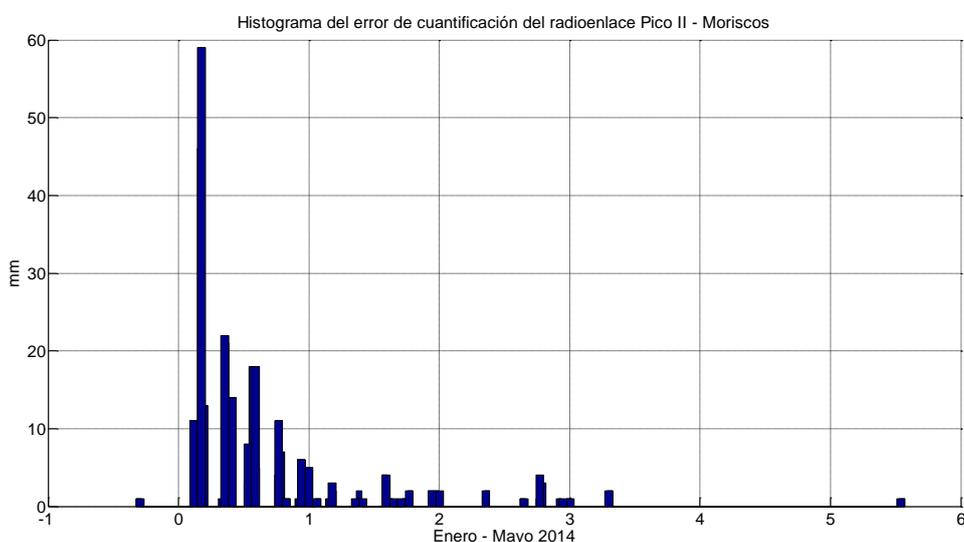


Fig. 6-5. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Pico II – Moriscos para el test 1

Una de las primeras cosas que saltan a la vista observando 6-5 es que se produce un error sistemático. Si conseguimos caracterizarlo podríamos minimizarlo. Para ello vamos a aplicar un factor de corrección en la lluvia estimada. El factor de corrección lo obtenemos de una estimación de la media a partir del histograma en la Fig. 6-5. El resultado es un factor de 0,6711 y aplicándolo a la cuantificación de la precipitación estimada, llevamos la media a cero. Generamos así unos resultados que podemos observar en la siguiente tabla.

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	187	56	15	17	2
	Nº eventos detectados	593	524	404	500	372
	Nº total muestras	612	540	443	539	418
	TP	186	56	15	17	2
	FN	1	0	0	0	0
	FP	407	468	389	483	370
	TN	18	16	39	39	46
	% acierto	99,47	100	100	100	100
	PRA	132,2	30	8,6	15,6	0,4
	PEA	132,2	39,05	10,4	12,04	1,35
+/- 1 hora	TP	187	56	15	17	2
	% acierto	100	100	100	100	100

Tabla 6-2. Resultados test 1 radioenlace Pico II – Moriscos aplicado el factor de corrección de 0,6711 en la cuantificación de la lluvia

Como podemos ver en la tabla 6-2 resaltado en negrita, los resultados obtenidos de precipitación estimada acumulada (PEA) una vez aplicado el factor de corrección mejoran enormemente en comparación con lo observado en la tabla 6-1. El resultado que más nos llama la atención es sin duda el de Enero, ya que obtenemos una precipitación estimada acumulada de 132,2 mm, siendo la precipitación real acumulada para este mismo mes de 132,2 mm.

### 6.1.1.3 Entrenamiento 2

Viendo los buenos resultados obtenidos en el primer test y con el objetivo de comprobar si los buenos resultados se extienden si utilizamos otro mes diferente para establecer ventana y umbral, hemos decidido realizar otro entrenamiento utilizando otro mes dentro de este periodo de tiempo y realizar a su vez otro test con los datos obtenidos. Hemos elegido utilizar el mes de Abril de 2014.

En la siguiente figura podemos observar que la ventana que mejor AUC nos ofrece es la ventana 3 con un valor de 0.97124, siendo su umbral de 0.0062.

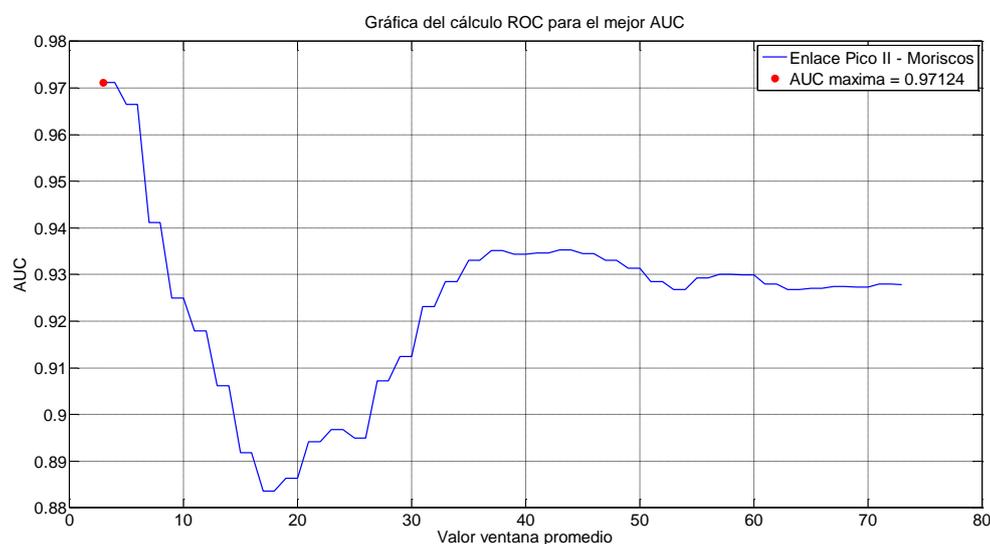


Fig. 6-6. Gráfica del valor de la AUC frente al valor de la ventana de promedio del entrenamiento 2

En la figura 6-7 podemos observar la curva ROC obtenida para la ventana óptima.

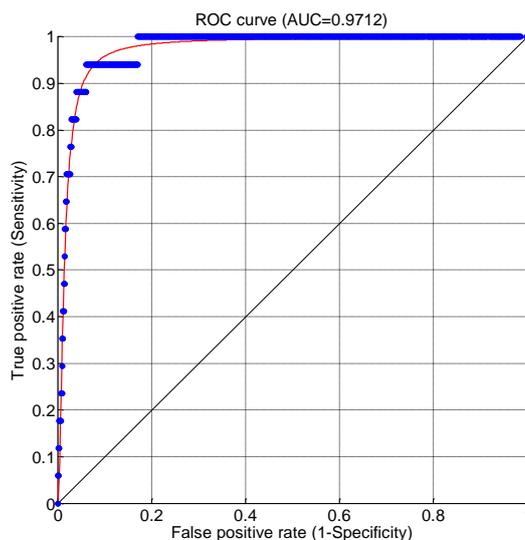


Fig. 6-7. Curva ROC del entrenamiento 2 para el radioenlace Pico II – Moriscos con una ventana de valor 3

### 6.1.1.4 Test 2

En este segundo test tomaremos como umbral el calculado en el apartado anterior y el periodo en el que lo realizaremos también es desde el 1 de Enero de 2014 hasta el 31 de Mayo de 2014.

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	<b>Nº eventos reales</b>	187	56	15	17	2
	<b>Nº eventos detectados</b>	423	386	267	327	258
	<b>Nº total muestras</b>	612	540	443	539	418
	<b>TP</b>	165	48	13	17	1
	<b>FN</b>	22	8	2	0	1
	<b>FP</b>	258	338	254	310	257
	<b>TN</b>	167	146	174	212	159
	<b>% acierto</b>	88,24	85,71	86,67	100	50
	<b>PRA</b>	124,4	24,2	8,2	15,6	0,2
	<b>PEA</b>	37,07	25,64	2,22	3,46	0,40
+/- 1 hora	<b>TP</b>	181	52	14	17	2
	<b>% acierto</b>	96,79	92,86	93,33	100	100

Tabla 6-3. Resultados test 2 radioenlace Pico II – Moriscos

Observando la tabla anterior vemos que, al igual que ocurrió en el test 1, detectamos una cantidad mucho mayor de eventos de precipitaciones de los que realmente recoge la estación meteorológica más cercana. Así, el número de False Positive sigue siendo muy alto, aunque ligeramente inferior a los obtenidos en el test 1. Por su parte el

número de False Negative, esto es lluvia real que no hemos detectado, si que ha aumentado, ocurriendo el mayor número en Enero con 22 False Negative. Esto conlleva que el número de True Positive no sea tan elevado como en el test 1 y, por lo tanto, el porcentaje de acierto a la misma hora ha disminuido. Esto se debe en gran medida al incremento del valor del umbral, pasamos de 0.82776 en el test 1 a 0.97124 en el test 2. Nuestras detecciones certeras aumentan si tenemos en cuenta los datos de meteorología una hora antes o una hora después, buscando lluvias desplazadas.

Los datos obtenidos de Precipitación Real Acumulada (PRA) y Precipitación Estimada Acumulada (PEA) siguen siendo bastante malos, puesto que al igual que en el test 1 se producen errores en las mediciones de precipitación a la misma hora y los valores obtenidos no se corresponden con los reales. Por ejemplo, en el mes de Enero se recogieron 124,4 mm de lluvia y en esas mismas horas, nuestro método de detección solo ha cuantificado 37,07 mm.

En la figuras 6-8 podemos ver las detecciones de precipitación realizadas para el mes de Enero de 2014, utilizando el valor de umbral calculado entrenando con el mes de Abril de 2014. La figura 6-9 es un zoom de la señal contenida en el recuadro y podemos observar dos ejemplos de True Positive, False Positive y False Negative que encontramos en nuestras detecciones.

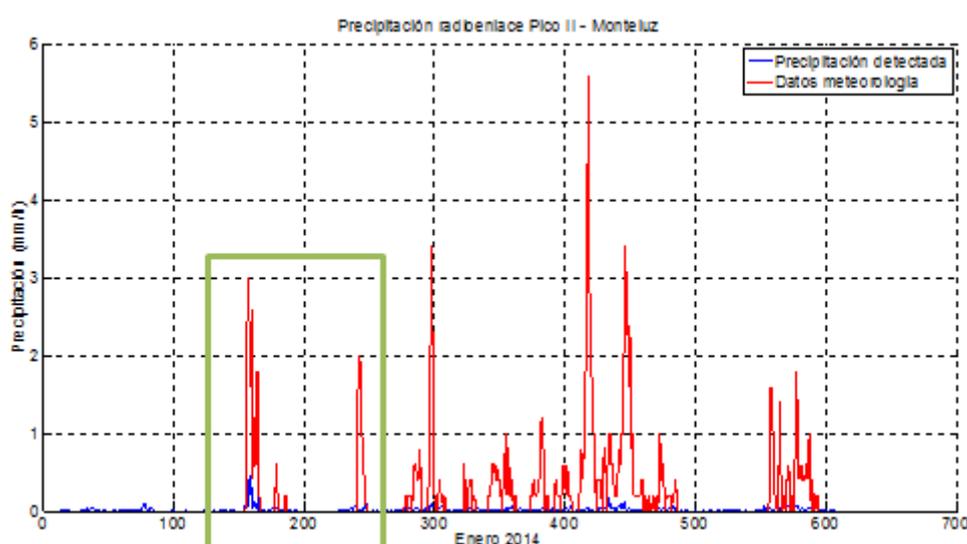


Fig. 6-8. Precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 2 para el radioenlace Pico II - Moriscos

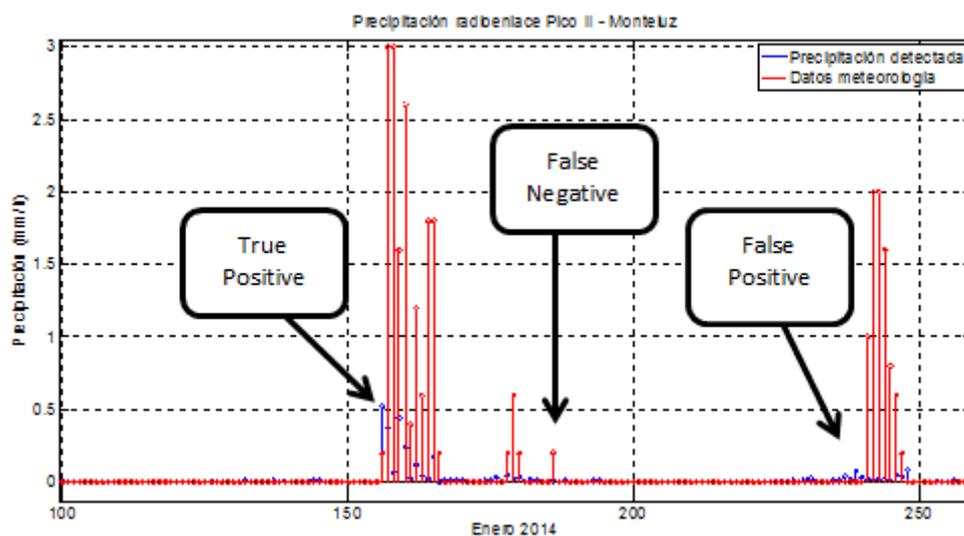


Fig. 6-9. Zoom de la precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 2 para el radioenlace Pico II – Moriscos

Al igual que en el test 1, hemos decidido realizar un histograma (figura 6-10) del error de cuantificación producido, ya que los niveles de cuantificación de lluvia estimada no se corresponden con la precipitación real recogida por la estación meteorológica.

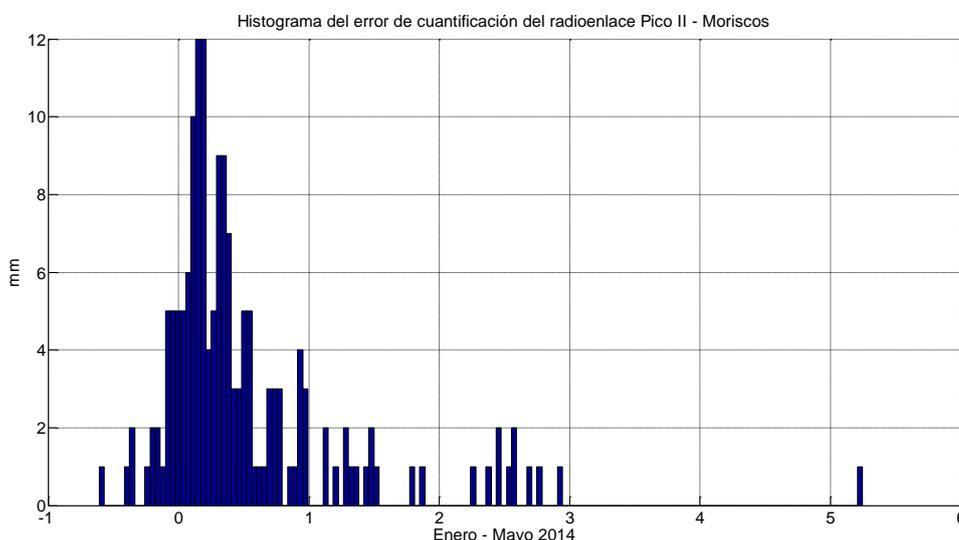


Fig. 6-10. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Pico II – Moriscos para el test 2

Para este test, al observar el histograma anterior nos damos cuenta que también se produce un error sistemático. Por lo que, siguiendo el mismo procedimiento que en el test

1, y con el objetivo de minimizarlo, obtenemos un factor de corrección de la lluvia estimada de 0,6637. Los resultados obtenidos de su aplicación podemos observarlos en la siguiente tabla.

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	187	56	15	17	2
	Nº eventos detectados	423	386	267	327	258
	Nº total muestras	612	540	443	539	418
	TP	165	48	13	17	1
	FN	22	8	2	0	1
	FP	258	338	254	310	257
	TN	167	146	174	212	159
	% acierto	88,24	85,71	86,67	100	50
	PRA	<b>124,4</b>	<b>24,2</b>	<b>8,2</b>	<b>15,6</b>	<b>0,2</b>
	PEA	<b>124,4</b>	<b>38,63</b>	<b>10,28</b>	<b>11,91</b>	<b>1,34</b>
+/- 1 hora	TP	181	52	14	17	2
	% acierto	96,79	92,86	93,33	100	100

Tabla 6-4. Resultados test 2 radioenlace Pico II – Moriscos aplicado el factor de corrección de 0,6637 en la cuantificación de la lluvia

Como podemos ver en la tabla 6-4 resaltado en negrita, los resultados obtenidos de precipitación estimada acumulada (PEA) una vez aplicado el factor de corrección mejoran enormemente en comparación con lo observado en la tabla 6-3, al igual que ocurrió en el test 1.

