

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA  
**Programa de Doctorado en Ingeniería Ambiental**



Tesis Doctoral

**Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes  
del satélite NOAA. Aplicación a la Península Ibérica**

Nelson Vera Mella

Tutor y Director: Dr. José María Baldasano Recio

Barcelona, mayo de 2005





# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

NELSON VERA MELLA  
DNI/Passaport: 93552555

El rector de la Universitat Politècnica de Catalunya

i en el seu nom el director del departament PROJECTES D'ENGINYERIA,  
atorga el present

y en su nombre el director del departamento PROYECTOS DE  
INGENIERÍA, otorga el presente

## Diploma d'Estudis Avançats en TECNOLOGIES DEL MEDI AMBIENT a

## Diploma de Estudios Avanzados en TECNOLOGIAS DEL MEDIO AMBIENTE a

NELSON VERA MELLA

per haver superat en data 10 de setembre de 2003 l'avaluació dels  
coneixements adquirits en els períodes de docència i de recerca que  
preveu l'art. 6è del RD 778/1998, dins del programa de doctorat  
ENGINYERIA AMBIENTAL amb la qualificació de

por haber superado en fecha 10 de Septiembre de 2003 la evaluación de  
los conocimientos adquiridos en los periodos de docencia y de  
investigación que prevé el art. 6º del RD 778/1998, en el programa de  
doctorado INGENIERÍA AMBIENTAL con la calificación de

**Notable**

**Notable**

Aquest document certifica, a l'empara de l'esmentat decret, el  
reconeixement dels estudis avançats realitzats per l'interessat en l'àrea de  
coneixement indicada, i acredita la seva Suficiència Investigadora

Este documento certifica, al amparo del citado decreto, el reconocimiento  
de los estudios avanzados realizados por el interesado en el área de  
conocimiento indicada, y acredita su Suficiencia Investigadora

Barcelona, 14 de novembre de 2003

El director del departament

La persona interessada

El cap de la Unitat de Terçer Cicle

JOSÉ Mª BALDASANO RECIO

NELSON VERA MELLA

TERESA MORERA ESCUDÉ

PEDRO SERRANO GARCÍA

(P.D.) (Resol. 2834/24.2.99)

2003/122



# Agraïments

Al Dr. José María Baldasano per la confiança i el suport donats durant el desenvolupament d'aquesta Tesi doctoral.

He d'agrair el suport donat per les diverses institucions que han proporcionat les dades necessàries per realitzar aquest treball: al Centro de Recepción, Proceso, Archivo y Distribución de Imágenes de Observación de la Tierra (CREPAD) per les imatges de satèl·lit i al Instituto Nacional de Meteorología (INM) per les dades de radiació solar d'estacions en superfície per la calibració i validació del model.

Als companys del Laboratori de Modelització Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya pel temps que hem compartit, i a tota la gent que d'una manera o d'una altra m'ha acompanyat durant el desenvolupament d'aquest treball. A més, desitjo agrair especialment la cooperació de Eugeni Lopez en tots als temes relacionats amb el SIG y la Teledetecció.

Per últim, però no per això menys important, vull agrair a la Valeria, la meva dona, pel suport i la paciència durant tot aquest temps, i a l'Anahí, la meva filla, per simplement ésser.



***A mi Padre y a mi Madre***



## Resumen

El estudio de la irradiación solar es un proceso clave para el aprovechamiento de la energía solar. En la mayoría de los casos, sin embargo, la disponibilidad de información es insuficiente y desactualizada. Adicionalmente, la interpolación de superficie obtenida a partir de estaciones de medición en superficie no permite la observación de los aspectos microclimáticos de la irradiación solar (Zelenka, 1999). Por esto, se ha elegido un modelo estadístico e imágenes del satélite NOAA-AVHRR para la determinación de mapas de irradiación solar para toda la Península Ibérica. El método estadístico basado en Diabaté (1989) y Flores (2002) asegura la exactitud del proceso y las imágenes NOAA-AVHRR una alta resolución espacial del orden de  $1 \text{ km}^2$ , lo cual es necesario dada la complejidad del área de estudio. El período de estudio es de 5 años (1998-2002), lo que permite estudiar la variación interanual de la irradiación solar. El modelo estadístico fue calibrado con 21 estaciones de medición en superficie distribuidas en toda la superficie de España. Los datos de las estaciones de medición son acuciosamente filtrados con el propósito de eliminar todos los registros erróneos, aspecto crucial del método. Las imágenes son calibradas y corregidas geométricamente, además se les realiza un proceso de detección de nubes con el fin de obtener el albedo superficial (Laine, 1999). La evaluación de los resultados, con datos de 7 estaciones de medición en superficie independientes, permite obtener un MBE de  $-3.8\%$  y un RMSE de  $24.2\%$  para los datos diarios y un MBE de  $-1.1\%$  y un RMSE de  $15.9\%$  para los datos horarios. Se obtienen mapas de irradiación solar horarios puntuales y diarios para todos los años del período de estudio, además se determina la tendencia media de los mismos. Los resultados muestran que la Península Ibérica recibe un mínimo de  $4.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  y un máximo de  $26 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , con una irradiación solar media de  $15.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . La variabilidad interanual de la irradiación solar queda expresada con valores que van desde  $14.9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para el año 2002 hasta  $17.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para el año 2000. Los resultados demuestran claramente la utilidad del trabajo en la obtención de mapas de irradiación solar horarios y diarios con una alta resolución espacial ( $1 \text{ km}^2$ ).



