



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

# DISEÑO DE UN SISTEMA INTEGRADO PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE DATOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS

TESIS DOCTORAL

Javier Estévez Gualda

DIRECTOR:

Pedro D. Gavilán Zafra

TUTOR:

Juan Vicente Giráldez Cervera

Departamento de Agronomía

Universidad de Córdoba

Junio 2008

TITULO: *Diseño de un sistema integrado para el control de calidad de datos de estaciones meteorológicas automáticas*

AUTOR: *JAVIER ESTEVEZ GUALDA*

---

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2010  
Campus de Rabanales  
Ctra. Nacional IV, Km. 396  
14071 Córdoba

[www.uco.es/publicaciones](http://www.uco.es/publicaciones)  
[publicaciones@uco.es](mailto:publicaciones@uco.es)

---

ISBN-13: 978-84-693-3000-5





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA  
E.T.S.I.AGRÓNOMOS Y MONTES

Campus de Rabanales  
Edificio C4 Celestino Mutis  
Ctra. Madrid, Km 396  
14071 CÓRDOBA  
SPAIN  
Teléf. 34 - 957 - 21 8502  
Fax 34 - 957 - 21 85 69  
e-mail ag3vace@uco.es

**D. Pedro Gavilán Zafra** y **D. Juan Vicente Giráldez Cervera**, director y tutor respectivamente de la Tesis Doctoral del alumno de tercer ciclo **D. Javier Estévez Gualda**, titulada "*Diseño de un sistema integrado para el control de calidad de datos de estaciones meteorológicas automáticas*", informan que el doctorando ha cubierto los objetivos propuestos en la mencionada Tesis.

Por todo ello creemos que procede la presentación de la misma para su exposición y defensa.

Córdoba 21 de abril de 2008.

Fdo.: Pedro Gavilán Zafra

Fdo.: Juan V. Giráldez Cervera

## *Agradecimientos*

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi director Pedro Gavilán por haberme permitido realizar esta Tesis Doctoral y por supuesto por haberla ideado inicialmente. Sus consejos, sus exhaustivas correcciones y su implicación en todo momento han hecho posible la realización de la misma, especialmente con su plena dedicación en el periodo final.

También mi agradecimiento a todos los compañeros del Centro IFAPA “Alameda del Obispo” por los momentos compartidos en estos cuatro años, y especialmente a Joaquín Berengena e Ignacio Lorite.

Mi gratitud debo también a Juan Vicente Giráldez, tutor de esta Tesis Doctoral, este trabajo no hubiera sido posible sin su apoyo y colaboración en todo momento.

Quisiera agradecer al IFAPA por brindarme el soporte económico a través de la beca predoctoral “Agrometeorología aplicada al riego”, que ha hecho viable el presente trabajo.

No puedo olvidar a mi familia, mis padres y mi hermana, quién desde la cercana lejanía han estado y estarán a mi lado siempre. A mi hermano Andrés, a quien debo mi formación académica, gracias a su ejemplo.



## *Resumen*

En el presente documento se expone el resultado del trabajo de Tesis Doctoral realizado por Javier Estévez Gualda para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Córdoba.

El objetivo principal del mismo ha consistido en diseñar un sistema de control de calidad de los registros meteorológicos generados en la Red de Información Agroclimática de Andalucía. Dentro de este gran objetivo se han desarrollado métodos para efectuar los procedimientos de validación de forma automática. Se ha diseñado un sistema de aplicación remota, exportable a otras redes de estaciones meteorológicas, utilizando formatos normalizados compatibles con los Sistemas de Información Geográfica. Finalmente se ha elaborado un modelo de Metadatos para su futura incorporación dentro del sistema y se ha realizado un análisis de sensibilidad de la ecuación ASCE-Penman-Monteith para el cálculo de la  $ET_0$  utilizando los registros meteorológicos validados.

Un sistema de este tipo responde a la necesidad en la sociedad actual de una información meteorológica de calidad ágil y eficaz, cumpliendo con las directrices marcadas por la Comisión de Meteorología Agrícola de la Organización Meteorológica Mundial.





# Índice

<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Fuentes de información meteorológica en España</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2. Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIAA)</b> .....	<b>5</b>
1.2.1. Introducción .....	5
1.2.2. Elementos de la Estación Meteorológica Automática .....	7
Trípode.....	7
Caja Intemperie.....	7
Unidad Central.....	8
Alimentación .....	9
Memoria .....	10
Panel de Conexiones.....	10
Módem .....	11
1.2.3. Sensores de la Estación Meteorológica Automática .....	12
Sonda de Humedad Relativa y Temperatura del aire .....	12
Pluviómetro.....	13
Anemoveleta.....	14
Piranómetro .....	15
1.2.4. Características de los sensores .....	16
1.2.5. Funcionamiento .....	16
1.2.6. Mantenimiento y calibración .....	17
<b>1.3. Gestión de la calidad en datos meteorológicos según la OMM</b> .....	<b>19</b>
1.3.1. Introducción .....	19
1.3.2. Factores que afectan a la calidad de los datos meteorológicos.....	20
1.3.3. Control de calidad .....	23
1.3.4. Metadatos.....	24
<b>1.4. Justificación</b> .....	<b>25</b>
<b>1.5. Objetivos y grado de innovación previsto</b> .....	<b>26</b>
<b>1.6. Datos analizados</b> .....	<b>28</b>
<b>Capítulo 2. Sistema de Control de calidad</b> .....	<b>32</b>
<b>2.1. Introducción</b> .....	<b>32</b>

---

<b>2.2. Antecedentes.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3. Procedimientos para la validación de datos meteorológicos .....</b>	<b>34</b>
2.3.1. Rangos o Intervalos .....	35
2.3.2. Consistencia Temporal .....	37
2.3.3. Persistencia.....	38
2.3.4. Consistencia Interna.....	39
2.3.5. Consistencia Espacial.....	40
<b>2.4. Inspección Manual y Toma de Decisiones.....</b>	<b>41</b>
<b>2.5. Resumen .....</b>	<b>42</b>
<b>2.6. Diseño y Arquitectura del Sistema .....</b>	<b>43</b>
2.6.1. Radiación Solar .....	44
2.6.2. Temperatura del aire.....	51
2.6.3. Humedad Relativa del aire .....	53
2.6.4. Velocidad y Dirección de Viento .....	57
2.6.5. Precipitación.....	61
2.6.6. Tests de temperatura basados en decisiones estadísticas .....	62
2.6.7. Códigos de validación y referencias empleadas .....	66
2.6.8. Arquitectura del Sistema: Plataforma, Base de Datos y Lenguajes de Programación empleados.....	68
<b>2.7. Modelo de Metadatos.....</b>	<b>70</b>
2.7.1. Introducción .....	71
2.7.2. Normas de Metadatos.....	71
2.7.3. Perfil del Núcleo Español de Metadatos .....	72
2.7.4. Creación de Metadatos .....	72
2.7.5. Catálogo de la Infraestructura de Datos de Andalucía (IDEA) .....	73
2.7.6. Normativa específica de Metadatos en Redes de Estaciones Meteorológicas Automáticas.....	73
2.7.7. Propuesta de implementación dentro del Sistema integrado de Control de Calidad.....	74
<b>Capítulo 3. Un nuevo Test de Precipitación semihoraria .....</b>	<b>76</b>
<b>3.1. Introducción.....</b>	<b>76</b>
<b>3.2. Justificación y objetivos .....</b>	<b>77</b>
<b>3.3. Datos analizados .....</b>	<b>78</b>

---

<b>3.4. Metodología</b> .....	<b>79</b>
3.4.1. Caracterización de eventos .....	80
3.4.2. Depuración manual de la base de datos diaria.....	81
3.4.3. Análisis de los datos .....	82
Eventos diurnos húmedos correspondientes a lluvia .....	82
Eventos diurnos húmedos correspondientes a riegos.....	83
3.4.4. Correlación entre variables .....	85
3.4.5. Análisis estadístico de los datos.....	87
<b>3.5. Diseño del Test de validación</b> .....	<b>92</b>
3.5.1. Introducción .....	92
3.5.2. Valores umbrales de $K_T$ y HR .....	93
3.5.3. Distribución conjunta de las variables.....	94
3.5.4. Diagrama de flujo .....	97
<b>3.6. Resultados y Discusión</b> .....	<b>99</b>
3.6.1. Aplicación del test de validación a la estación de la RIAA de Córdoba	99
3.6.2. Aplicación del test de validación a la estación de El Carpio (Córdoba)	101
3.6.3. Aplicación del test de validación a la estación de Basurta-Jerez de la	103
Frontera (Cádiz) .....	
<b>3.7. Conclusiones y futuras líneas de trabajo</b> .....	<b>105</b>
<b>Capítulo 4. Resultados del Sistema de Control de Calidad</b> .....	<b>107</b>
4.1. Depuración de la base de datos .....	107
4.2. Radiación Solar .....	109
4.3. Temperatura del aire .....	114
4.4. Humedad Relativa del aire.....	116
4.5. Velocidad y Dirección de Viento .....	119
4.6. Precipitación .....	125
4.7. Tests basados en decisiones estadísticas .....	129
4.7.1. Errores Tipo I.....	129
4.7.2. Errores Tipo II .....	136
4.7.3. Conclusiones .....	139

Capítulo 5. Análisis de sensibilidad de la ecuación estandarizada para el cálculo de la $ET_0$ (ASCE-Penman-Monteith) a escala diaria.....	141
5.1. Introducción.....	141
5.2. Materiales y Métodos.....	143
5.2.1. Datos analizados.....	143
5.2.2. Ecuación estandarizada para el cálculo de $ET_0$ según ASCE-Penman-Monteith (ASCE-PM).....	144
5.2.3. Análisis y coeficientes de sensibilidad.....	145
5.2.4. Simulación e introducción de errores.....	146
5.3. Resultados y Discusión.....	148
5.4. Conclusiones.....	159
Conclusiones generales.....	161
Anejo I.....	163
Bibliografía.....	173

## *Índice de Figuras*

Figura 1. Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIAA) y zonas regables. ....	6
Figura 2. Estación Meteorológica Automática de la RIAA .....	7
Figura 3. Caja Intemperie modelo ENC 12/14 de Campbel Scientific.....	8
Figura 4. Interior de la Caja Intemperie .....	9
Figura 5. Panel Solar .....	10
Figura 6. Panel de Conexiones .....	11
Figura 7. Sonda de HR y T. Izquierda (a) con protector y derecha (b) sin protector.....	13
Figura 8. Pluviómetro modelo ARG100 de Campbell Scientific Ltd. ....	14
Figura 9. Anemoveleta Young 05103.....	15
Figura 10. Piranómetro Skye SP1110.....	15
Figura 11. Instalación de sensores en paralelo.....	17
Figura 12. Área de influencia de los cuatro técnicos de mantenimiento de la RIAA. ....	18
Figura 13. Finca del Centro “Alameda del Obispo” de Córdoba donde están situadas las dos estaciones meteorológicas.....	79
Figura 14. Falsos positivos registrados en los años 2003 (a) y 2004 (b) en la estación de la RIAA de Córdoba.....	81
Figura 15. Datos semihorarios de precipitación ( $P_{sh}$ ), humedad relativa ( $HR_{sh}$ ), radiación solar medida ( $Rs_{sh}$ ), radiación solar teórica en cielo despejado ( $R_{so}$ ) y coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ) registrados en la estación de Córdoba (RIAA) los días 9 de Agosto de 2004 (día 222) (a) y 30 de Enero de 2004 (día 30) (b).....	82
Figura 16. Datos semihorarios de precipitación ( $P_{sh}$ ), humedad relativa ( $HR_{sh}$ ), radiación solar medida ( $Rs_{sh}$ ), radiación solar teórica en cielo despejado ( $R_{so}$ ) y coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ) registrados en la estación de Córdoba (RIAA) los días 24 de Agosto de 2004 (día 237) (a) y el 21 de Septiembre de 2004 (día 271) (b).....	83
Figura 17. Datos semihorarios de precipitación ( $P_{sh}$ ), humedad relativa ( $HR_{sh}$ ), radiación solar medida ( $Rs_{sh}$ ), radiación solar teórica en cielo despejado ( $R_{so}$ ) y coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ) registrados en la estación de Córdoba (RIAA) el 22 de Septiembre de 2004 (día 272). 85	85

Figura 18.	Valores promedio de Temperatura y Humedad Relativa (a) y Velocidad y Dirección de viento (b) durante los eventos diurnos de lluvia en función de los promedios de $K_T$ . Período: 2001-2004 .....	86
Figura 19.	Volumen de agua y duración de los eventos de lluvia en función de los promedios de $K_T$ . Período: 2001-2004.....	86
Figura 20.	Funciones de densidad de probabilidad de $K_T$ (a) y HR (b) y ajustes con las distribuciones LogNormal (a) y de Weibull (b), respectivamente. Eventos de lluvia cierta en el periodo 2001-2004.....	87
Figura 21.	Funciones de densidad de probabilidad de $K_T$ (a) y HR (b) y ajustes con las distribuciones de Weibull (a) y Normal (b), respectivamente. Eventos Falsos Positivos en el periodo 2001-2004. ....	88
Figura 22.	Funciones de probabilidad acumulada observada y esperada de $K_T$ (a) y HR (b). Para $K_T$ y HR se ha utilizado una distribución LogNormal ajustada (a) y una distribución de Weibull ajustada (b), respectivamente. Eventos de lluvia cierta en el periodo 2001-2004. ....	89
Figura 23.	Funciones de probabilidad acumulada observada y esperada de $K_T$ (a) y HR (b). Para $K_T$ y HR se ha utilizado una distribución de Weibull ajustada (a) y una distribución Normal ajustada (b), respectivamente. Eventos Falsos Positivos en el periodo 2001-2004. ....	89
Figura 24.	Valores promedios de $K_T$ y HR para los diferentes meses del año durante los eventos diurnos de lluvia cierta. ....	92
Figura 25.	Funciones de densidad conjunta (a) y de distribución conjunta (b) para las variables HR (tanto por uno) y $K_T$ (tanto por uno) durante los eventos de lluvia cierta.....	95
Figura 26.	Función de densidad conjunta(a) y función de distribución conjunta (b) para las variables HR (tanto por uno) y $K_T$ durante los eventos con riego.....	96
Figura 27.	Regiones definidas para el test de validación .....	96
Figura 28.	Diagrama de flujo del nuevo test de validación de datos de precipitación semihorarios .....	98
Figura 29.	Representación de los eventos diurnos húmedos para la estación de Córdoba (RIAA). Enero-Agosto 2005.....	100
Figura 30.	Representación de los eventos diurnos húmedos para la estación de El Carpio (Córdoba). Período: 2002-2004.....	102
Figura 31.	Valores semihorarios de radiación solar medida ( $R_{s_{sh}}$ ), radiación solar estimada para cielo despejado ( $R_{s_o}$ ), precipitación ( $P_{sh}$ ), humedad relativa ( $HR_{sh}$ ) y coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ) correspondientes al día 13 de Abril de 2003. Estación de El Carpio (Córdoba).....	103

Figura 32. Representación eventos diurnos húmedos para la estación de la RIA de Basurta-Jerez de la Frontera (Cádiz). Período del 2002 al 2004. .104

Figura 33. Valores semihorarios de radiación solar medida ( $R_{s_{sh}}$ ), radiación solar estimada para cielo despejado ( $R_{s_o}$ ), precipitación ( $P_{sh}$ ), humedad relativa ( $HR_{sh}$ ) y coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ) correspondientes al día 4 de Junio del 2002. Estación de Basurta-Jerez de la Frontera (Cádiz). ..... 105

Figura 34. Resultado gráfico de la aplicación del test de rango flexible para los registros de Radiación Solar diaria de la estación de Las Cabezas de San Juan (Sevilla). ..... 111

Figura 35. Resultado gráfico de la aplicación del test de rango flexible para los registros de radiación solar diaria de la estación de Córdoba..... 112

Figura 36. Evolución diaria del Ratio entre la  $V_{v_{max}}$  y  $V_v$  en la estación de Santaella (Córdoba) (a) y en la estación de Conil de la Frontera (Cádiz) (b). ..... 122

Figura 37. Función de densidad conjunta Velocidad de Viento-Dirección de Viento para los años 2003 a 2006 en la estación de El Carpio (Córdoba). 124

Figura 38. Porcentaje de datos semihorarios de velocidad de viento ( $V_{v_{sh}}$ ) correspondientes a calma (velocidad < 0.67 m/s) ..... 125

Figura 39. Valores semihorarios de Radiación solar ( $R_{s_{sh}}$ ), Radiación solar en cielo despejado ( $R_{s_o}$ ) y Precipitación ( $P_{sh}$ ) para el 26 de Abril de 2002 en la estación de Tíjola (Almería) ..... 128

Figura 40. Fracción de datos detectados por los tests de rango dinámico (a-b) y de consistencia temporal (c-d) en función de los diferentes valores del factor f. .... 130

Figura 41. Fracción de datos detectados por los tests de persistencia (a-b) y de coherencia espacial (c-d) en función de los diferentes valores del factor f. .... 131

Figura 42. Porcentaje de potenciales errores Tipo I con  $f=3.0$  para el Test de Rango Dinámico aplicado a temperatura máxima (a), mínima (b) y media (c). ..... 132

Figura 43. Porcentaje de potenciales errores Tipo I con  $f=3.0$  para el Test de Consistencia Temporal aplicado a temperatura máxima (a), mínima (b) y media (c). ..... 134

Figura 44. Porcentaje de potenciales errores Tipo I con  $f=3.0$  para el Test de Coherencia Espacial aplicado a temperatura máxima (a), mínima (b) y media (c). ..... 135

Figura 45. Sensibilidad de la ecuación de la  $ET_0$  (ASCE-PM) a los errores sistemáticos (a y c) y aleatorios (b y d) introducidos en las variables

meteorológicas para los meses de Enero, Febrero, Marzo (a y b) y para Abril, Mayo, Junio (c y d).....	149
Figura 46. Sensibilidad de la ecuación de la $ET_0$ (ASCE-PM) a los errores sistemáticos (a y c) y a los errores aleatorios (b y d) introducidos en las variables meteorológicas para los meses de Julio, Agosto, Septiembre (a y b) y para Octubre, Noviembre y Diciembre (c y d).....	150
Figura 47. Evolución anual de los coeficientes de sensibilidad medios mensuales para los dos tipos de errores y para las variables meteorológicas: T (Temperatura), Rs (Radiación Solar), Vv (Velocidad de viento) y HR (Humedad Relativa).....	155
Figura 48. Coeficientes de sensibilidad para errores sistemáticos en la Velocidad de Viento (Vv) como función de los valores medios de Vv (meses de Abril, Mayo y Junio).....	156
Figura 49. Distribución espacial de los coeficientes de sensibilidad para los errores sistemáticos durante los meses de Abril, Mayo y Junio para temperatura (a), radiación solar (b), velocidad del viento (c) y humedad relativa (d). .....	157



## *Índice de Tablas*

Tabla 1. Características de los sensores instalados en las estaciones meteorológicas automáticas de la RIAA .....	16
Tabla 2. Listado de las Estaciones meteorológicas automáticas analizadas de la RIAA.....	29
Tabla 3. Límites físicos de diferentes variables meteorológicas (UNE 500540, 2004). .....	36
Tabla 4. Tolerancias propuestas en función del tiempo transcurrido entre medidas consecutivas (WMO, 1993).....	38
Tabla 5. Clasificación de errores .....	63
Tabla 6. Códigos de validación empleados en el sistema de control de calidad. ....	67
Tabla 7. Resumen referencias bibliográficas empleadas.....	67
Tabla 8. Riegos efectuados y falsos positivos detectados y depurados manualmente de la base de datos diaria (estación de la RIAA- Córdoba)..	82
Tabla 9. Valores del estadístico D y del valor crítico C para un $\alpha=0.05$ . Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov. ....	90
Tabla 10. Valores máximos observados de $K_T$ y HR y valores registrados para los distintos cuantiles durante los eventos húmedos diurnos. ....	91
Tabla 11. Valor umbral máximo de $K_T$ y mínimo de HR ( $p=0.05$ ) corregidos con la incertidumbre de cada sensor para los eventos de lluvia cierta.....	93
Tabla 12. Valor umbral máximo de $K_T$ y mínimo de HR observados y corregidos con la incertidumbre de cada sensor para los eventos de lluvia cierta. ....	94
Tabla 13. Valor umbral máximo de $K_T$ y mínimo de HR ( $p=0.05$ ) corregidos con la incertidumbre de cada sensor para los eventos en días de riego.....	94
Tabla 14. Valores máximos y mínimos de $K_T$ y HR observados y corregidos con la incertidumbre de cada sensor para los eventos en días de riego.....	94
Tabla 15. Resultados del test de validación de datos de precipitación diurnos semihorarios. Estación de la RIAA (Córdoba).....	100
Tabla 16. Resultados del test de validación de datos de precipitación diurnos semihorarios. Estación del El Carpio (Córdoba).....	101
Tabla 17. Resultados del test de validación de datos de precipitación diurnos semihorarios. Estación Basurta-Jerez de la Frontera (Cádiz).....	103

Tabla 18.	Número de datos y registros meteorológicos en blanco para las distintas variables meteorológicas en escala diaria. Distribución porcentual en años. ....	108
Tabla 19.	Número de datos y registros meteorológicos en blanco para las distintas variables meteorológicas en escala semihoraria. Distribución porcentual en años.....	108
Tabla 20.	Porcentaje de datos que no han superado el test de rango rígido aplicado a los registros de $R_s$ (Radiación solar diaria) y $R_{s_{sh}}$ (Radiación solar semihoraria) .....	109
Tabla 21.	Porcentaje de datos que no han superado el test de rango flexible aplicado a los registros de $R_s$ (Radiación solar diaria) .....	110
Tabla 22.	Porcentaje de datos que no han superado los tests de consistencia temporal aplicado a registros de $R_{s_{sh}}$ y de persistencia aplicado a registros de $R_{s_{sh}}$ y $R_s$ .....	113
Tabla 23.	Porcentaje de datos que no han superado los diferentes tests de consistencia interna aplicados a Temperatura máxima, mínima y media diaria ( $T_{max}$ , $T_{min}$ y $T_{med}$ respectivamente) .....	114
Tabla 24.	Porcentaje de datos que no han superado los tests de consistencia temporal y persistencia aplicados a datos semihorarios de temperatura del aire ( $T_{sh}$ ).....	115
Tabla 25.	Porcentaje de registros que no han superado el test de rango fijo para los registros de Humedad Relativa máxima, mínima, media y semihoraria ( $HR_{max}$ , $HR_{min}$ , $HR_{med}$ y $HR_{sh}$ , respectivamente).....	116
Tabla 26.	Porcentaje de datos de $HR_{max}$ (humedad relativa máxima) y de $HR_{sh}$ (humedad relativa media semihoraria) que alcanzan el valor físico máximo (100%) .....	117
Tabla 27.	Porcentaje de datos que no han superado los tests de consistencia interna aplicados a las variables de Humedad Relativa máxima, mínima, media y semihoraria ( $HR_{max}$ , $HR_{min}$ , $HR_{med}$ y $HR_{sh}$ , respectivamente) .....	117
Tabla 28.	Porcentaje de datos que no han superado los tests de persistencia aplicados a las variables de Humedad Relativa máxima, mínima, media y semihoraria ( $HR_{max}$ , $HR_{min}$ , $HR_{med}$ y $HR_{sh}$ , respectivamente) y de consistencia temporal aplicados a $HR_{sh}$ .....	118
Tabla 29.	Porcentaje de datos que no han superado los tests de consistencia interna aplicados a la velocidad de viento máxima y media diaria y semihoraria ( $V_{v_{max}}$ , $V_v$ y $V_{v_{sh}}$ ) y para dirección de viento media diaria y semihoraria ( $D_v$ y $D_{v_{sh}}$ ) .....	120
Tabla 30.	Porcentaje de datos que no han superado los tests de consistencia temporal aplicados a las variables de velocidad y dirección de viento media diaria y semihoraria ( $V_v$ , $V_{v_{sh}}$ , $D_v$ y $D_{v_{sh}}$ ).....	121

Tabla 31.	Porcentaje de datos que no han superado los tests de persistencia aplicados a velocidad de viento máxima diaria, media diaria y semihoraria ( $V_{v_{max}}$ , $V_v$ y $V_{v_{sh}}$ ) y para dirección de viento media diaria y semihoraria ( $D_v$ y $D_{v_{sh}}$ ).....	122
Tabla 32.	Porcentaje de datos que no han superado el test del Ratio entre $V_{v_{max}}$ y $V_v$ (Velocidad de viento máxima diaria y media diaria) .....	123
Tabla 33.	Porcentaje de datos marcados como calma para datos de velocidad de viento diaria y semihoraria ( $V_v$ y $V_{v_{sh}}$ ).....	124
Tabla 34.	Porcentaje de datos que no han superado el test de rango fijo para datos de precipitación diarios ( $P$ ) y semihorarios ( $P_{sh}$ ).....	126
Tabla 35.	Resultados del test de falsos positivos para precipitación semihoraria (porcentaje de datos que no han superado el test y volumen de faltos positivos en mm) .....	126
Tabla 36.	Porcentaje de errores introducidos en los registros de temperatura máxima diaria en la estación de Córdoba que ha sido detectado por cada uno de los tests, en función de la magnitud del error. ....	138
Tabla 37.	Porcentaje de errores introducidos en los registros de temperatura máxima en la estación de Cádiar (Granada) que ha sido identificado por cada uno de los tests, en función de la magnitud del error.....	139
Tabla 38.	Coefficientes de sensibilidad mensuales máximo, mínimo y medio de las variables meteorológicas T, Rs, Vv y HR para cada uno de los errores introducidos.....	151
Tabla 39.	Coefficientes de sensibilidad medios de la ecuación ASCE Penman-Monteith para la estimación de la $ET_0$ para los diferentes periodos de tiempo analizados. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación típica entre estaciones .....	153
Tabla 40.	Errores unitarios para las diferentes variables meteorológicas para las estaciones de Padul (Granada) y Palma del Río (Córdoba), derivados de la introducción de errores sistemáticos. ....	158
Tabla 41.	Valores medios mensuales de las variables T (Temperatura, °C), Rs (Radiación Solar, MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ), Vv (Velocidad de viento, m s <sup>-1</sup> ), HR (Humedad Relativa, %), P (Precipitación, mm) y $ET_0$ (Evapotranspiración de referencia, mm d <sup>-1</sup> ).....	163

# Capítulo 1. Introducción

A lo largo de los años, el conjunto de la sociedad ha ido aprendiendo a medir las variables meteorológicas y a usar esta información obtenida en muy diversas e importantes aplicaciones cotidianas. El ser humano, fascinado siempre por el clima, ha sentido la necesidad de conocer la complejidad de su comportamiento, básicamente para producir alimento y para sobrevivir. Hasta no hace mucho tiempo, la única opción para obtener los diferentes parámetros meteorológicos e hidrológicos era tomar observaciones manualmente a diferentes horas del día. Incluso actualmente, en algunos países, existen observadores (algunos de ellos voluntarios) que realizan manualmente estas mediciones, las cuales se recogen cuidadosamente en informes diseñados específicamente para esta tarea. Operadores o técnicos son los que posteriormente introducen estas observaciones en ordenadores, almacenándose en formato digital, en diferentes tipos de bases de datos. Estos registros, después de pasar un control de calidad, estarán disponibles para su uso en diferentes aplicaciones. Este es un proceso largo y complicado, en el cual pueden transcurrir varios meses hasta que estos conjuntos de datos queden a disponibilidad de la comunidad de usuarios.