## 6.1.2 Radioenlace Monteluz – Hospital Militar

### 6.1.2.1 Entrenamiento 1

Hemos elegido para entrenar el mes de Febrero de 2014 ya que era el mes con el que veníamos trabajando. Lo primero que debemos seleccionar, es la mejor ventana. Para esta selección utilizamos como criterio la opción que maximice el Área Bajo la Curva (AUC). De esta forma buscamos maximizar las detecciones correctas y minimizar las falsas alarmas (detecciones). El óptimo sucede con ventana 45, ya que nos proporciona un área de 0.0029 tal y como podemos observar en la figura 6-11. Nuestro código, también nos indica que el umbral óptimo es 0.0021.

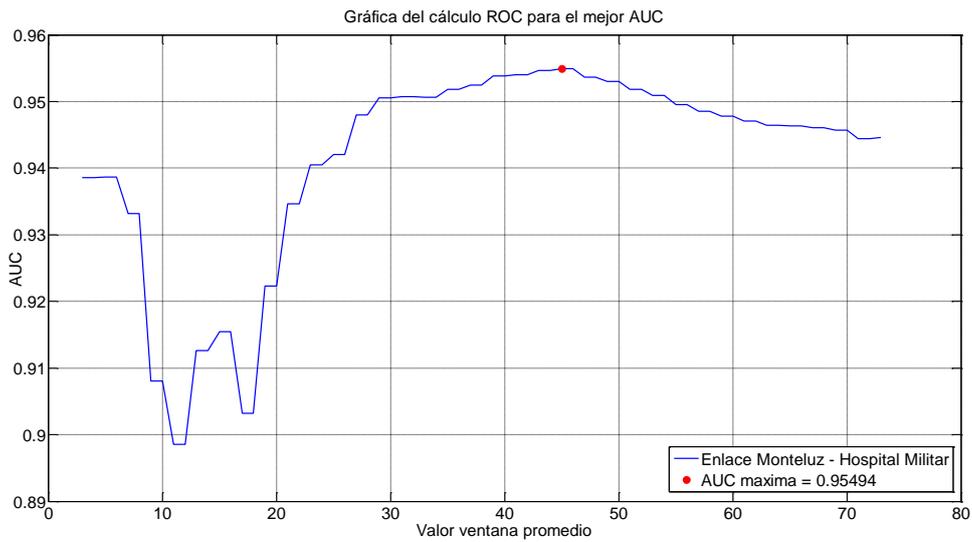


Fig. 6-11. Gráfica del valor de la AUC frente al valor de la ventana de promedio del entrenamiento

1

En la siguiente figura podemos observar la curva ROC obtenida para la ventana óptima con el valor de su área AUC.

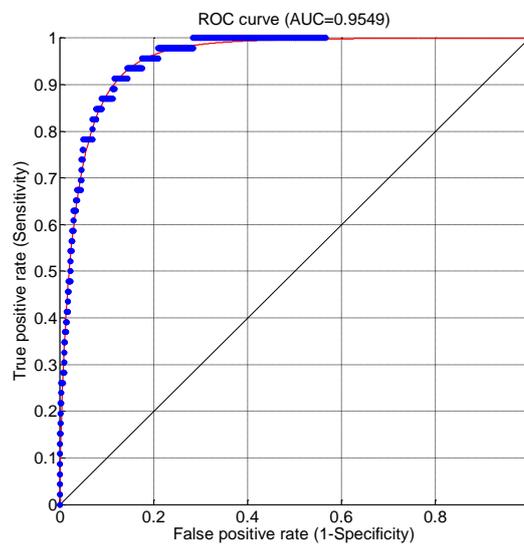


Fig. 6-12. Curva ROC del entrenamiento 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar con una ventana de valor 45

6.1.2.2 Test 1

Con todo lo indicado en el apartado de entrenamiento anterior, realizamos el primer test, que abarca los meses de Enero a Mayo de 2014. En la siguiente tabla podemos observar los resultados obtenidos.

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	62	46	6	6	4
	Nº eventos detectados	210	192	120	158	125
	Nº total muestras	574	560	438	586	510
	TP	55	46	5	5	4
	FN	7	0	1	1	0
	FP	155	146	115	153	121
	TN	357	368	317	427	385
	% acierto	88,71	100	83,33	83,33	100
	PRA	45,8	50	1,4	3,2	1,6
	PEA	7,33	7,03	0,34	0,33	0,40
+/- 1 hora	TP	55	46	6	5	1
	% acierto	88,71	100	100	83,33	25

Tabla 6-5. Resultados test 1 radioenlace Monteluz – Hospital Militar

Observando la tabla vemos que, al igual que ocurre con el radioenlace Pico II – Moriscos, detectamos una cantidad mucho mayor de eventos de precipitaciones de los que realmente son. Por poner un ejemplo, en Marzo detectamos 120 eventos de precipitación y según los datos recogidos por la estación meteorológica, solo se produjeron 6 eventos de lluvia. Esta cantidad de detecciones nos genera un gran número de False Positive (FP). Sin embargo, el número de True Positive (TP), False Negative (FN) y el porcentaje de acierto a la misma hora que hemos obtenido son unos buenos resultados, ya que este método ha conseguido detectar casi todas las precipitaciones contando excepciones como la que encontramos en Enero, en la que hemos obtenido 7 False Negative. Además, también examinamos los datos una hora antes y una hora después buscando lluvias desplazadas por cuestiones de topografía y dirección de viento. El mes de Marzo es un ejemplo, puesto que teníamos un False Negative y después de comprobar +/- 1 hora lo podemos clasificar como True Positive.

Examinando los datos obtenidos de Precipitación Real Acumulada (PRA) y Precipitación Estimada Acumulada (PEA), vemos que se producen errores en las mediciones de precipitación a la misma hora, puesto que los valores estimados no se

## Experimentos y resultados de estimación de lluvia

corresponden con los reales. Por ejemplo, en el mes de Enero se recogieron 48,8 mm de lluvia y en esas mismas horas, nuestro método de detección solo ha cuantificado 7,33 mm.

En la figuras 6-13 podemos ver las detecciones de precipitación realizadas para el mes de Enero de 2014, utilizando los datos obtenidos en el entrenamiento. Además, en la figura 6-14 podemos observar dos claros ejemplos de True Positive y False Positive que encontramos en nuestras detecciones.

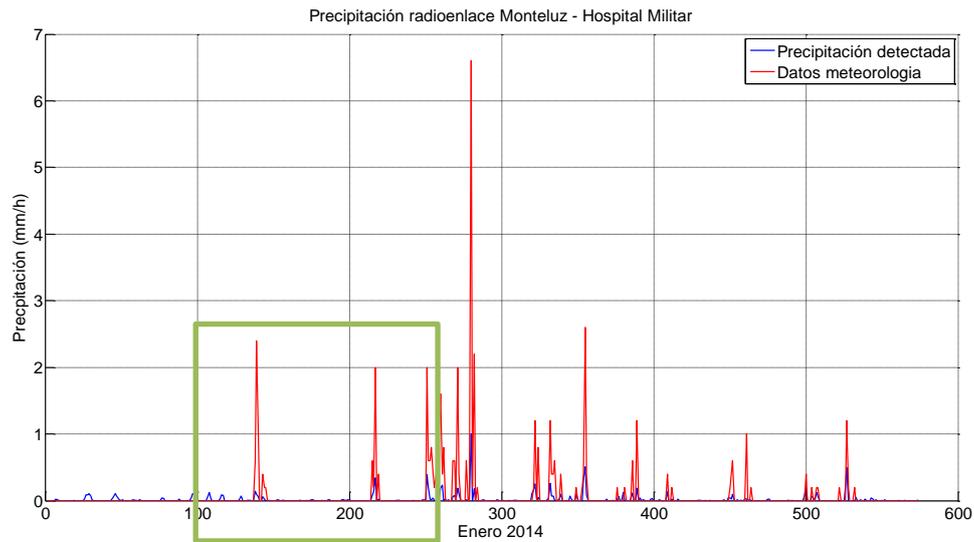


Fig. 6-13. Precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

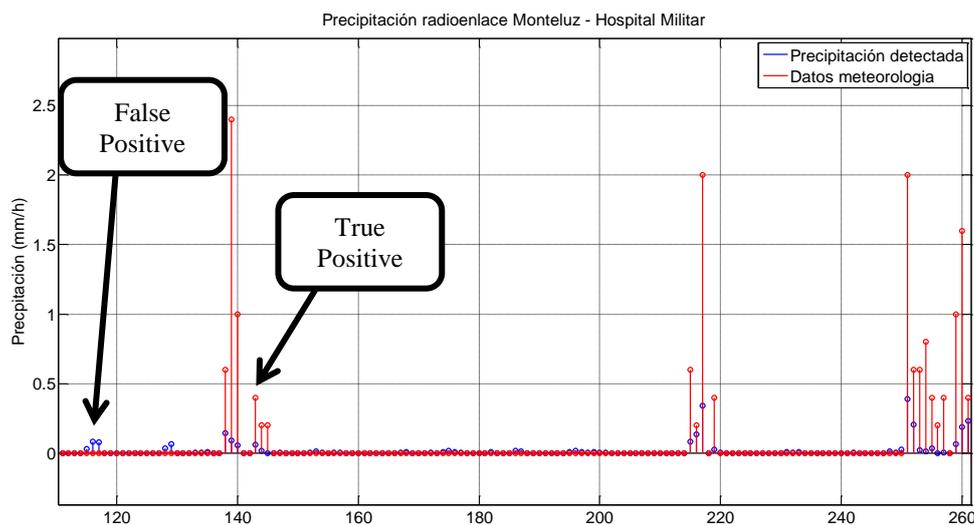


Fig. 6-14. Zoom de la precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

Al igual que para el radioenlace anterior, hemos decidido realizar un histograma (figura 6-15) del error de cuantificación producido, ya que los niveles de cuantificación de lluvia estimada son menores que la precipitación real recogida por la estación meteorológica.

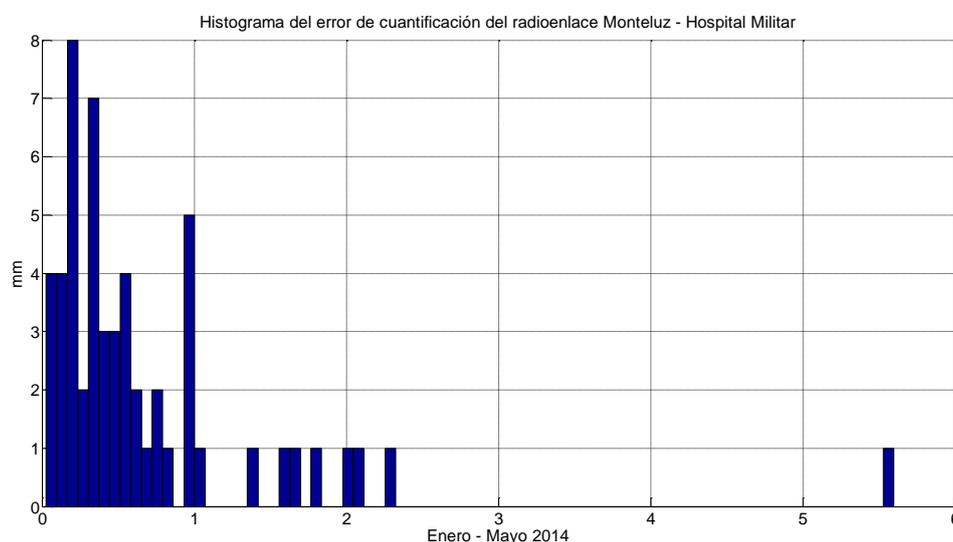


Fig. 6-15. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Monteluz – Hospital Militar para el test 1

Una de las primeras cosas que saltan a la vista observando la figura 6-15 es que se produce un error sistemático, al igual que en los test anteriores. Si conseguimos caracterizarlo podríamos minimizarlo. Para ello vamos a aplicar un factor de corrección en la lluvia estimada. El factor de corrección lo obtenemos de una estimación de la media a partir del histograma en la Fig. 6-15. El resultado es un factor de 0.994 y aplicándolo a la cuantificación de la precipitación estimada, llevamos la media a cero. Generamos así unos resultados que podemos observar en la tabla 6-6.

En la tabla resaltada en negrita están los resultados obtenidos precipitación real acumulada (PRA) y de precipitación estimada acumulada (PEA) una vez aplicado el factor de corrección. Estos resultados mejoran enormemente en comparación con lo observado en la tabla 6-5. Al igual que en los test anteriores, vemos que la cuantificación estimada para el mes de Enero se ha ajustado muy bien, siendo esta de 45,8 mm.

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	62	46	6	6	4
	Nº eventos detectados	210	192	120	158	125
	Nº total muestras	574	560	438	586	510
	TP	55	46	5	5	4
	FN	7	0	1	1	0
	FP	155	146	115	153	121
	TN	357	368	317	427	385
	% acierto	88,71	100	83,33	83,33	100
	PRA	45,8	50	1,4	3,2	1,6
	PEA	45,8	39,20	3,84	3,83	3,19
+/- 1 hora	TP	55	46	6	5	1
	% acierto	88,71	100	100	83,33	25

Tabla 6-6. Resultados test 1 radioenlace Monteluz – Hospital Militar aplicado el factor de corrección de 0.994 en la cuantificación de la lluvia

### 6.1.2.3 Entrenamiento 2

Para el segundo entrenamiento con este radioenlace hemos elegido el mes de Marzo de 2014. El procedimiento es similar al explicado en el apartado 6.1.2.1. Seleccionamos la mejor ventana utilizando como criterio la opción que maximice el Área Bajo la Curva (AUC). De esta forma buscamos maximizar las detecciones correctas y minimizar las falsas alarmas (detecciones). La ventana óptima es 45 con un umbral de 0,00047 como podemos observar en la figura 6-16.

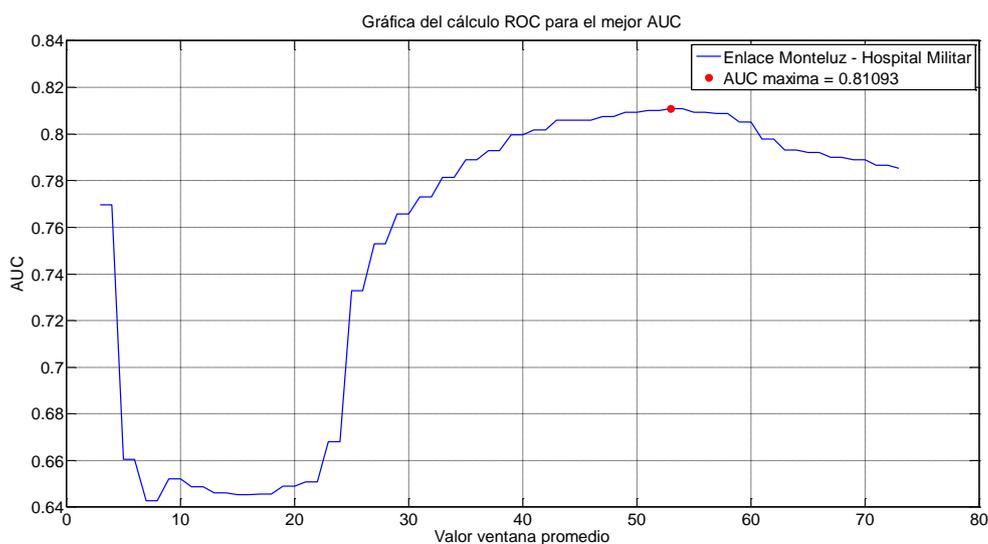


Fig. 6-16. Gráfica del valor de la AUC frente al valor de la ventana de promedio del entrenamiento

En la siguiente figura podemos observar la curva ROC obtenida para la ventana óptima con el valor de su área AUC.

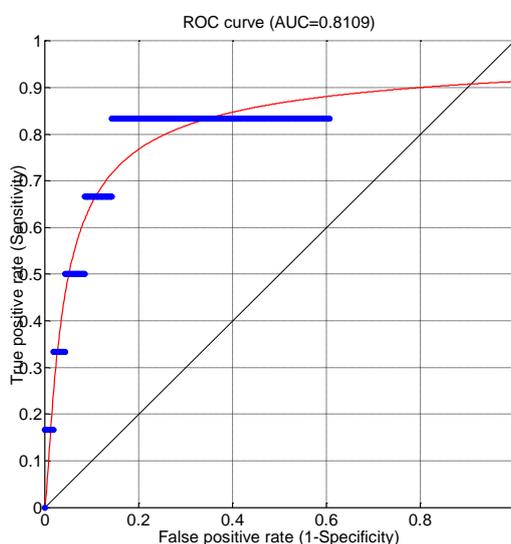


Fig. 6-17. Curva ROC del entrenamiento 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar con una ventana de valor 53

### 6.1.2.4 Test 2

Con todo lo indicado en el apartado de entrenamiento anterior realizamos el test que abarca los meses de Enero a Mayo de 2014. En la siguiente tabla podemos observar los resultados obtenidos.