## Abstract

The study of solar irradiation is a key process for the exploitation of solar energy systems. In most cases, however, the availability of information is insufficient and not up-to-date. In addition, the interpolation of ground-level measurement stations data does not allow the observation of microclimatic aspects of solar irradiation (Zelenka, 1999). Therefore, a statistical model and NOAA-AVHRR satellite images were selected for the determination of solar irradiation maps for the entire Iberian Peninsula. The statistical methodology based on Diabate (1989) and Flores (2002) assures the accuracy of the process and the NOAA-AVHRR images provide a fine high resolution of  $1 \text{ km}^2$ , which is needed because of the complexity of the area of study. The period of study covers five years (1998-2002), which assures the study of the year-on-year variation of solar irradiation. The statistical model was calibrated with data from 21 ground-level measurement stations all around the Iberian Peninsula. These data were filtered with the aim of eliminating all erroneous registers, which a crucial subject in the method. The satellite images were geometrically calibrated and corrected. Furthermore, a methodology for the detection of clouds was applied in order to obtain the surface albedo (Laine, 1999). The evaluation of results, with 7 independent ground-level measurement stations, leads to a MBE of  $-3.8\%$  and a RMSE of  $24.4\%$  for the daily data and a MBE of  $-1.1\%$  and a RMSE of  $15.9\%$  for the hourly data. Maps of hourly and daily solar irradiation for the years of study and the average tendency were determined. The Iberian Peninsula receives a minimum of  $4.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  and a maximum of  $26 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  of daily solar irradiation, with a mean of  $15.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . The year-to-year variability of solar irradiation ranges between  $14.9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  for year 2002 to  $17.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  for year 2000. The results clearly show the usefulness of this work when obtaining solar irradiation maps with a high temporal (hourly and daily maps) and spatial resolution ( $1 \text{ km}^2$ ).



# Índice de Contenidos

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1	Marco General.....	1
1.2	Trabajos previos en el Laboratorio de Modelización Ambiental.....	5
1.3	Objetivos .....	5
1.4	Estructura del documento.....	7
<b>2</b>	<b>Revisión bibliográfica</b> .....	<b>9</b>
2.1	Atlas de irradiación solar .....	9
2.1.1	Europa.....	9
2.1.2	España y Comunidades Autónomas .....	11
2.1.3	Portugal.....	13
2.1.4	Estados Unidos de América.....	13
2.2	Procesamiento digital de imágenes de satélites para la estimación de la irradiación solar.....	14
2.2.1	Tipo de satélite.....	14
2.2.2	Tipo de modelo .....	15
2.3	Comparación entre datos de satélites y mediciones de estaciones de superficie para la determinación de la irradiancia solar.....	21
2.4	Conclusiones sobre el estado actual del tema .....	22
<b>3</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>29</b>
3.1	Factor de transmisión atmosférica $k(i,j)$ .....	30
3.2	Índice de nubosidad $n^t$ .....	31
3.3	Relación entre el Índice de nubosidad y el factor de transmisión atmosférica .....	32
3.4	Procedimiento operativo .....	33
3.5	Constante Solar .....	33
<b>4</b>	<b>Datos de estaciones de medición en superficie</b> .....	<b>35</b>
4.1	Filtrado de los datos .....	37
4.2	Análisis por tiempo de cobertura .....	38
4.3	Análisis por área de cobertura.....	42
4.4	Estaciones de calibración y estaciones de validación .....	42
4.5	Conclusiones .....	44

<b>5</b>	<b>Imágenes NOAA-AVHRR</b> .....	<b>45</b>
5.1	Características del Sensor AVHRR .....	46
5.2	Imágenes de satélite empleadas .....	48
5.3	Cobertura espacial de las imágenes .....	49
5.4	Corrección Geométrica .....	51
<b>6</b>	<b>Albedo</b> .....	<b>53</b>
6.1	Determinación del albedo a partir de imágenes NOAA-AVHRR .....	54
6.2	Corrección Radiométrica .....	55
6.2.1	Canales visibles .....	55
6.2.2	Canales térmicos.....	56
6.3	Detección de nubes .....	57
6.3.1	Técnicas de detección de nubes.....	57
6.3.2	Algoritmo de detección de nubes utilizado .....	59
6.4	Albedo de banda ancha .....	61
6.5	Albedo superficial.....	63
6.6	Conclusiones .....	69
<b>7</b>	<b>Irradiación solar</b> .....	<b>71</b>
7.1	Determinación del factor de transmisión atmosférica horario y diario.....	71
7.2	Determinación del índice de nubosidad en base mensual y en base anual.....	71
7.3	Determinación de los coeficientes del modelo .....	72
7.4	Determinación de la irradiación solar global a partir de datos de satélites.....	85
7.5	Comparación entre los resultados obtenidos a partir de imágenes NOAA-AVHRR con mediciones de superficie .....	86
7.5.1	Comparación de la irradiación solar diaria obtenida con las estaciones de Palma de Mallorca, Mahón e Ibiza.....	99
7.6	Mapas de irradiación solar diaria.....	104
7.6.1	Mapas de irradiación solar diaria año medio.....	104
7.6.2	Mapas de irradiación solar diaria años 1998-2002.....	121
<b>8</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	<b>125</b>
8.1	Revisión Bibliográfica .....	125
8.1.1	Atlas de irradiación solar .....	125
8.1.2	Procesamiento digital de imágenes de satélites.....	126
8.2	Albedo.....	128