Hoy día, existe en todos los países un crecimiento cada vez mayor de la necesidad de disponer de los datos meteorológicos en tiempo real o casi real (Miller y Bath, 2003). Esta información es necesaria para actividades tan importantes como la monitorización de parámetros medioambientales, la gestión de recursos hídricos, el transporte, la agricultura, el desarrollo industrial, la investigación y la transferencia tecnológica o para actividades educativas o de ocio. Los principales motores, fundamentalmente en las dos décadas pasadas, del cambio en la manera de registrar, intercambiar y almacenar estos datos meteorológicos son múltiples. Por un lado, el desarrollo de la microelectrónica en los sistemas automáticos de adquisición de datos, la continua evolución de la informática y las telecomunicaciones y, por otro lado, la integración de herramientas de teledetección con los sistemas de información geográfica. Como resultado, actualmente no sólo es posible observar los parámetros hidrológicos y meteorológicos casi en tiempo real sino que es posible analizarlos de forma dinámica, desarrollando aplicaciones y productos diseñados para satisfacer las

necesidades de los usuarios finales. El registro de las diferentes variables a través de las estaciones meteorológicas automáticas no sólo reduce costes sino que permite aumentar la superficie de cobertura y aumentar las frecuencias de muestreo para cualquier periodo de observación. Otra de las ventajas importantes de este tipo de sistemas automáticos es la posibilidad de transmitir los registros que provienen de diferentes estaciones a una unidad central de almacenamiento, permitiendo el control simultáneo y remoto de toda la red de estaciones meteorológicas. La definición de **estación meteorológica automática (EMA)** según la norma UNE 500510 (2005), elaborada por el comité técnico AEN/CTN 176 “Meteorología y Climatología” de AENOR, es la siguiente: **“Equipamiento diseñado para medir y registrar de modo automático y continuo diferentes variables meteorológicas. Según la aplicación directa de estas medidas, una EMA puede ser climática, agrometeorológica, forestal, etc.”**

En los últimos años, numerosas convenciones internacionales han aunado esfuerzos para el desarrollo conjunto de actividades e iniciativas relacionadas con el intercambio y disponibilidad de datos meteorológicos a nivel global.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) es la entidad encargada de facilitar la cooperación internacional en materia de servicios meteorológicos. Promueve el intercambio de la información, la normalización de las observaciones, así como la publicación de las mismas de una forma rápida y precisa al creciente sector de usuarios en todo el planeta. Con sede en Ginebra, esta organización forma parte de Naciones Unidas y coordina la actividad científica mundial en materia de Meteorología. Es la voz autorizada en relación con el clima de la Tierra y el estado y comportamiento de la atmósfera. Las actividades de la OMM contribuyen a la seguridad de vidas y bienes, al desarrollo socioeconómico de las naciones y a la protección del medio ambiente.

La Comisión de Meteorología Agrícola (WMO, 2006), una de las ocho Comisiones Técnicas de la OMM, viene impulsando durante sus 50 años de existencia diversos proyectos y aplicaciones agrometeorológicas como el uso de la predicción climática en las prácticas agrícolas, manejo y comunicación de la información, análisis de eventos extremos, etc. En su sesión celebrada en Ljubljana en 2002, se establecieron las líneas prioritarias de actuación mediante varios de sus programas, en las que cabe destacar un notable esfuerzo por aumentar de forma sostenible el desarrollo agrícola y la producción de alimentos, especialmente en los países en desarrollo. En este sentido, se reconoce actualmente que la evaluación de los recursos hídricos mundiales y la planificación adecuada para su conservación constituye un problema a escala mundial. Para gestionar la calidad y la cantidad de agua, atendiendo a las diversas necesidades humanas, esta comisión fomenta la cooperación entre países

y la creación de redes y servicios, de predicción y suministro de datos meteorológicos.

El objetivo de estas líneas de actuación no es otro que establecer unas pautas generales, desde un punto de vista agrometeorológico, para la conservación de los recursos naturales y el medio ambiente en armonía con los sistemas de producción agraria, sistemas cada vez más exigentes en cuanto a su sostenibilidad económica y ambiental.

Pese a toda esta serie de esfuerzos por parte de la OMM en términos de cooperación, intercambio o disponibilidad de estos datos meteorológicos, existe en estos últimos años un creciente proceso de comercialización que sufre la Meteorología por parte de los diferentes organismos nacionales, lo cual está produciendo una restricción en el intercambio nacional e internacional de la información climática (Cuadrat et al., 2002). El acceso a esta información suele estar normalmente muy restringido y los grupos de investigación habitualmente pagan cantidades elevadas para realizar sus actividades. Estos datos pese a ser oficiales -ya que proviene de Organismos Competentes en la materia- suelen venir en formatos poco manejables y sin depurar, de manera que, dependiendo del uso que el investigador, técnico o usuario final vaya a hacer de los mismos, serán más o menos útiles a la hora de cumplir los objetivos marcados.

## **1.1. Fuentes de información meteorológica en España**

Existe una extensa red en España que es gestionada por el Instituto Nacional de Meteorología (INM), recientemente Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Esta Agencia, que depende del Ministerio de Medio Ambiente, ejerce la planificación, dirección, desarrollo y coordinación de las actividades meteorológicas de cualquier naturaleza que se lleven a cabo dentro del ámbito nacional, así como la representación del Estado en materia meteorológica internacional, en especial dentro de la Organización Meteorológica Mundial.

La AEMET es el organismo competente encargado de mantener la red de observatorios, obtener la información y almacenarla para su posterior uso en función de las diferentes demandas. A través de sus Centros Territoriales se pueden realizar las diferentes peticiones de la información que se requiera. Esta red de observatorios cubre todo el territorio nacional y posee desde

observatorios clásicos instrumentales mantenidos por voluntarios hasta una densa red de estaciones meteorológicas automáticas.

El formato digital en el que se suministran los datos es ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), que son ficheros de texto o ficheros planos de los cuales hay que extraer la información. Este formato tiene la ventaja de tener un tamaño muy pequeño pero resulta tedioso el proceso de tratamiento de los datos que el usuario necesita, al igual que la detección de lagunas dentro de las series temporales facilitadas (es bastante habitual que las series temporales largas no estén completas o que haya habido cambios en la ubicación de las estaciones).

En paralelo a esta vía clásica de suministro de información meteorológica a través de la AEMET, existen actualmente otros mecanismos para obtener información climática de interés para nuestros estudios. Es aquí donde Internet juega un papel decisivo en la disponibilidad de estos datos meteorológicos. Son innumerables las páginas donde se puede encontrar este tipo de información, aunque no siempre resulte de nuestro interés debido a la escala temporal, parámetros disponibles, etc. Los propios servicios meteorológicos autonómicos del País Vasco o Cataluña, las diferentes confederaciones hidrográficas, institutos de investigación y universidades son ejemplos diferentes de instituciones u organismos que disponen de información meteorológica que puede resultar de interés para la comunidad de usuarios. Otra cuestión diferente es que estos datos satisfagan nuestras necesidades de representatividad, escala temporal, densidad espacial o garantías de calidad de los mismos.

Por otro lado, las propias Comunidades Autónomas a través de sus Consejerías tienen sus propias estructuras de registro de información climática para usos muy diversos. El Servicio de Sanidad Vegetal de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía puso en marcha en 1996 la Red de Alerta e Información Fitosanitaria (RAIF), una red de estaciones meteorológicas automáticas con el objetivo de vigilar y controlar el estado fitosanitario de los cultivos (Junta de Andalucía, 2007). En el ámbito de la agricultura, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación impulsó durante los años 1999 y 2000 la implantación a nivel nacional de la Red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío) en las diferentes Comunidades Autónomas.

## 1.2. Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIAA)

### 1.2.1. Introducción

Este es el nombre con el que se conoce a la Red SIAR en la Comunidad Autónoma Andaluza. Esta Red estuvo compuesta inicialmente por 86 estaciones meteorológicas automáticas y un Centro Regional de Explotación e Información Climática. Fue instalada con fondos procedentes de la Unión Europea (Iniciativa Comunitaria INTERREG II-C: Lucha contra la sequía) entre los años 1999 y 2000 por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (Pérez de los Cobos et al., 2003). Actualmente cuenta con un total de 94 estaciones operativas (Figura 1) y es explotada y mantenida por el Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA).

La RIAA ha supuesto un notable impulso en los trabajos de asesoramiento y asistencia técnica al regante implantados en esta región desde este mismo Instituto. Las estaciones se instalaron para dar cobertura a la mayor parte de la superficie regable de Andalucía (más de 900.000 ha), y de esta forma suministrar información meteorológica a las diferentes comunidades de regantes (De Haro et al., 2003). El objetivo inicial y prioritario de esta Red fue el de estimar las necesidades hídricas en las diferentes zonas regables de Andalucía, aunque actualmente se están utilizando para usos muy diversos tanto a nivel científico como técnico. Cabe destacar recientes trabajos como el análisis térmico para la evaluación del efecto de las heladas en Andalucía (Ruiz, et al., 2007), sobre la distribución de la aridez (Estévez et al., 2007) o el estudio de la evapotranspiración de referencia a diferentes escalas (Gavilán et al., 2006; Gavilán et al., 2008)



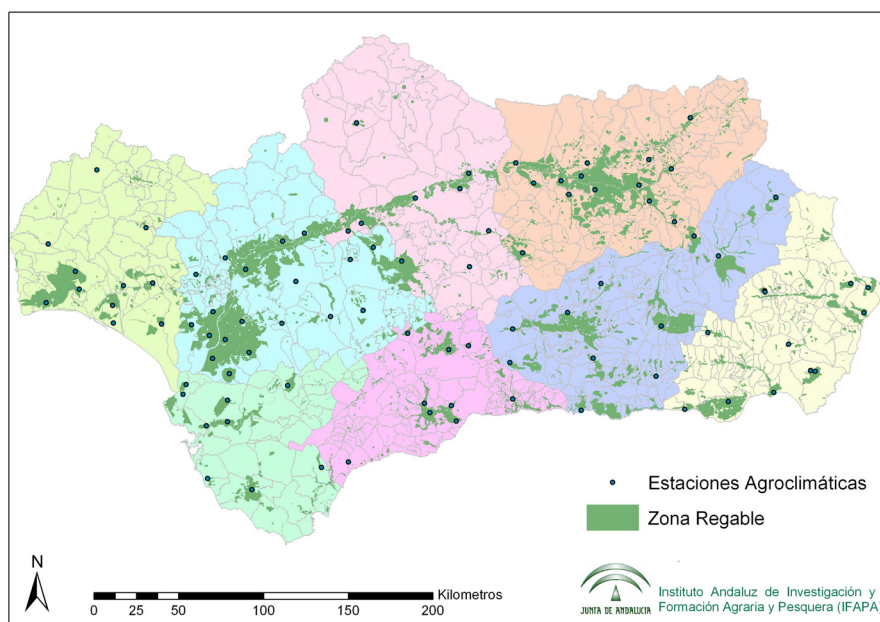


Figura 1. Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIAA) y zonas regables.

Las estaciones disponen de un equipo de adquisición de datos programable CR10X (Campbell Scientific Instruments), un pluviómetro (ARG 100), una sonda de humedad y temperatura (HMP45C, Vaisala), una anemoveleta (WS-05103, R.M. Young) para medir velocidad y dirección del viento, y un piranómetro (SP1110 Skye Instruments) para medir la radiación solar. Estas estaciones suministran registros semihorarios (valor medio cada 30 min) y medios diarios de cada una de las variables meteorológicas, así como los valores máximos (temperatura, humedad relativa y velocidad de viento), mínimos (temperatura y humedad relativa) y precipitación acumulada a lo largo de cada día. Estos registros se almacenan en bases de datos diferentes (semihoraria y diaria) y a partir de los mismos se calcula la evapotranspiración de referencia media diaria ( $ET_0$ ) mediante el método de Penman-Monteith versión FAO-56 (Allen et al., 1998). Estos valores son publicados posteriormente y de manera libre en Internet.

Todas las estaciones de la RIAA tienen la misma configuración e incorporan el mismo grupo de sensores (Figura 2). Un recinto cerrado de 10 x 10 m sirve para proteger la estación del exterior y está compuesto por una valla de 1.5 m de altura con tres filas de alambre de púas. Los diferentes elementos de las estaciones son: trípode, caja intemperie, alimentación, sonda de humedad relativa y temperatura, pluviómetro, anemoveleta, piranómetro, unidad central y módem.



Figura 2. Estación Meteorológica Automática de la RIAA

## 1.2.2. Elementos de la Estación Meteorológica Automática

### *Trípode*

Consta de un mástil de 2 metros de acero galvanizado, incluyendo el propio trípode para apoyo y fijación. Es desmontable y sus 3 patas pueden ir montadas sobre pequeños dados a modo de cimentación o simplemente sujetas al suelo con piquetas enterradas. En el mástil van montados los brazos soporte del piranómetro y del sensor de viento de la siguiente manera: anemoveleta orientada al norte y piranómetro orientado al sur.

### *Caja Intemperie*

El modelo ENC 12/14 de Campbell Scientific es una caja de dimensiones internas 355x300x15 mm (Figura 3) que permite alojar la unidad central de proceso, un módem y un regulador de batería (Figura 4). Está construida en fibra de vidrio reforzada con poliéster, resistente al agua, la corrosión y está

totalmente protegida de la entrada de polvo (grado de protección IP68), no requiriendo protección adicional para lluvia y radiación. En su interior va montada la alimentación, el equipo de adquisición de datos (datalogger) y los periféricos. En su base van instalados los conectores de plástico para los sensores y el cable de la toma de tierra.



Figura 3. Caja Intemperie modelo ENC 12/14 de Campbel Scientific

### *Unidad Central*

Es un equipo de adquisición de datos programable o datalogger (modelo CR10X) que recibe las señales de los sensores y las procesa. Sus características son (Campbell Scientific Ltd., 2000):

- Carece de teclado y pantalla.
- Tiene 12 canales analógicos SE (6 diferenciales), 2 de pulsos, 8 puertos de control digital y 3 canales de excitación (+/- 2.5V).
- Frecuencia de muestreo de 64 Hz, aunque existe una configuración especial que permitiría muestrear hasta 750 Hz.
- Rango de entrada de canales analógicos: +/- 2500 mV.
- Conversor analógico-digital de 13 bits de resolución (hasta 0.33 mV).

- Bajo consumo: 1 mA en reposo, 13 mA procesando y 46 mA en medida.
- Realiza operaciones matemáticas y cálculos estadísticos.
- Batería interna de Litio para mantener los datos, el programa y el reloj, en el caso de que la alimentación fallase.
- Temperatura de funcionamiento:  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ .



Figura 4. Interior de la Caja Intemperie

### ***Alimentación***

La estación meteorológica funciona con una tensión nominal de 9.6V a 16V. Por debajo de 9.6V el datalogger CR10X suspende la ejecución del programa para evitar la toma de datos erróneos manteniendo la información almacenada y conservando la energía restante de la batería.

Como fuente de alimentación externa para suministro de energía al datalogger y al módem GSM se emplea una batería de 12V y 80Ah, modelo DELTA80 con conexión, vía regulador, al panel solar de 20W (Figura 5) que sirve para la recarga de ésta.



Figura 5. Panel Solar

### ***Memoria***

El equipo de adquisición de datos tiene dos tipos de memoria (Campbell Scientific Ltd., 2000):

- Memoria Flash (EEPROM) de 128 Kb para cargar el sistema operativo (98 Kb) y programas del datalogger (32 Kb).
- Memoria circular estándar (SRAM) de 128 Kb para almacenamiento de datos y para ejecución de programas hasta 16 Kb, que permite almacenar hasta 62.000 valores.

Dada la configuración de memoria de tipo circular, y en función del tipo y número de datos a almacenar, se puede calcular la frecuencia mínima de extracción de datos para no perder registros.

### ***Panel de Conexiones***

Se puede apreciar en la Figura 6 y consta de los siguientes elementos (Campbell Scientific Ltd., 2000):

- Entradas analógicas: 12 en modo 'single-ended' (referenciada a tierra) o 6 en modo diferencial.
- Entradas de pulsos: con 2 entradas digitales, P1 y P2.
- Canales de excitación: las salidas etiquetadas como E1 a E3 son canales que proporcionan un voltaje de excitación a los elementos resistivos.
- Puertos digitales de control: son 8, de C1 a C8. Pueden ser configurados como entradas o salidas. Tres de ellos (C6 a C8) pueden ser utilizados como contadores de pulsos de baja frecuencia (<40 Hz).
- Tierras Analógicas: denominadas AG, se utilizan como referencia para las medidas en 'single-ended' de las entradas analógicas y como vía de retorno de las corrientes de excitación.
- Tomas de fuerza y tierra: denominadas 12V y G respectivamente. El resto alimenta elementos externos que requieran este voltaje para su funcionamiento. Las tomas de tierra se emplean como referencia para los contadores de pulsos y entradas binarias.
- Toma de 12V controlada y puerto control: para la alimentación de los sensores. Se controla la activación del sensor.
- Tomas de 5V: salidas de este voltaje para alimentar periféricos.

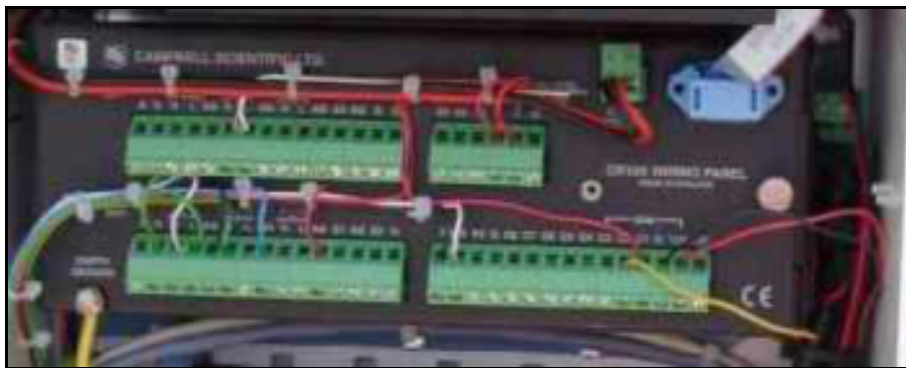


Figura 6. Panel de Conexiones

### *Módem*

Para las comunicaciones GSM que se realizan diariamente se instaló el módem WMO1-G900 de Wavecom. Es un módem compacto (115x54x33 mm) que transmite a 9600 bps. Requiere un interface S932C para conectarlo al datalogger.

### 1.2.3. Sensores de la Estación Meteorológica Automática

#### *Sonda de Humedad Relativa y Temperatura del aire*

La medida de la temperatura del aire (T) se realiza con un sensor de temperatura Pt1000, cuyo funcionamiento se basa en la variación de la resistencia eléctrica del Platino con la temperatura (Figura 7b). El Pt1000 tiene una resistencia de  $1000 \Omega$  a  $0^\circ \text{C}$  y es un sensor del tipo RTD (*Resistance Temperatura Detector*) (UNE 500510, 2005).

La medida de la Humedad Relativa (HR) se realiza mediante un dispositivo capacitivo (HUMICAP 180, polímero plástico que tiende a absorber la humedad), que cambia sus características eléctricas respondiendo a variaciones de humedad (Figura 7b), de tal manera que al absorber humedad disminuye la capacidad. Estos cambios son detectados, linealizados y amplificados por un circuito situado en la sonda que, además, compensa la HR con la T (Campbell Scientific Ltd., 1999).

Como accesorio lleva un protector para radiación con ventilación natural modelo URS1 (Figura 7a). Este dispositivo de apantallamiento múltiple protege al sensor de temperatura de la radiación directa y difusa, ya que, si ésta incidiese directamente sobre él, se registrarían medidas muy superiores a la real. Su efecto sobre el sensor de HR es el de evitar el rocío, la condensación o la lluvia, eliminando el efecto de histéresis que produciría. Su diseño es tal que permite la ventilación natural y facilita el acceso al sensor para su montaje y desmontaje.

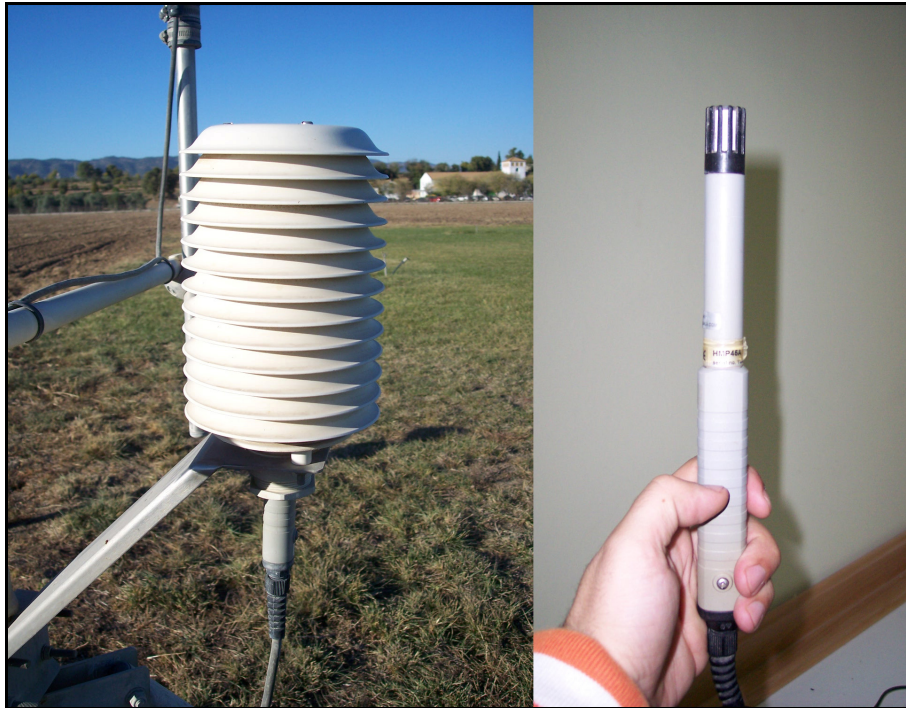


Figura 7. Sonda de HR y T. Izquierda (a) con protector y derecha (b) sin protector

### *Pluviómetro*

Se trata de un dispositivo de cazoletas basculantes que mide el volumen de precipitación (Campbell Scientific Ltd., 1998a). Está formado por dos partes, una base y un embudo superior para la recogida del agua. La base alberga el mecanismo de cazoletas basculantes, protegiéndolo del exterior y permitiendo la sujeción del pluviómetro a un soporte. Ambas partes son de plástico resistente a radiación ultravioleta (UV) y el diseño del embudo evita en gran medida las pérdidas debidas a deriva por efecto del viento (Figura 8). El mecanismo de medida consiste en que el agua recogida por el embudo pasa a una de las cazoletas situada en uno de los extremos del brazo del balancín, cuando se produce el llenado vuelca vaciando la cazoleta, posicionando la otra bajo el embudo y comenzando el llenado de ésta. En cada volcado el brazo del balancín provoca el contacto de una lengüeta solamente durante unos milisegundos. La cantidad de agua caída se mide por el número de pulsos, equivalentes cada uno a 0,2 mm.





Figura 8. Pluviómetro modelo ARG100 de Campbell Scientific Ltd.

### *Anemoveleta*

La medida de la velocidad del viento se realiza mediante la rotación de una hélice de cuatro palas que produce una señal eléctrica en corriente alterna, de frecuencia proporcional a la velocidad. Esta señal es inducida en una bobina estacionaria por el giro de un imán permanente de seis polos, solidario al eje de las hélices. La medida de la dirección del viento se realiza gracias a que la posición de la veleta es convertida por un potenciómetro de plástico conductivo de alta precisión de 10 KW de valor nominal, cuyo cursor es solidario al eje de la veleta. Cuando se aplica un voltaje constante, la señal de salida es una señal continua proporcional al ángulo medido. El cuerpo principal, la cabeza cónica, la hélice, la cola estabilizadora y otras partes internas son moldeados por inyección de plásticos resistentes a los rayos UV. El conjunto de cabeza cónica encaja en el cuerpo principal sellado por una junta tórica. La hélice y los ejes verticales se sitúan sobre unos cojinetes de acero inoxidable engrasados para proporcionar bajo par y proteger el ambiente (Campbell Scientific Ltd., 1998b) (Figura 9).



Figura 9. Anemoveleta Young 05103

### *Piranómetro*

El piranómetro es un sensor que mide la radiación solar global que incide sobre una superficie plana (UNE 500510, 2005). Consiste en una fotocélula de Silicio sensible a la radiación entre 350 y 1100 nm. Se monta sobre un brazo soporte con nivel, orientado al sur y evitando que cualquier otro sensor o accesorio del trípode proyecte sombra sobre ella (Figura 10). La cabeza está totalmente sellada y puede dejarse ininterrumpidamente en las condiciones de exposición (Skye Instruments, Ltd., 1995).



Figura 10. Piranómetro Skye SP1110

### 1.2.4. Características de los sensores

Las características de los sensores anteriormente descritos se muestran la Tabla 1, donde se puede observar el tipo de sensor, su precisión y su rango de medida.

Tabla 1. Características de los sensores instalados en las estaciones meteorológicas automáticas de la RIAA

Sensor	Variable	Precisión	Rango de medida
Pt1000	Temperatura del aire	+/- 0.2°C (20°C)	-39°C – 60°C
Humicap 180	Humedad Relativa del aire	+/- 2% (0-90%) +/- 3% (90-100%)	0.8-100%
Young 05103	Vel. viento	+/- 0.3 m s <sup>-1</sup> (1-60 m s <sup>-1</sup> )	0-60 m s <sup>-1</sup>
	Dir. viento	+/- 3°	0-360°
Skye SP1110	Radiación Solar	+/- 5%	350-1100 nm
ARG 100	Precipitación	0.2 mm/vuelco	

### 1.2.5. Funcionamiento

La frecuencia de muestreo para la radiación, pluviometría, velocidad y dirección del viento es de 10 segundos, y cada 10 minutos se muestrean la humedad relativa y la temperatura del aire. Se almacenan los registros medios semihorarios y medios diarios para todas las variables, así como los máximos y mínimos instantáneos de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento (sólo valor máximo diario) y la dirección de viento correspondiente a esa velocidad.

La transferencia de los registros meteorológicos generados en cada estación se realiza secuencialmente cada noche. Se realizan tres repeticiones por cada estación para que los datos se vuelquen a un servidor central situado en los Servicios Centrales de la Consejería de Agricultura y Pesca de Sevilla (CAP). Si por alguna razón no se pudiera establecer comunicación con alguna de las estaciones, se pospone dicha tarea para el día siguiente.

Estos datos son incorporados a una base de datos y posteriormente publicados para su descarga (sólo datos diarios) en la página web del IFAPA. Este mismo centro es el responsable de realizar semanalmente las copias de seguridad pertinentes.

### 1.2.6. Mantenimiento y calibración

El mantenimiento es parte esencial de la Red, y tiene por objeto asegurar el correcto funcionamiento, tanto de las comunicaciones y transmisión de datos, como de la calidad de la información proporcionada por los sensores instalados en cada una de las estaciones que la forman.

El mantenimiento se realiza en tres niveles (De Haro et al., 2003):

- Mantenimiento periódico de conservación (preventivo). Mensualmente se realizan en campo comparaciones de los registros de los sensores con sensores de referencia portátiles, debidamente calibrados.
- Mantenimiento anual. Se instalan sensores en paralelo de las mismas características que los instalados en cada estación (Figura 11). Los datos son recogidos con la misma frecuencia de muestreo durante dos semanas, de manera que se pueden observar errores en las medidas de los sensores o fenómenos de agotamiento.
- Mantenimiento correctivo, en el que se atiende a cualquier contingencia relacionada con el correcto funcionamiento y conservación tanto del instrumental como del recinto de las estaciones.



Figura 11. Instalación de sensores en paralelo

Para un correcto plan de mantenimiento se cuenta con personal cualificado que realiza las labores según un protocolo de actuación diseñado al efecto, así como con los elementos de reparación y reposición necesarios. Actualmente estas labores son realizadas por cuatro técnicos expertos, cada uno de ellos responsable de una zona específica, tal y como se muestra en la Figura 12. Para optimizar la frecuencia de las visitas a campo de estos técnicos y reducir los tiempos de viaje, se han establecido tres centros de trabajo, Córdoba, Granada y Sevilla.