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	62	46	6	6	4
	Nº eventos detectados	573	559	438	586	510
	Nº total muestras	574	560	438	586	510
	TP	62	46	6	6	4
	FN	0	0	0	0	0
	FP	511	513	432	580	506
	TN	1	1	0	0	0
	% acierto	100	100	100	100	100
	PRA	47,2	50	1,6	3,4	1,6
	PEA	7,70	7,45	0,38	0,36	0,40
+/- 1 hora	TP	62	46	6	6	4
	% acierto	100	100	100	100	100

Tabla 6-7. Resultados test 2 radioenlace Monteluz – Hospital Militar

Observando la tabla anterior vemos que, en comparación con el test 1, detectamos una cantidad aún mayor de eventos de precipitaciones de los que realmente recoge la estación meteorológica más cercana. Para este test, el número de False Positive es enorme, rondando los 500 en casi todos los meses. Por su parte el número de False Negative, esto es lluvia real que no hemos detectado, es cero. Lo cual conlleva que el número de True Positive y el porcentaje de acierto a la misma hora sean de 100% para todos los meses.

A pesar de este porcentaje de acierto tan elevado, los datos obtenidos de Precipitación Real Acumulada (PRA) y Precipitación Estimada Acumulada (PEA) siguen siendo malos. Por ejemplo, en el mes de Enero se recogieron 47,2 mm de lluvia y en esas mismas horas, nuestro método de detección solo ha cuantificado 7,7 mm.

En la figuras 6-18 podemos ver las detecciones de precipitación realizadas para el mes de Enero de 2014, utilizando el valor de umbral calculado entrenando con el mes de Marzo de 2014. La figura 6-19 es un zoom de la señal contenida en el recuadro y podemos observar varios ejemplos de True Positive, False Positive y False Negative que encontramos en nuestras detecciones.

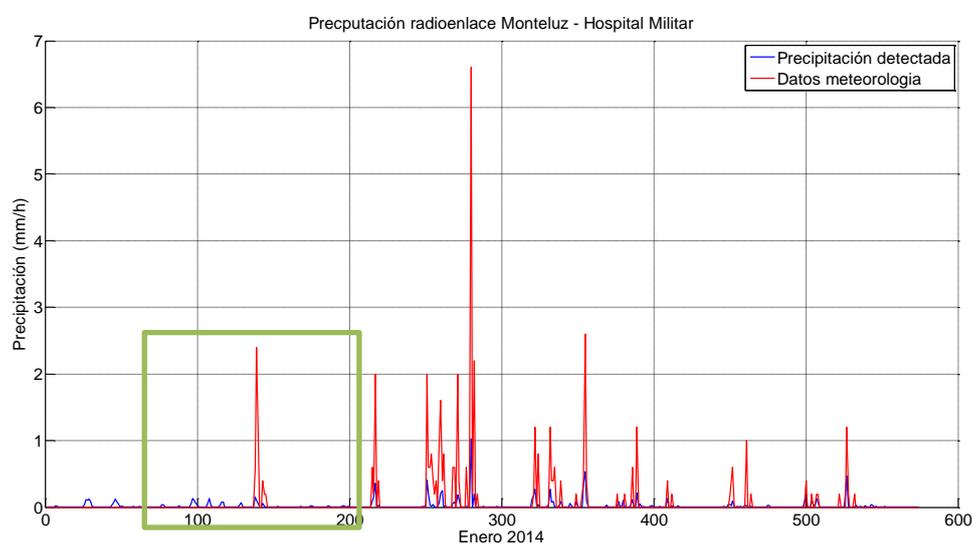


Fig. 6-18. Precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

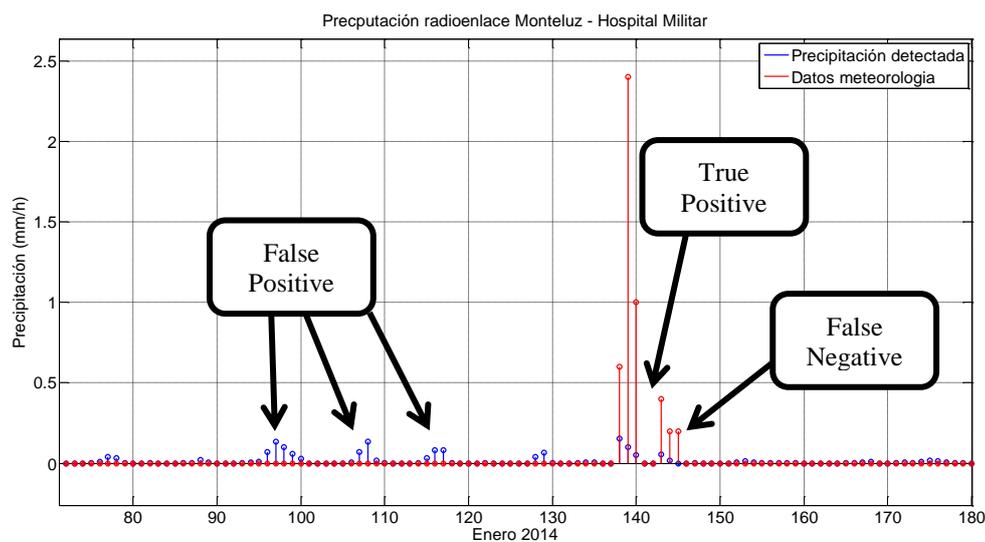


Fig. 6-19. Zoom de la precipitación detectada por el método de sustracción de componentes de baja frecuencia en el test 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

Al igual que en todos los test anteriores, hemos decidido realizar un histograma (figura 6-20) del error de cuantificación producido, ya que los niveles de cuantificación de lluvia estimada no se corresponden con la precipitación real recogida por la estación meteorológica.

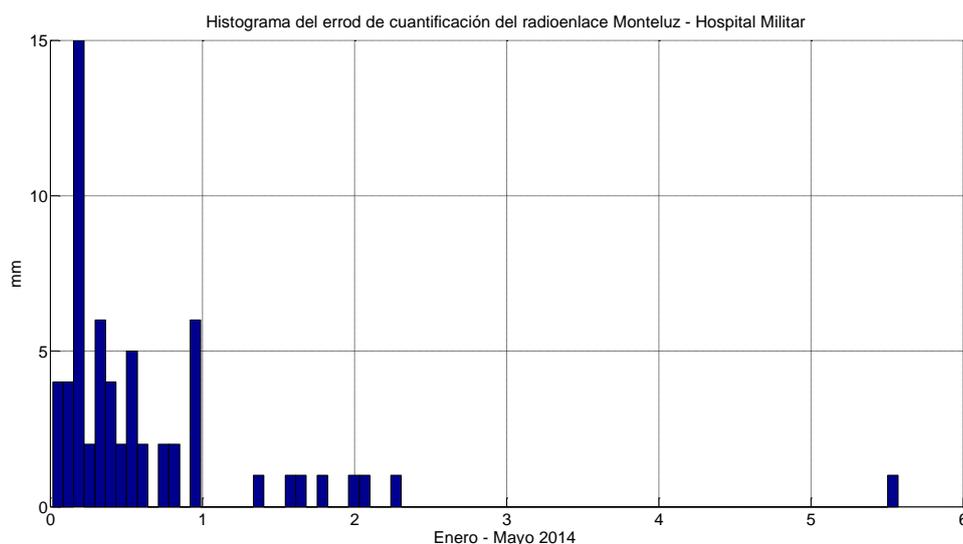


Fig. 6-20. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Monteluz – Hospital Militar para el test 2

## Experimentos y resultados de estimación de lluvia

Al observar el histograma anterior nos damos cuenta que también se produce un error sistemático. Por lo que, siguiendo el mismo procedimiento que en los test anteriores, y con el objetivo de minimizarlo, obtenemos un factor de corrección de la lluvia estimada de 0.6371. Los resultados obtenidos de su aplicación podemos observarlos en a siguiente tabla.

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	<b>N° eventos reales</b>	62	46	6	6	4
	<b>N° eventos detectados</b>	573	559	438	586	510
	<b>N° total muestras</b>	574	560	438	586	510
	<b>TP</b>	62	46	6	6	4
	<b>FN</b>	0	0	0	0	0
	<b>FP</b>	511	513	432	580	506
	<b>TN</b>	1	1	0	0	0
	<b>% acierto</b>	100	100	100	100	100
	<b>PRA</b>	<b>47,2</b>	<b>50</b>	<b>1,6</b>	<b>3,4</b>	<b>1,6</b>
	<b>PEA</b>	<b>47,2</b>	<b>36,75</b>	<b>4,20</b>	<b>4,18</b>	<b>2,95</b>
+/- 1 hora	<b>TP</b>	62	46	6	6	4
	<b>% acierto</b>	100	100	100	100	100

Tabla 6-8. Resultados test 2 radioenlace Monteluz – Hospital Militar aplicado el factor de corrección de 0.6371 en la cuantificación de la lluvia

Como podemos ver en la tabla 6-8 resaltado en negrita, los resultados obtenidos de precipitación estimada acumulada (PEA) una vez aplicado el factor de corrección mejoran enormemente en comparación con lo observado en la tabla 6-7. Al igual que en todos los test anteriores, el mejor resultado de cuantificación lo obtenemos en el mes de Enero, calculando una precipitación estimada acumulada de 47,2 mm y siendo la precipitación real acumulada para este mismo mes de 47,2 mm.

## 6.2 Experimentos para la detección por comparación de patrones

A continuación utilizamos el método de detección por comparación de patrones cuya metodología es la siguiente:

- 1- Entrenamiento: cálculo del valor de la AUC y el umbral óptimo de cinco máscaras para un radioenlace determinado.
- 3- Test: se realiza con los datos de umbral óptimo obtenidos en el paso anterior. En este paso obtenemos los siguientes datos: precipitación detectada, nº total de eventos detectados, precipitación real, nº total de eventos reales, True Positive, False Negative, False Positive, True Negative y porcentaje de acierto todo esto de la misma hora. También obtenemos datos de True Positive y del porcentaje de acierto de una 1 hora y una hora después.

Es importante recordar que nos interesa tener el máximo de True Positive y el mínimo posible de False Negative, por lo que debemos elegir bien la máscara. A priori no somos capaces de determinar cuál de todas ellas nos dará los mejores resultados, por lo que comprobaremos cuál de todas nos ofrece unos mejores resultados.

Además, con el fin de poder comparar ambas metodologías, se utilizan los mismos radioenlaces con los mismos meses de entrenamiento y test que utilizamos en el apartado 6.1.

## 6.2.1 Radioenlace Pico II – Moriscos

### 6.2.1.1 Entrenamiento 1

Para la realización de este entrenamiento hemos escogido el mismo mes que en el primer entrenamiento del método de detección anterior. Es decir, utilizamos el mes de Febrero de 2014 para el primer entrenamiento con este radioenlace.

En la siguiente tabla podemos observar los valores de AUC y umbrales que hemos obtenido para cada máscara.

Nombre Mascara	Valor AUC	Umbral
Pulso	0,91	0,02
Trapezio	0,91	0,01
Hamming	0,90	0,01
Barthannwin	0,90	0,01
Nuttallwin	0,91	0,03

Tabla 6-9. Valores de AUC y umbral para diferentes máscaras del entenamiento 1 del radioenlace

Pico II – Moriscos

### 6.2.1.2 Test 1

Para realizar este primer test hemos utilizado, al igual que con el anterior método de detección, el periodo de Enero a Mayo de 2014. Así mismo, en un primer momento elegimos utilizar la máscara Nuttallwin, cuyos resultados podemos ver en la tabla 6-10. Pero, como nuestro objetivo es obtener el mayor número de detecciones certeras (True Positive) y el mínimo posible de False Negative, hemos realizado el test con todas las máscaras obteniendo los mejores resultados con la máscara Hamming y sus resultados podemos observarlos en la tabla 6-11.

Como vemos, la diferencia entre ambas máscaras es sustancial debido a que con la máscara Hamming detectamos correctamente diez eventos de meteorología que con Nuttallwin habíamos clasificado como False Negative.

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	187	56	15	17	2
	Nº eventos detectados	235	197	121	139	129
	Nº total muestras	612	540	443	539	418
	TP	101	38	10	12	1
	FN	86	18	5	5	1
	FP	134	159	111	127	128
	TN	291	325	317	395	288
	% acierto	54,01	67,86	66,67	70,59	50
	PRA	90,8	21,6	7,6	13	0,2
	PEA	30,19	15,36	2,13	3,68	0,51
+/- 1 hora	TP	136	46	13	15	1
	% acierto	72,73	82,14	86,67	88,24	50

Tabla 6-10. Resultado máscara Nuttallwin del test 1 para el radioenlace Pico II - Moriscos

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	187	56	15	17	2
	Nº eventos detectados	279	238	183	229	176
	Nº total muestras	612	540	443	539	418
	TP	111	38	10	13	1
	FN	76	18	5	4	1
	FP	168	200	173	216	175
	TN	257	284	255	306	241
	% acierto	59,36	67,86	66,67	76,47	50
	PRA	96,8	21	7,6	14,8	0,2
	PEA	31,09	15,77	2,19	3,76	0,53
+/- 1 hora	TP	146	45	13	15	2
	% acierto	78,07	80,36	86,67	88,24	100

Tabla 6-11. Resultado máscara Hamming del test 1 para el radioenlace Pico II - Moriscos

Observar los resultados obtenidos con la máscara Hamming podemos apreciar que el número de detecciones de eventos es de más del doble para algunos los meses. El número de False Positive es elevado, pero no tan elevando como los obtenidos con el método anterior. Lo que sí cabe destacar, es que el número de aciertos (True Positive) no es tan elevado y esto nos acarrea un alto número de False Negative y un bajo porcentaje de acierto en las detecciones. Aunque examinando los datos una hora antes y una hora después el número de True Positive aumenta y, por lo tanto, el porcentaje de acierto.

Asimismo, examinando los datos obtenidos de Precipitación Real Acumulada (PRA) y Precipitación Estimada Acumulada (PEA), vemos que se producen errores en las mediciones de precipitación a la misma hora, puesto que los valores estimados no se corresponden con los reales. Por ejemplo, en el mes de Enero se recogieron 96,8 mm de lluvia y en esas mismas horas, nuestro método de detección solo ha cuantificado 31,09 mm.

En la figuras 6-21 podemos ver las detecciones de precipitación realizadas para el mes de Enero de 2014, utilizando los datos obtenidos en el entrenamiento anterior. Además, en la figura 6-22 podemos observar ejemplos de True Positive, False Positive y False Negative que encontramos en nuestras detecciones.

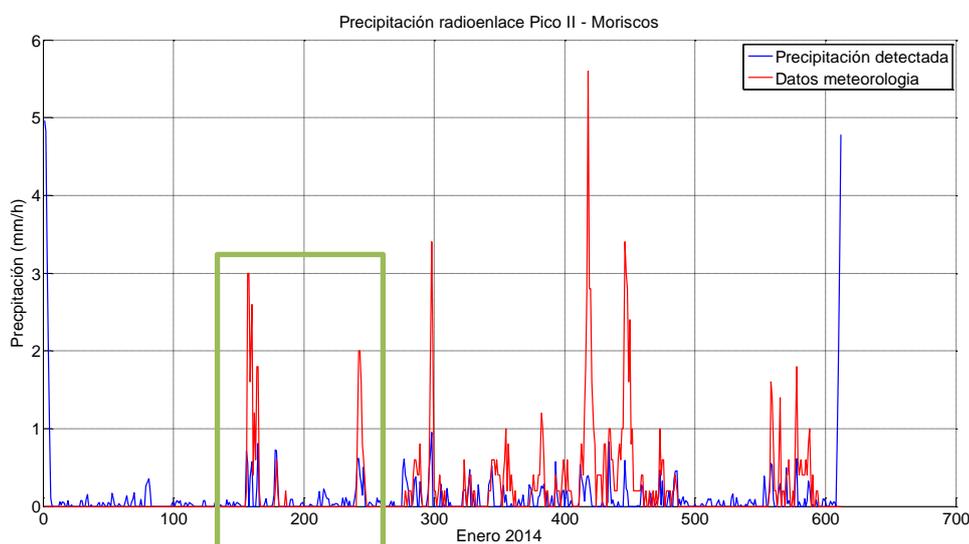


Fig. 6-21. Precipitación detectada por el método de comparación de patrones con la máscara Hamming en el test 1 para el radioenlace Pico II - Moriscos

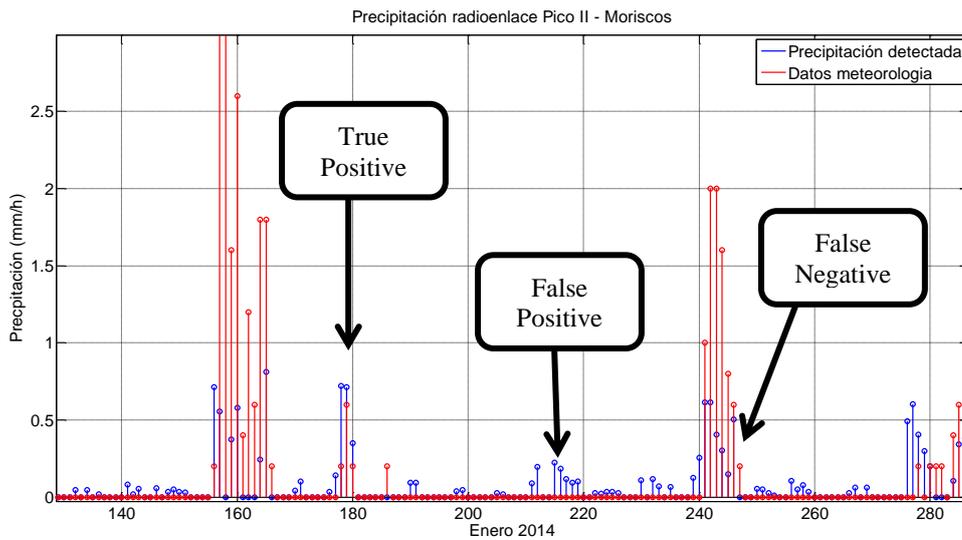


Fig. 6-22. Zoom de la precipitación detectada por el método comparación de patrones con la máscara Hamming en el test 1 para el radioenlace Pico II – Moriscos

Como mencionamos anteriormente, en la tabla 6-11 podemos apreciar que nuestros niveles de cuantificación de lluvia estimada no se corresponden con la precipitación real recogida por la estación meteorológica. Por eso, realizamos un histograma del error de cuantificación producido comparando la lluvia real con la estimada. El resultado se puede ver en la figura siguiente.