8.3	Irradiación solar .....	129
8.4	Recomendaciones.....	131
8.5	Publicaciones .....	132
<b>9</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>133</b>
<b>10</b>	<b>Anexo A: Aspectos Básicos de la Radiación Solar.....</b>	<b>143</b>
10.1	Relaciones astronómicas Tierra-Sol.....	143
10.1.1	Distancia Tierra-Sol.....	143
10.1.2	Declinación solar .....	145
10.1.3	Ecuación del tiempo $E_t$ .....	146
10.1.4	Tiempo solar verdadero .....	148
10.1.5	Posición del Sol relativa a superficies horizontales.....	148
10.2	Irradiación solar extraterrestre .....	151
10.3	Unidades de medida de la irradiación solar .....	152
<b>11</b>	<b>Anexo B: Descripción de la zona de estudio.....</b>	<b>153</b>
11.1	Geografía.....	153
11.2	Orografía y Topografía .....	154
11.3	Hidrografía .....	154
11.4	Clima.....	157
11.4.1	Clima Oceánico Atlántico.....	157
11.4.2	Clima mediterráneo .....	157
11.4.3	Climas de interior .....	158
11.4.4	Climas singulares.....	158
11.5	Vegetación .....	159
<b>12</b>	<b>Anexo C: Glosario .....</b>	<b>161</b>
<b>13</b>	<b>Anexo D: Datos de irradiación solar en superficie.....</b>	<b>165</b>
<b>14</b>	<b>Anexo E: Coeficientes de calibración .....</b>	<b>207</b>
<b>15</b>	<b>Anexo F: Resultados de la validación .....</b>	<b>267</b>
<b>16</b>	<b>Anexo G: Irradiación solar diaria media, años 1998–2002.....</b>	<b>285</b>
16.1	Irradiación solar diaria - año 1998 .....	285
16.2	Irradiación solar diaria - año 1999 .....	301
16.3	Irradiación solar diaria - año 2000 .....	317
16.4	Irradiación solar diaria - año 2001 .....	333
16.5	Irradiación solar diaria - año 2002 .....	349



# Índice de Figuras

Figura 2.1:	Irradiación Solar Global Media en España en el año 2001 ( $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).....	12
Figura 4.1:	Ubicación de las estaciones de medición del INM de España.....	35
Figura 4.2:	Irradiación solar registrada en la estación San Sebastián (en azul) y la irradiación solar atenuada, igual a 0.8 de la irradiación solar extraterrestre (en rojo) .....	38
Figura 5.1:	Cobertura espacial de las imágenes NOAA-AVHRR empleadas.....	50
Figura 5.2:	Imagen NOAA-AVHRR de la Península Ibérica en proyección geográfica .....	51
Figura 5.3:	Imagen NOAA-AVHRR de la Península Ibérica en proyección UTM-30.....	52
Figura 6.1:	Algoritmo de detección de nubes (Laine, 1999) .....	60
Figura 6.2:	Clasificación de nubes, tierra y nieve en el espacio R1, T3-T4.....	60
Figura 6.3:	Albedo superficial de banda ancha de enero a junio del año medio.....	65
Figura 6.4:	Albedo superficial de banda ancha de julio a diciembre del año medio .....	66
Figura 6.5:	Histogramas de las imágenes de albedo de banda ancha de enero a junio del año medio .....	67
Figura 6.6:	Histogramas de las imágenes albedo de banda ancha de julio a diciembre del año medio .....	68
Figura 7.1a:	Regresión lineal entre $k$ y $n$ para la estación de San Sebastián para datos horarios de las 14 horas en base mensual de enero a junio de 1998.....	74
Figura 7.2:	Regresión lineal entre $k$ y $n$ para la estación de San Sebastián para datos horarios de las 14 horas en base anual de 1998.....	76
Figura 7.3a:	Regresión lineal entre $k$ y $n$ para la estación de San Sebastián para datos horarios de las 15 horas en base mensual de enero a junio de 1998.....	77
Figura 7.4:	Regresión lineal entre $k$ y $n$ para la estación de San Sebastián para datos horarios de las 15 horas en base anual de 1998.....	79
Figura 7.5a:	Regresión lineal entre $k$ y $n$ para la estación de San Sebastián para datos diarios en base mensual de enero a junio de 1998 .....	80
Figura 7.6:	Regresión lineal entre $k$ y $n$ para la estación de San Sebastián para datos diarios en base anual de 1998 .....	82
Figura 7.7:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 14 horas en base mensual estimada por el modelo y la medida en los piranómetros, para el año 1998 .....	87
Figura 7.8:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 14 horas en base anual estimada por el modelo y la medida en los piranómetros, para el año 1998.....	88
Figura 7.9:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 15 horas en base mensual estimada por el modelo y la medida en los piranómetros, para el año 1998 .....	89