El mantenimiento incluye los sensores y el entorno de la estación. Si ambos no reciben la atención necesaria, en ciertas ocasiones y en diferentes épocas del año, la calidad de los datos se verá afectada negativamente. El control de la vegetación y evitar la acción de los animales en el recinto donde la estación está situada, son básicos para prevenir el deterioro de los sensores y asegurar unas óptimas condiciones medioambientales y del entorno para la toma de datos.

La calibración anual de algunos sensores se realiza en el laboratorio de calibración del Centro IFAPA “Alameda del Obispo” de Córdoba. Concretamente se calibran las sondas de humedad y temperatura, pluviómetros y los piranómetros (Estévez et al., 2005).

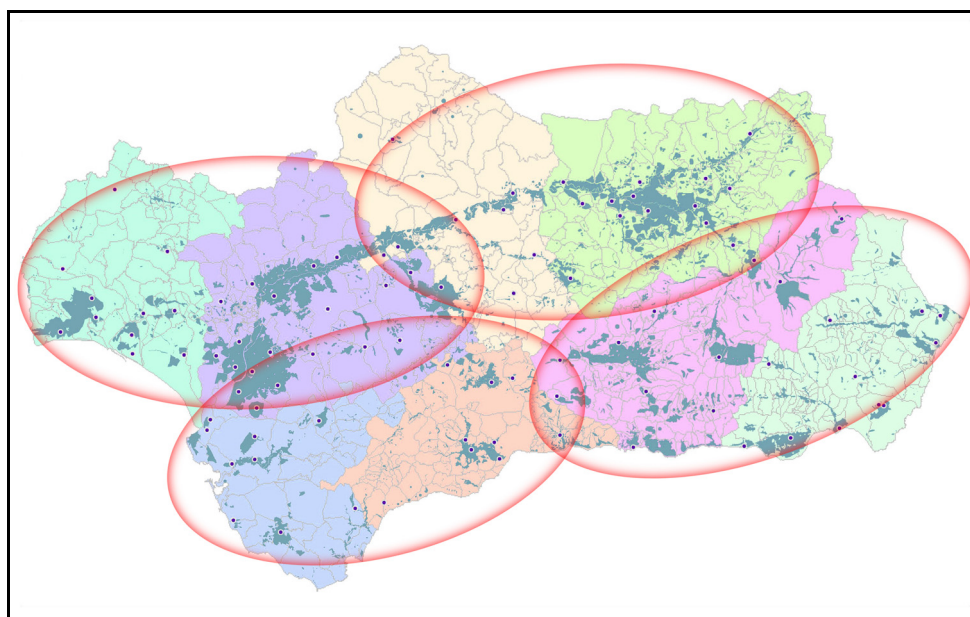


Figura 12. Área de influencia de los cuatro técnicos de mantenimiento de la RIAA

## 1.3. Gestión de la calidad en datos meteorológicos según la OMM

### 1.3.1. Introducción

Se considera que los datos meteorológicos son de calidad cuando responden a unas determinadas necesidades tanto explícitas como implícitas (WMO, 1996). Estas necesidades dependerán de las diferentes aplicaciones para las que se vaya a utilizar la información. La gestión de la calidad tiene como objetivo asegurar que los datos cumplan las condiciones necesarias (en cuanto a margen de incertidumbre, resolución, continuidad, homogeneidad, representatividad, puntualidad, formato, etc.) para la aplicación deseada, con un coste mínimo viable. Unos datos de calidad no tienen que ser necesariamente excelentes, pero es esencial que su calidad sea conocida y demostrable.

Disponer de una base de datos meteorológica de calidad no es una tarea sencilla y resulta imposible sin un sistema de gestión de calidad. Estos sistemas actúan de manera continua en todos los elementos de observación, desde la planificación de la red y la formación de personal hasta la transmisión y almacenamiento de los datos, pasando por las diferentes tareas de mantenimiento de la estación, calibración de los sensores, previsión de mecanismos de respuesta adecuados, etc. Los recursos que hay que dedicar para una gestión efectiva de la calidad representan una parte considerable del coste total de todas las operaciones dentro de una red de estaciones meteorológicas. Los datos meteorológicos que no vengan respaldados por un sistema de este tipo habrá que considerarlos como inciertos o de calidad dudosa, y su utilidad será menor.

El control de calidad es el componente mejor conocido de los sistemas de gestión de calidad y constituye el mínimo irreducible de todo sistema. Consiste en examinar los datos que provienen de las estaciones y de los centros de datos para detectar posibles errores y permitir que los datos sean corregidos y etiquetados adecuadamente. Un sistema de control de calidad debe incorporar procedimientos que verifiquen la información meteorológica y que eviten la repetición de errores, generando alertas e informando a los gestores de la correspondiente red de estaciones. Puede aplicarse en tiempo real o diferido.

La vigilancia de la calidad es una actividad en tiempo no real consistente en examinar la efectividad de la Red para detectar tendencias y deficiencias

sistemáticas. Es habitual que se utilice el término control de calidad englobando también esta actividad.

La gestión de la calidad incluye, además de estas tareas, el control de los demás aspectos que afectan directamente a la calidad de los datos: el equipo de adquisición, la exposición, los procedimientos, el mantenimiento, la inspección, el procesamiento de los datos, la formación, etc.

Para evitar posibles malentendidos y el empleo indiferente de términos relacionados con la calidad, se detallan a continuación los conceptos que la OMM aclaró en su 57 reunión dentro del programa específico “Marco de Gestión de la Calidad”, y basados en la norma ISO 9000: Sistemas de Gestión de la Calidad – Principios Básicos y vocabulario (International Organization for Standardization, 1994):

Calidad: grado en que un conjunto de características intrínsecas satisface los requisitos.

Control de calidad: parte de la gestión de la calidad concentrada en satisfacer los requisitos de calidad.

Garantía de Calidad: parte de la gestión de la calidad concentrada a brindar confianza en que se satisfarán los requisitos de calidad.

Gestión de la Calidad: coordinación de actividades para dirigir y controlar una organización respecto a la calidad.

Sistema de Gestión de la Calidad: herramienta de gestión consistente en un conjunto de normas (procedimientos) que una organización decide aplicar para lograr sus objetivos referentes a la calidad de los productos que ofrece.

Política de Calidad: intenciones y orientación generales de una organización respecto a la calidad, tal como las expresa formalmente la dirección superior.

Marco de Gestión de la Calidad: marco específico de la OMM, cuyo objetivo es abordar una amplia gama de cuestiones relativas a la gestión de la calidad que resultan de interés para los miembros de la Organización, con la inclusión de la norma ISO 9001:2000 sobre Sistemas de Gestión de la Calidad.

### **1.3.2. Factores que afectan a la calidad de los datos meteorológicos**

A continuación se describen los diferentes factores que afectan a la calidad de los datos (WMO, 1996):

Necesidades de los usuarios: la calidad de un sistema de medición puede evaluarse estableciendo una comparación entre las necesidades de los usuarios y la capacidad de los sistemas para responder a ellas.

Especificaciones funcionales y técnicas: son las que determinan el funcionamiento general del sistema de medición, requieren un conocimiento de las técnicas de mediciones meteorológicas, métodos de observación, condiciones de trabajo e infraestructuras técnicas/administrativas adecuadas y sus efectos, por tanto, sobre la calidad de los datos son considerables.

Selección de instrumentos/sensores: se debe tener en cuenta la precisión que se requiere para cada variable meteorológica, las condiciones climatológicas donde se desarrollan las aplicaciones del usuario así como la infraestructura técnica disponible para la formación, la instalación y el mantenimiento. Una elección inadecuada de los sensores o instrumentos de medida puede conllevar a una mala calidad de los datos.

Pruebas de aceptabilidad: se trata de asegurarse de que los sensores o instrumentos de medida cumplen las especificaciones originales. Es complicado y costoso llevarlo a cabo pero la OMM recomienda realizar pruebas adecuadas en condiciones de funcionamiento antes de utilizar los sensores para fines operativos.

Compatibilidad: este factor hace referencia a los posibles problemas que aparecen cuando se utilizan sensores de características técnicas diferentes para realizar el mismo tipo de mediciones, los cuales pueden aparecer cuando se pasa de mediciones manuales a automáticas o se cambian sensores que tienen diferentes especificaciones, constantes de tiempo diferentes o utilizan protecciones distintas.

Emplazamiento y exposición: la densidad de estaciones meteorológicas depende de la escala espacial y temporal de los fenómenos meteorológicos que se vayan a observar y suele estar especificada por los usuarios o definida inicialmente en los objetivos de la propia red de estaciones. Una ubicación y exposición inadecuadas puede deteriorar seriamente la exactitud y representatividad de las mediciones. Existen recomendaciones de la OMM al respecto (WMO, 1981). También hay que prestar atención a factores externos que pueden introducir errores como el polvo, la contaminación, la escarcha o el vandalismo.

Errores instrumentales: la selección adecuada de los instrumentos o sensores es una condición necesaria pero no suficiente para obtener una calidad de los datos adecuada. No hay técnica de medición perfecta, y todos los sensores producen errores sistemáticos y aleatorios. Sus efectos deben reducirse a un nivel aceptable mediante medidas preventivas y correctivas.

Acopio de datos: Las técnicas y métodos empleados para obtener los datos y convertirlos en datos representativos también influyen en la calidad de los mismos. Dependiendo de las características técnicas de un sensor, y en



particular de su capacidad de respuesta, será necesario aplicar procedimientos adecuados de muestreo y de promedio.

Procesamiento de los datos: pueden producirse errores imputables a las técnicas de conversión o a los procedimientos de computación aplicados para convertir los datos de los sensores en datos meteorológicos. En el caso de instrumentos donde la observación sea visual, puede haber problemas de transcripción del observador.

Control de calidad en tiempo real: Durante la adquisición y el procesamiento de los datos se suelen emplear procedimientos específicos de control de calidad para cada medición. Suelen consistir en comprobaciones simples de la verosimilitud de los valores registrados y en las redes de estaciones meteorológicas automáticas es usual que se realicen dentro del equipo de adquisición de datos.

Vigilancia del funcionamiento: Errores en la transmisión de datos, la deriva a largo plazo de los sensores y otro tipo de errores o fallos en el registro de las medidas de cada variable pueden pasar inadvertidos en los procedimientos comentados anteriormente. Por esa razón, es necesario que los centros de análisis meteorológico y los administradores de las redes efectúen una vigilancia del funcionamiento de la red, coordinándose entre los responsables de esta vigilancia, los de mantenimiento y calibración.

Pruebas y calibración: El rendimiento de las características funcionales de los sensores cambia por diversas razones, por ejemplo el envejecimiento o deterioro de los componentes mecánicos o electrónicos, degradación de los materiales, exceso de exposición a la intemperie, etc. Esto puede provocar que los sensores no midan correctamente, por lo cual es necesario disponer de instalaciones y equipos de calibración y prueba adecuadas.

Mantenimiento: Puede ser correctivo (de los elementos que fallan), preventivo (tareas de limpieza, lubricación, etc.) o de adaptación (en respuesta a nuevas necesidades o al deterioro u obsolescencia de los equipos o componentes). La aptitud y capacidad del personal de mantenimiento resultan esenciales para asegurar un correcto funcionamiento de las redes. Los tres tipos de mantenimiento, una gestión logística apropiada, instalaciones de reparación, prueba y servicios de apoyo son elementos necesarios para un adecuado funcionamiento de la red, pero pueden llegar a superar los costes de la compra de nuevos sensores o equipos.

Formación y educación: La calidad de los datos también depende de las aptitudes del personal técnico encargado de realizar las pruebas, la calibración o el mantenimiento. Es conveniente organizar programas de formación y educación y adaptarlos a cada sistema, de acuerdo a las necesidades de los usuarios y, especialmente a las necesidades de mantenimiento y calibración señaladas anteriormente.

**Metadatos:** Un buen sistema de calidad implica la disponibilidad de información detallada sobre el sistema de observación propiamente dicho y, en particular, sobre todos los cambios que se produzcan durante el periodo de funcionamiento. Esta información sobre los datos (metadatos) permitirá al gestor de una red de estaciones adoptar las medidas preventivas, correctivas y de adaptación más apropiadas para mantener o mejorar la calidad de los datos.

### 1.3.3. Control de calidad

La finalidad del control de calidad no es otra que la de detectar errores en el contenido de las observaciones meteorológicas y si es posible, corregirlas (WMO, 1993). Ciertos procedimientos de control de calidad deberían aplicarse a todos los datos meteorológicos destinados a intercambio internacional (WMO, 1981). Los centros de procesamiento de datos deben aplicar este tipo de procesos con el objetivo de verificar los errores de cifrado y codificación, la coherencia interna, la coherencia temporal y espacial y los límites físicos y climatológicos (WMO, 1992). Es importante distinguir entre los procedimientos necesarios que deben emplearse en redes de estaciones manuales y el de redes de estaciones automáticas. En el primer caso hay un componente humano dentro de la cadena de procesamiento de datos que es atribuible a la lectura del instrumento, a la transcripción, almacenamiento, etc. que requerirá unas verificaciones diferentes a la información que proviene de redes de estaciones automáticas. En la comprobación manual deben utilizarse métodos sencillos y bastante directos, mientras que en la verificación automática las técnicas pueden ser más complejas y tal vez más completas. Estas verificaciones dependerán, en gran medida, del sistema empleado para transferir los datos de cada estación al centro de procesamiento, del protocolo empleado para realizar dicha transferencia y de los elementos que intervengan en la misma. Así, en WMO (1993) se describen verificaciones de preproceso, verificaciones en el sector telecomunicación, verificación de la fecha y hora, verificación de la sintaxis del informe, verificación de duplicados, etc.

El conjunto de procedimientos para verificar la calidad de los registros generados puede aplicarse en tiempo real o una vez que los datos ya han sido almacenados, inicialmente en la estación o posteriormente en el centro de procesamiento de datos. Los informes de los diferentes tipos de datos se dividen en dos: los elementos de identificación y los elementos físicos de las observaciones consideradas. Aunque la verificación de los elementos físicos puede ser la tarea principal, debe tenerse en cuenta que las verificaciones de validez de los elementos de identificación son igualmente importantes. Por tanto, en el trabajo operativo, el mejor modo de actuar consiste en aplicar primero las

verificaciones de validez de los elementos que identifican las observaciones y después los elementos físicos.

La posibilidad de verificar las observaciones meteorológicas depende de la redundancia de la información. A modo de ejemplo: la ecuación hidrostática puede utilizarse para elaborar un algoritmo de control de calidad que verifique la coherencia vertical entre los datos de temperatura y geopotencial en los niveles de presión normalizados. Otro caso de este tipo es la verificación de la cizalladura vertical del viento.

En el Capítulo 2 se realiza un estudio más detallado de los procedimientos que se emplean actualmente en las redes de estaciones meteorológicas, así como su posible aplicación y adecuación a los diferentes centros de procesamiento de datos.

### **1.3.4. Metadatos**

En los últimos años, debido al gran interés por el cambio climático entre otras causas, los diferentes organismos meteorológicos han tenido en cuenta la incorporación de verificaciones de la homogeneidad de los datos y de la continuidad de las series temporales. Generalmente, las redes de observación se venían centrandó principalmente en descubrir valores anómalos, mientras que actualmente las pruebas de homogeneidad de los datos han revelado que muchos de los aparentes cambios o alteraciones climáticas pueden ser atribuidos a la heterogeneidad de las series temporales causada únicamente por variaciones operativas de los sistemas de observación (WMO, 1993).

La heterogeneidad de las series se presenta como discontinuidades abruptas, cambios graduales o cambios de la variabilidad. Las discontinuidades abruptas se deben principalmente a los cambios de instrumentos o sensores, de emplazamiento y exposición, a la reubicación de las estaciones, a variaciones en el cálculo de promedios o a los procedimientos de reducción de datos. Los cambios en el entorno de la estación, la urbanización o los cambios progresivos de las características funcionales de los sensores o instrumentos pueden producir heterogeneidad creciente de carácter gradual. Los cambios de la variabilidad están causados por el mal funcionamiento de los mismos. También se puede producir heterogeneidad por variaciones en la hora de observación, por insuficiencia en las rutinas de inspección, mantenimiento y calibración, o por procedimientos de observación insatisfactorios. En definitiva, todos los factores que afectan a la calidad también dan origen a heterogeneidad en los datos.

Esta heterogeneidad debería evitarse, en la medida de lo posible, mediante una gestión adecuada de la calidad. Sin embargo, esto no siempre es posible, ya que algunas causas de heterogeneidad, como la sustitución de un sensor, pueden representar mejoras reales de las técnicas de medición. Es importante disponer de información sobre la existencia, el tipo y, especialmente, la cronología de la heterogeneidad que se vaya produciendo. Este tipo de información en forma de metadatos (información sobre los datos) también se denomina habitualmente “historial de la estación”. En ausencia de esta información es muy probable que gran cantidad de las heterogeneidades citadas anteriormente no puedan ser descubiertas o corregidas.

Los metadatos hay que considerarlos como una versión ampliada del registro administrativo de la estación, que contiene toda la información posible sobre la puesta en marcha inicial y sobre los tipos y fechas de los cambios acaecidos durante la vida útil de un sistema de observación.

## 1.4. Justificación

La información meteorológica de calidad es una de las herramientas más importantes para la toma de decisiones en la Agricultura (Carlson, 1989; Getz, 1978; McNew et al., 1991; Vining et al., 1984; Weiss y Robb, 1986). Algunas de las aplicaciones más frecuentes son: el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos, la programación y diseño de sistemas de riego y drenaje, la lucha integrada contra plagas y enfermedades de los cultivos y la lucha contra heladas, entre otras (Meyer y Hubbard, 1992).

Las técnicas de control de calidad están basadas en la posibilidad de verificar los registros meteorológicos generados en las diferentes redes. Esta posibilidad depende de la redundancia de la información meteorológica, siendo muchos de los métodos empleados de carácter estadístico. Por consiguiente, la mayoría de los algoritmos para el rechazo de datos erróneos estarán basados en un compromiso entre el riesgo de aceptar valores erróneos (errores Tipo II) y el riesgo de rechazar valores correctos (errores Tipo I).

Actualmente existen multitud de redes meteorológicas de las cuales es posible obtener información vía Internet libremente o previa petición al organismo encargado de la gestión de la Red. Uno de los mayores problemas que el usuario de datos meteorológicos tiene que resolver cuando obtiene estos datos es adaptar a sus necesidades el formato en que se encuentran, así como depurarlos correctamente. A continuación se deben eliminar los registros

erróneos y detectar los campos vacíos para que no influyan en posteriores aplicaciones (Cuadrat et al., 2002).

Estimaciones precisas de las necesidades de agua de los cultivos son necesarias para un uso eficiente del agua de riego, principalmente en zonas áridas y semiáridas. Andalucía tiene un clima típico Mediterráneo cuya distribución de aridez aumenta de Oeste a Este, siendo la mayor parte de las zonas regables semiáridas (Estévez et al., 2007). Para cuantificar estas necesidades hídricas se emplea un método estándar que utiliza el concepto de evapotranspiración de referencia, definida como las pérdidas de agua (Evaporación + Transpiración) de una superficie extensa de gramíneas, de altura uniforme entre 8 y 15 cm., que cubre completamente la superficie del suelo y está bien abastecida de agua (Doorenbos y Pruitt, 1977). La evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) es calculada para un cultivo de gramíneas y posteriormente es ajustada mediante un coeficiente de cultivo empírico ( $K_C$ ) para estimar la evapotranspiración del cultivo ( $ET_C$ ). Esta evapotranspiración de referencia puede ser estimada por diferentes métodos a partir de datos meteorológicos. Numerosos estudios han demostrado la superioridad de la ecuación de Penman-Monteith para la estimación de  $ET_0$  en climas diversos (Jensen et al., 1990). Esta ecuación es recomendada como un estándar para la estimación de la  $ET_0$  por la FAO (Allen et al., 1998) y por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) (Walter et al., 2000). Por esta razón, la Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIAA) emplea la ecuación de Penman-Monteith FAO-56 para el cálculo de la  $ET_0$  (Gavilán et al., 2003). Además, esta ecuación ha sido evaluada en las condiciones semiáridas del valle del Guadalquivir con excelentes resultados (Berengena y Gavilán, 2005). Para una aplicación correcta de esta ecuación son necesarias medidas meteorológicas estándar de Radiación Solar, Velocidad de Viento, Temperatura y Humedad Relativa del aire, las cuales son registradas adecuadamente por la RIAA para tal fin.

## 1.5. Objetivos y grado de innovación previsto

El presente trabajo tiene como objetivo general el diseño de un sistema de control de calidad de los registros meteorológicos generados en la Red de Información Agroclimática de Andalucía. Dentro de este gran objetivo se detallan a continuación los siguientes objetivos específicos:

1. Validación de los registros existentes, desarrollando métodos para efectuar los procesos de validación de forma automática.
2. Desarrollo de un sistema de aplicación remota, exportable a otras Redes de Estaciones Meteorológicas, utilizando formatos normalizados compatibles con Sistemas de Información Geográfica (SIG).
3. Identificación y depuración de datos erróneos, analizando su distribución espacial y temporal.
4. Estudio de los errores Tipo I y Tipo II en las variables temperatura máxima, mínima y media.
5. Análisis de sensibilidad en el cálculo de la Evapotranspiración de Referencia ( $ET_0$ ) según la ecuación estandarizada de ASCE-Penman-Monteith.
6. Elaboración de un modelo de Metadatos para su futura incorporación dentro del Sistema.

Un sistema de este tipo responde a la necesidad en la sociedad actual de una información meteorológica ágil y eficaz. No se trata de una aplicación que se instala en el ordenador del “cliente” y cuyo formato de entrada es específico. Este conjunto de procedimientos de validación permitirá integrar los resultados en cualquier aplicación SIG.

La posibilidad de exportar este tipo de sistema a diferentes redes de estaciones meteorológicas constituye un gran avance para el desarrollo conjunto en el cumplimiento de las directrices marcadas por la Comisión de Meteorología Agrícola de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2006).

El empleo mayoritario de códigos de programación de libre acceso disminuirá los elevados costes que pagan por las licencias actuales las distintas administraciones que gestionan estas redes meteorológicas y los usuarios.

La aplicación directa de los diferentes procedimientos de control de calidad sobre la base de datos garantizará el tratamiento de los identificadores temporales de cada registro: diario o semihorario.

El desarrollo de un conjunto de herramientas que permitan la validación de los datos de la Red de Información Agroclimática de Andalucía constituye un gran avance para los estudios climáticos y medioambientales a diferentes

escalas, produciendo a medio y largo plazo una importante mejora en las aplicaciones y modelos que se nutren de esta información.

## 1.6. Datos analizados

Los registros analizados en el presente trabajo de tesis doctoral son las series temporales de cada estación meteorológica desde su instalación y puesta en marcha (1999-2000), hasta el 31 de Diciembre de 2006. Este conjunto de datos está dividido en dos grandes bloques:

- Registros Diarios. Es donde se almacenan las variables meteorológicas correspondientes a los promedios diarios de temperatura, humedad relativa, radiación, velocidad de viento, dirección de viento y valor acumulado de precipitación en 24 horas. También se almacenan los valores extremos diarios de temperatura (máxima y mínima), humedad relativa (máxima y mínima), y velocidad de viento (máxima con su dirección correspondiente).
- Registros Semihorarios. Aquí se almacenan los promedios semihorarios (30 minutos) de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento, dirección de viento y radiación. También se registra el acumulado semihorario de la precipitación.

El conjunto de datos diarios que corresponde a todas las estaciones analizadas tiene inicialmente un total de 198,068 registros, y el conjunto de datos semihorarios un total de 7,697,291 registros. Cada uno de ellos (organizados en filas) contiene los valores de las diferentes variables meteorológicas (en columnas), además de otros campos auxiliares como la fecha, hora, tipo de registro, día del año, nivel de batería, hora y minuto en que se registran valores extremos, identificador de provincia, identificador de estación, etc., también dispuestos en columnas.

En la Tabla 2 se muestra un listado con el nombre de las estaciones de la RIAA, así como sus coordenadas geográficas, la provincia en la que se encuentra y el periodo o duración de la serie temporal.

Tabla 2. Listado de las Estaciones meteorológicas automáticas analizadas de la RIAA.