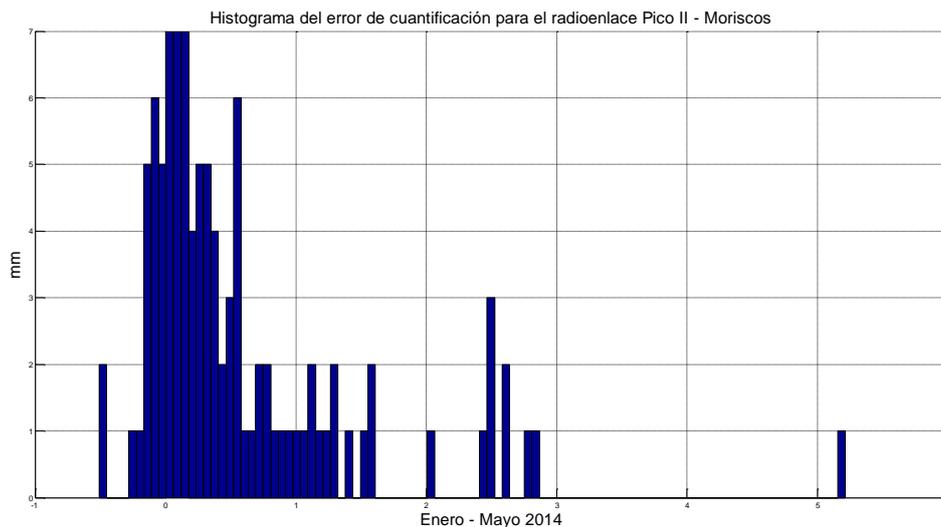


Fig. 6-23. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Pico II –Moriscos para el test 1 y máscara Hamming

De esta manera, aplicamos un factor de corrección de 0,5920 en la lluvia estimada corriendo así los datos obtenidos. Podemos ver los resultados en la siguiente tabla.

Como podemos observar en la tabla 6-12, los datos de precipitación estimada acumulada mejoran bastante. Hemos pasado de estimar 31,09 mm para Enero de 2014 a estimar 96,8 mm para el mismo mes, siendo la precipitación real acumulada a lo largo del mes la misma que la estimada. Es importante añadir, que aunque para el mes de Enero los datos de precipitación estimada y real se ajustan bastante, para los otros meses no es así. Encontrándonos meses en los que la precipitación estimada acumulada es mayor que la precipitación real estimada, como pasa para el mes de Febrero, donde nos encontramos 38,26 mm de precipitación estimada frente a 21 mm de precipitación real.

<b>Mes</b>		<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>
<b>Misma hora</b>	<b>Nº eventos reales</b>	187	56	15	17	2
	<b>Nº eventos detectados</b>	279	238	183	229	176
	<b>Nº total muestras</b>	612	540	443	539	418
	<b>TP</b>	111	38	10	13	1
	<b>FN</b>	76	18	5	4	1
	<b>FP</b>	168	200	173	216	175
	<b>TN</b>	257	284	255	306	241
	<b>% acierto</b>	59,36	67,86	66,67	76,47	50
	<b>PRA</b>	<b>96,8</b>	<b>21</b>	<b>7,6</b>	<b>14,8</b>	<b>0,2</b>
	<b>PEA</b>	<b>96,8</b>	<b>38,26</b>	<b>8,11</b>	<b>11,46</b>	<b>1,12</b>
<b>+/- 1 hora</b>	<b>TP</b>	146	45	13	15	2
	<b>% acierto</b>	78,07	80,36	86,67	88,24	100

Tabla 6-12. Resultados test 1 con máscara Hamming del radioenlace Pico II – Moriscos aplicado el factor de corrección de 0.6371 en la cuantificación de la lluvia

### 6.2.1.3 Entrenamiento 2

Para este segundo entrenamiento hemos utilizado el mes Abril 2014 para la obtención de los umbrales. En la tabla 6-8 podemos observar los resultados.

<b>Nombre Mascara</b>	<b>Valor AUC</b>	<b>Umbral</b>
<b>Pulso</b>	0,917	0,004
<b>Trapezio</b>	0,896	0,006
<b>Hamming</b>	0,917	0,022
<b>Barthannwin</b>	0,917	0,018
<b>Nuttallwin</b>	0,944	0,035

Tabla 6-13. Valores de AUC y umbral para diferentes máscaras del entrenamiento 2 del radioenlace Pico II – Moriscos

### 6.2.1.4 Test 2

Para este segundo test también hemos utilizado el periodo de Enero a Mayo de 2014. En la siguiente tabla mostramos los resultados obtenidos con la máscara Nuttallwin, que es la que mejores resultados nos ha ofrecido en este test.

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	187	56	15	17	2
	Nº eventos detectados	227	184	109	127	114
	Nº total muestras	612	540	443	539	418
	TP	101	37	10	11	1
	FN	86	19	5	6	1
	FP	126	147	99	116	113
	TN	299	337	329	406	303
	% acierto	54,01	66,07	66,67	64,71	50
	PRA	90,8	21,4	7,6	12,6	0,2
	PEA	30,19	15,33	2,13	3,64	0,51
+/- 1 hora	TP	136	45	13	14	1
	% acierto	72,73	80,36	86,67	82,35	50

Tabla 6-14. Resultado máscara Nuttallwin del test 2 para el radioenlace Pico II - Moriscos

Comparando estos resultados con los resultados del test 1 podemos concluir que son peores, porque las detecciones certeras han disminuido y los falsos negativos (False Negative) han aumentado. Asimismo, en la figura 6-24 podemos observar una gráfica de las detecciones realizadas en el mes de Enero de 2014 junto con las precipitaciones recogidas por la estación meteorológica.

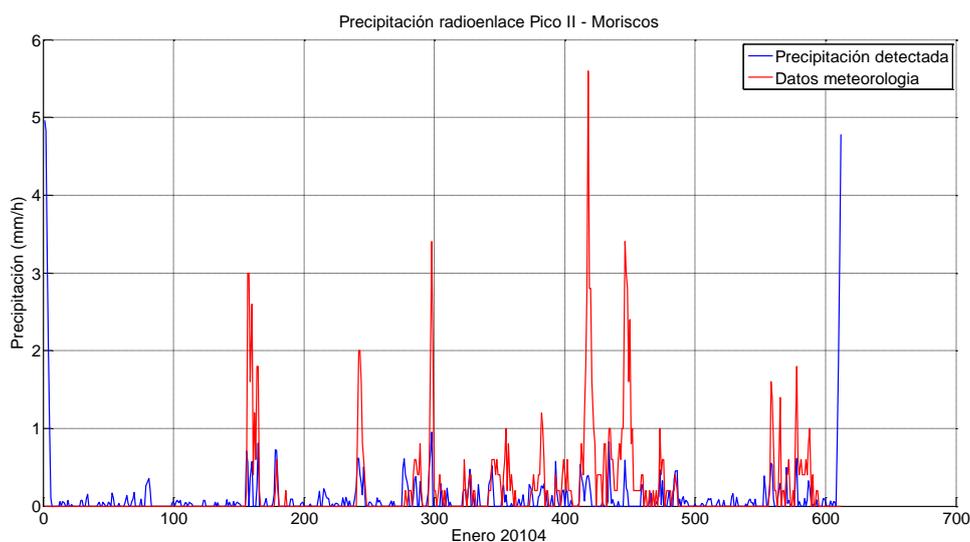


Fig. 6-24. Precipitación detectada por el método de comparación de patrones con la máscara Nuttallwin en el test 2 para el radioenlace Pico II – Moriscos

Al igual que en el test 1, observando la tabla 6-14 podemos apreciar que nuestros niveles de cuantificación de lluvia estimada no se corresponden con la precipitación real recogida por la estación meteorológica. Por eso, realizamos un histograma del error de cuantificación producido comparando la lluvia real con la estimada, que podemos observar en la figura 6-25.

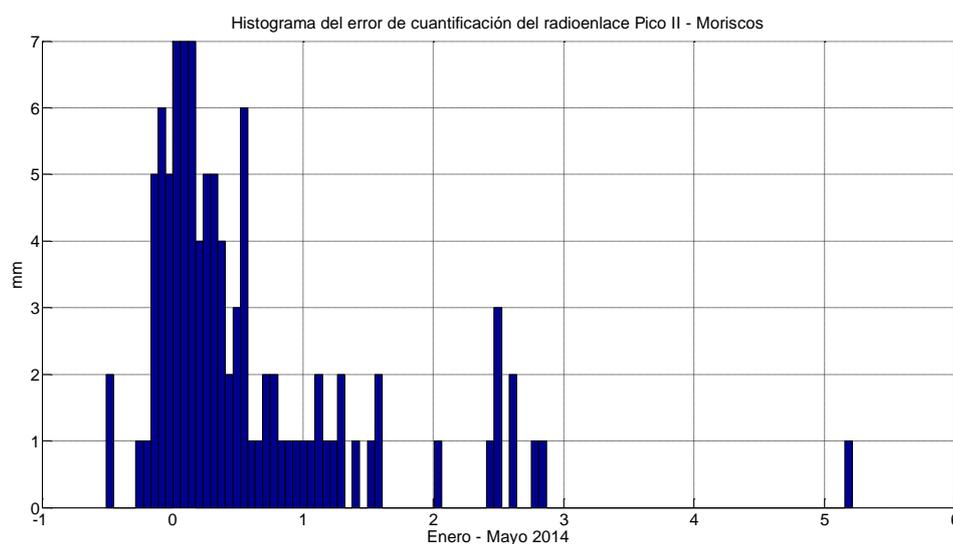


Fig. 6-25. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Pico II –Moriscos para el test 2 y máscara Nuttallwin

Siguiendo el mismo procedimiento explicado con anterioridad, obtenemos que un factor de corrección de 0,6001. Y aplicándolo a la cuantificación de la precipitación estimada, generamos los resultados que podemos observar en la tabla 6-15.

Como podemos ver en la tabla 6-15 resaltado en negrita, los resultados obtenidos de precipitación estimada acumulada (PEA) una vez aplicado el factor de corrección mejoran enormemente en comparación con lo observado en la tabla 6-14. El resultado que más nos llama la atención es sin duda el de Enero, ya que obtenemos una precipitación estimada acumulada de 90,8 mm, siendo la precipitación real acumulada para este mismo mes de 90,8 mm.

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	187	56	15	17	2
	Nº eventos detectados	227	184	109	127	114
	Nº total muestras	612	540	443	539	418
	TP	101	37	10	11	1
	FN	86	19	5	6	1
	FP	126	147	99	116	113
	TN	299	337	329	406	303
	% acierto	54,01	66,07	66,67	64,71	50
	PRA	<b>90,8</b>	<b>21,4</b>	<b>7,6</b>	<b>12,6</b>	<b>0,2</b>
	PEA	<b>90,8</b>	<b>37,53</b>	<b>8,13</b>	<b>10,25</b>	<b>1,11</b>
+/- 1 hora	TP	136	45	13	14	1
	% acierto	72,73	80,36	86,67	82,35	50

Tabla 6-15. Resultados test 2 con máscara Nuttallwin del radioenlace Pico II – Moriscos aplicado el factor de corrección de 0,6001 en la cuantificación de la lluvia

## 6.2.2 Radioenlace Monteluz – Hospital Militar

### 6.2.2.1 Entrenamiento 1

Para la realización del primer entrenamiento con el radioenlace Monteluz – Hospital Militar hemos elegido el mismo mes que en el primer entrenamiento del método de detección por sustracción de componentes de bajas frecuencias, es decir, el mes de Febrero de 2014.

En la siguiente tabla podemos observar los valores de AUC y umbrales que hemos obtenido para cada máscara.

Nombre Mascara	Valor AUC	Umbral
<b>Pulso</b>	0,955	0,074
<b>Trapezio</b>	0,941	0,004
<b>Hamming</b>	0,939	0,009
<b>Barthannwin</b>	0,950	0,027
<b>Nuttallwin</b>	0,948	0,028

Tabla 6-16. Valores de AUC y umbral para diferentes máscaras del entenamiento 1 del radioenlace Monteluz – Hospital Militar

### 6.2.2.2 Test 1

Para realizar este primer test hemos utilizado, al igual que con el anterior método de detección, el periodo de Enero a Mayo de 2014. Y, al igual que ocurrió con el radioenlace Pico II – Moriscos, en un primer momento elegimos utilizar la máscara Pulso, cuyos

resultados podemos ver en la tabla 6-17. Pero, como nuestro objetivo es obtener el mayor número de detecciones certeras (True Positives) y el mínimo posible de False Negative por lo que hemos realizado el test con todas las máscaras obteniendo los mejores resultados con la máscara Hamming. A continuación, podemos observar los resultados de la máscara Barthannwin en la tabla 6-18 y de la máscara Hamming en la tabla 6-19.

<b>Mes</b>		<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>
<b>Misma hora</b>	<b>N° eventos reales</b>	62	46	6	6	4
	<b>N° eventos detectados</b>	51	37	22	12	17
	<b>N° total muestras</b>	574	560	438	586	510
	<b>TP</b>	27	19	1	2	3
	<b>FN</b>	35	27	5	4	1
	<b>FP</b>	24	18	21	10	14
	<b>TN</b>	488	496	411	570	492
	<b>% acierto</b>	43,55	41,30	16,67	33,33	75
	<b>PRA</b>	29,6	34,2	0,6	2	1,4
	<b>PEA</b>	4,72	3,47	0,22	0,24	0,35
<b>+/- 1 hora</b>	<b>TP</b>	29	17	2	4	0
	<b>% acierto</b>	46,77	36,96	33,33	66,67	0

Tabla 6-17. Resultado máscara Pulso del test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

<b>Mes</b>		<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>
<b>Misma hora</b>	<b>N° eventos reales</b>	62	46	6	6	4
	<b>N° eventos detectados</b>	131	107	59	56	68
	<b>N° total muestras</b>	574	560	438	586	510
	<b>TP</b>	41	36	3	4	4
	<b>FN</b>	21	10	3	2	0
	<b>FP</b>	90	71	56	52	64
	<b>TN</b>	422	443	376	528	442
	<b>% acierto</b>	66,13	78,26	50	66,66	100
	<b>PRA</b>	37	43,6	1	3	1,6
	<b>PEA</b>	9,29	7,60	0,50	0,54	0,72
<b>+/- 1 hora</b>	<b>TP</b>	44	35	3	5	0
	<b>% acierto</b>	70,96	76,08	50	83,33	0

Tabla 6-18. Resultado máscara Barthannwin del test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

## Experimentos y resultados de estimación de lluvia

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	<b>Nº eventos reales</b>	62	46	6	6	4
	<b>Nº eventos detectados</b>	187	173	127	186	148
	<b>Nº total muestras</b>	574	560	438	586	510
	<b>TP</b>	43	36	4	5	4
	<b>FN</b>	19	10	2	1	0
	<b>FP</b>	144	137	123	181	144
	<b>TN</b>	368	377	309	399	362
	<b>% acierto</b>	69,35	78,26	66,67	83,33	100
	<b>PRA</b>	39,8	43,6	1,2	3,2	1,6
	<b>PEA</b>	9,39	7,65	0,53	0,57	0,73
+/- 1 hora	<b>TP</b>	49	36	5	5	0
	<b>% acierto</b>	79,03	78,26	83,33	83,33	0

Tabla 6-19. Resultado máscara Hamming del test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

Podemos observar que la diferencia entre las máscaras es muy pequeña, detectando 27 True Positive en Enero 2014 con la máscara Pulso, 41 con la máscara Barthannwin y 43 con la máscara Hamming. A pesar de que esta última es la que nos presenta menor AUC, es la que mejores resultados nos proporciona. En general podemos apreciar que el número de detecciones de eventos es casi el doble para todos los meses, con la excepción de la máscara Pulso, que detecta menos eventos de los que realmente suceden. Aun así el número de False Positive es elevado, rondando la centena, pero no tan elevando como ocurre con el método anterior. Lo que sí cabe destacar, es que el número de aciertos (True Positive) no es tan elevado y esto nos acarrea un alto número de False Negative y un bajo porcentaje de acierto en las detecciones.