Figura 7.10:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 15 horas en base anual estimada por el modelo y la medida en los piranómetros, para el año 1998 .....	90
Figura 7.11:	Comparación entre la irradiación solar diaria en base mensual estimada por el modelo y la medida en los piranómetros, para el año 1998 .....	91
Figura 7.12:	Comparación entre la irradiación solar diaria en base anual estimada por el modelo y la medida en los piranómetros, para el año 1998 .....	92
Figura 7.13:	Irradiación solar diaria estación de Palma de Mallorca ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) .....	101
Figura 7.14:	Irradiación solar diaria estación de Palma de Mallorca ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) .....	102
Figura 7.15:	Irradiación solar diaria estación de Ibiza ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) .....	103
Figura 7.16:	Mapas de Irradiación solar diaria, media anual - año medio (período 1998-2002) – Escala absoluta y escala relativa .....	105
Figura 7.17:	Mapas de la irradiación solar diaria media de enero - año medio .....	106
Figura 7.18:	Mapas de la irradiación solar diaria media de febrero - año medio .....	107
Figura 7.19:	Mapas de la irradiación solar diaria media de marzo - año medio .....	108
Figura 7.20:	Mapas de la irradiación solar diaria media de abril - año medio .....	109
Figura 7.21:	Mapas de la irradiación solar diaria media de mayo - año medio .....	110
Figura 7.22:	Mapas de la irradiación solar diaria media de junio - año medio .....	111
Figura 7.23:	Mapas de la irradiación solar diaria media de julio - año medio .....	112
Figura 7.24:	Mapas de la irradiación solar diaria media de agosto - año medio .....	113
Figura 7.25:	Mapas de la irradiación solar diaria media de septiembre - año medio .....	114
Figura 7.26:	Mapas de la irradiación solar diaria media de octubre - año medio .....	115
Figura 7.27:	Mapas de la irradiación solar diaria media de noviembre - año medio .....	116
Figura 7.28:	Mapas de la irradiación solar diaria media de junio - año medio .....	117
Figura 7.29:	Variación mensual de la irradiación solar diaria para el año medio .....	118
Figura 7.30:	Variación interanual de la irradiación solar diaria media para el período 1998-2002 .....	121
Figura 90.1:	Movimiento de la Tierra alrededor del Sol (Iqbal, 1983) .....	144
Figura 10.2:	Esfera celeste mostrando el movimiento aparente del Sol y el ángulo de declinación solar (Iqbal, 1983) .....	145
Figura 10.3:	Variación anual de la ecuación del tiempo .....	147
Figura 10.4:	Esfera celestial y coordenadas del sol relativas a un observador ubicado sobre la tierra en el punto O .....	149
Figura 10.5:	Definición del ángulo cenital del sol, la altura solar y el azimut .....	150
Figura 13.1:	Ubicación de las estaciones de medición del INM de España .....	165
Figura 13.2:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Barcelona .....	167
Figura 13.3:	Datos de irradiación solar diaria de la estación San Sebastián .....	168
Figura 13.4:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Bilbao .....	169

Figura 13.5:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Santander.....	170
Figura 13.6:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Oviedo.....	171
Figura 13.7:	Datos de irradiación solar diaria de la estación A Coruña.....	172
Figura 13.8:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Corón.....	173
Figura 13.9:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Soria.....	174
Figura 13.10:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Valladolid.....	175
Figura 13.11:	Datos de irradiación solar diaria de la estación León.....	176
Figura 13.12:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Salamanca.....	177
Figura 13.13:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Madrid.....	178
Figura 13.14:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Toledo.....	179
Figura 13.15:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Cáceres.....	180
Figura 13.16:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Ciudad Real.....	181
Figura 13.17:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Badajoz.....	182
Figura 13.18:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Huelva.....	183
Figura 13.19:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Granada.....	184
Figura 13.20:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Cádiz.....	185
Figura 13.21:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Melilla.....	186
Figura 13.22:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Málaga.....	187
Figura 13.23:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Almería.....	188
Figura 13.24:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Murcia.....	189
Figura 13.25:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Albacete.....	190
Figura 13.26:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Valencia.....	191
Figura 13.27:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Vitoria.....	192
Figura 13.28:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Logroño.....	193
Figura 13.29:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Zaragoza.....	194
Figura 13.30:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Lleida.....	195
Figura 13.31:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Tortosa.....	196
Figura 13.32:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Palma CM (Centro Meteorológico).....	197
Figura 13.33:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Palma Aeropuerto.....	198
Figura 13.34:	Datos de irradiación solar diaria de la estación Ibiza.....	199
Figura 16.1:	Mapas de la irradiación solar diaria media anual - año 1998.....	287
Figura 16.2:	Mapas de la irradiación solar diaria media enero - año 1998.....	289
Figura 16.3:	Mapas de la irradiación solar diaria media febrero - año 1998.....	290
Figura 16.4:	Mapas de la irradiación solar diaria media marzo - año 1998.....	291