Provincia	Nombre	Nombre corto	Periodo	Altitud (m)	Latitud (grados)	Longitud (grados)
Almería	La Mojonera	AL01	2000-2006	142	36.7886	-2.7031
Almería	Almería	AL02	2000-2006	22	36.8361	-2.4017
Almería	Tabernas	AL04	2000-2006	435	37.0925	-2.3011
Almería	Fiñana	AL05	2000-2006	971	37.1578	-2.8375
Almería	Virgen de Fátima-Cuevas de Almanzora	AL06	1999-2006	185	37.3903	-1.7692
Almería	Huércal-Overa	AL07	1999-2006	317	37.4133	-1.8831
Almería	Cuevas de Almanzora	AL08	1999-2006	20	37.2578	-1.7992
Almería	Adra	AL10	2000-2006	42	36.7478	-2.9919
Almería	Níjar	AL11	2001-2006	182	36.9517	-2.1564
Almería	Tíjola	AL12	2001-2006	796	37.3797	-2.4583
Cádiz	Basurta-Jerez de la Frontera	CA01	2000-2006	60	36.7581	-6.0161
Cádiz	Jerez de la Frontera	CA02	2000-2006	32	36.6439	-6.0122
Cádiz	Villamartín	CA04	2000-2006	171	36.8453	-5.6217
Cádiz	Conil de la Frontera	CA05	2000-2006	26	36.3372	-6.1306
Cádiz	Vejer de la Frontera	CA06	2000-2006	24	36.2861	-5.8386
Cádiz	Jimena de la Frontera	CA07	2000-2006	53	36.4136	-5.3844
Cádiz	Puerto de Santa María	CA08	2001-2006	20	36.6175	-6.1514
Cádiz	Sanlúcar de Barrameda	CA09	2003-2006	22	36.7817	-6.3122
Cádiz	CIFA Chipiona	CA101	2004-2006	7	36.7519	-6.3986
Córdoba	Bélmez	CO01	2000-2006	523	38.2550	-5.2083
Córdoba	Adamuz	CO02	1999-2006	90	37.9986	-4.4439
Córdoba	Palma del Río	CO03	2000-2006	134	37.6767	-5.2464
Córdoba	Hornachuelos	CO04	2000-2006	157	37.7208	-5.1589
Córdoba	El Carpio	CO05	2000-2006	165	37.9150	-4.5025
Córdoba	Córdoba	CO06	2000-2006	117	37.8617	-4.8000
Córdoba	Santaella	CO07	2000-2006	207	37.5236	-4.8842
Córdoba	Baena	CO08	2000-2006	334	37.6928	-4.3047
Córdoba	CIFA – Cabra	CO101	2003-2006	547	37.4994	-4.4294
Granada	Baza	GR01	2000-2006	814	37.5656	-2.7664
Granada	Puebla de Don Fadrique	GR02	2000-2006	1110	37.8772	-2.3803
Granada	Loja	GR03	2000-2006	487	37.1706	-4.1369



Provincia	Nombre	Nombre corto	Periodo	Altitud (m)	Latitud (grados)	Longitud (grados)
Granada	Pinos Puente	GR04	2000-2006	594	37.2628	-3.7719
Granada	Iznalloz	GR05	2000-2006	935	37.4175	-3.5500
Granada	Jerez del Marquesado	GR06	2000-2006	1212	37.1917	-3.1486
Granada	Cádiar	GR07	2000-2006	950	36.9242	-3.1825
Granada	Zafarraya	GR08	2000-2006	905	36.9914	-4.1525
Granada	Almuñecar	GR09	2001-2006	49	36.7403	-3.6761
Granada	Padul	GR10	2001-2006	781	37.0200	-3.5989
Huelva	El Tojallillo-Gibraleón	H01	1999-2006	52	37.3194	-7.0264
Huelva	Lepe	H02	1999-2006	74	37.2408	-7.2433
Huelva	Gibraleón	H03	1999-2006	169	37.4136	-7.0586
Huelva	Moguer	H04	2000-2006	87	37.1478	-6.7911
Huelva	Niebla	H05	2000-2006	52	37.3483	-6.7339
Huelva	Aroche	H06	2000-2006	299	37.9594	-6.9436
Huelva	La Puebla de Guzmán	H07	2000-2006	288	37.5533	-7.2469
Huelva	El Campillo	H08	2000-2006	406	37.6622	-6.5981
Huelva	La Palma del Condado	H09	2000-2006	192	37.3681	-6.5403
Huelva	Almonte	H10	2000-2006	18	37.1517	-6.4706
Huelva	Moguer-El Cebollar	H11	2001-2006	63	37.2414	-6.8008
Jaén	Huesa	J01	2000-2006	793	37.7486	-3.0603
Jaén	Pozo Alcón	J02	2000-2006	893	37.6731	-2.9289
Jaén	San José de los Propios	J03	2000-2006	509	37.8589	-3.2292
Jaén	Sabiote	J04	2000-2006	822	38.0806	-3.2342
Jaén	Torreblascopedro	J05	2000-2006	291	37.9897	-3.6881
Jaén	Alcaudete	J06	2000-2006	645	37.5783	-4.0772
Jaén	Mancha Real	J07	2000-2006	436	37.9175	-3.5950
Jaén	Ubeda	J08	2000-2006	358	37.9439	-3.2992
Jaén	Linares	J09	2000-2006	443	38.0600	-3.6483
Jaén	Marmolejo	J10	2000-2006	208	38.0572	-4.1294
Jaén	Chiclana de Segura	J11	2000-2006	510	38.3039	-2.9542
Jaén	La Higuera de Arjona	J12	2001-2006	267	37.9500	-4.0064
Jaén	Mengíbar	J13	2001-2006	373	37.9650	-3.8228
Jaén	Santo Tomé	J14	2001-2006	571	38.0303	-3.0817
Jaén	Jaén	J15	2001-2006	299	37.8917	-3.7700
Málaga	Málaga	MA01	2000-2006	68	36.7575	-4.5364

Provincia	Nombre	Nombre corto	Periodo	Altitud (m)	Latitud (grados)	Longitud (grados)
Málaga	Vélez-Málaga	MA02	2000-2006	49	36.7972	-4.1303
Málaga	Antequera	MA03	2000-2006	457	37.0567	-4.5589
Málaga	Estepona	MA04	2000-2006	199	36.4461	-5.2083
Málaga	Archidona	MA05	2000-2006	516	37.0781	-4.4289
Málaga	Sierra Yeguas	MA06	2000-2006	464	37.1394	-4.8347
Málaga	Churriana	MA07	2001-2006	32	36.6750	-4.5017
Málaga	Pizarra	MA08	2001-2006	84	36.7678	-4.7139
Málaga	Cártama	MA09	2001-2006	95	36.7181	-4.6769
Sevilla	Los Palacios y Villafranca	SE01	2000-2006	21	37.1803	-5.9375
Sevilla	Las Cabezas de San Juan	SE02	2000-2006	25	37.0167	-5.8836
Sevilla	Lebrija I	SE03	2000-2006	25	36.9778	-6.1250
Sevilla	Lebrija 2	SE04	2000-2005	40	36.9000	-6.0094
Sevilla	Aznalcázar	SE05	2000-2006	4	37.1528	-6.2719
Sevilla	La Puebla del Río	SE07	2000-2006	25	37.2272	-6.1325
Sevilla	La Puebla del Río II	SE08	2000-2006	41	37.0814	-6.0453
Sevilla	Ecija	SE09	2000-2006	125	37.5942	-5.0756
Sevilla	La Luisiana	SE10	2000-2006	188	37.5261	-5.2269
Sevilla	Osuna	SE11	2000-2006	214	37.2561	-5.1336
Sevilla	La Rinconada	SE12	2000-2006	37	37.4581	-5.9236
Sevilla	Sanlúcar La Mayor	SE13	2000-2006	88	37.4228	-6.2536
Sevilla	Villanueva del Río y Minas	SE14	2000-2006	38	37.6144	-5.6825
Sevilla	Lora del Río	SE15	2000-2006	68	37.6603	-5.5386
Sevilla	Los Molares	SE16	2001-2006	90	37.1772	-5.6717
Sevilla	Guillena	SE17	2001-2006	191	37.5158	-6.0628
Sevilla	Puebla Cazalla	SE18	2001-2006	229	37.2192	-5.3494
Sevilla	Isla Mayor	SE20	2004-2006	35	37.1147	-6.1197
Sevilla	Carmona Tomejil	SE101	2001-2006	79	37.4019	-5.5861

# Capítulo 2. Sistema de Control de calidad

## 2.1. Introducción

En los últimos años se han desarrollado diferentes y nuevos métodos para la validación de datos meteorológicos dentro de los procedimientos que se enmarcan en los sistemas de control de calidad. Un sistema de control de calidad no sólo se basa en la validación de los registros meteorológicos sino en un conjunto de herramientas, actividades y decisiones que aseguren la fiabilidad de los datos registrados por las estaciones (calibración periódica de sensores, mantenimiento, etc.). En los siguientes apartados se presenta una revisión bibliográfica y una breve descripción de los procedimientos que habitualmente se emplean en la validación de datos meteorológicos en las distintas redes de estaciones que existen en el mundo. Estos métodos son diferentes para cada una de las variables y su desarrollo e implementación varían en función de la naturaleza de cada parámetro. Los algoritmos que se deben emplear para la validación dependen también de la longitud de las series temporales existentes, de la escala temporal en que se mide la variable en cuestión y de la propia estructura y funcionamiento de nuestro sistema de medición y almacenamiento de los datos.

## 2.2. Antecedentes

La finalidad del control de calidad es detectar errores en el conjunto de las variables meteorológicas medidas (WMO, 1993). El control de calidad es un concepto muy amplio que comienza con la elección adecuada de la ubicación de cada estación meteorológica. Posteriormente, resulta esencial un correcto mantenimiento de la misma y de todos sus elementos y la calibración periódica de los sensores que se encuentren instalados en ella. Finalmente, se encuentra la validación de los datos medidos en las estaciones. Este concepto engloba un

conjunto de técnicas, procedimientos, algoritmos y tests que sirven como herramientas para la identificación y detección de errores. Para hacer un uso óptimo de los datos meteorológicos es imprescindible conocer el grado de calidad de los mismos. Para ello, la validación aporta a cada registro un indicativo de su nivel de calidad que sirve para describir la fiabilidad que tiene dicha medida. Este código de control se conoce en la literatura con el nombre de “*flag*”, “bandera” o “etiqueta” y generalmente equivale a descripciones del tipo “dato validado correctamente”, “dato sospechoso”, “dato erróneo”, “dato inexistente”, etc., y explica si el mismo ha pasado o no un determinado test aplicado. Se trata, por tanto, de generar una información añadida al registro meteorológico que sirve para describir el nivel o grado de confianza que posee ese dato. En el proceso de validación siempre hay una labor final de monitorización, inspección visual y análisis manual, que debe ser efectuada por personal cualificado, con capacidad para decidir si ciertos valores que han sido marcados como potencialmente erróneos están asociados a fenómenos meteorológicos poco habituales como olas de frío, tormentas, olas de calor, etc. Esta inspección manual se plantea como la última fase dentro de la validación y es un componente muy importante en los sistemas de control de calidad (Fiebrich y Crawford, 2001; Shafer et al., 2000; Sopoco et al., 2004).

Existen básicamente dos categorías dentro de los procedimientos de control de calidad: los procedimientos que analizan datos de una sola estación (Meek y Hatfield, 1994; Shafer et al., 2000) y aquellos que requieren datos de varias estaciones. En este último caso se comparan los registros de cada estación con los valores de las estaciones vecinas (Barnes, 1964; Hubbard, 2001; Reek et al., 1992). Hay que tener en cuenta que cada variable medida (temperatura, humedad, radiación solar, velocidad de viento, etc.) tiene una variabilidad espacial y temporal distinta, con lo cual tendrá un comportamiento muy diferente a la hora de establecer los mecanismos que determinen la validez del dato medido. También es muy importante la resolución temporal con la que se registran las variables (datos diarios, horarios, 30-min, 10-min, etc.), ya que de ello dependerán, en gran medida, los procedimientos que se vayan a emplear para su validación. Existen, por ejemplo, técnicas específicas para validar datos de radiación solar (Allen, 1996; Geiger et al., 2002), basadas en la comparación del valor medido con un valor estimado para condiciones de cielo despejado. Son métodos con un alto grado de eficacia, ya que se tiene una referencia máxima muy concreta con la que poder comparar la medida, a través del cálculo de la radiación solar extraterrestre (Duffie y Beckman, 1991). Este procedimiento se puede emplear para diferentes escalas de tiempo: datos medios diarios, horarios e incluso para períodos más cortos. No existen procedimientos de este tipo para otras variables, siendo necesario recurrir a otro tipos de tests, a efemérides

meteorológicas o a decisiones estadísticas que fijen intervalos de confianza para la validación de los datos (Hubbard et al., 2005).

Cuando existen series temporales lo suficientemente largas, se utilizan técnicas de homogenización para depurar los datos. Esto es muy habitual en redes de estaciones cuyos observatorios meteorológicos pasaron de ser manuales a automáticos, con equipos de adquisición electrónica de datos. Estas técnicas se utilizan fundamentalmente para la temperatura (Feng et al., 2004; Peterson et al., 1998) y se utilizan con frecuencia en los estudios sobre el cambio climático. De esta manera se pueden detectar los cambios graduales que inducen una tendencia artificial en el clima cercano a la estación (urbanización y/o industrialización, deterioro de la estación, crecimiento de la vegetación en el entorno de la misma, etc.) y también discontinuidades de mayor grado debidas a posibles reubicaciones de la estación, cambios temporales en los métodos de cálculo de los promedios, sustitución de sensores, etc. Estos tests de homogenización se basan en la comparación de la serie candidata (conjunto de datos de la estación que se pretende validar) con una serie de referencia (Alexanderson, 1986; Alexanderson y Moberg, 1997).

Por último, es importante destacar que no todas las variables meteorológicas están normal o simétricamente distribuidas, con lo cual los métodos que se usan habitualmente no son robustos y hay que recurrir a técnicas no paramétricas que precisan de series temporales mayores (Lanzante, 1996).

En los siguientes apartados se expone una breve descripción de los diferentes procedimientos para la validación de datos meteorológicos, con independencia del tamaño de las series temporales utilizadas. En España la mayor parte de las redes de estaciones meteorológicas automáticas son de reciente implantación, con una antigüedad menor a 10 años.

## 2.3. Procedimientos para la validación de datos meteorológicos

Los principios básicos de la mayoría de los tests que se aplican a datos registrados en una sola estación provienen de las tres reglas introducidas por Meek y Hatfield (1994), que están basadas en O'Brien y Keefer (1985). Estas reglas utilizan límites fijos o dinámicos para cada variable (lo que se conoce habitualmente como test de rangos), límites fijos o dinámicos para los cambios entre observaciones sucesivas ("*step test*" o test de consistencia temporal) y, por

último, límites para detectar medidas consecutivas que son iguales o de baja variabilidad (test de persistencia). Este último también se podría considerar como un test de consistencia temporal.

Otro gran grupo de procedimientos son los tests de consistencia interna (Feng et al., 2004; Kunkel et al., 1998; Reek et al., 1992). Estos se utilizan para asegurar la coherencia meteorológica de la variable que se esté midiendo. Por ejemplo, la temperatura máxima de un día en concreto debe ser mayor que la temperatura media y que la temperatura mínima. Dentro de este grupo están los que evalúan los valores máximos del salto térmico diario ( $T_{\max} - T_{\min}$ ) y la existencia de datos con el mismo valor durante varios días consecutivos (no aplicable a precipitación), conocido como “*flat line check*” o los que se conocen como “*spike check*”, cuyo objetivo es evaluar el menor valor absoluto tras comparar las diferencias de tres días consecutivos, centrado en el día en cuestión. Otro ejemplo de consistencia interna dentro del sistema para los datos de viento es el relacionado con la comparación entre la velocidad del viento y su dirección en determinadas situaciones (por ejemplo, si la velocidad es igual a cero, la dirección de viento no puede ser distinta a la posición en calma) (DeGaetano, 1997).

Graybeal et al. (2004a) describen un conjunto de procedimientos para validar valores horarios de temperatura y humedad y los engloba en tres grupos: consistencia de límites, consistencia interna y consistencia temporal (incluye test de persistencia y “*step test*”). Por último, están los procedimientos basados en la comparación de los datos que se pretenden validar con los valores medidos en las estaciones meteorológicas cercanas, lo que se denomina consistencia espacial.

En los siguientes apartados se describen más detalladamente los procedimientos que se emplean para validar las diferentes variables meteorológicas y el fundamento en el que se basan: rangos o intervalos, consistencia temporal, persistencia, consistencia interna y consistencia espacial.

### 2.3.1. Rangos o Intervalos

Con este tipo de tests se comprueba si una observación está dentro de un rango predeterminado que puede ser fijo o dinámico. Los límites fijos pueden ser físicos (p.ej. la humedad relativa no puede ser mayor del 100%) o instrumentales (derivados de las especificaciones del sensor) y los valores dinámicos vienen dados por los registros meteorológicos extremos de cada zona, lo que se conoce con el nombre de efemérides meteorológicas (Reek et al., 1992; Shafer et al., 2000; Schroeder et al., 2005). Las efemérides son los valores extremos registrados

para un determinado lugar dentro de una determinada serie de datos (UNE 500510, 2005). También Feng et al. (2004) proporcionan un ejemplo de los valores mínimos y máximos para diferentes variables.

En la Tabla 3 se exponen los límites físicos recomendados por AENOR que se pueden aplicar para diferentes variables meteorológicas (UNE 500540, 2004)

Tabla 3. Límites físicos de diferentes variables meteorológicas (UNE 500540, 2004)

Variable	Unidad	Rango
Temperatura del aire	°C	-35/55
Humedad Relativa del aire	%	0/100
Velocidad de viento	m/s	0/75
Dirección de viento	grados	0/360
Presión	hPa	700/1080
Radiación Solar Global	W/m <sup>2</sup>	-1/1400
Precipitación en 10 min	mm	0/50

Para validar los registros de radiación solar se pueden utilizar los valores de la radiación solar estimada en condiciones de cielo despejado (Allen, 1996; Geiger et al., 2002). Los valores de radiación solar medida no pueden superar de forma sistemática este valor potencial.

Para la temperatura del aire máxima, mínima y media se pueden utilizar por un lado los límites específicos del sensor (rango de medida de la Tabla 1), límites físicos y, por otro, las efemérides meteorológicas de cada localización (Feng et al., 2004; Shafer et al., 2000).

El rango para la humedad relativa del aire es un rango físico que va de 0 a 100 en porcentaje. Este tipo de procedimiento se utiliza para la humedad relativa máxima, mínima y media (Feng et al., 2004; Shafer et al., 2000) teniendo en cuenta también las características del sensor.

Para la precipitación también se pueden utilizar los límites marcados por el sensor y las efemérides registradas en cada estación (Feng et al., 2004; Shafer et al., 2000). Si el registro de precipitación en forma de lluvia superase el valor máximo registrado hasta la fecha, en un principio se podría considerar como un “*outlier*” (valor anómalo dentro de una serie temporal de datos) y tras la inspección manual se determinaría si corresponde realmente a un evento extremo para su consideración como nueva efeméride meteorológica.

En el caso de la velocidad de viento es posible utilizar el rango de medida del propio sensor y también los límites que Meek y Hatfield (1994) propusieron

para valores medios diarios y horarios. Feng et al. (2004) y Shafer et al. (2000) adoptaron estos límites para chequear la velocidad de viento máxima diaria. Para valores horarios de velocidad de viento, DeGaetano (1997) describe tests específicos más complejos que van asociados a los patrones de la presión atmosférica de la zona.

Uno de los test de rango existentes en la bibliografía que más se adecuan a las necesidades y características de una red de estaciones meteorológicas automáticas es el descrito por Hubbard et al. (2005). En este trabajo se comprueba que cada registro medido se sitúe dentro de un rango específico definido para cada mes del año. El límite superior o inferior de este rango viene dado por el valor de la media correspondiente más o menos un número de veces su desviación típica, respectivamente. Este procedimiento se ha utilizado para validar datos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación en redes de estaciones meteorológicas de Florida, Nebraska o Arizona, pertenecientes al Centro Nacional de Datos Climáticos de Estados Unidos (Hubbard et al., 2005) y ha sido empleado también para datos de humedad relativa en Andalucía (Estévez y Gavilán, 2006).

En general, las verificaciones utilizando límites sirven para detectar errores graves en las series de datos meteorológicos. Cuando los límites son funciones de la zona geográfica o el momento del año (mes, estación, etc.) se aplican principalmente a variables que contienen información expresada en unidades físicas (WMO, 1993).

### **2.3.2. Consistencia Temporal**

Los procedimientos basados en la consistencia temporal comprueban si la diferencia entre medidas meteorológicas sucesivas excede un valor determinado, en cuyo caso habría que sospechar de ambas medidas. Es decir, se chequea el exceso de variabilidad de dos registros consecutivos. Si esta diferencia supera el valor preestablecido dentro del sistema de control de calidad, se genera una alerta para los dos datos.

Este tipo de test se ha utilizado para valores horarios de temperatura y humedad en diferentes redes de Estados Unidos (Graybeal et al., 2004a). Meek y Hatfield (1994) lo emplearon para valores horarios y diarios de temperatura, radiación solar, viento, presión de vapor y presión barométrica. Este procedimiento sirve para detectar posibles problemas en los equipos de adquisición de datos o errores debidos a las conexiones de los sensores (Shafer et al., 2000). Trabajos recientes también lo han empleado con datos a mayor



resolución (Schroeder et al., 2005). Una adaptación de este “*step test*” es el de Lanzante (1996), cuya particularidad reside en que para su aplicación se necesitan series temporales de más de 10 años y es válido sólo para la variable temperatura. Trabajos como los de Feng et al. (2004) muestran los resultados para valores diarios de este procedimiento. Existen también algoritmos específicos para valores horarios de velocidad y dirección de viento (DeGaetano, 1997).

Al igual que para el test de límites o rangos, Hubbard et al. (2005) desarrollaron una adaptación de este tipo de comprobación al que denominaron “*step change*”. Este procedimiento se basa en los mismos principios pero con la particularidad de utilizar valores umbrales para cada mes del año. En definitiva se trata de acotar la variabilidad entre medidas consecutivas entre unos límites determinados. Este rango se define de forma análoga al test de rango del apartado anterior y lo aplicaron a valores diarios de temperatura máxima y mínima. Este procedimiento también se ha aplicado a valores de humedad relativa (Estévez y Gavilán, 2006).

Las verificaciones de la consistencia temporal en los datos meteorológicos se basan en la redundancia de la información en medidas sucesivas de una misma estación. La OMM recomienda una serie de tolerancias propuestas solamente para las variables temperatura ( $T$ =temperatura del aire y  $T_{\text{dew}}$ =temperatura del punto de rocío) y presión (WMO, 1993). Se detallan en la Tabla 4, donde  $dt$  es la diferencia de tiempo entre los dos datos consecutivos y TOL es la tolerancia máxima permitida, es decir, el valor absoluto máximo permitido de la diferencia entre esas dos medidas.

Tabla 4. Tolerancias propuestas en función del tiempo transcurrido entre medidas consecutivas (WMO, 1993)

	dt=1 hora	dt=2 horas	dt=3 horas	dt=6 horas	dt=12 horas
<b>T TOL</b>	4 °C	7 °C	9 °C	15 °C	25 °C
<b>T<sub>dew</sub> TOL</b>	4 °C	6 °C	8 °C	12 °C	20 °C
<b>Presión TOL</b>	3 hPa	6 hPa	9 hPa	18 hPa	36 hPa

### 2.3.3. Persistencia

Son también procedimientos basados en la consistencia temporal. En lugar de evaluar el excesivo cambio o salto entre observaciones sucesivas, ahora se comprueba la escasa o nula variabilidad de dichos registros. Existen varias matizaciones en la bibliografía. Así, por ejemplo, en Shafer et al. (2000) se chequean los datos de todo un día calculando la media y la desviación típica. Si ésta resulta por debajo de un valor determinado, el correspondiente valor diario

y sus registros intradiarios se etiquetan como sospechosos. Al depender de agregados estadísticos, todos los valores de ese día quedan etiquetados como sospechosos o en alerta. Dentro de este tipo de procedimientos se encuentra el “*delta test*” (Fiebrich y Crawford, 2001; Shafer et al., 2000; Schroeder et al., 2005), donde se comprueba que la máxima diferencia entre cualquier par de observaciones de un día en concreto sea menor que un valor umbral determinado. Si no es así, todos los datos correspondientes a ese día son marcados. Para la temperatura se aplica también el “*flatliner check*” (Kunkel et al., 1998; Reek et al., 1992) que analiza los valores de cinco días consecutivos. Para el resto de variables, excepto para la precipitación, Meek y Hatfield (1994) realizaron comprobaciones para datos horarios y diarios de tres registros consecutivos. También hay un algoritmo denominado ‘test de ceros’, donde se determinan observaciones continuas nulas, excluyendo la precipitación (Schroeder et al., 2005).

Hubbard et al. (2005) desarrollaron un test de este tipo basándose en la hipótesis de que cuando un sensor falla siempre registra un valor constante, de manera que la desviación típica de la serie evaluada será menor, pudiendo ser cero si se completa el periodo de medida. En otros casos, cuando el sensor trabaja intermitentemente, se registrarán valores razonables y otros cercanos a cero, obteniéndose una desviación típica muy elevada. Esto implica que cuando la variabilidad se salga fuera de unos límites determinados, se generará una alerta para todos los datos comprendidos en el periodo de estudio.

### 2.3.4. Consistencia Interna

Los procedimientos denominados de consistencia interna están basados en la verificación de la coherencia física o climatológica de cada variable observada o también de la consistencia entre variables (Grüter et al., 2001). También entran en esta categoría los tests que comprueban la coherencia interna del propio sistema. Por ejemplo, un valor promediado debe ser siempre menor que el valor instantáneo máximo, o la precipitación durante tres horas siempre deberá ser menor que la precipitación acumulada durante seis horas (Vejen et al., 2002). También son habituales las comprobaciones del tipo  $T_{max}(i) > T_{med}(i) > T_{min}$  ó  $T_{max}(i) > T_{min}(i-1)$  (Feng et al., 2004; Reek et al., 1992) siendo  $i$  un día cualquiera. Para la humedad relativa y la temperatura del aire se debe verificar que la  $T_{bulbo\_húmedo}$  no sea mayor que la  $T_{bulbo\_seco}$  (Graybeal et al., 2004a) ni que esta última sea mayor que  $T_{dew}$  (Graybeal et al., 2004b).

Existen también comprobaciones para rangos diarios de temperatura excesivos (Feng et al., 2004; Reek et al., 1992). Este rango diario ( $T_{\max} - T_{\min}$ ) también se puede utilizar para comprobar los valores de la depresión del punto de rocío (Graybeal et al., 2004b).

Esta verificación de la consistencia física de cada parámetro se solapa en algunos casos con los tests de rangos que evalúan los límites físicos de cada sensor. Así, variables como la velocidad y la dirección de viento, la precipitación o la humedad relativa del aire nunca pueden ser menores que cero por la propia naturaleza de la variable que se está midiendo.

Existen casos específicos, por ejemplo para el viento, en los cuales se validan datos horarios haciendo comprobaciones para detectar errores (DeGaetano, 1997). En este trabajo se marcan los datos como erróneos cuando la dirección de viento es  $0^\circ$  y la velocidad es distinta de 0 m/s, cuando ésta es nula y la dirección de viento no marca la posición en calma o cuando la velocidad promediada supera el valor máximo en un minuto. Graybeal (2005) utiliza como procedimiento de validación la relación existente entre la velocidad de viento media diaria y la velocidad de viento máxima registrada en ese día.

### 2.3.5. Consistencia Espacial

Este tipo de algoritmos sirven para detectar posibles errores comparando los datos de una estación con los valores correspondientes a estaciones vecinas (Eischeid et al., 1995; Gandin, 1988; Hubbard, 2001; Wade, 1987). En Shafer et al. (2000) se calcula un valor estimado para cada estación como una media ponderada de estaciones vecinas. Este valor decrece con la distancia a la estación que está siendo evaluada. Se compara la diferencia entre el valor observado y estimado con la desviación típica de los valores de todas las estaciones consideradas, si éste excede en más de dos desviaciones típicas, el valor es etiquetado como sospechoso. Es necesaria la utilización, al menos, de seis estaciones. Este procedimiento está basado en el algoritmo de Barnes (1964), que también se utiliza para variables medidas con mayor frecuencia de muestreo (Schroeder et al., 2005). Cuando se dispone de una gran cantidad de estaciones meteorológicas repartidas homogéneamente y series suficientemente largas es posible aplicar procedimientos como los de Kunkel et al. (2005) para la temperatura del aire y la precipitación.

La mayor parte de las técnicas para estimar los valores medidos en una estación a partir de datos de estaciones vecinas se basan en la técnica de ponderar cada valor en función del inverso de la distancia a la estación

considerada (Guttman et al., 1988; Wade, 1987). El problema es que dependiendo de la orografía del terreno y de la variabilidad y naturaleza de cada parámetro, no siempre la estación más cercana es la que registra un valor más parecido al valor medido en la estación que se evalúa. Recientemente se ha desarrollado el denominado test de regresión espacial (Hubbard et al., 2005), que se basa en ponderar cada estación vecina en función de la raíz cuadrada del error cuadrático medio, obteniendo mejores resultados que los basados en la distancia para variables como temperatura máxima, mínima y precipitación (Hubbard y You, 2005).

## **2.4. Inspección Manual y Toma de Decisiones**

La última etapa de la validación debe ser realizada manualmente y por personal altamente cualificado. Se trata de visualizar o monitorizar los datos considerados como sospechosos tras la aplicación de los diferentes métodos de validación para que definitivamente sean admitidos o no como datos erróneos o, en su caso, darlos por válidos e incluirlos, por ejemplo, como nuevas efemérides meteorológicas (Shafer et al., 2000).

En los últimos años los procedimientos de validación se han automatizado para reducir el tiempo empleado por los técnicos o administradores de las redes de estaciones en descubrir posibles errores en las series temporales o en los registros generados diariamente. Pero cuando se trabaja con un volumen de datos importante es inevitable una fase de exploración o verificación manual antes de etiquetar el dato definitivamente. Aunque la intervención humana es necesaria, la automatización de los procesos reducirá su intervención y proporcionará la información necesaria para la posterior toma de decisiones por parte de los operadores del sistema (Doraiswamy et al., 2000). Especial importancia tiene en esta fase de inspección manual el estudio de los eventos extremos. Valores poco frecuentes en datos meteorológicos pueden ser debidos a eventos extremos que realmente se dan en nuestro clima. Olas de calor, heladas, tormentas, etc. pueden llegar a generar valores extremos que inicialmente sean considerados por los procedimientos de validación que se aplican, como potenciales errores. Los efectos climáticos locales (orografía, microclima, etc.) que pueden afectar a cada estación meteorológica son muy difíciles de controlar pero los eventos extremos se dan a una escala mayor y son fenómenos registrados e incluso predichos por los organismos meteorológicos nacionales. Estos eventos extremos deben ser analizados individualmente para aceptar o no

los resultados de los algoritmos que se aplican de forma automática (You y Hubbard, 2006).

En función de las alertas generadas, existen varios métodos complejos para la toma de decisiones final (Gandin, 1988; Graybeal et al., 2004b), de forma que se podrá determinar si ese dato es válido o no. En cualquier caso estos mecanismos pueden ser más o menos automáticos o más o menos complejos, pero no cabe duda que la inspección manual resulta esencial en esta etapa final de la validación de datos meteorológicos.