Asimismo, examinando los datos obtenidos de Precipitación Real Acumulada (PRA) y Precipitación Estimada Acumulada (PEA), vemos que con este método también se producen errores en las mediciones de precipitación a la misma hora, puesto que los valores estimados no se corresponden con los reales. Por ejemplo, en el mes de Enero se recogieron 39,8 mm de lluvia y en esas mismas horas, nuestro método de detección solo ha cuantificado 9,39 mm.

En la figuras 6-26 podemos ver las detecciones de precipitación realizadas para el mes de Enero de 2014, utilizando los datos obtenidos en el entrenamiento anterior. Además, en la figura 6-27 podemos observar ejemplos de True Positive, False Positive y False Negative que encontramos en nuestras detecciones.

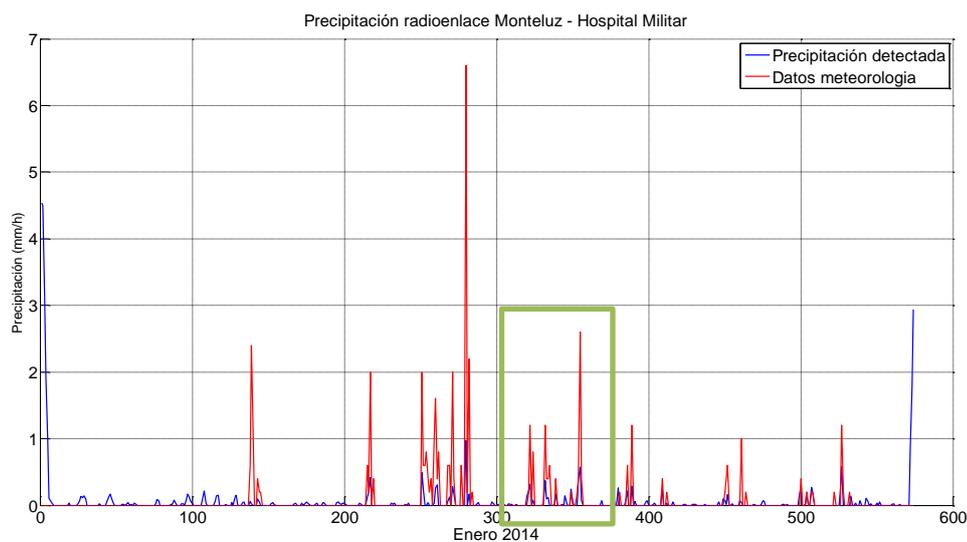


Fig. 6-26. Precipitación detectada por el método de comparación de patrones con la máscara Hamming en el test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

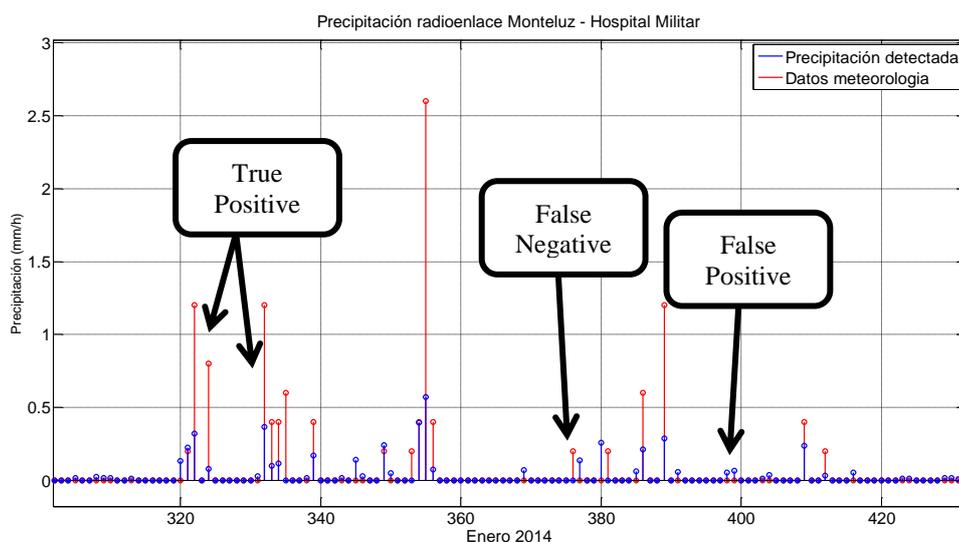


Fig. 6-27. Zoom de la precipitación detectada por el método comparación de patrones con la máscara Hamming en el test 1 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

Al igual que para los test anteriores, hemos decidido realizar un histograma (figura 6-28) del error de cuantificación producido, ya que los niveles de cuantificación de lluvia estimada no se corresponden con la precipitación real recogida por la estación meteorológica.

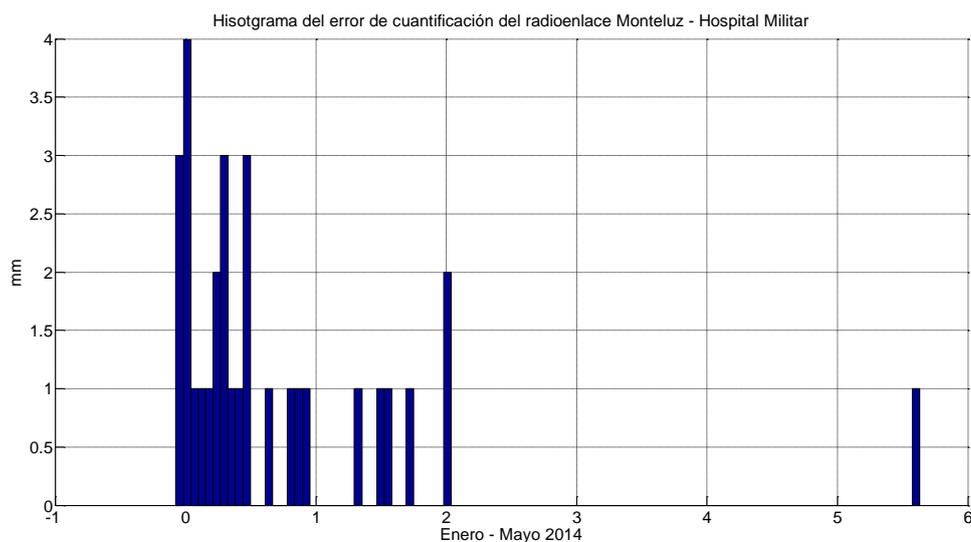


Fig. 6-28. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Monteluz –Hospital Militar para el test 1 y máscara Hamming

Al observar el histograma anterior nos damos cuenta que también se produce un error sistemático. Por lo que, siguiendo el mismo procedimiento que anteriormente, y con el objetivo de minimizarlo, obtenemos un factor de corrección de la lluvia estimada de 0,7073. Los resultados obtenidos de su aplicación podemos observarlos en a siguiente tabla.

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	62	46	6	6	4
	Nº eventos detectados	187	173	127	186	148
	Nº total muestras	574	560	438	586	510
	TP	43	36	4	5	4
	FN	19	10	2	1	0
	FP	144	137	123	181	144
	TN	368	377	309	399	362
	% acierto	69,35	78,26	66,67	83,33	100
	PRA	39,8	43,6	1,2	3,2	1,6
	PEA	39,8	33,11	3,36	4,11	3,56
+/- 1 hora	TP	49	36	5	5	0
	% acierto	79,03	78,26	83,33	83,33	0

Tabla 6-20. Resultados test 1 con máscara Hamming del radioenlace Monteluz – Hospital Militar aplicado el factor de corrección de 0,7073 en la cuantificación de la lluvia

Como podemos ver en la tabla 6-20 resaltado en negrita, los resultados obtenidos de precipitación estimada acumulada (PEA) una vez aplicado el factor de corrección mejoran enormemente en comparación con lo observado en la tabla 6-19. El resultado que más nos llama la atención es sin duda el de Enero, ya que obtenemos una precipitación estimada acumulada de 39,8 mm, siendo la precipitación real acumulada para este mismo mes de 39,8 mm.

### 6.2.2.3 Entrenamiento 2

Para este segundo entrenamiento hemos utilizado el mes Marzo 2014 para la obtención de los umbrales, al igual que hicimos con anterioridad. En la tabla 6-21 podemos observar los resultados.

Nombre Mascara	Valor AUC	Umbral
<b>Pulso</b>	0,927	0,050
<b>Trapezio</b>	0,928	0,073
<b>Hamming</b>	0,928	0,089
<b>Barthannwin</b>	0,928	0,088
<b>Nuttallwin</b>	0,929	0,089

Tabla 6-21. Valores de AUC y umbral para diferentes máscaras del entrenamiento 2 del radioenlace Monteluz – Hospital Militar

### 6.2.2.4 Test 2

Para este segundo test también hemos utilizado el periodo de Enero a Mayo de 2014. Hemos utilizado todas las máscaras para hallar aquella que nos ofrece un mejor resultado. En la tabla 6-22 podemos observar los resultados obtenidos con la máscara Pulso y en la tabla 6-23 los resultados de la máscara Nuttallwin.

En este ocasión, los mejores resultados los obtenemos con la máscara pulso obteniendo un mejor resultado de true positive a pesar de ser la máscara que menor AUC presenta en el entrenamiento.

En la tabla 6-22 podemos observar los resultados de este test. Comparando con los resultados del test anterior podemos concluir que son peores, porque las detecciones certeras (True Positive) han disminuido y los falsos negativos han aumentado. Por lo tanto, el porcentaje de acierto en las detecciones es muy bajo.

Experimentos y resultados de estimación de lluvia

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	62	46	6	6	4
	Nº eventos detectados	66	63	25	19	30
	Nº total muestras	574	560	438	586	510
	TP	31	30	1	2	4
	FN	31	16	5	4	0
	FP	35	33	24	17	26
	TN	477	481	408	563	480
	% acierto	50	65,21	16,66	33,33	100
	PRA	31,6	39,4	0,6	2	1,6
	PEA	4,99	4,13	0,21	0,23	0,40
+/- 1 hora	TP	34	27	2	4	0
	% acierto	54,83	58,69	33,33	66,66	0

Tabla 6-22. Resultado máscara Pulso del test 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

Mes		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Misma hora	Nº eventos reales	62	46	6	6	4
	Nº eventos detectados	65	59	24	18	27
	Nº total muestras	574	560	438	586	510
	TP	31	28	1	2	4
	FN	31	18	5	4	0
	FP	34	31	23	16	23
	TN	478	483	409	564	483
	% acierto	50	60,86	16,66	33,33	100
	PRA	31,6	37	0,6	2	1,6
	PEA	8,62	7,031	0,36	0,4	0,71
+/- 1 hora	TP	35	25	2	4	0
	% acierto	56,45	54,34	33,33	66,66	0

Tabla 6-23. Resultado máscara Nuttallwin del test 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital

Además, los datos obtenidos de Precipitación Real Acumulada (PRA) y Precipitación Estimada Acumulada (PEA) siguen siendo bastante malos, puesto que al igual que en el test 1 se producen errores en las mediciones de precipitación a la misma hora y los valores obtenidos no se corresponden con los reales. Por ejemplo, en el mes de Enero se recogieron 31,6 mm de lluvia y en esas mismas horas, nuestro método de detección solo ha cuantificado 8,62 mm.

En la figura 6-29 podemos observar una gráfica de las detecciones realizadas en el mes de Enero de 2014 junto con las precipitaciones recogidas por la estación meteorológica.

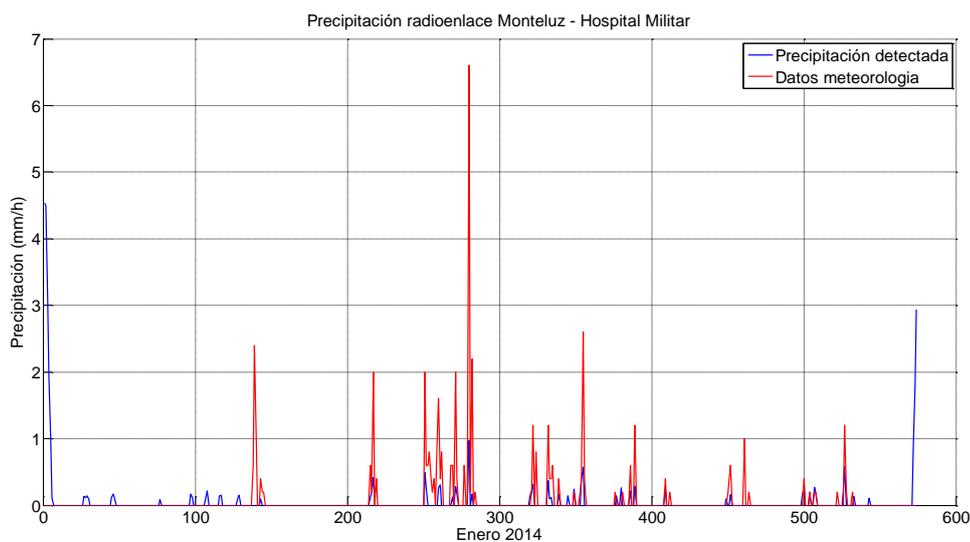


Fig. 6-29. Precipitación detectada por el método de comparación de patrones con la máscara Hamming en el test 2 para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

Al igual que en el test 1, hemos decidido realizar un histograma (figura 6-30) del error de cuantificación producido, ya que los niveles de cuantificación de lluvia estimada no se corresponden con la precipitación real recogida por la estación meteorológica.

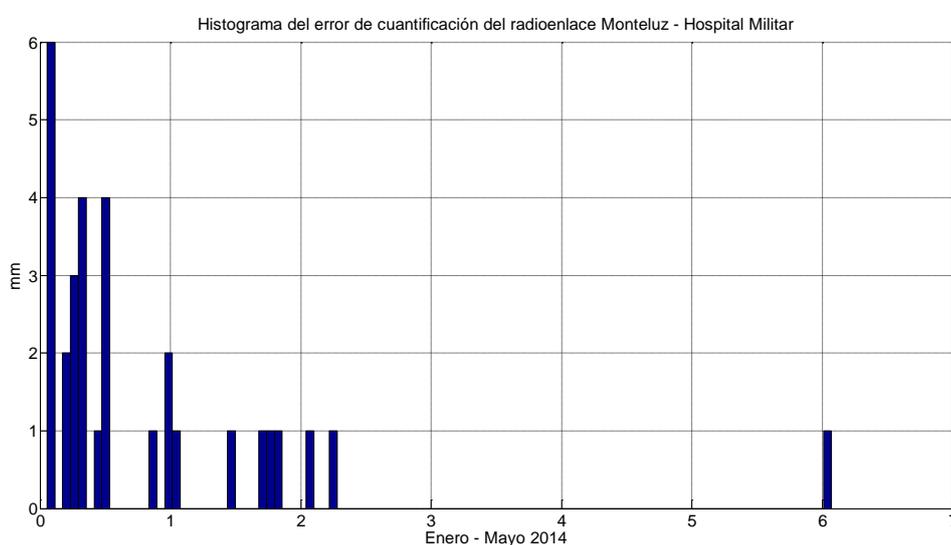


Fig. 6-30. Histograma del error de cuantificación del radioenlace Monteluz –Hospital Militar para el test 2 y máscara Pulso

Al observar el histograma anterior nos damos cuenta que también se produce un error sistemático. Por lo que, siguiendo el mismo procedimiento que en los test anteriores, y con el objetivo de minimizarlo, obtenemos un factor de corrección de la lluvia estimada de 0.6858. Los resultados obtenidos de su aplicación podemos observarlos en a siguiente tabla.

<b>Mes</b>		<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>
<b>Misma hora</b>	<b>Nº eventos reales</b>	62	46	6	6	4
	<b>Nº eventos detectados</b>	66	63	25	19	30
	<b>Nº total muestras</b>	574	560	438	586	510
	<b>TP</b>	31	30	1	2	4
	<b>FN</b>	31	16	5	4	0
	<b>FP</b>	35	33	24	17	26
	<b>TN</b>	477	481	408	563	480
	<b>% acierto</b>	50	65,22	16,67	33,33	100
	<b>PRA</b>	<b>31,6</b>	<b>39,4</b>	<b>0,6</b>	<b>2</b>	<b>1,6</b>
	<b>PEA</b>	<b>31,6</b>	<b>29,88</b>	<b>1,07</b>	<b>1,95</b>	<b>3,84</b>
<b>+/- 1 hora</b>	<b>TP</b>	34	27	2	4	0
	<b>% acierto</b>	54,84	58,70	33,33	66,67	0

Tabla 6-24. Resultados test 2 con máscara Pulso del radioenlace Monteluz – Hospital Militar aplicado el factor de corrección de 0.68582 en la cuantificación de la lluvia

Como podemos observar en la tabla 6-24, los datos de precipitación estimada acumulada mejoran bastante. Hemos pasado de estimar 8,62 mm para Enero de 2014 a estimar 31,6 mm para el mismo mes, siendo la precipitación real acumulada a lo largo del mes la misma que la estimada. Es importante añadir, que aunque para el mes de Enero los datos de precipitación estimada y real se ajustan bastante, para los otros meses no es así. Encontrándonos meses en los que la precipitación estimada acumulada es mayor que la precipitación real estimada, como pasa para el mes de Mayo, donde nos encontramos 3,84 mm de precipitación estimada frente a 1,6 mm de precipitación real.