Figura 16.5:	Mapas de la irradiación solar diaria media abril - año 1998 .....	292
Figura 16.6:	Mapas de la irradiación solar diaria media mayo - año 1998.....	293
Figura 16.7:	Mapas de la irradiación solar diaria media junio - año 1998.....	294
Figura 16.8:	Mapas de la irradiación solar diaria media julio - año 1998 .....	295
Figura 16.9:	Mapas de la irradiación solar diaria media agosto - año 1998 .....	296
Figura 16.10:	Mapas de la irradiación solar diaria media septiembre - año 1998 .....	297
Figura 16.11:	Mapas de la irradiación solar diaria media octubre - año 1998.....	298
Figura 16.12:	Mapas de la irradiación solar diaria media noviembre - año 1998 .....	299
Figura 16.13:	Mapas de la irradiación solar diaria media diciembre - año 1998.....	300
Figura 16.14:	Mapas de la irradiación solar diaria media anual - año 1999 .....	303
Figura 16.15:	Mapas de la irradiación solar diaria media enero - año 1999.....	305
Figura 16.16:	Mapas de la irradiación solar diaria media febrero - año 1999 .....	306
Figura 16.17:	Mapas de la irradiación solar diaria media marzo - año 1999.....	307
Figura 16.18:	Mapas de la irradiación solar diaria media abril - año 1999 .....	308
Figura 16.19:	Mapas de la irradiación solar diaria media mayo - año 1999.....	309
Figura 16.20:	Mapas de la irradiación solar diaria media junio - año 1999.....	310
Figura 16.21:	Mapas de la irradiación solar diaria media julio - año 1999 .....	311
Figura 16.22:	Mapas de la irradiación solar diaria media agosto - año 1999 .....	312
Figura 16.23:	Mapas de la irradiación solar diaria media septiembre - año 1999.....	313
Figura 16.24:	Mapas de la irradiación solar diaria media octubre - año 1999.....	314
Figura 16.25:	Mapas de la irradiación solar diaria media noviembre - año 1999 .....	315
Figura 16.26:	Mapas de la irradiación solar diaria media diciembre - año 1999.....	316
Figura 16.27:	Mapas de la irradiación solar diaria media anual - año 2000 .....	319
Figura 16.28:	Mapas de la irradiación solar diaria media enero - año 2000.....	321
Figura 16.29:	Mapas de la irradiación solar diaria media febrero - año 2000 .....	322
Figura 16.30:	Mapas de la irradiación solar diaria media marzo - año 2000.....	323
Figura 16.31:	Mapas de la irradiación solar diaria media abril - año 2000 .....	324
Figura 16.32:	Mapas de la irradiación solar diaria media mayo - año 2000.....	325
Figura 16.33:	Mapas de la irradiación solar diaria media junio - año 2000.....	326
Figura 16.34:	Mapas de la irradiación solar diaria media julio - año 2000 .....	327
Figura 16.35:	Mapas de la irradiación solar diaria media agosto - año 2000 .....	328
Figura 16.36:	Mapas de la irradiación solar diaria media septiembre - año 2000.....	329
Figura 16.37:	Mapas de la irradiación solar diaria media octubre - año 2000.....	330
Figura 16.38:	Mapas de la irradiación solar diaria media noviembre - año 2000 .....	331
Figura 16.39:	Mapas de la irradiación solar diaria media diciembre - año 2000.....	332

Figura 16.40: Mapas de la irradiación solar diaria media anual - año 2001.....	335
Figura 16.41: Mapas de la irradiación solar diaria media enero - año 2001 .....	337
Figura 16.42: Mapas de la irradiación solar diaria media febrero - año 2001.....	338
Figura 16.43: Mapas de la irradiación solar diaria media marzo - año 2001 .....	339
Figura 16.44: Mapas de la irradiación solar diaria media abril - año 2001 .....	340
Figura 16.45: Mapas de la irradiación solar diaria media mayo - año 2001 .....	341
Figura 16.46: Mapas de la irradiación solar diaria media junio - año 2001 .....	342
Figura 16.47: Mapas de la irradiación solar diaria media julio - año 2001 .....	343
Figura 16.48: Mapas de la irradiación solar diaria media agosto - año 2001.....	344
Figura 16.49: Mapas de la irradiación solar diaria media septiembre - año 2001.....	345
Figura 16.50: Mapas de la irradiación solar diaria media octubre - año 2001 .....	346
Figura 16.51: Mapas de la irradiación solar diaria media noviembre - año 2001.....	347
Figura 16.52: Mapas de la irradiación solar diaria media diciembre - año 2001 .....	348
Figura 16.53: Mapas de la irradiación solar diaria media anual - año 2002.....	351
Figura 16.54: Mapas de la irradiación solar diaria media enero - año 2002 .....	353
Figura 16.55: Mapas de la irradiación solar diaria media febrero - año 2002.....	354
Figura 16.56: Mapas de la irradiación solar diaria media marzo - año 2002 .....	355
Figura 16.57: Mapas de la irradiación solar diaria media abril - año 2002.....	356
Figura 16.58: Mapas de la irradiación solar diaria media mayo - año 2002 .....	357
Figura 16.59: Mapas de la irradiación solar diaria media junio - año 2002 .....	358
Figura 16.60: Mapas de la irradiación solar diaria media julio - año 2002 .....	359
Figura 16.61: Mapas de la irradiación solar diaria media agosto - año 2002.....	360
Figura 16.62: Mapas de la irradiación solar diaria media septiembre - año 2002.....	361
Figura 16.63: Mapas de la irradiación solar diaria media octubre - año 2002 .....	362
Figura 16.64: Mapas de la irradiación solar diaria media noviembre - año 2002.....	363
Figura 16.65: Mapas de la irradiación solar diaria media diciembre - año 2002.....	364