El objetivo de cualquier sistema de este tipo es minimizar los datos meteorológicos correctos que son rechazados por los procedimientos de validación (errores Tipo I) y disminuir también los datos erróneos que son aceptados (errores Tipo II). Es muy importante diseñar los algoritmos en función de las características y finalidad de nuestra red de estaciones, así como el desarrollo de unos procedimientos dinámicos que sean lo suficientemente flexibles como para corregir o incorporar mecanismos nuevos que mejoren los resultados en la toma de decisiones. Lo ideal es que estos mecanismos sean capaces de aumentar su eficacia de forma automática a medida que las series temporales se van haciendo más largas.

Los datos originales nunca deben eliminarse del sistema, aunque hayan sido rechazados o marcados como sospechosos por algún procedimiento de validación. A modo de ejemplo, un dato de humedad relativa del 110% no es un dato sospechoso, es un dato erróneo, por lo que no debe utilizarse ni quedar a disposición de ningún usuario. Pero sí es importante desde el punto de vista del control de calidad hacer un seguimiento del número de datos anómalos parecidos que hay registrados, de la edad del sensor, de su última calibración, a qué condiciones de intemperie está sometido, etc. Los datos anómalos, erróneos o sospechosos resultan de gran valor para conocer mejor el rendimiento o la durabilidad de todos los elementos de nuestro sistema.

## **2.5. Resumen**

En los apartados anteriores de este capítulo se ha realizado una revisión bibliográfica de los métodos de validación más extendidos, para diferentes períodos de muestreo y para las distintas variables meteorológicas. El pilar básico de la validación, o de los tests de control de calidad en general, es la necesidad de comparar el dato medido o algún valor calculado a partir de él (su desviación típica, la diferencia entre valores sucesivos, etc.) con una determinada referencia que nos permita verificar su grado de validez. Esta

referencia es la clave de estos procedimientos. Hay casos muy evidentes en los que será fácil tomar una decisión y será posible automatizar este mecanismo (p.ej. velocidad de viento  $< 0$  m/s), pero en muchas otras ocasiones será complicado comprobar si los efectos locales influyen de manera determinante en la generación de alertas, ya que la variabilidad espacio-temporal de cada parámetro resulta muy diferente.

Los mecanismos que se basan en decisiones estadísticas nos permitirán determinar, en función de un factor, el porcentaje de registros que no pasarán satisfactoriamente cada uno de los tests, con lo cual tendremos un intervalo de confianza en el que movernos para cada dato etiquetado como sospechoso o para cada alerta generada. Mientras mayor sea la serie temporal disponible, mayores posibilidades tendremos de realizar una mejor validación de este tipo.

Es relativamente fácil elaborar sistemas de validación con procedimientos que generen muchas alertas de forma automática, basta con diseñar tests que sean muy restrictivos. Igualmente ocurre en el caso contrario, donde todos los registros pasen satisfactoriamente los tests sin detectar errores. Pero el objetivo de un sistema de validación no es éste, se trata de diseñar un conjunto de herramientas que identifiquen los posibles errores y que aporten una información o distintivo de calidad a cada uno de los datos meteorológicos registrados. De esta forma, el futuro usuario será conocedor de los diferentes procesos de validación que se han aplicado al conjunto de datos. Este usuario final será el que tome las decisiones oportunas sobre la utilización de estos nuevos datos validados en función de su aplicación en diferentes ámbitos de trabajo (investigación, programación de riegos, estudios de cambio climático, etc).

Por último, hay que incidir en la idea de que el diseño y desarrollo de un sistema de control de calidad de los datos registrados en redes de estaciones meteorológicas automáticas debe ser entendido como un concepto global donde tengan la misma importancia la calibración de sensores, los trabajos de mantenimiento de cada una de las estaciones, los procedimientos automáticos de validación y la última etapa de inspección manual.

## 2.6. Diseño y Arquitectura del Sistema

Uno de los objetivos del presente trabajo es la validación de los registros meteorológicos procedentes de la Red de Información Agroclimática de Andalucía, desarrollando un sistema que permita aplicar los procesos de validación de forma automática. En este apartado se describen los algoritmos que van a formar parte de los diferentes tests de validación que se van a aplicar,

la arquitectura y especificaciones del nuevo sistema de control de calidad. En base a la revisión bibliográfica realizada y analizando las características y funcionamiento de esta red, se han diseñado los siguientes procedimientos de validación para cada una de las variables meteorológicas.

### 2.6.1. Radiación Solar

Para la validación de la radiación solar se propone en primer lugar un **test de rango rígido** basado en los límites especificados por las características del propio sensor y por la norma UNE 500540 (2004):  $-1/1400 \text{ W m}^{-2}$ . Cualquier valor fuera de este intervalo será etiquetado como erróneo.

Posteriormente, se aplicará un **test de rango flexible** basado en la radiación solar estimada bajo condiciones de cielo despejado (Allen, 1996), utilizando este último valor como límite superior. Este procedimiento verificará que la radiación solar medida no supere o no alcance este límite sistemáticamente. Es posible que ocasionalmente el piranómetro registre datos de radiación moderadamente superiores a esta radiación potencial estimada debido a una razón puramente física como es la reflexión de nubes cercanas que hacen que el sensor reciba radiación solar adicional (Allen, 1996). Esto puede ocurrir para valores horarios o períodos más cortos. El mantenimiento correcto de unas condiciones adecuadas de limpieza del piranómetro resulta imprescindible para que éste no registre sistemáticamente valores de radiación inferiores a los potenciales. También este test tiene en cuenta cómo se distribuyen temporalmente los registros que superan este valor máximo, de forma que si el número de “outliers” (valores fuera de rango) es mayor a medida que pasa el tiempo es muy probable que el piranómetro no esté funcionando de manera correcta. Como límite inferior se utilizará el valor de radiación solar calculado como el producto de la radiación solar extraterrestre (Duffie y Beckman, 1991) por el mínimo índice de claridad recomendado por Geiger et al. (2002).

El empleo de una efeméride meteorológica para la radiación solar no se ha estimado conveniente puesto que el valor máximo posible viene dado por las condiciones atmosféricas y es función de la radiación solar extraterrestre, que es el valor de radiación que llega a la capa superior de la atmósfera.

Las Ecuaciones 2.1a y 2.1b etiquetan como erróneos los valores de radiación solar que no cumplan esa condición (test de rango rígido):

$$-1 < R_{s_{sh}} < 1400 \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (2.1a)$$

$$-0.0864 < R_s < 120.96 \text{ (MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}) \quad (2.1b)$$

donde  $R_s$  hace referencia a valores diarios de radiación solar en (2.1b) y  $R_{s_{sh}}$  a valores intradiarios (horarios, semihorarios en este caso, etc.) en (2.1a).

Para calcular la Radiación Solar estimada bajo condiciones de cielo despejado ( $R_{so}$ ) se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_{so} = K_T R_a \quad (2.2)$$

donde  $K_T$  es un índice adimensional de “claridad” y  $R_a$  es la radiación solar extraterrestre. Para datos de radiación solar diaria,  $K_T$  oscila entre 0.7 y 0.8 dependiendo de la claridad atmosférica (polvo, polución, humedad, etc.), de la elevación y del ángulo solar. Puede ser estimado de forma muy sencilla en función de la altura sobre el nivel del mar, siempre que ésta no sea superior a 3000 m (Allen et al., 1994):

$$K_T = 0.75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z \quad (2.3)$$

donde  $z$  es la elevación de la estación sobre el nivel del mar (m). La radiación solar extraterrestre diaria puede calcularse mediante la ecuación:

$$R_a = \frac{G_{sc}}{\pi} d_r (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (2.4)$$

donde

$R_a$  =Radiación Solar Extraterrestre promedio en base diaria ( $\text{W m}^{-2}$ ),

$G_{sc}$  =Constante Solar ( $1367 \text{ W m}^{-2}$ ),

$d_r$  =Factor de la distancia relativa de la Tierra al Sol,

$\delta$  =Declinación Solar (rad),

$\varphi$  =Latitud (rad),

$\omega_s$  =Ángulo horario de la puesta de Sol (rad)



$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (2.5)$$

donde J es el día del año.

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (2.6)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (2.7)$$

La radiación solar bajo condiciones de cielo despejado ( $R_{so}$ ) puede ser estimada también para períodos de tiempo horarios o más cortos de forma análoga a la Ecuación 2.2, calculando la radiación solar extraterrestre en base al período de tiempo considerado:

$$R_{ah} = \frac{12}{\Delta t \pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1)] \quad (2.8)$$

donde  $R_{ah}$  = Radiación Solar extraterrestre durante el período evaluado ( $\text{W m}^{-2}$ )

$\omega_1$  = Ángulo solar al inicio del período (rad)

$\omega_2$  = Ángulo solar al final del período (rad)

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi \Delta t}{24} \quad (2.9)$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi \Delta t}{24} \quad (2.10)$$

$\Delta t$  = duración del período (h). Por ejemplo,  $\Delta t = 0,5$  h si el período de tiempo son 30 minutos.

$\omega$

$L_z$  = longitud en grados del centro del huso correspondiente a la zona (en grados oeste del meridiano de Greenwich)

$L_m$  = longitud del sitio en cuestión (en grados oeste del meridiano de Greenwich)

$S_c$  = corrección estacional para la hora solar (h)

$$S_c = 0.1645 \sin(2b) - 0.1255 \cos(b) - 0.025 \sin(b) \quad (2.12)$$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364} \quad (2.13)$$

Para la validación de datos semihorarios de la RIAA habrá que ajustar los registros de cada una de las estaciones meteorológicas automáticas que actualmente están en hora solar local al formato UTC (Universal Time Coordinate). Esto será necesario como paso previo a la estimación de la Radiación solar teórica según (2.2).

En general, la Ecuación 2.3 es válida para estimar la Radiación solar bajo condiciones de cielo despejado, pero existen otras expresiones más complejas que consideran los efectos del ángulo solar y el vapor de agua, separando los componentes de la radiación directa y difusa (ASCE-EWRI, 2005) tal y como se detalla a continuación:

$$R_{so} = (K_B + K_D)R_a \quad (2.14)$$

donde

$K_B$  = índice de claridad para la radiación directa

$K_D$  = índice de claridad para radiación difusa

$$K_B = 0.98 \exp \left[ \frac{-0.00146P}{K_{tb} \sin \phi} - 0.075 \left( \frac{W}{\sin \phi} \right)^{0.4} \right] \quad (2.15)$$

donde

$\phi$  = ángulo solar sobre el horizonte (rad), que se calcula según la Ecuación 2.16 para valores diarios y según (2.17) para períodos horarios o más cortos.

$$\sin \phi_{24} = \left[ 0.85 + 0.3\varphi \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) - 0.42\varphi^2 \right] \quad (2.16)$$

$$\sin \phi = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (2.17)$$

$K_{ib}$  = coeficiente de turbidez,  $0 < K_{ib} \leq 1.0$  donde  $K_{ib} = 1.0$  es para aire limpio y  $K_{ib} \leq 0.5$  para aire extremadamente turbio, con polvo o contaminado. Para el cálculo de  $R_{so}$  se recomienda utilizar  $K_{ib} = 1.0$

$P$  = presión atmosférica a la altura sobre el nivel del mar ( $z$ ) de la estación (kPa), que viene dada por:

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065 \cdot z}{293} \right)^{5.26} \quad (2.18)$$

$W$  = agua precipitable en la atmósfera (mm), que se estima según:

$$W = 0.14 \cdot e_a \cdot P + 2.1 \quad (2.19)$$

donde:

$e_a$  = presión de vapor (kPa), que se puede calcular en función de los datos meteorológicos disponibles. Para una estación que mida temperatura máxima y mínima y humedad relativa máxima y mínima, se estima para escala diaria según:

$$e_a = \frac{e^o(T_{\min}) \frac{HR_{\max}}{100} + e^o(T_{\max}) \frac{HR_{\min}}{100}}{2} \quad (2.20)$$

donde

$HR_{\max}$  = Humedad Relativa máxima diaria (%),

$HR_{\min}$  = Humedad Relativa mínima diaria (%),

$e^o(T_{\min})$  = presión de vapor de saturación (kPa) para temperatura mínima diaria,

$e^o(T_{\max})$  = presión de vapor de saturación (kPa) para temperatura máxima diaria.

Esta presión de vapor de saturación se calcula según (2.21) en función de la temperatura en °C.

$$e^o(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (2.21)$$

En escala horaria o para períodos más cortos, la presión de vapor ( $e_a$ ) se calcula según:

$$e_a = \frac{HR}{100} e^o(T) \quad (2.22)$$

El índice de claridad de la radiación difusa se puede estimar siguiendo Allen (1996):

$$K_D = 0.35 - 0.36K_B \quad (2.23)$$

Así pues, las expresiones (2.2) y (2.14) son dos modelos que sirven como aproximaciones teóricas para la estimación de la radiación solar bajo condiciones de cielo despejado. Es posible que la radiación solar medida, como ya se ha comentado, se desvíe de este valor teórico, debido a la turbidez del aire, reflexión de nubes cercanas, aerosoles o polvo en suspensión, etc. Una desviación por defecto puede ser debida sencillamente a la nubosidad existente en un día concreto o en período determinado. Teniendo en cuenta la precisión del sensor (Tabla 1) y los posibles desajustes de cálculo del propio modelo, el test generará alertas cuando la radiación solar medida supere en un 10% a la radiación teórica, como se muestra en la Ecuación 2.24. Este test se aplicará a los valores diarios ( $Rs$ ) y semihorarios ( $Rs_{sh}$ ).

$$Rs, Rs_{sh} > 1.1 \cdot R_{so} \quad (2.24)$$

Además, también se generarán alertas cuando el cociente entre la radiación solar medida y la radiación solar extraterrestre sea inferior al valor mínimo recomendado por Geiger et al. (2002):

$$K_T < 0.03 \quad (2.25)$$

Ocasionalmente, pueden existir valores de radiación negativos o valores ligeramente por encima de 0 durante períodos nocturnos (Allen, 1996). Esto puede ser consecuencia de gradientes de voltaje dentro del equipo de adquisición

de datos o los propios coeficientes de calibración del sensor. Este tipo de fenómeno podrá aparecer en registros cuya escala sea menor a la diaria y se tendrá en cuenta dentro de los procesos que se llevan a cabo para la calibración de los piranómetros.

Este test de radiación solar servirá también para detectar la desviación sistemática de valores fuera de los intervalos marcados. Se hará un seguimiento de la evolución en el tiempo de las alertas generadas para verificar que los piranómetros están funcionando de forma adecuada.

Por último, este test incluirá un módulo de visualización que sirva para representar gráficamente los valores medidos de radiación con los valores teóricos estimados a partir de los modelos descritos anteriormente.

Como **test de consistencia temporal** se ha diseñado el siguiente procedimiento de validación, basado en Meek y Hatfield (1994) y adaptado para datos semihorarios en  $W m^{-2}$ , según:

$$0 \leq |Rs_{sh} - Rs_{sh-2}| \leq 555 \text{ W m}^{-2} \quad (2.26)$$

donde

$Rs_{sh}$  = valor de radiación solar en una semihora en concreto ( $W m^{-2}$ ),

$Rs_{sh-2}$  = valor de radiación solar una hora antes ( $W m^{-2}$ ).

Finalmente, como **tests de persistencia**, y basados también en Meek y Hatfield (1994), se han diseñado los dos tests siguientes:

$$Rs(d) \neq Rs(d-1) \neq Rs(d-2) \quad (2.27)$$

$$Rs_{sh} \neq Rs_{sh-2} \neq Rs_{sh-4} \neq Rs_{sh-6} \quad (2.28)$$

donde

$Rs$  = valor de radiación solar diaria ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ),

$d$  = día que se está evaluando,

$Rs_{sh}$  = valor de radiación solar en una semihora concreta ( $W m^{-2}$ ),

$Rs_{sh-2}$  = valor de radiación solar una hora antes ( $W m^{-2}$ ),

$Rs_{sh-4}$  = valor de radiación solar dos horas antes ( $W m^{-2}$ ),

$Rs_{sh-6}$  = valor de radiación solar tres horas antes ( $W m^{-2}$ ).

### 2.6.2. Temperatura del aire

Para las temperaturas máxima, mínima y media del aire se propone, en primer lugar, un **test de rango fijo** definido por los límites físicos propuestos en UNE 500540 (2004), tal y como se muestra en la Tabla 3, que son más restrictivos que los definidos por las características del propio sensor (Tabla 1). Este test permitirá al administrador del sistema, introducir el rango específico del sensor, en caso de sustitución del tipo de sonda o para su aplicación a otras redes de estaciones meteorológicas.

$$-35^{\circ}C < T < 55^{\circ}C \quad (2.29)$$

En la Ecuación 2.29  $T$  hace referencia a cualquier valor de temperatura medido en la estación meteorológica (máxima, mínima y media diaria o semihoraria). Debido a que el sensor no está diseñado para medir fuera de ese rango definido, si el registro que se esté validando no cumple esta condición será etiquetado como erróneo.

Este test incorporará también un módulo de verificación de efemérides donde cada valor se comparará con el valor extremo registrado históricamente en la misma estación. Si el registro que se está validando supera el valor extremo prefijado, el sistema generará una alerta que deberá ser validada por el administrador para incorporarla como nueva efeméride. En el caso de la RIAA, al no tener una serie histórica amplia de datos termométricos se utilizarán en el futuro como efemérides los valores extremos que hayan superado los diferentes tests de validación. El sistema irá incorporando anualmente como nuevas efemérides los registros extremos validados satisfactoriamente.

Como **tests de consistencia interna** (Feng et al., 2004; Kunkel et al., 1998; Reek et al., 1992) se han diseñado una serie de procedimientos básicos para verificar la coherencia de la temperatura del aire dentro del sistema, así como un **test de ceros** para verificar continuos registros de temperatura mínima igual a cero (Schroeder, 2005) y un **test para el salto térmico diario** donde se comprueba que éste no supere un umbral determinado (Reek et al., 1992).

$$T_{\max} > T_{\text{med}} > T_{\min} \quad (2.30)$$

$$T_{\max} > \max(T_{sh}) \quad (2.31)$$

$$T_{\min} < \min(T_{sh}) \quad (2.32)$$

$$T_{\max}(d) > T_{\min}(d-1) \quad (2.33)$$

$$T_{\min}(d) \leq T_{\max}(d-1) \quad (2.34)$$

$$dT(d) < 23.8^{\circ}\text{C} \quad (2.35)$$

$$T_{\min}(d) = T_{\min}(d-1) = T_{\min}(d-2) = 0 \quad (2.36)$$

donde

$T_{\max}$  = temperatura máxima diaria  $^{\circ}\text{C}$ ,

$T_{\text{med}}$  = temperatura media diaria  $^{\circ}\text{C}$ ,

$T_{\min}$  = temperatura mínima diaria  $^{\circ}\text{C}$ ,

$\max(T_{sh})$  = valor semihorario máximo de temperatura en un día concreto  $^{\circ}\text{C}$ ,

$\min(T_{sh})$  = valor semihorario mínimo de temperatura en un día concreto  $^{\circ}\text{C}$ ,

$d$  = día que se está evaluando,

$dT$  = salto térmico diario  $^{\circ}\text{C}$ . Diferencia diaria entre  $T_{\max}$  y  $T_{\min}$ .

La Ecuación 2.30 verifica que la temperatura máxima (valor instantáneo) debe ser mayor que la temperatura media (valor promedio), y ésta, a su vez, mayor que la temperatura mínima (valor instantáneo). Se trata de comprobar la coherencia de las tres variables que se almacenan diariamente. Las Ecuaciones 2.31 y 2.32 comprueban que la temperatura máxima diaria debe ser mayor que el valor semihorario máximo de temperatura (valor promedio) y de forma análoga para la temperatura mínima. Las Ecuaciones 2.33 y 2.34 verifican que la temperatura máxima sea mayor que la mínima del día anterior, y que la

temperatura mínima sea menor o igual que la máxima del día anterior, respectivamente (Kunkel et al., 1998).

Los **tests de rango dinámico, consistencia temporal, persistencia y coherencia espacial** para datos diarios de temperatura máxima, mínima y media se detallan ampliamente en el apartado 2.6.6.

Para los registros semihorarios de temperatura se ha diseñado un **test de consistencia temporal** basado en las tolerancias recomendadas en la Tabla 4 según WMO (1993).

$$|T_{sh} - T_{sh-2}| < 4^{\circ}\text{C} \quad (2.37)$$

Por último se ha diseñado un **test de persistencia** basado en Meek y Hatfield (1994), donde se verifican que los registros no sean iguales durante un periodo de 3 horas.

$$T_{sh} \neq T_{sh-2} \neq T_{sh-4} \neq T_{sh-6} \quad (2.38)$$

donde

$T_{sh}$  = valor de la temperatura del aire en una semihora concreta ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_{sh-2}$  = valor de la temperatura del aire una hora antes ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_{sh-4}$  = valor de la temperatura del aire dos horas antes ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_{sh-6}$  = valor de la temperatura del aire tres horas antes ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### 2.6.3. Humedad Relativa del aire

El primer procedimiento de validación que se ha diseñado para los registros de humedad relativa ( $HR$ ) es un **test de rango fijo** basado en los límites instrumentales del sensor (Tabla 1) y similares a los de Shafer et al. (2000):

$$0.8 < HR \leq 100 \% \quad (2.39)$$

En la Ecuación 2.39  $HR$  hace referencia a cualquier dato de humedad relativa, semihoraria o diaria (máxima, mínima y media). Todos los valores que se encuentren fuera de este rango serán etiquetados como erróneos. En este test



se realizará también un seguimiento de los valores que superen el 100% de humedad relativa, ya que es posible que ocasionalmente, y debido a la precisión de la sonda, se puedan registrar valores superiores. Valores frecuentes por encima de este máximo es síntoma inequívoco de mal funcionamiento del sensor. Como se ha expuesto en la Tabla 1, el sensor de humedad HUMICAP podría registrar valores del 103%, ya que para ese rango de humedad alta su precisión es de +/- 3%. En estos casos los registros se corregirán igualándolos al límite físico máximo que es 100% y se etiquetarán como tal, informando de que es un registro corregido. En ningún caso se pondrán estos datos sin corregir a disposición de usuarios finales ni se introducirán en cualquier cálculo auxiliar que se realice. Se hará un seguimiento de los registros con valores iguales al 100% para comprobar la verosimilitud de dichos registros. Eventos importantes de precipitación y fenómenos como el rocío o la niebla pueden provocar valores elevados de humedad relativa (90-100%).

En relación a la **consistencia interna**, de forma análoga a los procedimientos diseñados para temperatura, se comprobarán las siguientes expresiones que sirven para verificar la coherencia interna del sistema y de sus variables (Feng et al., 2004):

$$HR_{\max} > HR_{\text{med}} > HR_{\min} \quad (2.40)$$

$$HR_{\max} > \max(HR_{sh}) \quad (2.41)$$

$$HR_{\min} < \min(HR_{sh}) \quad (2.42)$$

donde

$HR_{\max}$  = humedad relativa máxima diaria en %,

$HR_{\text{med}}$  = humedad relativa media diaria en %,

$HR_{\min}$  = humedad relativa mínima diaria en %,

$\max(HR_{sh})$  = valor semihorario máximo de humedad relativa del aire en un día concreto en %,

$\min(HR_{sh})$  = valor semihorario mínimo de humedad relativa del aire en un día concreto en %.

Los valores que no cumplan las Ecuaciones 2.40, 2.41 y 2.42 serán etiquetados como erróneos. Es posible que los valores de las variables en las Ecuaciones 2.41 y 2.42 sean iguales, lo cual implicaría valores instantáneos consecutivos idénticos. Hay que tener en cuenta que esta variable se muestrea con una frecuencia de 10 minutos, y a valores altos de humedad (90-100%), el sensor no responde con la misma velocidad a los cambios de humedad debido a la histéresis de la propia sonda.

Con las medidas de humedad relativa y temperatura es posible estimar la temperatura del punto de rocío ( $T_{dew}$ ) que es una variable que se utiliza también para cuantificar el contenido de agua del aire. Para estimar esta variable cuando no ha sido medida, puede estimarse a partir de la presión de vapor ( $e_a$ ) según la Ecuación 2.43 (Bosen, 1958; Jensen et al., 1990).

$$T_{dew} = \frac{116.91 + 237.3 \ln(e_a)}{16.78 - \ln(e_a)} \quad (2.43)$$

Se ha decidido no aplicar a  $T_{dew}$ , un conjunto de procedimientos semejantes a los diseñados para  $T$  debido a que  $T_{dew}$  no es una variable medida. El sensor Humicap instalado en las estaciones de la RIAA sirve para medir la humedad relativa del aire, no la  $T_{dew}$ . Para medir  $T_{dew}$  se utilizan habitualmente higrómetros u otros sensores específicos para ello. Se dice que esta variable es estimada o calculada porque se puede aproximar mediante la Ecuación 2.43 a partir de la presión de vapor. Ésta es función de la humedad relativa y de la temperatura del aire, con lo cual estaríamos introduciendo errores propios de las medidas térmicas y de humedad relativa junto con otros errores intrínsecos a las dos aproximaciones teóricas de cálculo ( $e_a$  y  $T_{dew}$ ).

No obstante, se ha diseñado un procedimiento para verificar que los valores de  $T_{dew}$  no superan sistemáticamente las medidas de  $T_{min}$ , ya que esto indicaría problemas graves en el sensor de humedad relativa (ASCE-EWRI, 2005). Tal y como se comenta ampliamente en Allen (1996) y Allen et al. (1998) es posible que en regiones húmedas ambos valores se aproximen en muchos días. En regiones áridas o semiáridas con vientos nocturnos muy leves y si las medidas se realizan en condiciones de referencia es posible que las dos variables tengan valores parecidos. Aunque lo habitual en climas secos es que  $T_{dew}$  se sitúe entre 2° C y 4° C por debajo de  $T_{min}$  (ASCE-EWRI, 2005). Cuando se da el fenómeno conocido como rocío durante la noche, los valores de  $T_{dew}$  durante las primeras horas de la mañana pueden coincidir con los registros de temperatura mínima diaria. El procedimiento diseñado evaluará las diferencias diarias entre ambos valores, generando una alerta si la Ecuación 2.44 no se cumple. El

procedimiento determinará la evolución temporal del número de casos en que no se cumple esta condición y se verificará gráficamente que la diferencia entre ambos valores no experimenta ningún tipo de tendencia. Para una automatización del procedimiento se han generado alertas cuando  $T_{min}$  ha registrado valores por debajo de 1 °C con respecto a  $T_{dew}$ .

$$T_{dew} \leq T_{min} \quad (2.44)$$

En relación a los **tests de consistencia temporal** para humedad relativa no existe ningún procedimiento para datos diarios que permita verificar la validez de los mismos. Al tratarse de una magnitud sin unidades físicas no es posible establecer un límite máximo de la variabilidad entre días consecutivos para una zona o un mes en concreto (WMO, 1993). Zahumensky (2004) estableció un límite del 15% para registros instantáneos sucesivos de humedad relativa, con una frecuencia de muestreo de 10 minutos. Extrapolando este umbral para datos semihorarios, se ha diseñado el siguiente test (Ecuación 2.45):

$$|HR_{sh} - HR_{sh-1}| > 45 \% \quad (2.45)$$

Como **test de persistencia** para datos diarios se ha diseñado un procedimiento para verificar si existen más de dos registros consecutivos con el mismo valor de humedad relativa. En tales casos se generará una alerta marcando los tres datos como sospechosos.

$$HR_{max}(d) \neq HR_{max}(d-1) \neq HR_{max}(d-2) \quad (2.46)$$

$$HR_{min}(d) \neq HR_{min}(d-1) \neq HR_{min}(d-2) \quad (2.47)$$

$$HR_{med}(d) \neq HR_{med}(d-1) \neq HR_{med}(d-2) \quad (2.48)$$

Donde  $d$  es el día que se está evaluando para los valores diarios de humedad relativa máxima, mínima y media.