### 6.3 Detección en dos etapas

En esta parte de los experimentos vamos a hacer uso de los resultados obtenidos en los apartados 5.2 de detección mediante SVM, y 6.1 y 6.2 detección mediante sustracción de componentes de baja frecuencia y por comparación de patrones, respectivamente.

---

En este caso, haremos la detección en dos etapas que se describen a continuación:

- Primera etapa: Hacemos una detección y cuantificación utilizando los algoritmos descritos en los apartados 5.4 o 5.5.
- Segunda etapa: Aprovecharemos los buenos resultados de detección de TP (True Positive) y TN (True Negative), además de una baja tasa de FP (False Positive), para aplicar este algoritmo de detección sobre las potenciales detecciones positivas obtenidas en la primera etapa.

Es importante señalar que el número de eventos reales contados en cada una de las etapas puede diferir. Esto es porque para conformar la matriz quinceminutal hemos tenido que descartar todos aquellos grupos de quinceminutales en el que hubiera algún GAP. Es decir, si tenemos 13:15 - 13:30 - 13:45 - 14:00 y la muestra 13:30 es un GAP, descartamos todos esos quinceminutales, puesto que son necesarias las cuatro muestras para la extracción de características. Sin embargo, con los otros métodos empleados como primeras etapas de detección, esto no es necesario, porque tal y como explicamos en el apartado 4.2.3 convertimos la señal a horaria y no es tan vital si nos falta la información de una sola muestra.

Con las detecciones obtenidas al acabar la segunda etapa damos por finalizado el proceso de detección, y consiguiente cuantificación sobre los eventos de lluvia.

### 6.3.1 Detección por sustracción de componentes de baja frecuencia

A continuación utilizamos el método de detección por sustracción de componentes de baja frecuencia para la implementación del algoritmo SVM. La metodología es la siguiente:

- Paso 1: obtenemos los resultados de detección para cada radioenlace tal y como hacemos en el apartado 6.1.
- Paso 2: formamos una matriz quinceminutal (p.e. 00:15-00:30-00:45-01:00) y un vector con los índices de las detecciones de precipitación. A su vez, conformamos un vector con los datos de meteorología para aquellos momentos en los que hemos detectado lluvia.

- **Paso 3:** Descomponemos el mes de entrenamiento en datos de lluvia y datos de no lluvia, ayudándonos de los datos de meteorología de los que disponemos.
- **Paso 4:** Realizamos el entrenamiento del algoritmo SVM con los datos de la tercera etapa y obtenemos una serie de parámetros.
- **Paso 5:** Con los resultados del Paso 4, aplicamos una detección con SVM a los potenciales positivos obtenidos en el Paso 1, de tal forma que buscamos minimizar el número de falsos positivos.

### 6.3.1.1 Radioenlace Pico II – Moriscos

A continuación mostramos los datos totales (de Enero a Mayo 2014) para el primer test del radioenlace Pico II – Moriscos, cuyo mes de entrenamiento es Febrero 2014, y los datos obtenidos utilizando el algoritmo SVM como segunda etapa.

	Nº eventos reales	Nº eventos detectados	TP	FP	FN
<b>1º etapa</b>	277	2393	276	2117	1
<b>2º etapa</b>	274	429	204	225	70

Tabla 6-25. Resultados 1º etapa y 2º etapa para el radioenlace Pico II – Moriscos

Observando la tabla anterior podemos observar como un resultado importante de la implementación del algoritmo SVM es la disminución de los False Positive (FP), puesto que pasamos de 2117 a 225, lo cual es una gran mejora. Aun así, los datos que obtenemos de True Positive y False Negative son peores que los obtenidos tras la primera etapa, puesto que han descendido y aumentando respectivamente.

### 6.3.1.2 Radioenlace Monteluz – Hospital Militar

A continuación mostramos los datos totales (de Enero a Mayo 2014) para el primer test del radioenlace Monteluz – Hospital Militar, cuyo mes de entrenamiento es Febrero 2014, y los datos obtenidos utilizando el algoritmo SVM como segunda etapa.

	Nº eventos reales	Nº eventos detectados	TP	FP	FN
<b>1º etapa</b>	124	805	115	690	9
<b>2º etapa</b>	115	113	79	34	36

Tabla 6-26. Resultados 1º etapa y 2º etapa para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

---

Estudiando los resultados expuestos en la tabla anterior vemos que, tras la implementación de la segunda etapa y, tal y como ocurre con el anterior radioenlace, el número de False Positive (FP) ha disminuido. Pasando de 690 a tan solo 34. Esto supone una gran mejora en la detección de True Negative. Pero al igual que en el radioenlace anterior, los True Positive han disminuido y, por lo tanto, los False Negative han aumentado.

### 6.3.2 Detección por comparación de patrones

A continuación utilizamos el método de detección por comparación de patrones para la implementación del algoritmo SVM. La metodología es similar a la seguida en el subapartado anterior, y es:

- Primer paso: obtenemos los resultados de detección para cada radioenlace tal y como hacemos en el apartado 6.2.
- Segundo paso: formamos una matriz quinceminutal y un vector con los índices de las detecciones de precipitación. A su vez, conformamos un vector con los datos de meteorología para aquellos momentos en los que hemos detectado lluvia.
- Tercer paso: Descomponemos el mes de entrenamiento en datos de lluvia y datos de no lluvia, ayudándonos de los datos de meteorología de los que disponemos.
- Cuarto paso: Realizamos el entrenamiento del algoritmo SVM con los datos de la tercera etapa y obtenemos una serie de parámetro.
- Quinto paso: Con los resultados del Paso 4, aplicamos una detección con SVM a los potenciales positivos obtenidos en el Paso 1, de tal forma que buscamos minimizar el número de falsos positivos.

#### 6.3.2.1 Radioenlace Pico II – Moriscos

A continuación mostramos los datos totales (de Enero a Mayo 2014) para el primer test del radioenlace Pico II – Moriscos obtenidos utilizando el método de detección por comparación de patrones utilizando la máscara Hamming. El mes de entrenamiento es también ha sido Febrero 2014 para este caso. Asimismo, en la misma tabla mostramos los datos obtenidos utilizando el algoritmo SVM como segunda etapa.

	Nº eventos reales	Nº eventos detectados	TP	FP	FN
<b>1º etapa</b>	277	821	162	659	115
<b>2º etapa</b>	172	292	144	148	28

Tabla 6-27. Resultados 1º etapa y 2º etapa para el radioenlace Pico II – Moriscos

Observando la tablas 6-29 podemos ver que el número de eventos detectado ha caído, aunque los True Positive TP se han mantenido casi iguales (162 obtuvimos en la primera etapa frente a 144 con SVM). Aunque lo más destacado es que han caído los False Positive a 148 frente a 659. Y también han disminuido los False Negative de 115 a 28. Recordemos que estos últimos se dan cuando la estación meteorológica recoge lluvia pero nuestro método no la detecta.

### 6.3.2.2 Radioenlace Monteluz – Hospital Militar

A continuación mostramos los datos totales (de Enero a Mayo 2014) para el primer test del radioenlace Monteluz – Hospital Militar obtenidos utilizando el método de detección por comparación de patrones utilizando la máscara Hamming. El mes de entrenamiento también es Febrero 2014 para este radioenlace. Asimismo, en la misma tabla mostramos los datos obtenidos utilizando el algoritmo SVM como segunda etapa.

	Nº eventos reales	Nº eventos detectados	TP	FP	FN
<b>1º etapa</b>	277	821	162	659	115
<b>2º etapa</b>	92	102	67	35	25

Tabla 6-28. Resultados 1º etapa y 2º etapa para el radioenlace Monteluz – Hospital Militar

Estudiando los resultados expuestos en la tabla anterior vemos que, tras la implementación de la segunda etapa y, tal y como ocurre con el anterior radioenlace, el número de eventos detectado ha disminuido. Asimismo, el número de False Positive (FP) también ha disminuido. Pasando de 659 a tan solo 35.

# CAPÍTULO 7.

## CONCLUSIONES

En el presente capítulo, exponemos las conclusiones obtenidas, tras el desarrollo del presente Proyecto Fin de Carrera, en relación con los objetivos planteados inicialmente, y con los resultados adquiridos de los distintos experimentos realizados. Asimismo, se proponen mejoras del mismo y diversas líneas de investigación para futuros trabajos relacionados con la implementación y desarrollo de sistemas que permitan la detección de precipitación a partir de niveles de potencia los radioenlaces.

### 7.1 Conclusiones

A lo largo del presente Proyecto Fin de Carrera se han logrado una serie de objetivos marcados al inicio del mismo y que enumeramos a continuación:

1. Hemos elaborado una base de datos que contiene todos los datos de las estaciones meteorológicas y de todos los radioenlaces ubicados en las Islas Canarias.
2. Hemos estudiado los datos para llevar a cabo un preprocesado y un procesado que nos ha permitido transformar los datos de tal manera que podemos hacer un uso sencillo de los mismos en las siguientes etapas.

3. Hemos establecido varios algoritmos que nos permiten detectar la presencia de lluvia en los niveles de potencia de radioenlaces.
4. Hemos generado indicadores que nos permiten cuantificar el nivel de la lluvia.

Asimismo, de los resultados obtenidos y presentados en el capítulo anterior, se extraen las siguientes conclusiones.

La metodología que mejores resultados de detección presenta es la detección por sustracción de componentes de baja frecuencia. Pues, como se puede ver en el capítulo anterior, los resultados de los test realizados para ambos radioenlaces son muy buenos, teniendo en algunos casos un 100% de acierto sobre muestras a la misma hora, lo que conlleva un bajo número de False Negative. Es decir, detecta lluvia cuando nuestras estaciones meteorológicas recogen lluvia. Uno de los inconvenientes que presenta este método de detección, es que al utilizar un valor tan pequeño de umbral nos genera una gran cantidad de muestras que clasificamos como False Positive.

Asimismo, el mejor método de detección que cuantifica el nivel de lluvia es la detección por comparación de patrones. Esta metodología nos permite medir mejor los niveles de precipitación, aunque no es certera completamente, los resultados obtenidos para algunos radioenlaces es de casi la mitad de los recogido por la estación meteorológica. Uno de los inconvenientes de este método de detección, al contrario el anterior, es que nos genera muchos False Negative. Esto hace que este método no sea del todo fiable en la detección de los eventos de lluvia.

Una gran mejora a la hora de cuantificar lluvia es la introducción del factor de corrección, lo que nos permite aproximar los valores de precipitación estimada acumulada a los valores de precipitación real acumulada, siendo para algunos meses, exacta esta medición.

Además, la introducción de una segunda etapa utilizando el algoritmo SVM nos permite una detección de eventos de precipitación más certera, puesto que hemos visto en el apartado 6.3 que nos disminuye el número de False Positive detectados en una gran cantidad.

Así, la conclusión final que extraemos de todos los datos presentados con anterioridad es que, el mejor método de detección es la detección en dos etapas utilizando como primera etapa el método de detección por sustracción de componentes de baja

---

frecuencia. Este método es el que más porcentaje de acierto nos ofrece. Además, si aplicamos el factor de corrección, la cuantificación del nivel que lluvia que realiza es bueno. Sobre las detecciones realizadas aplicaríamos la segunda etapa, es decir, el algoritmo SVM que nos permitiría reducir el número de Falses Negative.

## 7.2 Líneas futuras

En este apartado se evalúan las posibles líneas futuras de trabajos que se podrían llevar a cabo para complementar y/o mejorar este Proyecto Fin de Carrera.

- Implementación de nuevo código en la base de datos que nos permita comprobar el tipo de fichero que deseamos cargar a la base de datos. Así, no sería necesario seleccionar de qué tipo se trata en el entorno web. Además, nos permitiría poder seleccionar todos los ficheros que queramos cargar una sola vez.
- Implementación de algoritmos que cuantifiquen el nivel de precipitación. Puesto que, junto con la detección, es uno de los aspectos más importantes y que debido a la falta de tiempo no se ha podido mejorar.
- Implementación de una metodología que nos permita localizar los fenómenos meteorológicos. Aprovechando que poseemos datos de diferentes radioenlaces se podría diseñar algoritmos para determinar la localización de fenómenos meteorológicos (lluvia, etc.) y, de ser posible, hacerles un seguimiento.
- Integración de más fuentes de información de los radioenlaces como, por ejemplo, la temperatura.
- Estudio de diversos métodos de clasificación, tanto para detectar como para cuantificar.



# APÉNDICE A.

## CONEXIÓN DE LA BASE DE DATOS CON MATLAB

Para poder conectar nuestra base de datos con el programa principal que vamos a utilizar, Matlab, es necesario seguir una serie de pasos que detallamos a continuación:

### 1. Descargar el *Connector/ODBC*

Proporcionado por MySQL para diferentes sistemas operativos. Lo podemos encontrar aquí [27].

El ordenador del laboratorio que hemos utilizado utiliza Microsoft Windows de 64 bits, por lo que esa es la versión que buscamos. La última versión disponible 5.3.8 nos dio problemas en su instalación, por lo que decidimos instalar la versión anterior, la 5.2.7, para Microsoft Windows 64 bits.

### 2. Instalación del *Connector/ODBC*

Para ello buscamos el ‘*Administrador de origen de datos ODBC*’. Nos aparecerá una ventana como la que se muestra en la figura A-1.

Lo que debemos hacer es Agregar el nuevo controlador, para ello solo es necesario presionar el botón “Agregar” y nos aparecerá una ventana como la que podemos ver en la figura A-2. Simplemente seleccionamos MySQL ODBC 5.2 ANSI Driver y pinchamos en “Finalizar”.