# Índice de Tablas

Tabla 2.1:	Resumen de la revisión bibliográfica ordenado cronológicamente.....	26
Tabla 4.1:	Coordenadas de las estaciones de medición.....	36
Tabla 4.2:	Datos útiles de irradiación solar horaria .....	39
Tabla 4.3:	Datos útiles de irradiación solar diaria .....	40
Tabla 4.4:	Resumen de los datos horarios por tipo.....	41
Tabla 4.5:	Resumen de los datos diarios por tipo .....	41
Tabla 4.6:	Estaciones de medición para calibración y validación.....	43
Tabla 5.1:	Características de los sensores AVHRR.....	47
Tabla 5.2:	Región espectral y uso principal de las bandas del sensor AVHRR .....	48
Tabla 5.3:	Archivo CREPAD.....	49
Tabla 5.4:	Imágenes NOAA-AVHRR utilizadas .....	49
Tabla 6.1:	Coefficientes empíricos para la determinación del albedo planetario .....	62
Tabla 6.2:	Albedos típicos de varias superficies (Stull, 2000) .....	63
Tabla 6.3:	Valores mínimos, máximos y medios del albedo superficial (%) de la Península Ibérica para el año medio .....	64
Tabla 7.1:	Coefficientes de calibración del modelo para la irradiación solar horarios de las 14 horas de la estación de San Sebastián para el año 1998.....	76
Tabla 7.2:	Coefficientes de calibración del modelo para la irradiación solar horaria de las 15 horas de la estación de San Sebastián para el año 1998.....	79
Tabla 7.3:	Coefficientes de calibración del modelo para la irradiación solar diaria de la estación de San Sebastián para el año 1998 .....	82
Tabla 7.4:	Estadística de los coeficiente de regresión para datos horarios .....	83
Tabla 7.5:	Estadística de los coeficiente de regresión para datos diarios.....	83
Tabla 7.6:	Coefficientes de calibración medios anuales para datos diarios .....	84
Tabla 7.7a:	Coefficientes de calibración medios anuales para datos horarios (13, 14, 15 y 16 horas) .....	84
Tabla 7.8:	Comparación entre la irradiación solar diaria estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1998 .....	93
Tabla 7.9:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 13 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1998 .....	93
Tabla 7.10:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 14 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1998 .....	94

Tabla 7.11:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 15 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1998.....	94
Tabla 7.12:	RMSE medio para la irradiación solar diaria estimada por el modelo .....	95
Tabla 7.13:	MBE medio para la irradiación solar diaria estimada por el modelo.....	95
Tabla 7.14:	RMSE medio para la irradiación solar horaria estimada por el modelo .....	95
Tabla 7.15:	MBE medio para la irradiación solar horaria estimada por el modelo .....	96
Tabla 7.16:	MBE mínimos y máximos para los datos diarios .....	97
Tabla 7.17:	RMSE mínimos y máximos para los datos diarios.....	97
Tabla 7.18:	MBE mínimos y máximos para los datos horarios.....	97
Tabla 7.19:	RMSE mínimos y máximos para los datos horarios .....	97
Tabla 7.20:	Irradiación solar diaria estación de Palma de Mallorca ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) .....	99
Tabla 7.21:	Irradiación solar diaria estación de Mahón (Menorca) ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ).....	100
Tabla 7.22:	Irradiación solar diaria estación de Ibiza ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ).....	100
Tabla 7.23:	Valores máximos, mínimos y medios de irradiación solar diaria ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) para el año medio.....	118
Tabla 7.24:	Valores mínimos, máximos y medios de irradiación solar diaria media ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) para toda el área de estudio .....	122
Tabla 13.1:	Coordenadas de las estaciones de medición .....	166
Tabla 13.2:	Datos útiles de irradiación solar horaria.....	200
Tabla 13.3:	Datos útiles de irradiación solar diaria.....	201
Tabla 13.4:	Datos erróneos de irradiación solar horaria .....	202
Tabla 13.5:	Datos erróneos de irradiación solar diaria.....	203
Tabla 13.6:	Datos vacíos de irradiación solar horaria.....	204
Tabla 13.7:	Datos vacíos de irradiación solar diaria .....	205
Tabla 14.1:	Coeficientes de calibración de la estación San Sebastián para el año 1998.....	207
Tabla 14.2:	Coeficientes de calibración de la estación Bilbao para el año 1998.....	208
Tabla 14.3:	Coeficientes de calibración de la estación Santander para el año 1998 .....	208
Tabla 14.4:	Coeficientes de calibración de la estación Oviedo para el año 1998 .....	209
Tabla 14.5:	Coeficientes de calibración de la estación para el año 1998 .....	209
Tabla 14.6:	Coeficientes de calibración de la estación Corón para el año 1998 .....	210
Tabla 14.7:	Coeficientes de calibración de la estación Valladolid para el año 1998 .....	210
Tabla 14.8:	Coeficientes de calibración de la estación León para el año 1998 .....	211
Tabla 14.9:	Coeficientes de calibración de la estación Madrid para el año 1998 .....	211
Tabla 14.10:	Coeficientes de calibración de la estación Toledo para el año 1998.....	212
Tabla 14.11:	Coeficientes de calibración de la estación Cáceres para el año 1998 .....	212
Tabla 14.12:	Coeficientes de calibración de la estación Ciudad Real para el año 1998 .....	213