Por último, como **test de persistencia** para datos intradiarios se ha diseñado un procedimiento basado en Zahumensky (2004), donde se comprueba que la desviación típica diaria de todos los registros semihorarios de humedad relativa no pueden superar un umbral determinado, definido por la Ecuación 2.49. Los registros semihorarios correspondientes y su valor promedio diario serán etiquetados con su código de validación correspondiente.

$$\sigma_{HR_{sh}} > 1\% \quad (2.49)$$

#### 2.6.4. Velocidad y Dirección de Viento

Verificar la calidad de los datos de velocidad y dirección de viento resulta una labor bastante complicada a no ser que se dupliquen los sensores en la estación meteorológica. Es habitual que la presencia reiterada de valores bajos de velocidad de viento sea debida a un mal funcionamiento del sensor o a la presencia de hielo si la temperatura del aire ha estado en torno a los 0 °C o menos. También los elementos mecánicos de los anemómetros se ensucian con facilidad y provocan un incremento de la resistencia umbral del sensor para registrar adecuadamente la velocidad o la dirección.

Hay que tener en cuenta que los sensores de viento que se emplean en las redes de estaciones agrometeorológicas automáticas suelen ser anemoveletas, que son sensores que miden simultáneamente la velocidad y dirección del viento. Esta última variable no tiene desde el punto de vista agronómico la misma relevancia que la primera pero puede servir como variable auxiliar para verificar la calidad de los datos de velocidad de viento.

El primer procedimiento de validación que se ha diseñado para los datos de velocidad de viento, tanto diarios como semihorarios, es un **test de rango fijo** basado en los límites definidos en la Tabla 3 y en la consistencia física por la que no pueden existir valores negativos:

$$0 < Vv^* < 75 \text{ m s}^{-1} \quad (2.50)$$

Donde  $Vv^*$  es cualquier valor diario o semihorario de velocidad de viento (media o máxima). Igual procedimiento se ha empleado para validar los registros de dirección de viento, que tampoco pueden tomar valores por debajo de 0 grados:

$$0 < Dv^* < 360^\circ \quad (2.51)$$

Donde  $Dv^*$  indica el valor de los datos correspondientes a la variable dirección de viento (diario o semihorario).

Los registros de velocidad y dirección de viento que no cumplan las expresiones 2.50 y 2.51 serán etiquetados como erróneos.

Como **test de consistencia interna**, de forma similar a otras variables comentadas anteriormente, se han diseñado los siguientes procedimientos donde se comprueba la coherencia interna del sistema:

$$V_{\max} > V_v \quad (2.52)$$

$$V_{\max} > \max(V_{v_{sh}}) \quad (2.53)$$

donde

$V_{\max}$  = racha o velocidad de viento máxima diaria ( $\text{m s}^{-1}$ )

$V_v$  = velocidad de viento media diaria ( $\text{m s}^{-1}$ )

$\max(V_{v_{sh}})$  = valor semihorario máximo de velocidad de viento en un día concreto ( $\text{m s}^{-1}$ )

Dentro de los **tests de consistencia interna** también se han considerado los procedimientos recomendados por DeGaetano (1997) y Zahumensky (2004) para su aplicación a los registros de velocidad y dirección de viento a diferentes escalas:

$$\text{Si } Dv^* = 0, \rightarrow V_v^* \neq 0 \quad (2.54)$$

$$\text{Si } V_v^* = 0, \rightarrow Dv^* \neq 0 \quad (2.55)$$

Los registros que no cumplan alguna de las expresiones anteriores serán etiquetados como erróneos.

Los **tests de consistencia temporal** se han diseñado para los dos tipos de datos que se almacenan en la RIAA, a escala diaria y semihoraria.

$$|V_v(d) - V_v(d-1)| < 10 \text{ m s}^{-1} \quad (2.56)$$

$$|V_{v_{sh}} - V_{v_{sh-2}}| < 7.5 \text{ m s}^{-1} \quad (2.57)$$

$$\min(|Dv(d) - Dv(d-1)|, 360 - |Dv(d) - Dv(d-1)|) < 150^\circ \quad (2.58)$$

$$\min(|Dv_{sh} - Dv_{sh-2}|, 360 - |Dv_{sh} - Dv_{sh-2}|) < 150^\circ \quad (2.59)$$

donde  $d$  es el día que se está evaluando, siendo  $d-1$  el día anterior, y  $sh$  es el valor correspondiente a una semihora concreta, siendo  $sh-2$  el valor medido una hora antes.

Estos tests de consistencia temporal están basados en las indicaciones de Meek y Hatfield (1994), al igual que los **tests de persistencia**, donde se verifica la existencia de varios registros consecutivos de igual valor:

$$Vv(d) \neq Vv(d-1) \neq Vv(d-2) \quad (2.60)$$

$$Vv_{\max}(d) \neq Vv_{\max}(d-1) \neq Vv_{\max}(d-2) \quad (2.61)$$

$$Dv(d) \neq Dv(d-1) \neq Dv(d-2) \quad (2.62)$$

$$Vv_{sh} \neq Vv_{sh-2} \neq Vv_{sh-4} \neq Vv_{sh-6} \quad (2.63)$$

$$Dv_{sh} \neq Dv_{sh-2} \neq Dv_{sh-4} \neq Dv_{sh-6} \quad (2.64)$$

Donde  $d$  hace referencia al día en que se está evaluando el valor diario de velocidad ( $Vv$ ) o dirección de viento ( $Dv$ ).  $Vv_{\max}$  es la velocidad máxima diaria y  $Dv_{sh}$  corresponde a la dirección del viento en una semihora concreta,  $Dv_{sh-2}$  es la dirección una hora antes y así sucesivamente.

Utilizando la variable dirección de viento como dato auxiliar se ha desarrollado un procedimiento para describir el régimen de vientos de cada estación meteorológica. Así, se podrán obtener las **funciones de distribución conjunta de velocidad y dirección de viento**, generándose de forma dinámica gráficos para cada año. De esta manera, se puede comprobar qué direcciones son las más habituales en cada estación así como las velocidades asociadas a cada acimut. Este procedimiento servirá para generar alertas de las posibles derivas del sensor o la posible existencia de nuevas barreras naturales o artificiales cercanas a la estación, pero no servirá para validar individualmente cada registro.

También se ha diseñado un procedimiento automático mediante el cual se analizarán los **periodos de calma**. Ésta se define como la ausencia de movimiento aparente del aire, y en la práctica es el viento con velocidad inferior a 2 nudos que equivale a  $1 \text{ m s}^{-1}$  (UNE 500510, 2005). AENOR, en su conjunto de normas sobre redes de estaciones meteorológicas automáticas propone la instalación del sensor de viento a 10 m de altura (UNE 500520, 2002). Las anemoveletas de las estaciones de la RIAA están instaladas a 2 m de altura, para un correcto cálculo

de la evapotranspiración de referencia. Se ha optado por trasladar este valor de referencia de 1 m/s para datos de viento medidos a 10 m de altura, a su equivalente a 2 m de altura. Para ello se ha utilizado un perfil logarítmico de la velocidad del viento para trasladar las mediciones en altitud. Una relación que ya se ha utilizado en otros trabajos agronómicos relacionados con el viento (Allen y Wright, 1997) y que es la siguiente:

$$u_2 = u_z \frac{3.44}{\ln(16.3z_w - 5.42)} \quad (2.65)$$

donde

$u_2$  = velocidad del viento a 2 metros de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),

$u_z$  = velocidad del viento a una altura de  $z_w$  metros ( $\text{m s}^{-1}$ ),

$z_w$  = altura a la que se mide  $u_z$  (m).

Sustituyendo  $u_z = 1 \text{ m s}^{-1}$  y  $z_w = 10 \text{ m}$  para calcular  $u_2$ , nos queda el siguiente resultado:

$$u_2 = 1 \cdot \frac{3.44}{\ln(16.3 \cdot 10 - 5.42)} = 0.67 \text{ m s}^{-1} \quad (2.66)$$

Este procedimiento determinará si el número de registros por debajo de este umbral va aumentando con el tiempo, con el objetivo de detectar anomalías en el funcionamiento del sensor o la existencia de alguna barrera natural o artificial cercana a la estación meteorológica.

$$\text{Calma:} \quad Vv^* < u_2 = 0.67 \text{ m s}^{-1} \quad (2.67)$$

Para el control de calidad de los datos de velocidad de viento también se ha incorporado un mecanismo de validación para verificar gráficamente que el **ratio diario entre  $Vv_{max}$  y  $Vv$**  se mantiene en un rango razonable a lo largo de toda la serie temporal, siguiendo las recomendaciones de ASCE-EWRI (2005). Si este ratio es muy elevado a lo largo del tiempo es muy posible que el anemómetro no esté funcionando correctamente. La contaminación debida a la exposición a la intemperie aumenta la fricción en los rodamientos provocando la subida de este ratio. Si baja bruscamente a 1.0 es señal de fallos electrónicos. El uso de este ratio como variable adimensional puede ayudar a detectar anomalías

en las medidas de velocidad de viento que resultan inapreciables en otros procedimientos de validación que sólo emplean los valores medios diarios (Graybeal, 2005).

### 2.6.5. Precipitación

El primer procedimiento de validación que se ha diseñado para verificar la calidad de los datos de precipitación es un **test de rango fijo** basado en los límites de la Tabla 3 y en la consistencia física por la que no puede existir ningún registro de lluvia negativo:

$$0 \leq P_{sh} < 150 \text{ mm} \quad (2.68)$$

donde  $P_{sh}$  son los valores de precipitación semihoraria. Esta validación en los registros semihorarios se verá también reflejada en los datos de precipitación diarios.

Para los valores diarios se ha utilizado el límite marcado por Shafer et al. (2000):

$$0 \leq P < 508 \text{ mm} \quad (2.69)$$

Por otro lado y teniendo en cuenta que para el caso de la RIAA, el pluviómetro instalado en las estaciones tiene una precisión de 0.2 mm/vuelco, no puede existir ningún registro de lluvia inferior a este valor umbral. De esta manera como **test de consistencia interna** del sistema se establece la siguiente verificación:

$$\text{Cuando } P > 0 \quad P^* \geq 0.2 \text{ mm} \quad (2.70)$$

Donde  $P^*$  es el valor de cualquier registro de lluvia (diario o semihorario). Los valores que no cumplan las expresiones anteriores serán marcados como erróneos y no formarán parte de ningún cálculo posterior.

Siguiendo la misma metodología que se ha empleado en el desarrollo de los procedimientos de validación para datos de temperatura (apartado 2.6.2), existen en la bibliografía aplicaciones a la variable precipitación (Estévez y Gavilán, 2006; Hubbard et al., 2005) pero con la excepción del test de consistencia temporal. Esto es debido a los continuos valores iguales a cero de los registros de precipitación (cuando no existe lluvia) que impiden la



verificación de intervalos de variabilidad temporal para detectar posibles errores. Los tests de rango dinámico y de persistencia aplicados en los citados trabajos asumen la hipótesis de una distribución normal para los datos de precipitación diaria, y no resultan tan eficientes como para la temperatura, ya que precisan de una gran labor manual de inspección para verificar y comprobar la veracidad de los potenciales errores. Son múltiples los trabajos que consideran la distribución gamma una de las más adecuadas para ajustar a los datos de precipitación diaria (Evans et al., 2000; Johnson et al., 1995) y a partir de ahí se han desarrollado recientemente mecanismos con buenos resultados para la detección de errores (You y Hubbard, 2007). La limitación de este tipo de procedimientos está en la longitud de las series, y los tests de consistencia espacial como los de Kunkel et al. (2005) o Hubbard et al. (2005) precisan de una alta densidad de estaciones meteorológicas que forman la red, ya que la alta variabilidad espacio-temporal asociada a los datos de precipitación puede causar gran incertidumbre en las aproximaciones metodológicas que se lleven a cabo para validar esta variable.

Por tanto, se ha diseñado un procedimiento de validación para datos de precipitación que detecta con un alto grado de eficacia los valores anómalos de lluvia que pueden darse habitualmente en una Red de Estaciones meteorológicas de este tipo. Este procedimiento se describe detalladamente en el Capítulo 3.

### **2.6.6. Tests de temperatura basados en decisiones estadísticas**

También se han elaborado procedimientos de validación más complejos para datos diarios de temperatura. Para ello se ha seguido la metodología de Hubbard et al. (2005), basada en decisiones estadísticas, diseñando un test de rango dinámico, un test de consistencia temporal, un test de persistencia y un test de coherencia espacial.

Este tipo de procedimientos tienen la ventaja de ser unos tests que se adecuan a las necesidades y características de cada red de estaciones meteorológicas y que tienen la capacidad de aumentar su eficacia a medida que las series temporales son mayores, ya que utilizan agregados estadísticos que dependen del número de registros.

Básicamente se trata de aplicar un conjunto de algoritmos o reglas a cada registro, donde el procedimiento de validación aceptará el dato etiquetándolo como verdadero o rechazará el dato marcándolo como un valor anómalo, “outlier” o dato sospechoso. Esta hipótesis ( $H_0$ ) de verificar cada registro y la

decisión estadística de aceptarlo o marcarlo como potencialmente erróneo puede generar dos tipos de errores, tal y como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de errores

Decisión Estadística	Situación verdadera	
	H <sub>0</sub> verdadera	H <sub>0</sub> falsa
Aceptar H <sub>0</sub>	Sin Error	Error Tipo II
Rechazar H <sub>0</sub>	Error Tipo I	Sin Error

Así pues, si el dato es válido y el test lo acepta o si el dato no es válido y el test lo rechaza, se puede afirmar que el test de validación está funcionando correctamente. Cuando un dato válido es rechazado por el test se produce un error Tipo I, y si el dato no es válido y el test lo acepta, se producirá un error Tipo II.

Supongamos la hipótesis de que el valor de una variable en concreto es válido sólo si está entre los límites  $\pm 3$  desviaciones típicas ( $\sigma$ ) de la media ( $\mu$ ). Asumiendo una distribución normal, la hipótesis H<sub>0</sub> será aceptada en el 99.73% de los casos sin error. Los registros que se salgan de este intervalo definido como  $\mu \pm 3 \sigma$  serán rechazados generando errores Tipo I si hubiera registros válidos fuera de ese rango. En estos casos (H<sub>0</sub> es rechazada cuando los datos son válidos) se generarían errores Tipo I en un 0.27% de los casos, asumiendo que el conjunto de datos no tuviera valores erróneos. Si un registro “verdadero” se reemplazara por un valor “erróneo”, la hipótesis será rechazada correctamente sólo si el valor “erróneo” está fuera del rango  $\mu \pm 3 \sigma$ . Por el contrario, si la hipótesis fuera aceptada cuando el registro es “erróneo” se generaría un error Tipo II. De esta forma se puede comprobar como reduciendo los límites frente a los que se verifica cada uno de los datos, se producirán más errores Tipo I y menos errores Tipo II, mientras que ampliando el intervalo disminuimos los errores Tipo I y aumentamos los errores Tipo II. Para un correcto diseño de los procedimientos de validación basados en decisiones estadísticas es necesario conseguir un equilibrio donde se puedan reducir los errores Tipo II al mismo tiempo que no se incrementen los errores Tipo I. Es importante recalcar que debido a que los errores Tipo I no pueden ser evitados por completo, todos los administradores de sistemas de almacenamiento de datos meteorológicos deben guardar los registros originales independientemente de los resultados generados por los procedimientos de validación que se hayan aplicado.

Para el **test de rango dinámico** se realizará una verificación donde se compruebe que cada dato de temperatura registrado se encuentra dentro de un rango específico para cada mes del año, tal y como se muestra en (2.71).

$$\overline{T} - f\sigma_T \leq T \leq \overline{T} + f\sigma_T \quad (2.71)$$

Donde  $T$  es el registro diario de temperatura (media, máxima o mínima) que estamos validando,  $\overline{T}$  es el promedio diario (p.e., temperatura máxima, mínima o media diaria en el mes de Diciembre) y  $\sigma_T$  es la desviación típica de los valores diarios de  $T$  para ese mes en cuestión. Se ha realizado un análisis de todos los datos para determinar la relación existente entre el porcentaje de registros que son marcados como potenciales errores y diversos valores del factor  $f$ , para cada una de las estaciones meteorológicas. Este procedimiento indica que para valores grandes de  $f$  (factor), el número de potenciales errores disminuye.

En el caso del **test de consistencia temporal** que se ha diseñado, se verificará que registros diarios consecutivos no se sitúen fuera de los límites marcados por el ratio de cambio definido para cada mes.

$$\overline{d}_i - f\sigma_{d_i} \leq d_i \leq \overline{d}_i + f\sigma_{d_i} \quad (2.72)$$

Donde  $d_i = T_i - T_{i-1}$ ,  $i$  es el día actual y  $\sigma_{d_i}$  es la desviación típica de la diferencia de temperaturas ( $d_i$ ). De forma análoga, se ha estudiado la relación existente entre el porcentaje de potenciales errores que genera el test para diferentes valores del factor  $f$ .

El diseño del **test de persistencia** se ha basado en la hipótesis de que cuando un sensor falla puede registrar un valor constante, de manera que el valor de la desviación típica será menor, pudiendo ser cero si se completa el periodo de medida con un valor constante. En otros casos, cuando el sensor trabaja intermitentemente, se registrarán valores razonables y otros cercanos a cero, obteniéndose una desviación típica muy elevada. Esto quiere decir que cuando la variabilidad se salga fuera de unos límites determinados, según (2.73), los valores serán etiquetados como sospechosos.

$$\overline{\sigma}_j - f\sigma_{\sigma_j} \leq \sigma_j \leq \overline{\sigma}_j + f\sigma_{\sigma_j} \quad (2.73)$$

Donde  $\sigma_j$  es la desviación típica de los valores diarios para cada mes ( $j$ ) y año,  $\sigma_{\sigma_j}$  es la desviación típica de  $\sigma_j$  de cada mes en cuestión y  $\overline{\sigma}_j$  es el valor medio para cada mes de  $\sigma_j$  durante todos los años de datos. Igual que en los casos anteriores, se ha estudiado la relación existente entre el porcentaje de potenciales errores generados por este test de persistencia en función de diferentes valores del factor  $f$ .

Para el **test de coherencia espacial** se ha utilizado una adaptación del test de regresión espacial utilizado por diversos autores con excelentes resultados en comparación con otros métodos (Hubbard et al., 2005; Hubbard y You, 2005). En este procedimiento se comprueba que los datos de la variable en cuestión se encuentren en el intervalo de confianza formado por los datos de una serie de referencia que se crea a partir de las estaciones vecinas. Se selecciona un número de estaciones (M) dentro de un radio de distancia predefinido a la estación candidata. Este radio fue de 50 Km para la mayoría de los casos y de 80 Km para aquellas estaciones rodeadas de un menor número de estaciones cercanas, de forma que M tomase un valor mínimo de 10 estaciones. Se realiza una regresión lineal de cada estación vecina con la estación candidata, para toda la serie de datos (2.74)

$$x_i = a_i + b_i y_i \quad (2.74)$$

Donde  $a_i$  y  $b_i$  son los coeficientes de cada regresión lineal,  $y_i$  son los registros diarios de cada estación vecina y  $x_i$  son los valores preliminares estimados de la estación meteorológica candidata. Para cada regresión lineal se calcula el error estándar de la estimación ( $s_i$ ), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el resto de parámetros de la regresión. El índice  $i$  representa cada una de estas regresiones.

Los valores ponderados de la estimación de la serie de referencia ( $x'$ ) se obtienen utilizando el error estándar de la estimación, también conocido como la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE):

$$x' = \pm \left( \sum_{i=1}^N \pm x_i^2 s_i^{-2} \right)^{0.5} \left( \sum_{i=1}^N s_i^{-2} \right)^{-0.5} \quad (2.75)$$

donde N es el número de estaciones utilizadas en la estimación de la serie de referencia (generalmente el criterio para su elección es que tengan un  $R^2$  superior a 0.5, que estén obviamente dentro del radio de distancia predefinido, y que la longitud de la serie sea consistente, en este trabajo no se han tenido en cuenta series inferiores a 3 años). Siguiendo las indicaciones de Hubbard et al. (2005) N se ha fijado en 5. Téngase en cuenta que siempre  $N < M$ . De manera que se han escogido las cinco estaciones cercanas cuyo error estándar de la estimación es menor.

El error estándar de la estimación ponderado ( $s'$ ) se calcula de la siguiente forma (2.76):

$$\frac{1}{s'^2} = N^{-1} \sum_{i=1}^N s_i^{-2} \quad (2.76)$$

A continuación, se establecen los intervalos de confianza para la aplicación de este test a partir de  $s'$ , donde se comprueba si el valor registrado en la estación candidata ( $x$ ) está dentro de estos límites (2.77):

$$x' - fs' \leq x \leq x' + fs' \quad (2.77)$$

donde  $x'$  es el valor de la serie de referencia,  $f$  es un factor que toma diferentes valores y  $x$  es el dato de la variable que se está validando. Si cada registro cumple esta condición, el dato en cuestión pasa satisfactoriamente este test de coherencia espacial. Por el contrario, si es rechazado, pasará a ser un potencial 'outlier' y tendrá que ser verificado en la fase de inspección manual. En función de los diferentes valores que se le asignen al factor  $f$ , obtendremos un porcentaje determinado de potenciales 'outliers'. A medida que el factor  $f$  es mayor los potenciales errores detectados decrecen.

Debido a que los registros meteorológicos utilizados en este trabajo provienen todos de estaciones meteorológicas automáticas y se han integrado en una base de datos, se han podido realizar las comprobaciones previas para que las regresiones lineales sean consistentes. Es decir, cada pareja de datos utilizada en el modelo de regresión lineal corresponde a una misma fecha, y es idéntica para los dos registros (estación candidata y estación vecina). Es muy frecuente que al trabajar con series temporales que poseen gran cantidad de datos, existan lagunas o días puntuales en los que no existan registros.

Empleando esta metodología es posible preseleccionar el porcentaje de errores que cada test puede detectar (Tipo I). De esta forma se puede seleccionar diferentes valores del factor  $f$  para estaciones en diferentes condiciones climáticas y mantener el porcentaje de potenciales errores uniforme en toda la Red.

### 2.6.7. Códigos de validación y referencias empleadas

En la Tabla 6 se muestran los códigos de validación empleados para etiquetar cada uno de los registros meteorológicos validados, en función de los tests de control de calidad que le han sido aplicados. Un registro que sea detectado por cualquiera de los tests aplicados se denominará dato anómalo, por la existencia de una discrepancia con el resto de registros.

Los datos etiquetados con 1 y 3, ponen de manifiesto la inconsistencia meteorológica del dato validado, por lo tanto serán considerados como erróneos y no válidos, y no serán puestos a disposición de los usuarios ni se utilizarán para el cálculo o estimación de otras variables meteorológicas. El resto de los tests consideran a los datos como sospechosos o potencialmente erróneos para el caso de los tests basados en decisiones estadísticas, y será el administrador del sistema el que finalmente, y tras la inspección visual si fuera necesaria, determine la validez de ese registro en función de los objetivos de cada organismo meteorológico. Este código de control formará parte de los metadatos.

Tabla 6. Códigos de validación empleados en el sistema de control de calidad

Código de Validación	Descripción
0	Dato sin validar
1	Dato que no ha superado algún test de rango rígido
1C	Dato corregido que no ha superado el test de rango rígido físico
2	Dato que no ha superado el test de rango dinámico
3	Dato que no ha superado algún test de consistencia interna
4	Dato que no ha superado algún test de consistencia temporal
5	Dato que no ha superado algún test de persistencia
6	Dato que no ha superado el test de coherencia espacial
7	Dato que no ha superado algún test específico
8	Sin definir
9	Dato validado satisfactoriamente por el sistema

A continuación se resume en la Tabla 7 las referencias bibliográficas empleadas para el diseño de algunos de los procedimientos de control de calidad según las diferentes variables meteorológicas.

Tabla 7. Resumen referencias bibliográficas empleadas

Variable	Test y Referencia
<b>Radiación Solar</b>	Rango rígido (UNE 500540, 2004), Rango flexible (Allen, 1996; Allen et al., 1994; ASCE-EWRI, 2005; Duffie y Beckman, 1991; Geiger et al., 2002), Consistencia Temporal y Persistencia (Meek y Hatfield, 1994)
<b>Temperatura del aire</b>	Rango fijo (UNE 500540, 2004), Rango dinámico (Hubbard et al., 2005), Consistencia interna (Feng et al., 2004; Kunkel et al., 1998; Reek et al., 1992; Schroeder et al., 2005), Salto térmico (Reek et al., 1992), Consistencia temporal (WMO, 1993; Hubbard et al., 2005), Persistencia (Meek y Hatfield, 1994; Hubbard et al., 2005), Coherencia espacial (Hubbard et al., 2005; Hubbard y You, 2005)
<b>Humedad Relativa del aire</b>	Rango fijo (Campbell Scientific Ltd., 1999; Shafer et al., 2000), Consistencia interna (Feng et al., 2004), Tdew (ASCE-EWRI, 2005), Consistencia temporal y Persistencia (Zahumensky, 2004)

Variable	Test y Referencia
<b>Velocidad y Dirección de Viento</b>	Rango fijo (UNE 500540, 2004), Consistencia interna (DeGaetano, 1997; Zahumensky, 2004), Consistencia temporal y Persistencia (Meek y Hatfield, 1994), Ratio $V_{v_{max}}/V_v$ (ASCE-EWRI, 2005)
<b>Precipitación</b>	Rango fijo (UNE 500540, 2004; Shafer et al., 2000), Consistencia interna (Campbell Scientific, 1998a), Falsos positivos (Capítulo 3)

(Hubbard et al., 2005; Hubbard y You, 2005) corresponden a tests basados en decisiones estadísticas

### 2.6.8. Arquitectura del Sistema: Plataforma, Base de Datos y Lenguajes de Programación empleados

El sistema se ha desarrollado con el objetivo de posibilitar la aplicación de los diferentes tests para el control de calidad de forma remota. De esta manera, el administrador del sistema o la persona encargada de la validación puede ejecutar los procedimientos de control de calidad en cualquier equipo informático con conexión a Internet y no necesariamente en el mismo puesto donde estén almacenados los datos meteorológicos, lo que se denomina en el argot informático un sistema cliente/servidor. La autenticación previa mediante un nombre de usuario y una clave, dotará al administrador de los permisos necesarios para ejecutar los diferentes tests de validación.

Con la finalidad de desarrollar un sistema que sea exportable a otras redes de estaciones meteorológicas automáticas se ha diseñado una arquitectura multiplataforma con la capacidad de ser totalmente funcional bajo la mayoría de sistemas operativos: Linux, Unix (Mac OS X, Solaris, AIX, Tru64, etc.) y Windows.