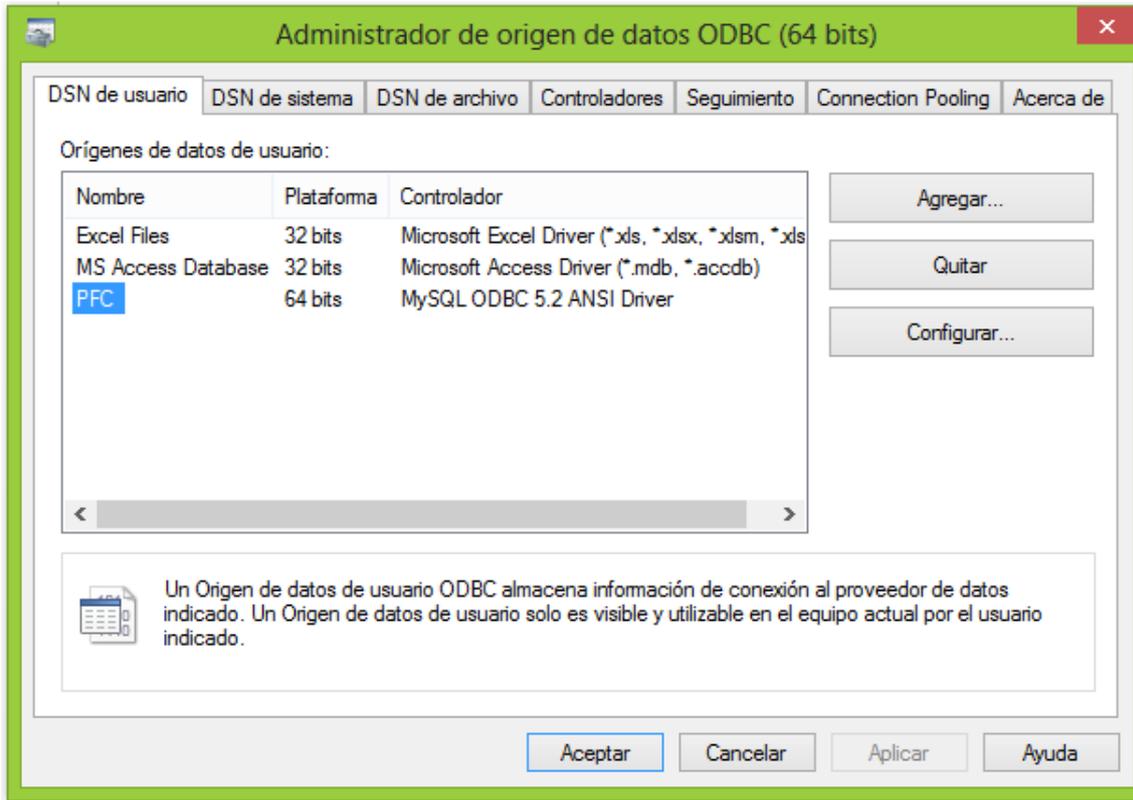


Fig. A-1. Captura de pantalla del Administrador de origen de datos ODBC

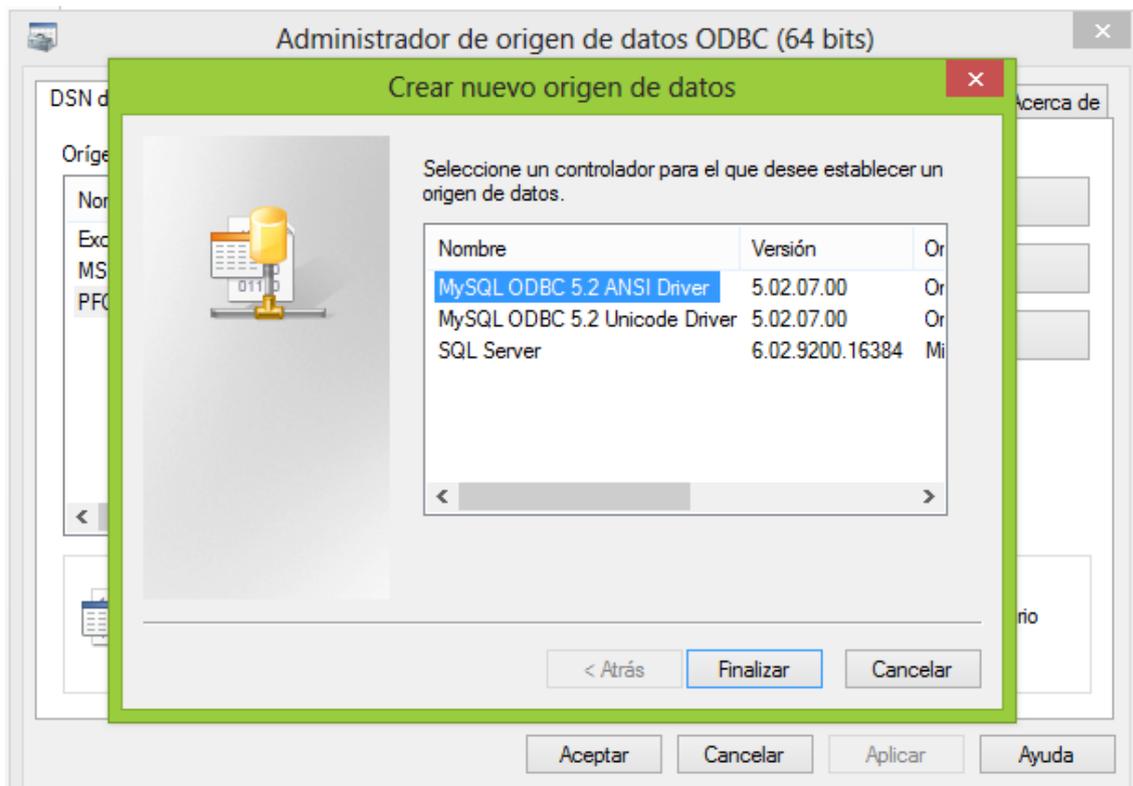


Fig. A-2. Captura de pantalla de creación de nuevo origen de datos

Al hacer esto nos aparecerá una ventana como la que podemos ver en la siguiente figura:

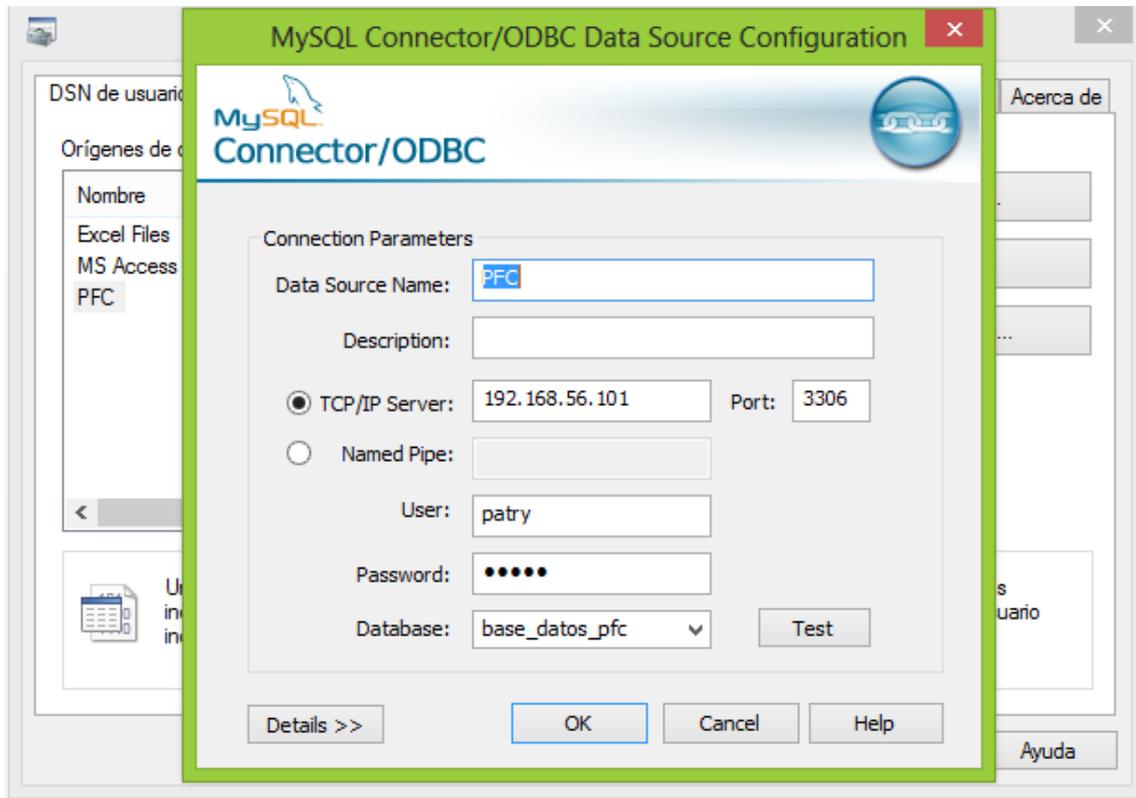


Fig. A-3. Configuración del Conector/ODBC

En la que simplemente debemos rellenar una serie de parámetros:

- Data Source Name: es el nombre que le queremos poner a la conexión, puede ser cualquiera porque no es de vital importancia.
- TCP/IP Server: es la IP de nuestra máquina. Si no sabemos cuál es, sólo hay que abrir una ventana de comandos y teclear *ipconfig* y enter.
- User: Es el nombre de usuario que tienes en la configuración de tu base de datos.
- Password: La contraseña de tu usuario de la base de datos.
- Database: El nombre de la base de datos con la que quieres conectarte.

Si todo está correcto, al seleccionar el botón ‘Test’ nos saldrá la ventana que podemos ver a continuación y que indica que la conexión de nuestra base de datos con Matlab se ha hecho correctamente.

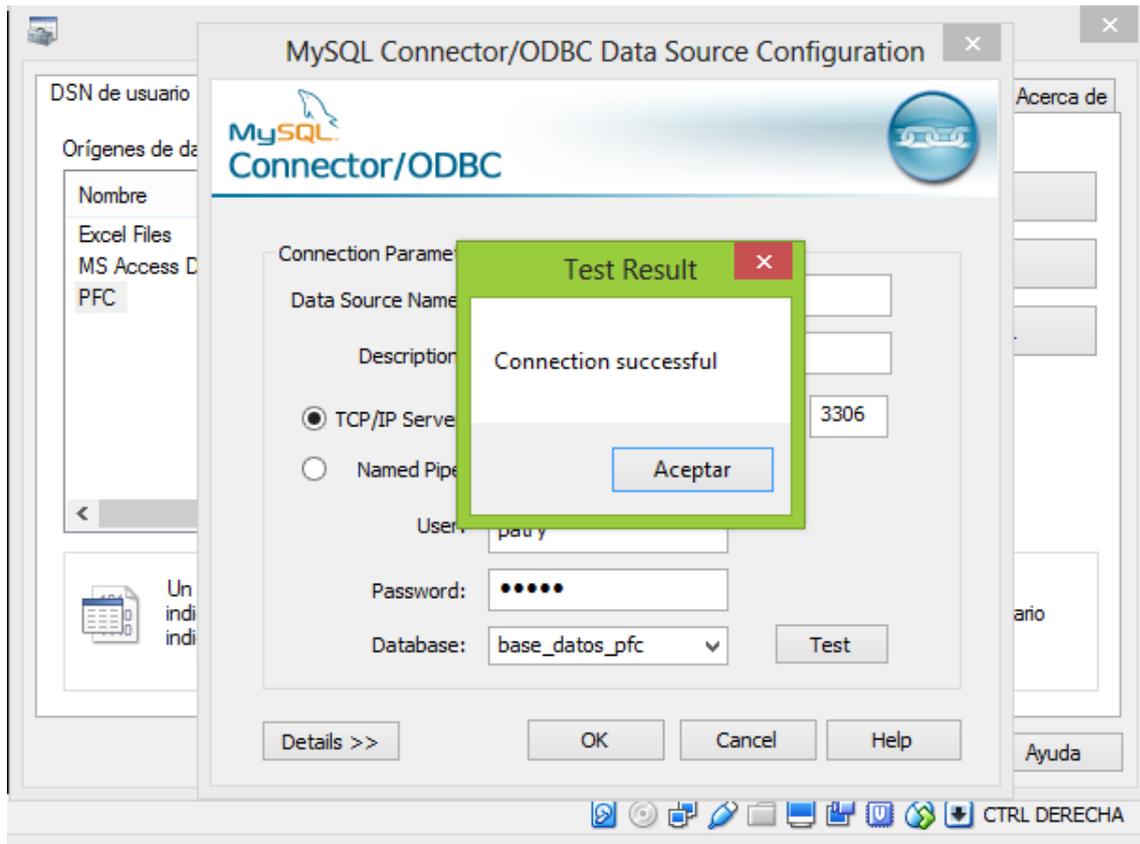


Fig. A-4. Resultado del Test de la conexión del Conector/ODBC

## APÉNDICE B.

### DATOS DE LOS RADIOENLACES

En la siguiente tabla podemos encontrar los datos de distancia, frecuencia y polarización para todos los radioenlaces ubicados en la isla de Gran Canaria.

Enlace	Distancia (km)	Frecuencia (MHz)	Polarización
Agaete – Montaña Gáldar	6,977	22078	H
Agüimes - Cazadores	9,014	23058	H
Agüimes - Tabaiba	12,137	23280	V
Cañadas Del Gato - Castillete	1,142	23086	V
Cañadas Del Gato – Roque Pernal	9,992	17775	V
Castillete – Cañadas Del Gato	1,142	22078	V
Castillete – Puerto Rico	6,035	22050	V
Cazadores - Agüimes	9,014	22050	H
Cazadores – Hospital Militar	16,754	6550	V
Cazadores - Monteluz	11,496	23016	V
Centro Salud La Aldea – Las Tabladas	0,678	22078	V
Cortadores – Puerto Rico	8,039	22078	V
Cortadores – Salobre Golf	7,851	22050	V
Hierbahuerto – Pico II	8,639	18725	V
Hierbahuerto – Roque Pernal	8,552	23086	V
Hospital Militar - Cazadores	16,754	6890	V
Hospital Militar – La Isleta	7,071	18765	V
Hospital Militar - Monteluz	5,353	23026	V
Hospital Militar – Pico I	20,008	18737,5	V

## Apéndice B

Hospital Militar – Usos Múltiples I	1,047	23086	H
La Isleta – Hospital Militar	7,071	17755	V
La Isleta – Montaña Gáldar	22,275	6460	V
La Isleta – Usos Múltiples III	5,555	22078	V
Las Tabladas – Centro Salud La Aldea	0,678	23086	V
Maspalomas - Tabaiba	7,890	23058	H
Montaña Gáldar - Agaete	6,977	23086	H
Montaña Gáldar – La Isleta	22,275	6800	V
Montaña Gáldar - Moriscos	13,571	17755	V
Monteluz - Cazadores	11,496	22008	V
Monteluz - Hospital Militar	5,353	22018	V
Moriscos – Montaña Gáldar	13,571	18765	V
Moriscos – Pico II	7,445	23086	H
Moriscos - Teror	7,696	23114	V
Pico I - Hospital Militar	20,008	17727,5	V
Pico I – Pico II	0,191	23200	V
Pico II - Hierbahuerto	8,639	17727,5	V
Pico II - Moriscos	7,445	22078	H
Pico II – Pico I	0,191	22192	V
Puerto Rico - Castillete	6,035	23058	V
Puerto Rico - Cortadores	8,039	23086	V
Roque Pernal – Cañada Del Gato	9,992	18783	V
Roque Pernal - Hierbahuerto	8,552	22078	V
Salobre Golf - Cortadores	7,851	23026	V
Salobre Golf - Tabaiba	13,361	23058	H
Tabaiba - Agüimes	12,137	22272	V
Tabaiba - Maspalomas	7,890	22050	H
Tabaiba – Salobre Golf	13,361	22018	H
Teror - Moriscos	7,696	22106	V
Usos Múltiples I - Hospital Militar	1,047	22078	H
Uso Múltiples III – La Isleta	5,555	23086	V

Tabla B-1. Datos de distancia, frecuencia y polarización de los radioenlaces de la isla de Gran Canaria

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] (26 Junio 2017). *Organización Meteorológica Mundial* [Online]. Available: [http://www.wmo.int/pages/index\\_es.html](http://www.wmo.int/pages/index_es.html).
- [2] C. Ho, "Modeling and Simulation for Realistic Propagation Environments of Communications Signals at SHF Band," 2005.
- [3] H. Messer, A. Zinevich and P. Alpert, "Environmental monitoring by wireless communication networks," *Science*, vol. 312, (5774), pp. 713, 2006. . DOI: 312/5774/713 [pii].
- [4] A. Zinevich, P. Alpert and H. Messer, "Estimation of rainfall fields using commercial microwave communication networks of variable density," *Adv. Water Resour.*, vol. 31, (11), pp. 1470-1480, 2008.
- [5] A. Rayitsfeld *et al*, "Comparison of two methodologies for long term rainfall monitoring using a commercial microwave communication system," *Atmos. Res.*, vol. 104, pp. 119-127, 2012.
- [6] H. Messer, A. Zinevich and P. Alpert, "Environmental sensor networks using existing wireless communication systems for rainfall and wind velocity measurements," *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, vol. 15, (2), pp. 32-38, 2012.
- [7] N. David, P. Alpert and H. Messer, "Novel method for fog monitoring using cellular networks infrastructures," *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, vol. 5, (4), pp. 5725-5752, 2012.
- [8] I. D. Guerra Moreno, "Algoritmos De Aprendizaje Aplicados a La Monitorización Meteorológica Mediante Redes Inalámbricas De Comunicaciones Distribuidas.", Tesis Doctoral. Programa de Doctorado en Cibernética y Telecomunicación, Lectura prevista para septiembre de 2017.
- [9] ITU-R P.530-16, "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems," 2015.
- [10] G. Brussaard, P. A. Watson and P. A. Watson, *Atmospheric Modelling and Millimetre Wave Propagation*. 1995.
- [11] UIT-R P.676-10, "Atenuación debida a los gases atmosféricos," 2013.