Tabla 14.13:	Coeficientes de calibración de la estación Huelva para el año 1998 .....	213
Tabla 14.14:	Coeficientes de calibración de la estación Cádiz para el año 1998 .....	214
Tabla 14.15:	Coeficientes de calibración de la estación Melilla para el año 1998 .....	214
Tabla 14.16:	Coeficientes de calibración de la estación Almería para el año 1998.....	215
Tabla 14.17:	Coeficientes de calibración de la estación Murcia para el año 1998 .....	215
Tabla 14.18:	Coeficientes de calibración de la estación Valencia para el año 1998 .....	216
Tabla 14.19:	Coeficientes de calibración de la estación Logroño para el año 1998.....	216
Tabla 14.20:	Coeficientes de calibración de la estación Lleida para el año 1998.....	217
Tabla 14.21:	Coeficientes de calibración de la estación Tortosa para el año 1998 .....	217
Tabla 14.22:	Coeficientes de calibración de la estación Palma para el año 1998.....	218
Tabla 14.23:	Coeficientes de calibración anuales para el año 1998.....	219
Tabla 14.24:	Coeficientes de calibración de la estación Bilbao para el año 1999 .....	220
Tabla 14.25:	Coeficientes de calibración de la estación Santander para el año 1999.....	220
Tabla 14.26:	Coeficientes de calibración de la estación Oviedo para el año 1999.....	221
Tabla 14.27:	Coeficientes de calibración de la estación A Coruña para el año 1999.....	221
Tabla 14.28:	Coeficientes de calibración de la estación Corón para el año 1999.....	222
Tabla 14.29:	Coeficientes de calibración de la estación Valladolid para el año 1999.....	222
Tabla 14.30:	Coeficientes de calibración de la estación León para el año 1999.....	223
Tabla 14.31:	Coeficientes de calibración de la estación Madrid para el año 1999 .....	223
Tabla 14.32:	Coeficientes de calibración de la estación Toledo para el año 1999 .....	224
Tabla 14.33:	Coeficientes de calibración de la estación Cáceres para el año 1999 .....	224
Tabla 14.34:	Coeficientes de calibración de la estación Ciudad Real para el año 1999.....	225
Tabla 14.35:	Coeficientes de calibración de la estación Huelva para el año 1999 .....	225
Tabla 14.36:	Coeficientes de calibración de la estación Granada para el año 1999 .....	226
Tabla 14.37:	Coeficientes de calibración de la estación Cádiz para el año 1999 .....	226
Tabla 14.38:	Coeficientes de calibración de la estación Málaga para el año 1999.....	227
Tabla 14.39:	Coeficientes de calibración de la estación Almería para el año 1999.....	227
Tabla 14.40:	Coeficientes de calibración de la estación Murcia para el año 1999 .....	228
Tabla 14.41:	Coeficientes de calibración de la estación Albacete para el año 1999 .....	228
Tabla 14.42:	Coeficientes de calibración de la estación Valencia para el año 1999 .....	229
Tabla 14.43:	Coeficientes de calibración de la estación Logroño para el año 1999.....	229
Tabla 14.44:	Coeficientes de calibración de la estación Palma para el año 1999.....	230
Tabla 14.45:	Coeficientes de calibración anuales para el año 1999.....	231
Tabla 14.46:	Coeficientes de calibración de la estación San Sebastián para el año 2000 .....	232
Tabla 14.47:	Coeficientes de calibración de la estación Bilbao para el año 2000 .....	232

Tabla 14.48:	Coeficientes de calibración de la estación Santander para el año 2000 .....	233
Tabla 14.49:	Coeficientes de calibración de la estación Oviedo para el año 2000 .....	233
Tabla 14.50:	Coeficientes de calibración de la estación A Coruña para el año 2000 .....	234
Tabla 14.51:	Coeficientes de calibración de la estación Corón para el año 2000 .....	234
Tabla 14.52:	Coeficientes de calibración de la estación Valladolid para el año 2000 .....	235
Tabla 14.53:	Coeficientes de calibración de la estación León para el año 2000 .....	235
Tabla 14.54:	Coeficientes de calibración de la estación Madrid para el año 2000 .....	236
Tabla 14.55:	Coeficientes de calibración de la estación Cáceres para el año 2000 .....	236
Tabla 14.56:	Coeficientes de calibración de la estación Ciudad Real para el año 2000 .....	237
Tabla 14.57:	Coeficientes de calibración de la estación Granada para el año 2000.....	237
Tabla 14.58:	Coeficientes de calibración de la estación Cádiz para el año 2000.....	238
Tabla 14.59:	Coeficientes de calibración de la estación Melilla para el año 2000.....	238
Tabla 14.60:	Coeficientes de calibración de la estación Málaga para el año 2000 .....	239
Tabla 14.61:	Coeficientes de calibración de la estación Almería para el año 2000 .....	239
Tabla 14.62:	Coeficientes de calibración de la estación Murcia para el año 2000.....	240
Tabla 14.63:	Coeficientes de calibración de la estación Albacete para el año 2000.....	240
Tabla 14.64:	Coeficientes de calibración de la estación Valencia para el año 2000.....	241
Tabla 14.65:	Coeficientes de calibración de la estación Vitoria para el año 2000.....	241
Tabla 14.66:	Coeficientes de calibración de la estación Logroño para el año 2000 .....	242
Tabla 14.67:	Coeficientes de calibración de la estación Zaragoza para el año 2000 .....	242
Tabla 14.68:	Coeficientes de calibración anuales para el año 2000 .....	243
Tabla 14.69:	Coeficientes de calibración de la estación San Sebastián para el año 2001.....	244
Tabla 14.70:	Coeficientes de calibración de la estación Santander para el año 2001 .....	244
Tabla 14.71:	Coeficientes de calibración de la estación Oviedo para el año 2001 .....	245
Tabla 14.72:	Coeficientes de calibración de la estación A Coruña para el año 2001 .....	245
Tabla 14.73:	Coeficientes de calibración de la estación Valladolid para el año 2001 .....	246
Tabla 14.74:	Coeficientes de calibración de la estación León para el año 2001 .....	246
Tabla 14.75:	Coeficientes de calibración de la estación Salamanca para el año 2001.....	247
Tabla 14.76:	Coeficientes de calibración de la estación Madrid para el año 2001 .....	247
Tabla 14.77:	Coeficientes de calibración de la estación Toledo para el año 2001 .....	248
Tabla 14.78:	Coeficientes de calibración de la estación Ciudad Real para el año 2001 .....	248
Tabla 14.79:	Coeficientes de calibración de la estación Granada para el año 2001.....	249
Tabla 14.80:	Coeficientes de calibración de la estación Cádiz para el año 2001 .....	249
Tabla 14.81:	Coeficientes de calibración de la estación Melilla para el año 2001.....	250
Tabla 14.82:	Coeficientes de calibración de la estación Murcia para el año 2001.....	250