El sistema se ha diseñado en PostgreSQL que es un motor de base de datos objeto relacional basado en POSTGRES, versión 4.2, inicialmente puesto en marcha en la Universidad de California, en el departamento de cálculo científico de Berkeley (Stonebraker y Kemnitz, 1991). Su licencia BSD (Berkeley Software Distribution) se engloba dentro de las licencias de software libre. PostgreSQL es un proyecto de código abierto donde es posible visualizar el código fuente y modificarlo libremente para las necesidades del sistema que se pretende desarrollar, como es el caso. PostgreSQL soporta el standard SQL (Structure Query Language) y sobre él se han desarrollado herramientas de alto rendimiento para la aplicación de los procedimientos de validación: consultas complejas, llaves foráneas, triggers o disparadores, vistas, programación de funciones, empleo de lenguajes procedurales, etc. Está considerado como la base de datos de código abierto más avanzada del mundo y proporciona características que habitualmente sólo se encontraban en las bases de datos

comerciales como Oracle (Worsley y Drake, 2001, cap.1). Algunas de estas particularidades son:

- DBMS Objeto-Relacional: PostgreSQL aproxima los datos a un modelo objeto-relacional, y es capaz de manejar complejas rutinas y reglas. Ejemplos de su avanzada funcionalidad son consultas SQL declarativas, control de concurrencia multi-versión, soporte multi-usuario, transacciones, optimización de consultas, herencia, y arrays.
- Altamente Extensible: PostgreSQL soporta operadores, funciones métodos de acceso y tipos de datos definidos por el usuario.
- Soporte SQL Comprensivo: PostgreSQL soporta la especificación SQL99 e incluye características avanzadas tales como las uniones (joins) SQL92.
- Integridad Referencial: PostgreSQL soporta integridad referencial, la cual es utilizada para garantizar la validez de los datos de la base de datos.
- API Flexible: La flexibilidad del API de PostgreSQL ha permitido a los vendedores proporcionar soporte al desarrollo fácilmente para el RDBMS PostgreSQL. Estas interfaces incluyen Object Pascal, Python, Perl, PHP, ODBC, Java/JDBC, Ruby, TCL, C/C++, y Pike.
- Lenguajes Procedurales: PostgreSQL tiene soporte para lenguajes procedurales internos, incluyendo un lenguaje nativo denominado PL/pgSQL. Este lenguaje es comparable al lenguaje procedural de Oracle, PL/SQL. Otra ventaja de PostgreSQL es su habilidad para usar Perl, Python, o TCL como lenguaje procedural embebido.
- MVCC: Control de Concurrencia Multi-Versión (Multi-Version Concurrency Control), es la tecnología que PostgreSQL usa para evitar bloqueos innecesarios. Hay ocasiones en las que una lectura o consulta tiene que esperar para acceder a la información de la base de datos. La espera está provocada por usuarios que están escribiendo en dicha base de datos. Resumiendo, el lector está bloqueado por los escritores que están actualizando registros. Mediante el uso de MVCC, PostgreSQL evita este problema por completo. MVCC está considerado mejor que el bloqueo a nivel de fila porque un lector nunca es bloqueado por un escritor. En su lugar, PostgreSQL mantiene una ruta a todas las transacciones realizadas por los usuarios de la base de datos. PostgreSQL es capaz entonces de manejar los registros sin necesidad de que los usuarios tengan que esperar a que los registros estén disponibles.
- Write Ahead Logging (WAL): Esta característica de PostgreSQL conocida como Write Ahead Logging incrementa la dependencia de la base de datos al registro de cambios antes de que estos sean escritos en la base de datos. Esto garantiza que en el hipotético caso de que la base de datos se caiga, existirá un registro de las transacciones a partir del cual



podremos restaurar la base de datos. Esto puede ser enormemente beneficioso en el caso de caída, ya que cualesquiera cambios que no fueron escritos en la base de datos pueden ser recuperados usando el dato que fue previamente registrado. Una vez el sistema ha quedado restaurado, un usuario puede continuar trabajando desde el punto en que lo dejó cuando cayó la base de datos.

Para dotar a este sistema de control de calidad de las herramientas de los sistemas de información geográfica, se ha implementado la extensión espacial PostGIS, la cual añade soporte de objetos geográficos a los datos meteorológicos almacenados bajo PostgreSQL. Se publica bajo licencia GNU GPL (Licencia Pública General) que es una licencia de software libre gracias a la cual se han desarrollado diferentes funciones adaptadas a las necesidades del sistema por ser de código abierto. PostGIS fue certificada en 2006 por el Open Geospatial Consortium (OGC) lo que garantiza la interoperabilidad con otros sistemas y posibilita la exportación del sistema a otras redes de estaciones meteorológicas automáticas.

La mayoría de los tests de control de calidad incorporados en el sistema se han desarrollado en el lenguaje procedural PL/pgSQL, lo que permite aumentar la potencialidad y flexibilidad de los procedimientos de validación. Esto es posible gracias al intérprete estructurado de secuencia de pasos que permite modificar fácilmente cada uno de los algoritmos y funciones que son utilizados en cada test. Estas funciones, las secuencias de código y el resto de algoritmos de programación se han documentado para futuras mejoras y adaptaciones a otras plataformas o sistemas. Determinados cálculos auxiliares en algunos procedimientos de validación se han desarrollado en el lenguaje de programación propio de MATLAB, que es una aplicación orientada al análisis numérico y el tratamiento de datos. Esto es posible gracias a la flexibilidad e interoperabilidad de las tecnologías que conforman los pilares de la arquitectura del sistema de control de calidad desarrollado: PostgreSQL, PostGIS y PlpgSQL.

## **2.7. Modelo de Metadatos**

Dentro del diseño de un sistema de control de calidad de datos de estaciones meteorológicas es fundamental la incorporación de un sistema de gestión que garantice el correcto funcionamiento del sistema a largo plazo. El acceso a estos metadatos y su correcta difusión aportarán un valor añadido al sistema, permitiendo el intercambio real de datos meteorológicos entre diferentes organismos, usuarios, etc.

### 2.7.1. Introducción

El punto de partida para implementar un sistema de gestión de metadatos es considerar los datos meteorológicos generados en cualquier Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas como información geográfica, ya que responde a la estructura de un sistema espacial con diferentes puntos de muestreo (estaciones) donde se registran y almacenan periódicamente datos georreferenciados.

Los metadatos constituyen la información, en forma de documentación asociada, que permite que los datos sean bien entendidos, compartidos y explotados de una manera eficaz por todo tipo de usuarios a lo largo del tiempo. Se utilizan, por tanto, para poder identificar, acceder y utilizar los datos. El ejemplo más sencillo de uso de los metadatos podría ser una leyenda en un mapa que muestra la temperatura máxima anual en Andalucía. Las coordenadas de una estación o la altura a la que se encuentran cada uno de los sensores son otros ejemplos sencillos de metadatos.

Los principales objetivos que se persiguen con la creación de los metadatos son: la búsqueda, la elección y la utilización del conjunto de datos meteorológicos. Estos objetivos deben plantearse para fomentar y/o mejorar la interoperabilidad, accesibilidad, disponibilidad, integración, intercambio y gestión de esta información meteorológica.

Es importante comentar que recientemente se ha producido una evolución desde la primera concepción de los metadatos como “datos acerca de los datos”, hasta la idea actual de metadatos como datos que describen no sólo los datos sino también servicios (“datos acerca de datos y servicios”). Estos servicios pueden ser los servicios de publicación de mapas en Internet, servicios de transformación de coordenadas, etc. Todos ellos son servicios accesibles en la Red, que necesitan ser descritos mediante metadatos para también poder ser buscados, comparados y utilizados correctamente.

### 2.7.2. Normas de Metadatos

El organismo responsable a nivel internacional es el Comité Técnico ISO/TC211 denominado “Geomática/Información Geográfica” y ha desarrollado una serie de estándares en materia de información geográfica. El perfil de recomendaciones en cuanto a los catálogos de Metadatos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) está basado en la norma ISO19115,

contribuyendo al desarrollo sostenible, a la resolución de problemas ecológicos y facilitando el establecimiento de las infraestructuras espaciales de datos (IDE) a nivel local, regional y global (WMO, 2005). La norma ISO 19115:2003 “Geographic Information-Metadata” ha sido adoptada como Norma Europea por CEN/TC287 y como Norma Española por AEN/CTN148. Esta norma es muy amplia (409 elementos), compleja y muy general, por ello surge la necesidad de definir un nuevo perfil de metadatos, el Núcleo Español de Metadatos (NEM) que no es otra cosa que un modo particular y concreto de aplicar y utilizar la Norma, seleccionando un conjunto de ítems y parámetros opcionales.

### **2.7.3. Perfil del Núcleo Español de Metadatos**

En Noviembre de 2002 y con la colaboración de diferentes organismos de ámbito nacional, autonómico y local se creó en España un Grupo de Trabajo para la definición y establecimiento de la Infraestructura de Datos Espaciales en España (IDEE). Ésta debe ir orientada en base a las directrices marcadas por la Directiva Europea INSPIRE -Infrastructure for Spatial Information in the European Community- (DIRECTIVE, 2007) y siguiendo las especificaciones de interoperabilidad de Open Geospatial Consortium (OGC) y las normas ISO mencionadas anteriormente. Se trata de abordar la necesidad de garantizar la interoperabilidad entre los datos que proceden de diferentes organizaciones y en consecuencia poder crear Catálogos de Datos Interoperables. Este perfil del NEM incluye también las especificaciones de la Guía sobre Sistemas de Información Geográfica de la Directiva Marco del Agua (DMA) donde se incide en la descripción de la calidad de la información espacial.

### **2.7.4. Creación de Metadatos**

La implementación de metadatos es una tarea complicada que requiere, además de cierta especialización y gran dedicación, un conocimiento exhaustivo de las características técnicas del recurso que se va a incluir como metadato, qué información se debe recoger en cada ítem de metadatos, de qué forma y con qué criterios.

Actualmente existe una iniciativa para facilitar la creación de metadatos que está promoviendo el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad de Zaragoza donde se trata de impulsar una adecuada creación de metadatos en los organismos

pertenecientes a las diferentes Administraciones (Nacional actualmente y en un futuro, Regional y Local).

Herramientas para la creación de Metadatos:

- Geonetwork
- CatMDEdit
- ISO Metadata Editor
- Geomedia Catalogue
- ESRI “Arc-Catalog”
- MetaD

### **2.7.5. Catálogo de la Infraestructura de Datos Espaciales de Andalucía (IDEA)**

El Geoportal de la IDE de Andalucía, abierto a todos los productores de la Comunidad Autónoma, ofrece actualmente un servicio de búsqueda de datos espaciales que permite responder a las preguntas que se hacen los usuarios sobre: ¿Qué información geográfica hay?, ¿Dónde encontrarla?, ¿Qué características tiene?, etc. Con el objetivo de asegurar que la documentación disponible sobre información geográfica se muestre libremente tanto a proveedores como a usuarios. El día 9 de Agosto de 2006 se publicó en el BOJA nº 154 el Decreto por el cual se regula la actividad cartográfica de la Comunidad Autónoma Andaluza (Decreto 141/2006).

### **2.7.6. Normativa específica de Metadatos en Redes de Estaciones Meteorológicas Automáticas**

Se trata de la norma UNE 500550 (2003) elaborada por el comité técnico AEN/CTN GET5 Registros Meteorológicos. Aquí se establecen los criterios que deben seguir los gestores de redes de estaciones meteorológicas automáticas para la creación de los ficheros digitales utilizados para la difusión e intercambio de datos meteorológicos y climatológicos. Estos criterios deben garantizar su correcta interpretación, lo que exige, además de la difusión e intercambio del dato en sí mismo, la difusión e intercambio de toda la información necesaria que permita su uso adecuado y correcto.

### 2.7.7. Propuesta de implementación dentro del Sistema integrado de Control de Calidad

En vista de los apartados anteriores y en base a las necesidades actuales es necesaria la integración de la norma AENOR específica sobre Metadatos de estaciones meteorológicas automáticas con los modelos actuales (europeo, nacional y regional expuestos anteriormente) de metadatos de información geográfica. Sería interesante promover, en colaboración con organismos competentes en climatología y meteorología, el desarrollo de un perfil específico dentro del Núcleo Español de Metadatos y del catálogo de la IDEA para este tipo de información meteorológica, de manera que se pueda estandarizar la creación de metadatos en este tipo de redes, bajo las directrices de INSPIRE y la Directiva Marco del Agua, y cumpliendo con la normativa ISO recomendada por la Organización Meteorológica Mundial.

Para el desarrollo e implementación del sistema de Metadatos es conveniente utilizar las tecnologías que permiten alcanzar un estándar técnico en base a las recomendaciones del Open Geospatial Consortium (OGC), la ISO y el World Wide Web Consortium (W3C) para conseguir la interoperabilidad con independencia de formatos, interfaces que permitan la consulta y búsqueda centralizada de información, etc. (GML -Geographic Markup Language-, XML -Extended Markup Language-, WMS -Web Map Service-, etc.)

Los ítems mínimos que se proponen para incluir en este nuevo catálogo de Metadatos de información meteorológica son:

- Identificación del archivo de metadatos
- Idioma
- Nombre de la Entidad que facilita los registros
- Dirección, teléfono, email y persona de contacto
- Fecha de Creación de Metadatos
- Norma utilizada, versión de la norma.
- Información de Distribución
- Información de Identificación
- Código Identificador de la Estación
- Municipio dónde se halla ubicada
- Provincia
- Sistema de Referencia. Coordenadas geográficas, coordenadas UTM, huso y toda la información relativa a la proyección: factor de escala, elipsoide, datum, etc.

- Descripción del terreno sobre el que se asienta la estación. Registro de fechas de almacenamiento actuales y en los posibles cambios.
- Descripción del emplazamiento y su relación con los obstáculos existentes en su entorno (temporales o permanentes, naturales o artificiales, etc.) que puedan influir en la medición de la variable meteorológica. Registro de fechas de almacenamiento actuales y en los posibles cambios. Clasificación de Davenport para cada acimut.
- Tipo de sensores y altura de medida. Registro fecha/cambios
- Tipo de dato (entero, decimal, flotante, etc.)
- Precisión decimal del dato
- Variable que representa y nemotécnico empleado
- Unidades utilizadas en la medida
- Registro de Incidencias de Mantenimiento
- Inventario de Sensores, descripción y tipo de medida
- Identificador del sensor, marca, modelo y número de serie
- Parámetros relativos al sensor: escala, precisión, sensibilidad, etc.
- Identificador de los resultados de la aplicación de los diferentes procesos de validación empleados (banderas)
- Información acerca de los procesos de validación utilizados
- Características internas del sistema de adquisición de datos: frecuencia de muestreo, promedios, algoritmos incluidos en el datalogger, etc.
- Información relacionada con las tareas de mantenimiento y calibración. Fechas y actuaciones
- Fotografías que resulten de interés realizadas en las operaciones de mantenimiento, croquis, etc.

# Capítulo 3. Un nuevo Test de Precipitación semihoraria

## 3.1. Introducción

Se conoce con el nombre de precipitación a todas las formas de humedad caídas directamente sobre el suelo en estado líquido o sólido, aunque en general, sólo la lluvia y la nieve contribuyen de modo significativo a los totales pluviométricos. Las nubes son la fuente principal de la precipitación, si bien, como es sabido, la mayoría de ellas no originan precipitaciones porque las diminutas gotitas y cristales de hielo que las forman no llegan al suelo hasta que crecen lo suficiente para vencer el empuje de las corrientes de aire ascendentes que las mantienen en suspensión. Existen diferentes tipos de precipitación: lluvia, llovizna, chubasco, aguanieve, etc. dependiendo del diámetro de las gotas de agua y de unas determinadas condiciones atmosféricas. La lluvia es la forma más común de precipitación, hasta el punto de utilizarse los dos términos como sinónimos en un gran número de ocasiones.

Las condiciones necesarias para que se origine precipitación se pueden clasificar en las siguientes (Cuadrat y Pita, 1997. Cap. 5):

- Ascenso del aire y su enfriamiento.
- Condensación del vapor de agua y formación de nubes
- Gran concentración de humedad
- El crecimiento de las gotitas de agua de la nube.

Las dos primeras se dan en la atmósfera sin demasiada dificultad, sin embargo, una vez formadas las nubes, éstas no siempre ocasionan precipitaciones.

Un evento de lluvia por tanto, irá acompañado necesariamente de una atenuación en la radiación solar, susceptible de ser medida por el piranómetro, debido a la formación de nubes, que descargarán su vapor de agua en forma de precipitación.

Se ha evaluado el coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ) como indicador relativo del grado de nubosidad, ya que los factores que también atenúan la radiación como el ozono, oxígeno, vapor de agua y las partículas sólidas y líquidas que constituyen la contaminación (Bristow y Campbell, 1984) se pueden considerar constantes para un día y un lugar en concreto. Este coeficiente es el cociente entre los valores semihorarios de radiación solar medida ( $R_{sh}$ ) y los correspondientes a la radiación solar extraterrestre ( $R_{ah}$ ), teniendo en cuenta que para un día con cielo despejado este índice toma un valor entre 0,7-0,8 dependiendo de la claridad atmosférica (polvo, polución, humedad, etc) y de la elevación y ángulo solar (Allen, 1996). La radiación solar extraterrestre se calcula según la Ecuación 2.8 para una escala semihoraria.

## 3.2. Justificación y objetivos

Debido a que el principal objetivo a la hora de buscar el emplazamiento para las estaciones fue el de dar cobertura a gran parte de las zonas regables de Andalucía, se ha comprobado que algunos riegos por aspersión generan registros pluviométricos que no corresponden a lluvia. Es el caso de los pluviómetros instalados en las dos estaciones situadas en la finca “Alameda del Obispo” del Centro IFAPA de Córdoba. Una de las estaciones pertenece al IFAPA y la otra está incluida en la RIAA, y es en esta última donde se depuran estos registros erróneos de precipitación eliminándolos de la base de datos diaria. Esto se hace de forma manual, sólo cuando el administrador del sistema es informado de los días y horas en las cuales se riega o se realiza algún tratamiento en dicha parcela.

Cuando en cualquier disciplina científica se quiere conocer la verosimilitud o veracidad de los resultados de un análisis, se conoce como falso positivo a aquel resultado que, siendo erróneo, es marcado como cierto durante el ensayo o prueba. En el presente trabajo se denominará falso positivo a los registros de precipitación semihoraria que no provienen del agua de lluvia. Si estos falsos positivos no son detectados y corregidos cada día, serán introducidos en el balance de agua en el suelo y afectarán por tanto a la programación de riegos.

Los objetivos específicos de este capítulo son:



- Estudiar la relación existente entre la precipitación y los fenómenos de nubosidad y atenuación de la radiación solar a través del coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ), que es el cociente entre la radiación solar medida y la radiación solar extraterrestre.
- Detectar los falsos positivos de precipitación semihoraria registrados en el pluviómetro de la estación de la RIAA. Identificación y depuración de los mismos.
- Establecer los umbrales de este coeficiente  $K_T$  a partir de los cuales se puede dar un evento de lluvia real, caracterizando su variabilidad.
- Estudiar la relación entre  $K_T$  y el resto de variables climáticas durante el período de lluvia.
- Diseñar un procedimiento automatizado (test de validación) mediante el cual se puedan validar los registros semihorarios de precipitación, garantizando la calidad de los mismos.
- Aplicación del test de validación y cuantificación de errores en el cálculo de las necesidades de riego para las distintas estaciones que se han estudiado.

### **3.3. Datos analizados**

Los datos que se han analizado corresponden a las dos estaciones citadas anteriormente, concretamente del período 2001 a 2004. Los valores correspondientes a los meses de Enero hasta Agosto del año 2005 de la estación de la RIAA son los que han servido para evaluar los resultados del test de validación y comprobar así la eficacia de este nuevo mecanismo de control de calidad de los datos de precipitación generados.

Para evaluar este test en diferentes zonas, se ha aplicado a dos estaciones más, pertenecientes también a la RIAA: la estación de El Carpio (Córdoba) y la estación de Basurta-Jerez de la Frontera (Cádiz). En estas dos últimas estaciones los períodos analizados han sido de 3 años, del 2002 al 2004, ambos inclusive.

### 3.4. Metodología

El ensayo consiste en aislar y analizar los registros pluviométricos que son realmente ciertos y no son debidos al agua de riego u otras causas. Así pues, se han escogido las dos estaciones meteorológicas automáticas situadas en la parcela lisimétrica del Centro IFAPA “Alameda del Obispo” en Córdoba separadas escasamente a 80 metros, una perteneciente al Centro y otra a la RIAA. La estación del Centro sirve de estación de referencia y sus características en cuanto al sensor que mide la precipitación (pluviómetro ARG100) son idénticas a la estación del RIAA (tipo de sensor, frecuencia de muestreo, mantenimiento, etc.).

Los datos de pluviometría real se han aislado verificando que ambos pluviómetros, estando tan próximos, deben marcar los mismos registros de lluvia. La situación de las dos estaciones meteorológicas se puede apreciar en la Figura 13.

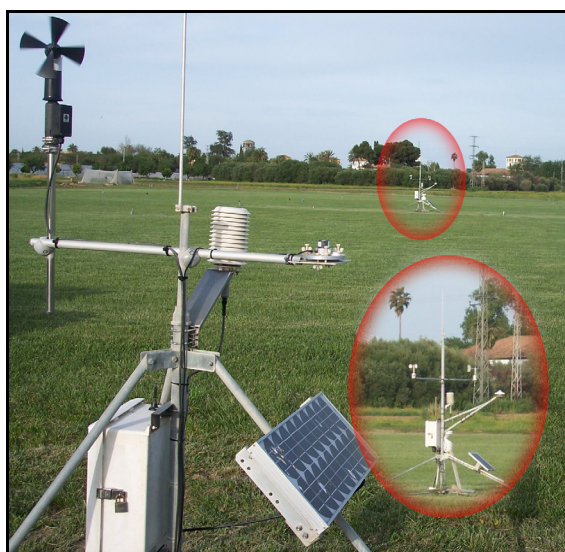


Figura 13. Finca del Centro “Alameda del Obispo” de Córdoba donde están situadas las dos estaciones meteorológicas

En primer lugar se ha procedido a la validación de estos datos de precipitación mediante el libro de incidencias en el cual se recogen las horas y los días en los que se riega, se siega o se realizan tratamientos fitosanitarios en esta parcela de ensayo.

Se ha definido un evento de lluvia diurno (evento húmedo diurno) como el total de la precipitación semihoraria registrada ininterrumpidamente entre el orto y el ocaso de cada día del año, siendo la semihora anterior y posterior a cada evento de  $P_{30\text{min}}=0$  mm. Los registros semihorarios aislados iguales a 0,2 mm (valor mínimo registrable en el pluviómetro) no se han tenido en cuenta, ya que en la mayor parte de los modelos de radiación, precipitación, temperatura, etc. un día lluvioso se considera cuando el volumen de agua es superior a 0,2 mm (Thornton y Running, 1999; Podestá, 2004). Se han separado los registros de precipitación en dos conjuntos, uno con los eventos de precipitación nocturnos y los valores aislados de 0,2 mm y el otro con los citados eventos diurnos húmedos, los cuales han sido objeto de estudio en el presente trabajo.

Como ya se ha comentado, actualmente la base de datos meteorológica es supervisada por un administrador que diariamente chequea remotamente si ha existido alguna alerta en alguna de las estaciones de la RIAA. Básicamente estas alertas corresponden a niveles de batería bajos o mínimos, problemas de conexión para la incorporación de datos, etc. En esta fase, los datos de precipitación diarios correspondientes a riegos de la parcela durante el día anterior son eliminados de la base de datos diaria. Este proceso se realiza manualmente gracias a que el personal que está trabajando en esta parcela de ensayo del Centro IFAPA de Córdoba informa al administrador de cuándo se ha producido un riego o algún tratamiento o labor, ya que éstos también pueden provocar que el pluviómetro marque algún pulso. Esto mismo ocurre también en otras parcelas donde están situadas las estaciones.

### **3.4.1. Caracterización de eventos**

El objetivo es caracterizar tanto los eventos diurnos húmedos que realmente corresponden a lluvia real, como aquellos que se han registrado en días en los que ha habido riego y que, por tanto, pueden corresponder a falsos positivos. Para ello, se analizan los valores de las principales variables promediadas durante el período en el que se registra la precipitación, y se comparan con los valores típicos de las mismas, bajo condiciones de cielo despejado y en presencia de nubes.

La razón de utilizar los valores promedio es, por una parte, la gran variabilidad de la velocidad en la formación de las nubes y de las intensidades de lluvia en la zona de estudio y, por otra, la sensibilidad o capacidad de respuesta de los sensores, lo que hace difícil establecer unas 'pautas de comportamiento' de las variables, en particular de sus gradientes temporales, antes, durante y después del evento.

Se espera obtener buenos resultados en la detección de falsos positivos de lluvia evaluando el coeficiente de transmitancia atmosférica y alguna variable más (humedad relativa, por ejemplo), debido a que los riegos habitualmente se dan de día y cuando existe cielo despejado o al menos cuando no hay indicios subjetivos de producirse lluvia.

### 3.4.2. Depuración manual de la base de datos diaria

A continuación, se muestran en la Figura 14 los resultados obtenidos tras calcular los promedios de  $K_T$  para cada evento diurno húmedo en dos de los cuatro años de estudio. Los eventos clasificados como “RIEGO” han sido identificados mediante la comprobación con el libro de incidencias de campo y comprobando la estación de referencia del IFAPA. Estos registros de precipitación deberían haber sido eliminados de la base de datos diaria, lo que demuestra la necesidad de automatizar este mecanismo de control de calidad en los datos de precipitación.

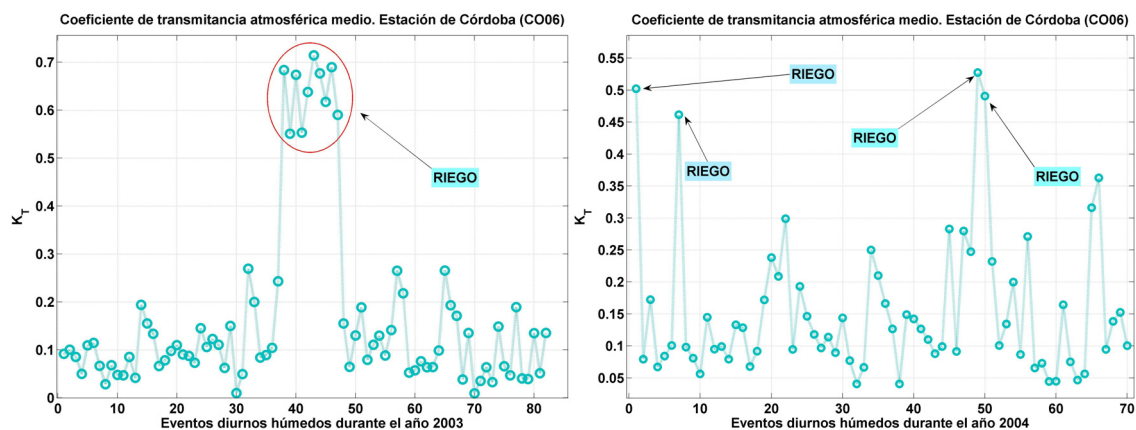


Figura 14. Falsos positivos registrados en los años 2003 (a) y 2004 (b) en la estación de la RIAA de Córdoba

De esta manera se ha depurado la base de datos diaria eliminando los valores de precipitación que corresponden a estos riegos. En vista de los resultados, se puede apreciar que los riegos se han dado bajo unas condiciones de elevada claridad atmosférica, con un  $K_T$  mayor de 0,4 en todos los casos. Los resultados obtenidos después de detectar los eventos diurnos húmedos correspondientes a riegos efectuados en la estación de la RIAA se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Riegos efectuados y falsos positivos detectados y depurados manualmente de la base de datos diaria (estación de la RIAA- Córdoba)

	Nº días (2001)	Nº días (2002)	Nº días (2003)	Nº días (2004)	Nº total de días
Riegos efectuados (libro de incidencias)	3	19	29	27	90
Falsos positivos depurados manualmente	2	7	8	4	21

### 3.4.3. Análisis de los datos

#### Eventos diurnos húmedos correspondientes a lluvia

Se ha estudiado el comportamiento de la radiación solar, la precipitación y la humedad relativa en dos días de lluvia, uno en el mes de Agosto y otro en Enero. Los ejemplos se muestran en las Figuras 15a y b, respectivamente. Ambos días se han comprobado con el libro de incidencias de campo y con la estación de referencia del Centro IFAPA de Córdoba y, efectivamente, no hubo riego, sino lluvia real.