## Bibliografía

---

- [12] ITU-R P.840-6, "Atenuación debida a las nubes y a la niebla," 2013.
- [13] L. W. Barclay, *Propagation of Radiowaves*. 2003502.
- [14] UIT-R P.838-3, "Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción," 2005.
- [15] UIT-R, "Proyecto de manual sobre radiometeorología," Marzo 1995.
- [16] C. Riva, "Spatial characteristics of propagation parameters: A review," in *First COST*, 2002, .
- [17] C. Capsoni *et al*, "Data and theory for a new model of the horizontal structure of rain cells for propagation applications," *Radio Sci.*, vol. 22, (3), pp. 395-404, 1987.
- [18] L. Féral *et al*, "HYCELL—A new hybrid model of the rain horizontal distribution for propagation studies: 2. Statistical modeling of the rain rate field," *Radio Sci.*, vol. 38, (3), 2003.
- [19] ITU-R P.839-4, "Modelo de estimación de la altura de la lluvia para utilizar en los métodos de predicción," 2013.
- [20] J. O. Laws and D. A. Parsons, "The relation of raindrop-size to intensity," *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 24, (2), pp. 452-460, 1943.
- [21] J. S. Marshall and W. M. K. Palmer, "The distribution of raindrops with size," *J. Meteorol.*, vol. 5, (4), pp. 165-166, 1948.
- [22] J. Joss, J. Thams and Waldvogel, A. "Variation of raindrop size distributions at Locarno," in *Bulletin of The American Meteorological Society*, 1968.
- [23] H. R. Pruppacher and R. Pitter, "A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops," *J. Atmos. Sci.*, vol. 28, (1), pp. 86-94, 1971.
- [24] R. Gunn and G. D. Kinzer, "The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air," *J. Meteorol.*, vol. 6, (4), pp. 243-248, 1949.
- [25] P. Dubois, *MySQL*. Indianapolis, Indiana : New Riders, 2000., 2000.
- [26] F. J. G. Rubio, *Creación De Sitios Web Con PHP5*. 2006.
- [27] (26 Junio 2017). *Download Connector/ODBC*. Available: <https://dev.mysql.com/downloads/connector/odbc/>.
- [28] "Sistema de vigilancia meteorológica para el seguimiento de riesgos medioambientales". Investigadores Principales: Antonio Ravelo García, Juan L. Navarro Mesa. Entidad financiadora: Programa de Cooperación Territorial. INTERREG V A España-Portugal. MAC 2014-2020. Acrónimo: VIMETRI-MAC. Duración: Desde 01/01/2017 hasta 31/12/2019. Código: MAC/3.5b/065.
-

- 
- [29] (26 Junio 2017). *Red de Emergencias y Seguridad de Canarias (RESCAN)*. Available: <http://www.gobiernodecanarias.org/cpj/temas/tnt/rescan/rescan.html>.
- [30] (26 Junio 2017). *Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicación (ETSI)*. Available: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/tetra>.
- [31] (26 Junio 2017). *Mapa de cobertura TETRA para la isla de Gran Canaria*. Available: [http://www.gobiernodecanarias.org/opencmsweb/export/sites/cpj/temas/tnt/descarga/rescan/gran\\_canaria.pdf](http://www.gobiernodecanarias.org/opencmsweb/export/sites/cpj/temas/tnt/descarga/rescan/gran_canaria.pdf).
- [32] (26 Junio 2017). *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*. Available: <http://www.aemet.es/es/portada>.
- [33] (26 Junio 2017). *GPS Visualizer*. Available: <http://www.gpsvisualizer.com/>.
- [34] John S. Seybold, "Rain attenuation of microwave and millimeter-wave signals," in *Introduction to RF Propagation*, John Wiley & Sons, Inc., 2005, pp. 221.
- [35] L. B. Lusted, "Signal detectability and medical decision-making," *Science*, vol. 171, (3977), pp. 1217-1219, 1971.
- [36] I. D. Guerra Moreno *et al*, "An approach to rainfall activity detection with characteristics extracted from microwave communication links and classification by means of SVM," *The 3rd International Conference on Intelligent Signal Processing, ISP 2017*, Pendiente de aceptación.
- [37] T. Hastie, R. Tibshirani and J. Firedman, Eds., *The Elements of Statistical Learning. Data Minig, Inference and Prediction*. 2001, *Springer Series in Statistics*.
- [38] M. N. Armas Déniz, "Prototipo De Sistema Para La Determinación De Contaminantes En El Agua Mediante Métodos Espectroscópicos.", Instituto Universitario para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Diciembre 2016.



# **Parte II**

## **Pliego de condiciones**



# PLIEGO DE CONDICIONES

## Pliego de condiciones técnicas

Para el presente proyecto, se ha utilizado una serie de herramientas software y hardware, indicadas a continuación.

### Recursos Hardware utilizados

Los componentes hardware utilizados fueron los siguientes:

- **Ordenador de sobremesa** con microprocesador Intel® Core™ i7 a 3,4 GHz, 6 GB de memoria RAM y 1TG de capacidad de disco duro el cual se utilizó tanto la fase de preprocesamiento, procesamiento, entrenamiento y test, así como para la elaboración de una parte de la memoria del proyecto.
- **Ordenador de sobremesa personal** con microprocesador Intel® Core™ i7 a 2,4 GHZ, 8 GB de memoria RAM y 1TG de capacidad de disco duro, el cual se utilizó el desarrollo de parte del código y la redacción de gran parte de la memoria.

### Recursos Software utilizados

También se utilizaron las siguientes herramientas *software*:

- **MATLAB® versión 2007:** para el desarrollo de la totalidad de los algoritmos implementados en este proyecto.

- **Windows® 8:** es el sistema operativo bajo el que se trabajó en todos los equipos.
- **Microsoft Office® 2010:** es el paquete de herramientas, en las que se incluye Microsoft Word, que se han utilizado para la elaboración de la memoria.
- **Notepad++ versión 7.3.3:** editor de texto para la edición de algoritmos.

## Pliego de condiciones legales y administrativas

A continuación, se exponen los aspectos de tipo legal y administrativo que habrán de ser tenidos en cuenta por los futuros usuarios. Estas condiciones establecen las obligaciones, derechos y deberes que los autores adquieren con los usuarios del sistema implementado en este proyecto, y a su vez de los usuarios con los autores.

### Derechos de explotación y restricciones de uso

La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria es quien ostenta los derechos de explotación y cualquier usuario debe estar de acuerdo en obligarse por los términos y condiciones establecidas en este Pliego de Condiciones, aceptando todos sus términos y estipulaciones. El uso de los programas y base de datos o de una copia en ordenador personal de los mismos, será bajo la autorización expresa del autor, los directores del proyecto y la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, como Centro al que pertenece la titulación de Ingeniero de Telecomunicación.

El usuario no podrá realizar ingeniería inversa, decompilación o desamblado de los programas. El usuario podrá transferir los programas y bases de datos a un tercero, siempre que no tenga copias de los mismos, incluyendo posibles actualizaciones o retener material escrito adicional que acompañe a los programas y la base de datos.

### Garantías y consideraciones adicionales

La autora y los tutores de este proyecto garantizan que los programas y la base de datos funcionarán correctamente en el momento de la correcta instalación. También

se garantiza que el soporte en el cual está grabado el programa no contendrá defectos en el momento de la adquisición del mismo.

Con la única excepción de lo expresamente expuesto en el párrafo anterior, los programas y bases de datos han sido creados sin garantías de ningún tipo. No se asegura, garantiza, o realiza ninguna declaración respecto al uso o los resultados derivados de la utilización de los programas o la base de datos. Tampoco se garantiza que la operación de los programas sea ininterrumpida o sin errores.

## **Limitación de responsabilidad**

En ningún caso serán la autora ni los tutores, ni la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria responsables de los perjuicios directos, indirectos incidentales o consiguientes, gastos, lucro cesante, pérdida de ahorros, interrupción de negocios, pérdida de información comercial o de negocio, o cualquier otra pérdida que resulte del uso o de la incapacidad de usar el programa o la documentación. El usuario conoce y acepta que los derechos de licencia reflejan esta asignación de riesgo como el resto de cláusulas y restricciones. La autora y los tutores rechazan cualquier otra garantía que no haya sido indicada anteriormente.

## **Varios**

En el supuesto de que cualquier disposición de esta licencia sea declarada total o parcialmente inválida, la cláusula afectada será modificada convenientemente de manera que sea ejecutable una vez modificada, plenamente eficaz, permaneciendo el resto de este contrato en vigencia.

Este Contrato se rige por las leyes de España. El usuario acepta la jurisdicción exclusiva de los tribunales de este país en relación con cualquier disputa que pudiera derivarse de la presente licencia.



# **Parte III**

# **Presupuesto**



# PRESUPUESTO

## Declaración Jurada

Doña Patricia González Gómez, autora del presente Proyecto de Fin de Carrera, declara que:

El proyecto Fin de Carrera con título “Diseño de técnicas de estimación de lluvia a partir de niveles de potencia de radioenlaces”, desarrollado en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y en un periodo de 10 meses, tiene un coste total de *cincuenta y tres mil ochocientos cuarenta y nueve euros con dos céntimos* (53.849,02 €) correspondiente a la suma de las cantidades consignadas a los apartados considerados a continuación.

Firmando la presente para que así conste a los efectos oportunos.

Autora del Proyecto:

Patricia del Carmen González Gómez

Las Palmas de Gran Canaria, 26 de junio de 2017

## Desglose del presupuesto

El presupuesto del proyecto realizado se ha obtenido según los precios de mercado actual, y de las indicaciones del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT) y de la Asociación Española de Ingenieros de Telecomunicación (AEIT), a efectos de visado.

Dicho informe alberga la estimación de los gastos generados durante su realización y se fundamenta sobre los siguientes conceptos, detallados a continuación:

- Trabajo tarifado por tiempo empleado.
- Amortización del inmovilizado material.
- Redacción del proyecto.
- Derechos de visado del COIT.
- Gastos de tramitación y envío.
- Aplicación de impuestos.

## Trabajo tarifado por tiempo empleado

La aproximación del importe de las horas empleadas en la realización del presente proyecto con respecto a los honorarios finales estimados, está indicada en la siguiente fórmula de recomendación del COIT:

$$H = 74.88 * H_N * C_T + 96.72 * H_E * C_T \text{ euros}$$

En donde:

- H son los honorarios por tiempo.
- $H_N$  son las horas trabajadas dentro de la jornada laboral.
- $H_E$  son las horas especiales trabajadas.
- $C_T$  es un factor de corrección en función del número de horas trabajadas.

Asimismo, el valor del factor de correlación según el número de horas trabajadas vendrá dado por la siguiente tabla:

<b>Horas empleadas</b>	<b>Factor de Corrección C<sub>T</sub></b>
Hasta 36 horas	1,0
De 36 a 72 horas	0,90
De 72 a 108 horas	0,80
De 108 a 144 horas	0,70
De 144 a 180 horas	0,65
De 180 a 360 horas	0,60
De 360 a 540 horas	0,55
De 540 a 720 horas	0,55
De 720 a 1080 horas	0,45
Más de 1080 horas	0,40

Para la realización del presente proyecto, se estima que se ha trabajado 1600 horas laborales (8 horas x 5 días x 4 semanas x 10 meses) y 0 horas especiales. Como el número de horas trabajadas es superior a 1080 horas, se aplicará un factor de corrección de 0,40.

Por lo tanto, los honorarios asociados al total de horas trabajadas en este proyecto han sido:

$$H = 74,88 * 1600 * 0,40 + 96,72 * 0 * 0,40 = 47.923,2 \text{ €}$$

Los honorarios totales por tiempo dedicado libres de impuestos ascienden a *cuarenta y siete mil novecientos veintitrés euros con veinte céntimos* (47.923,2 €)

## **Amortización del inmovilizado material**

Entre los recursos materiales utilizados para la realización de este proyecto se incluyen las herramientas software de desarrollo de los algoritmos del sistema, los paquetes software usados para la redacción de la memoria, y el sistema operativo bajo el que se ejecutó el trabajo. Asimismo, se incluyen los equipos hardware usados para dar soporte a estas herramientas.

Se estipula el coste de amortización para un período de 3 años. Para ello, se utilizará un sistema de amortización lineal o constante, en el que se supone que el

inmovilizado material se deprecia de forma constante a lo largo de su vida útil. La cuota de amortización anual se calcula usando la siguiente fórmula:

$$\text{Cuota de amortización anual} = \frac{\text{Valor de adquisición} - \text{Valor residual}}{\text{N}^{\circ} \text{ de años de vida útil}}$$

El “valor residual” es el valor teórico que se supone que tendrá el elemento después de su vida útil.

### Amortización del material hardware

Puesto que la elaboración del proyecto ha precisado de 10 meses de trabajo y el cálculo del coste de amortización se estipula en un periodo de tres años, los costes serán calculados como los derivados del tiempo de utilización que se ha requerido por cada uno de los elementos hardware.

En la siguiente tabla se muestra la relación de cada uno de los elementos hardware con su valor de adquisición, su valor residual y el coste de amortización finalmente obtenido.

Elementos Software	Coste	Valor residual (3 años)	Amortización 10 meses
Ordenador sobremesa (laboratorio 202): Intel® Core™ i7, 3,4 GHZ, 6 GB de RAM, 1TG disco duro	900 €	300 €	166,66 €
Ordenador sobremesa personal Intel® Core™ i7, 2,4 GHZ, 8 GB de RAM, 1TG disco duro	800 €	266,66 €	148,16 €
<b>Total Hardware</b>			<b>314,82 €</b>

Por tanto, el coste total del hardware empleado en el proyecto asciende a la cantidad de *trescientos catorce euros con ochenta y dos céntimos* (314,82 €).

### Amortización del material software

Para el cálculo del coste de amortización del software se manejan las mismas premisas que en el caso anterior. En la tabla se presentan los costes de amortización del material software:

Elementos Software	Coste	Valor residual (3 años)	Amortización 10 meses
MATLAB® 2007 Académica	2000 €	666,66 €	370,37 €
Sistema Operativo Microsoft Windows® 8 Enterprise, 64 bits.	135 €	45 €	25 €
Paquete Microsoft Office® 365 Pro Plus	155 €	51,66 €	28,70 €
Sistema Operativo Microsoft Windows® 8, 64 bits.	135 €	45 €	25 €
Paquete Microsoft Office® 365 Pro Plus	155 €	51,66 €	28,70 €
Notepad ++ 7.3.3	0 €	0 €	0 €
<b>Total Software</b>			<b>477,77 €</b>

Por tanto, el coste total del software empleado ha sido de *cuatrocientos setenta y siete euros con setenta y siete céntimos* (477,77 €).

### Cuotas de redacción

El coste asociado a la redacción del proyecto se ha calculado según la siguiente expresión propuesta por el COIT:

$$R = 0,07 * P * C_h$$

## Presupuesto

---

Donde P es el presupuesto del proyecto obtenido y  $C_h$  un coeficiente de ponderación en función del presupuesto estipulado por el COIT, que varía según el valor de P. Dicho valor se ha calculado sumando los costes de las secciones anteriores correspondientes a la amortización del inmovilizado material, tanto hardware como software, al trabajo tarifado por tiempo empleado y los gastos por desplazamiento.

Así, el valor de P asociado a este proyecto ha sido:

Concepto	Coste
Trabajo tarifado por tiempo empleado	47.923,2 €
Amortización del material hardware	314,82 €
Amortización del material software	476,66 €
<b>Total</b>	<b>48.714,68 €</b>

Que según el COIT tiene un coeficiente de ponderación de 0,4 pues es el valor fijado para proyectos cuyo presupuesto se encuentra entre los 30.050€ y los 90.150€, que es nuestro caso.

Teniendo en cuenta el presupuesto calculado en la tabla anterior, se tiene que:

$$R = 0,07 * P * C_h = 0,07 * 48.714,68 * 0,4 = \mathbf{1.364,01 \text{ €}}$$

Por lo tanto, el importe final de redacción del proyecto asciende a la cantidad de *mil trescientos sesenta y cuatro euros con un céntimo* (1.364,01 €).

## Derechos de visado

El COIT establece que para la redacción de proyectos y trabajos en general, los derechos de visado se calculan de acuerdo con la siguiente expresión:

$$V = 0,006 * P * C$$

Donde P representa el presupuesto total y C es el coeficiente reductor en función de dicho presupuesto.

El presupuesto total se obtiene de la suma de las secciones anteriores correspondientes al trabajo tarifado por tiempo empleado, la amortización del inmovilizado material y la redacción del proyecto, como se observa en la tabla:

Concepto	Coste
Trabajo tarifado por tiempo empleado	47.923,2 €
Amortización del material hardware	314,82 €
Amortización del material software	477,77 €
Redacción del proyecto	1.364,01 €
<b>Total</b>	<b>50.079,8 €</b>

En función del presupuesto obtenido, se extrae el valor del coeficiente reductor del presupuesto C, que según el COIT, para presupuestos de más de 30.050€ y menos de 90.150€ viene definido con un valor de 0,80.

Por consiguiente:

$$V = 0,006 * P * C = 0,006 * 50.079,8 * 0,8 = \mathbf{240,38 \text{ €}}$$

Finalmente, los costes por derecho de visado del proyecto ascienden a *doscientos cuarenta euros con treinta y ocho céntimos* (240,38 €).

## Gastos de tramitación y envío

Los gastos de tramitación y envío son fijos y se estipulan por el COIT en *seis euros y un céntimo* (6,01€).

## Presupuesto antes de impuestos

Sumando todos los conceptos calculados hasta el momento, se obtiene el total del presupuesto previo a la aplicación de impuestos, como se muestra a continuación.

Concepto	Coste
Trabajo tarifado por tiempo empleado	47.923,2 €
Amortización del material hardware	314,82 €
Amortización del material software	477,77 €
Coste redacción del proyecto	1.364,01 €
Derechos de visado del COIT	240,38 €.
Gastos de tramitación y envío	6,01 €
Total antes de impuestos	50.326,19 €
Aplicación de Impuestos (7% IGIC)	3.522,83 €
<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>	<b>53.849,02 €</b>

El presupuesto total, con los impuestos incluidos, asciende a la cantidad de *cincuenta y tres mil ochocientos cuarenta y nueve euros con dos céntimos* (53.849,02 €).

Las Palmas de Gran Canaria, a 26 de junio de 2017

Fdo: Patricia del Carmen González Gómez