Tabla 14.83:	Coeficientes de calibración de la estación Albacete para el año 2001 .....	251
Tabla 14.84:	Coeficientes de calibración de la estación Valencia para el año 2001 .....	251
Tabla 14.85:	Coeficientes de calibración de la estación Vitoria para el año 2001 .....	252
Tabla 14.86:	Coeficientes de calibración de la estación Logroño para el año 2001 .....	252
Tabla 14.87:	Coeficientes de calibración de la estación Zaragoza para el año 2001.....	253
Tabla 14.88:	Coeficientes de calibración de la estación Lleida para el año 2001.....	253
Tabla 14.89:	Coeficientes de calibración de la estación Palma para el año 2001.....	254
Tabla 14.90:	Coeficientes de calibración de la estación San José para el año 2001.....	254
Tabla 14.91:	Coeficientes de calibración anuales para el año 2001.....	255
Tabla 14.92:	Coeficientes de calibración de la estación San Sebastián para el año 2002 .....	256
Tabla 14.93:	Coeficientes de calibración de la estación Santander para el año 2002.....	256
Tabla 14.94:	Coeficientes de calibración de la estación Oviedo para el año 2002.....	257
Tabla 14.95:	Coeficientes de calibración de la estación A Coruña para el año 2002.....	257
Tabla 14.96:	Coeficientes de calibración de la estación Valladolid para el año 2002.....	258
Tabla 14.97:	Coeficientes de calibración de la estación León para el año 2002.....	258
Tabla 14.98:	Coeficientes de calibración de la estación Salamanca para el año 2002 .....	259
Tabla 14.99:	Coeficientes de calibración de la estación Madrid para el año 2002.....	259
Tabla 14.100:	Coeficientes de calibración de la estación Toledo para el año 2002 .....	260
Tabla 14.101:	Coeficientes de calibración de la estación Ciudad Real para el año 2002.....	260
Tabla 14.102:	Coeficientes de calibración de la estación Melilla para el año 2002 .....	261
Tabla 14.103:	Coeficientes de calibración de la estación Málaga para el año 2002.....	261
Tabla 14.104:	Coeficientes de calibración de la estación Murcia para el año 2002 .....	262
Tabla 14.105:	Coeficientes de calibración de la estación Valencia para el año 2002 .....	262
Tabla 14.106:	Coeficientes de calibración de la estación Vitoria para el año 2002 .....	263
Tabla 14.107:	Coeficientes de calibración de la estación Logroño para el año 2002.....	263
Tabla 14.108:	Coeficientes de calibración de la estación Zaragoza para el año 2002.....	264
Tabla 14.109:	Coeficientes de calibración de la estación Palma para el año 2002.....	264
Tabla 14.110:	Coeficientes de calibración de la estación San José para el año 2002.....	265
Tabla 14.111:	Coeficientes de calibración anuales para el año 2002.....	266
Tabla 15.1:	Comparación entre la irradiación solar diaria estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1998 .....	267
Tabla 15.2:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 13 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1998 .....	268
Tabla 15.3:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 14 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1998 .....	268

Tabla 15.4:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 15 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1998.....	269
Tabla 15.5:	Comparación entre la irradiación solar diaria estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1999.....	270
Tabla 15.6:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 14 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1999.....	270
Tabla 15.7:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 15 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1999.....	271
Tabla 15.8:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 16 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 1999.....	271
Tabla 15.9:	Comparación entre la irradiación solar diaria estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2000.....	272
Tabla 15.10:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 15 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2000.....	273
Tabla 15.11:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 16 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2000.....	274
Tabla 15.12:	Comparación entre la irradiación solar diaria estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2001.....	275
Tabla 15.13:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 13 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2001.....	276
Tabla 15.14:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 14 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2001.....	277
Tabla 15.15:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 15 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2001.....	278
Tabla 15.16:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 16 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2001.....	279
Tabla 15.17:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 17 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2001.....	280
Tabla 15.18:	Comparación entre la irradiación solar diaria estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2002.....	281
Tabla 15.19:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 13 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2002.....	282
Tabla 15.20:	Comparación entre la irradiación solar horaria de las 14 horas estimada por el modelo y la medida por piranómetros para el año 2002.....	283