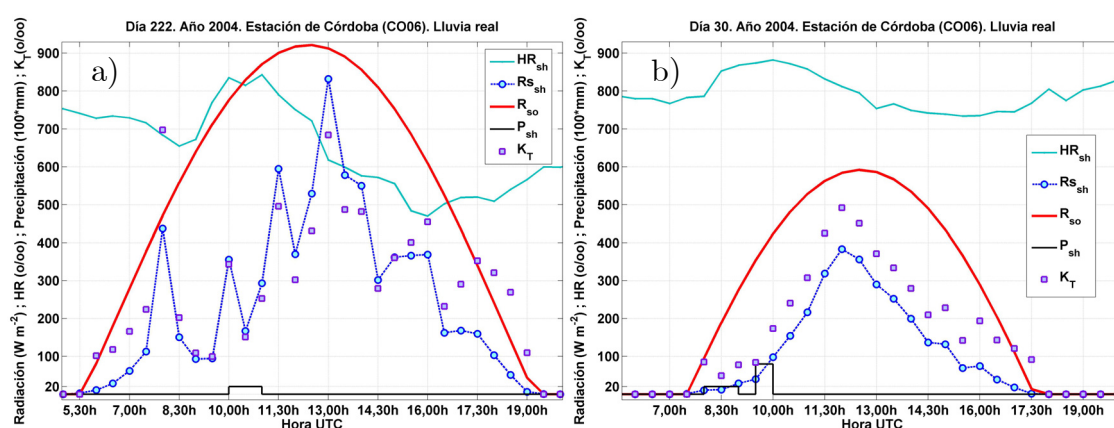


Figura 15. Datos semihorarios de precipitación ( $P_{sh}$ ), humedad relativa ( $HR_{sh}$ ), radiación solar medida ( $R_{sh}$ ), radiación solar teórica en cielo despejado ( $R_{so}$ ) y coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ) registrados en la estación de Córdoba (RIAA) los días 9 de Agosto de 2004 (día 222) (a) y 30 de Enero de 2004 (día 30) (b).

Se puede observar en la Figura 15 un descenso en los valores de radiación solar medida antes y durante el evento de lluvia, como consecuencia de la formación de nubes. Esta atenuación de la radiación solar provoca valores del coeficiente de transmitancia atmosférica bajos, en torno a 0.1 antes de registrarse la precipitación y por debajo de 0,35 en el período en el que se registran los valores de precipitación (Figura 15a). Para el día 30 de Enero (Figura 15b) los valores de  $K_T$  fueron aún más bajos, durante el periodo en que

se registró precipitación los valores de este coeficiente no fueron superiores a 0.1. Así mismo, se puede apreciar para el día 9 de Agosto (Figura 15a) un aumento de la humedad relativa durante ese mismo período, superando el 80% en las primeras horas del día. Teniendo en cuenta que se trata de Agosto, que es un mes cálido y seco en Córdoba, se observa que la lluvia afectó a la variable humedad relativa. Posteriormente al evento de lluvia, se aprecia que la humedad relativa descendió debido al aumento de radiación solar y, por tanto, de la temperatura, siguiendo su patrón habitual en esa época (desciende durante el día a medida que la radiación va provocando un ascenso en la temperatura y aumenta durante el período nocturno). Para el día 30 de Enero (Figura 15b) se observa que la humedad relativa también aumentó durante el evento de lluvia hasta un 88%, siguiendo posteriormente su curso habitual diario, que para Invierno es una V abierta mucho menos pronunciada. Hay que tener en cuenta que debido a la influencia de la velocidad del proceso de formación de nubes y de la intensidad de lluvia, la respuesta de los sensores (pluviómetro, piranómetro y sonda de humedad) puede estar más o menos desfasada en el tiempo.

### Eventos diurnos húmedos correspondientes a riegos

En la Figura 16 se muestran los registros semihorarios de precipitación, humedad relativa y radiación solar medidos en dos días típicos en los que se ha regado, uno en el mes de Agosto y otro en Septiembre. Se han registrado valores de precipitación, y se ha comprobado en la estación de referencia (estación del IFAPA) y con el libro de incidencias que realmente corresponden a riegos efectuados en la parcela de ensayo.

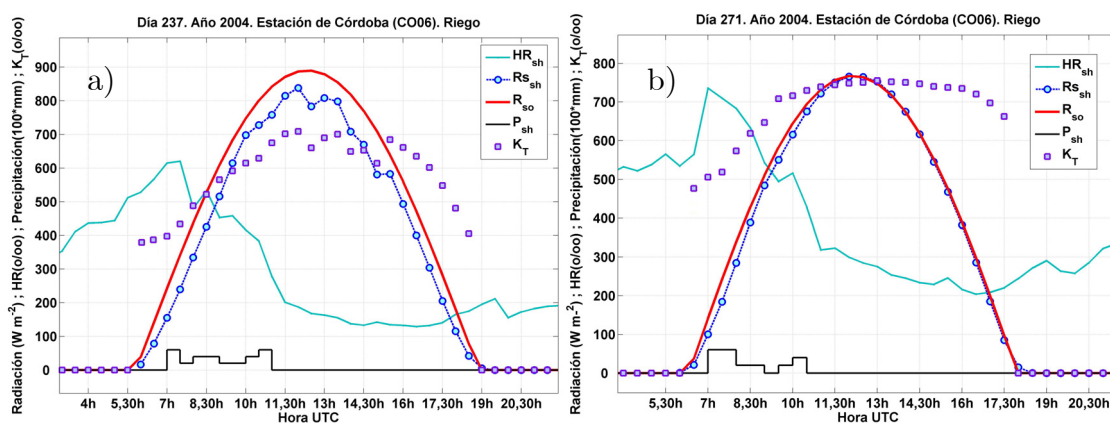


Figura 16. Datos semihorarios de precipitación ( $P_{sh}$ ), humedad relativa ( $HR_{sh}$ ), radiación solar medida ( $RS_{sh}$ ), radiación solar teórica en cielo despejado ( $R_{so}$ ) y coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ) registrados en la estación de Córdoba (RIAA) los días 24 de Agosto de 2004 (día 237) (a) y el 21 de Septiembre de 2004 (día 271) (b).

En ambos casos se observa que la radiación solar siguió su curso ascendente desde el amanecer y, por tanto, el coeficiente de transmitancia atmosférica fue tomando valores más elevados, hasta superar los valor de 0.5 (Figura 16a) y de 0,6 (Figura 16b) a las 8,30h UTC. Posteriormente siguió aumentando a la vez que se registraron semihoras de lluvia, tomando valores mayores de 0,6 para el día 237 (Figura 16a) y de 0,7 para el día 271 (Figura 16b), lo que indica claramente la existencia de un fenómeno meteorológico inconsistente, ya que debería haber existido una atenuación de la radiación solar al formarse la nubosidad, y por tanto un coeficiente de transmitancia atmosférica más bajo cuando se produjo la lluvia.

Se aprecia también que el agua procedente del riego no es capaz de elevar la humedad relativa de la misma manera que lo hace una lluvia real, ya que el régimen climático diario no se vió afectado. Tan sólo se produjo un pequeño ascenso de la humedad relativa a las 7,00h UTC, cuando se aprecia que la sonda detectó un aumento leve de humedad debido al riego (más acusado en el día 21 de Septiembre – Figura 16b), pero rápidamente empezó a descender debido al aumento de la temperatura a medida que la radiación solar comenzó a calentar el ambiente al inicio del día. Se observa claramente que existiendo registros importantes de precipitación debida al riego, la humedad siguió su curso descendente hasta empezar suavemente a subir después del ocaso, cuando la temperatura descendió.

En la Figura 17 se puede observar el comportamiento de estas variables correspondientes al 22 de Septiembre (día siguiente) cuando no se ha regado y bajo condiciones de cielo despejado. El coeficiente  $K_T$  permaneció por encima de 0.5 prácticamente durante todo el período diurno, la humedad relativa siguió su curso habitual de un día cálido y seco (Septiembre) y la radiación solar medida fue prácticamente idéntica a la radiación solar teórica en condiciones de cielo despejado.

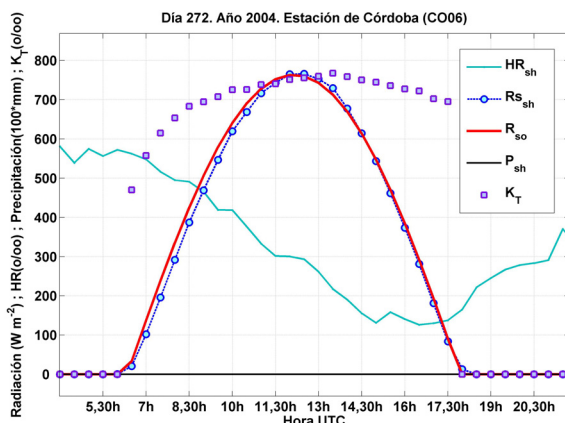


Figura 17. Datos semihorarios de precipitación ( $P_{sh}$ ), humedad relativa ( $HR_{sh}$ ), radiación solar medida ( $RS_{sh}$ ), radiación solar teórica en cielo despejado ( $R_{so}$ ) y coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ) registrados en la estación de Córdoba (RIAA) el 22 de Septiembre de 2004 (día 272).

### 3.4.4. Correlación entre variables

Una vez depurados los datos, se han obtenido los promedios de todas las variables meteorológicas durante los eventos diurnos húmedos con el objetivo de caracterizar la lluvia real frente al coeficiente  $K_T$ , observando si existe otro parámetro que permita identificar al mismo tiempo si un registro de precipitación corresponde a un riego o a una lluvia.

En la Figura 18a se puede observar que la temperatura oscila en un intervalo de  $7^{\circ}C$  a  $28^{\circ}C$ . Sin embargo, con la humedad relativa ocurre algo distinto, la mayoría de los eventos de lluvia se dan con valores mayores al 75-80%, sólo en muy pocos casos lo hacen por debajo de este valor. Existiendo un mínimo del 51% en el que sólo se da un evento, precisamente en el mes de Julio de 2004. Este evento corresponde a un día de verano en el que los procesos de formación de nubes y condensación de agua fueron muy rápidos. Este fenómeno y las altas temperaturas típicas del mes de Julio hicieron que los registros de humedad relativa no se vieran afectados por la lluvia.



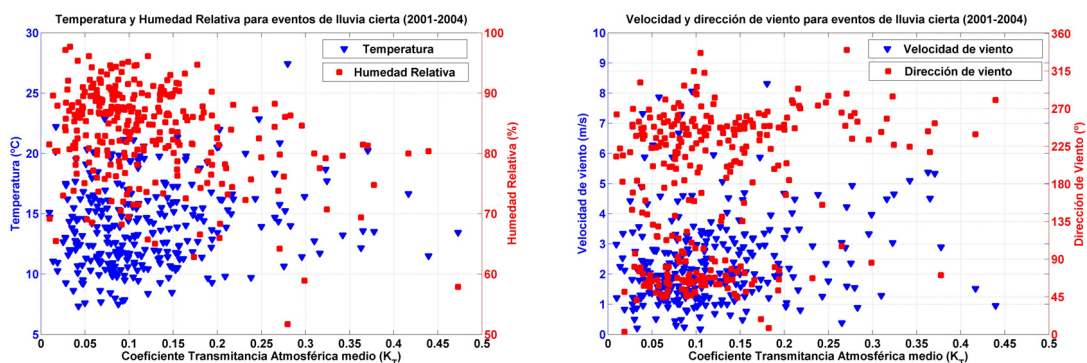


Figura 18. Valores promedio de Temperatura y Humedad Relativa (a) y Velocidad y Dirección de viento (b) durante los eventos diurnos de lluvia en función de los promedios de  $K_T$ . Período: 2001-2004

Por otro lado, en la Figura 18b se puede apreciar que la dirección y velocidad de viento se muestran como unos parámetros muy variables durante los eventos diurnos húmedos. Los valores medios de la velocidad de viento abarcan un rango de velocidades muy amplio y con direcciones de viento muy diferentes, lo cual hace difícil asociar a los eventos de lluvia algún patrón característico del régimen de vientos de la estación.

Finalmente, en la Figura 19 se observa que los eventos de mayor duración y volumen se dan cuando el cielo está más cubierto, con valores bajos de  $K_T$ , aunque debido a la gran variabilidad en la intensidad de lluvia a lo largo del año no existe una relación clara.

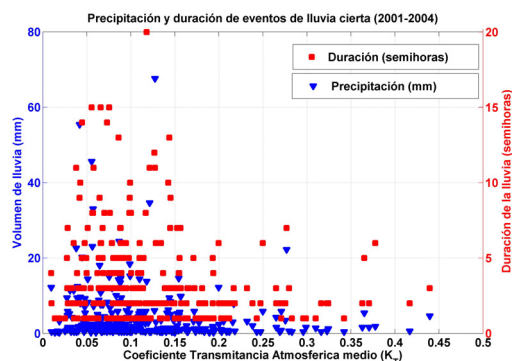


Figura 19. Volumen de agua y duración de los eventos de lluvia en función de los promedios de  $K_T$ . Período: 2001-2004

Por tanto, las dos variables que mejor pueden identificar y caracterizar un evento de lluvia son  $K_T$ , como indicador del grado de nubosidad y la humedad relativa, que toma normalmente valores altos debido al ambiente húmedo que genera la caída de lluvia. El parámetro clave para caracterizar un

evento diurno húmedo es el  $K_T$ , ya que es posible que un riego prolongado afecte muy directamente a la sonda de humedad y pueda provocar valores altos de humedad del aire.

### 3.4.5. Análisis estadístico de los datos

Se han estudiado las distribuciones que mejor se ajustan a los datos de las variables  $K_T$  y HR para los casos de lluvia cierta y para los eventos con riego. Las funciones de densidad de probabilidad durante los eventos de lluvia cierta se muestran en la Figura 20 para  $K_T$  y HR. Las distribuciones que mejor se ajustan a los datos observados son una distribución Lognormal para los valores de  $K_T$  (Figura 20a) y una distribución de Weibull para los valores de HR (Figura 20b).

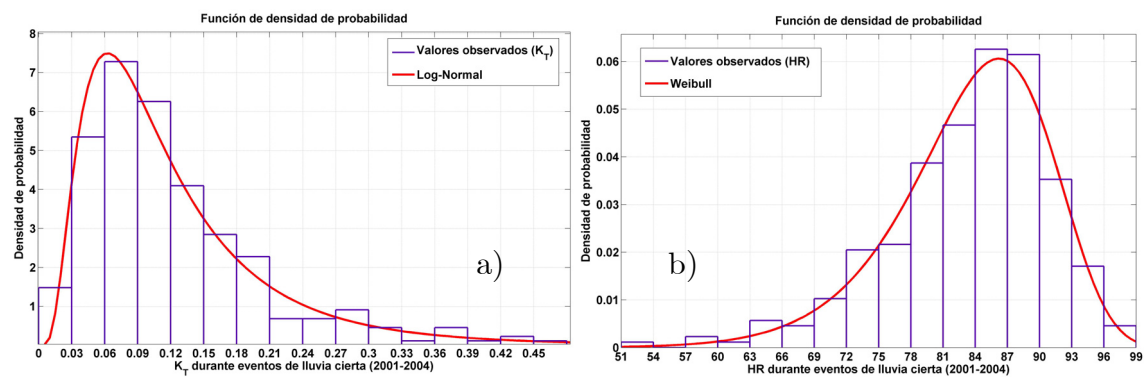


Figura 20. Funciones de densidad de probabilidad de  $K_T$  (a) y HR (b) y ajustes con las distribuciones LogNormal (a) y de Weibull (b), respectivamente. Eventos de lluvia cierta en el periodo 2001-2004.

En las Figuras 21a y b se muestran las funciones de densidad de probabilidad durante los eventos correspondientes a riegos para  $K_T$  y HR respectivamente. Las distribuciones que mejor se ajustan a los datos observados son una distribución de Weibull para los valores de  $K_T$  y una distribución Normal para los valores de HR.

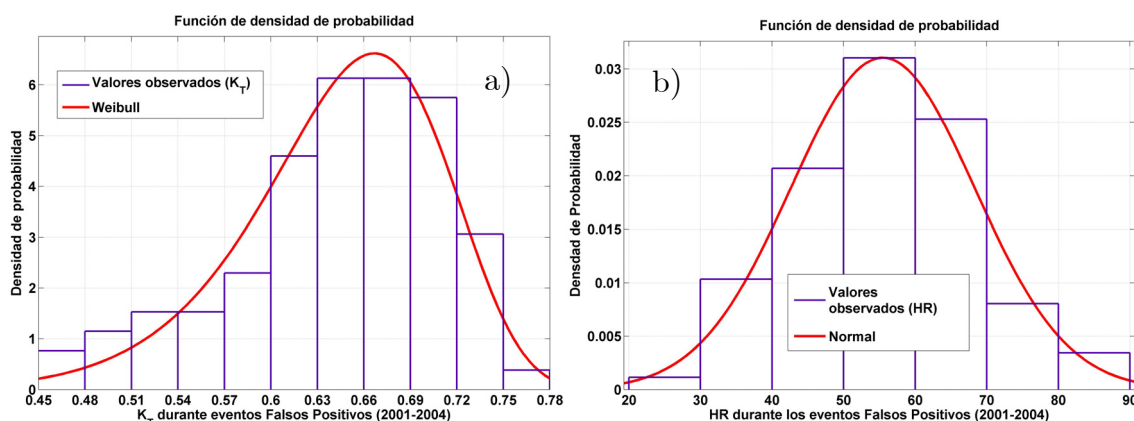


Figura 21. Funciones de densidad de probabilidad de  $K_T$  (a) y HR (b) y ajustes con las distribuciones de Weibull (a) y Normal (b), respectivamente. Eventos Falsos Positivos en el periodo 2001-2004.

La distribución Lognormal se usa habitualmente para representar variaciones en las propiedades de las nubes, y también se utiliza en muchas aplicaciones hidrológicas (Wilks, 1995. Cap. 4). Su función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (3.1)$$

donde  $\mu$  es la media y  $\sigma$  la desviación típica.

La distribución Weibull, cuya función de densidad de probabilidad viene dada por la Ecuación 3.2, se utiliza muy a menudo en las ciencias atmosféricas, para modelar, por ejemplo, las variaciones en la velocidad del viento y variaciones en la humedad relativa (Wilks, 1995. Cap. 4).

$$f(x) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (3.2)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros característicos de la distribución.

Finalmente, la distribución Normal, también denominada distribución gaussiana, tiene una función de densidad de probabilidad:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.3)$$

A partir de estas funciones de densidad de probabilidad se han obtenido las funciones de probabilidad acumulada para cada una de las variables citadas. Se representan en las Figuras 22a y b para los eventos de lluvia ciertos, y en las Figuras 23a y b para los eventos correspondientes a días en los que ha habido riegos.

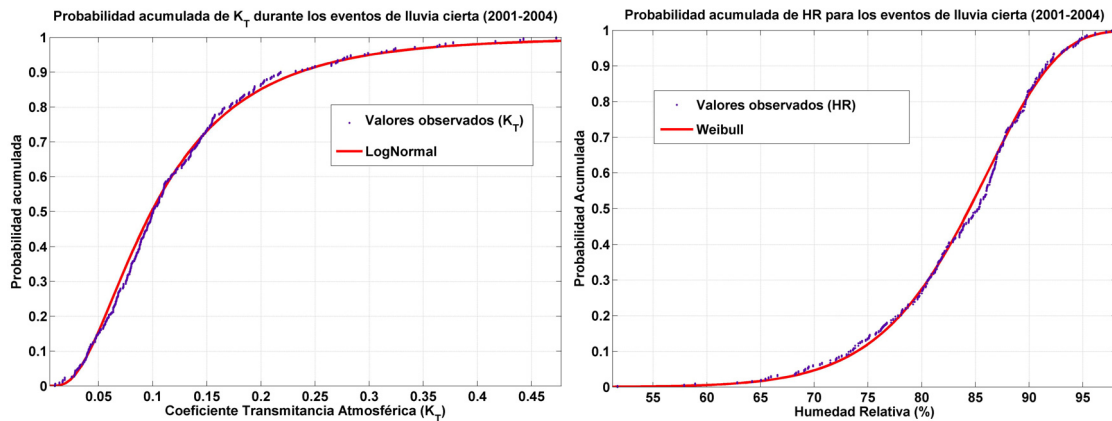


Figura 22. Funciones de probabilidad acumulada observada y esperada de  $K_T$  (a) y HR (b).

Para  $K_T$  y HR se ha utilizado una distribución LogNormal ajustada (a) y una distribución de Weibull ajustada (b), respectivamente. Eventos de lluvia cierta en el periodo 2001-2004.

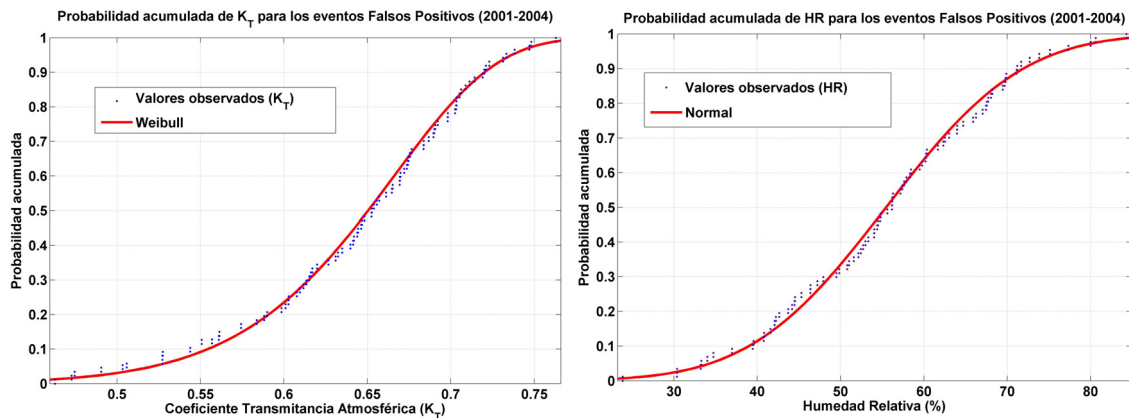


Figura 23. Funciones de probabilidad acumulada observada y esperada de  $K_T$  (a) y HR (b).

Para  $K_T$  y HR se ha utilizado una distribución de Weibull ajustada (a) y una distribución Normal ajustada (b), respectivamente. Eventos Falsos Postivos en el periodo 2001-2004.

La bondad de los ajustes se ha verificado mediante el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S), mediante el cual se puede conocer el grado de acuerdo entre la distribución de un conjunto de valores de una muestra aleatoria simple (valores observados) y alguna distribución teórica (Ardanuy y Martín, 1993. Cap.14). En esta prueba, la comparación se lleva a cabo a través de las distribuciones acumuladas esperada o teórica,  $F_0(x)$ , y observada,  $S_n(x)$ . Se establecen las siguientes hipótesis:

$H_0$ : La muestra obtenida proviene de una población con una distribución teórica específica  $F_0(x)$

$H_1$ : La muestra obtenida no proviene de una población con una distribución  $F_0(x)$ .

Se espera que la diferencia entre  $F_0(x)$  y  $S_n(x)$  sea pequeña y esté dentro de los límites de errores aleatorios. El test de Kolmogorov-Smirnov atiende a la mayor de las desviaciones:

$$D = \max |S_n(x) - F_0(x)| \quad (3.4)$$

D es el mayor valor absoluto de las n diferencias entre el histograma acumulado esperado o teórico y el observado.

Una vez conocido el estadístico de la distribución, se puede calcular el valor crítico C para diferentes niveles de significación. La forma de operar es la siguiente:

- Se acepta la hipótesis  $H_0$  si  $D \leq C$

Los resultados de esta prueba para los diferentes ajustes realizados se muestran en la Tabla 9. Los valores de C se han obtenido a partir de una tabla para un nivel de significación del 5% ( $\alpha=0.05$ ), obteniéndose por tanto un intervalo de confianza del 95%. (Benjamin y Cornell, 1970. Cap.4). Los resultados del test indican que los ajustes propuestos han sido adecuados para el nivel de significación elegido.

Tabla 9. Valores del estadístico D y del valor crítico C para un  $\alpha=0.05$ . Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov.

Variable	Tamaño muestral	$C_{95\%}$	D	Resultado test K-S
<b>Coef <math>K_T</math> (Lluvia cierta)</b>	293	0.0793	0.022	Se acepta $H_0$
<b>HR (Lluvia cierta)</b>	293	0.0793	0.061	Se acepta $H_0$
<b>Coef <math>K_T</math> (Riego)</b>	87	0.1423	0.043	Se acepta $H_0$
<b>HR (Riego)</b>	87	0.1423	0.041	Se acepta $H_0$

Después de este análisis, se han obtenido los cuantiles 0.05 y 0.01. En la Tabla 10 se muestran estos cuantiles y los valores máximos y mínimos observados durante los eventos diurnos húmedos, por un lado los correspondientes a lluvia cierta y por otro los correspondientes a riegos (falsos positivos).

Tabla 10. Valores máximos observados de  $K_T$  y HR y valores registrados para los distintos cuantiles durante los eventos húmedos diurnos.

	<b>p=0.05</b>	<b>p=0.01</b>	<b>Valor máximo observado</b>	<b>Valor mínimo observado</b>
<b>Coef. <math>K_T</math> (Lluvia cierta)</b>	0.35	0.43	0.44	0.01
<b>HR (Lluvia cierta)</b>	71.21 %	66.42 %	97.71 %	51.68 %
<b>Coef. <math>K_T</math> (Falsos positivos)</b>	0.50	0.47	0.76	0.46
<b>HR (Falsos positivos)</b>	75.42% 33.53%	81.11% 30.34 %	84.31 %	23.83 %

Se observa la existencia de un valor límite observado de  $K_T$  en torno a 0.44 por encima del cual nunca se han registrado eventos diurnos de lluvia cierta y un valor de HR del 51.68% por debajo del cual tampoco se ha registrado este tipo de evento. El 99% de estas precipitaciones se dan con un  $K_T$  medio inferior a 0,43 y un valor medio de HR superior al 66%. Para el caso de los días de riego, el análisis muestra que el 99% de estos eventos se dan con un  $K_T$  superior a 0,47 y con una HR entre el 30.34% y el 81.11%. Ya se ha visto anteriormente que la HR en los eventos de riego se distribuye normalmente, esto demuestra que esta variable puede tomar valores muy diferentes cuando se riega, ya que dependerá de la cantidad de agua aplicada, de la HR ambiental en esa época y de que el protector de la sonda de humedad y temperatura se moje en mayor o menor medida.

Para los eventos diurnos de lluvia cierta se ha analizado también la variación de HR y  $K_T$  a lo largo del año. En la Figura 24 se representan los valores medios de HR y  $K_T$  para los diferentes meses del año. Se puede apreciar como en los meses de Mayo a Septiembre (en las que se concentra la campaña de riegos), los eventos de lluvia tienden a darse bajo condiciones de menor humedad relativa y mayor coeficiente de transmitancia atmosférica, lo cual parece lógico, ya que los días son más secos y con una alta radiación, aunque no se puede olvidar que esto son valores promedio de sólo cuatro años y que dependen mucho de la cantidad de eventos que se den en cada mes.

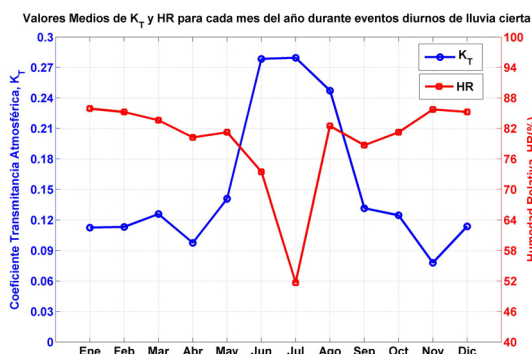


Figura 24. Valores promedio de  $K_T$  y HR para los diferentes meses del año durante los eventos diurnos de lluvia cierta.

## 3.5. Diseño del Test de validación

### 3.5.1. Introducción

Nuestro objetivo es diseñar un test sencillo, de fácil incorporación dentro de cualquier plataforma informática y que sea lo menos restrictivo posible, es decir, que detecte el máximo número de falsos positivos de forma automática pero que genere el mínimo de “alertas”. Se entienden por alertas aquellos eventos que son susceptibles de duda y deben ser revisados por el administrador manualmente. Este test asignará una probabilidad a cada evento, en base a unas regiones que se definirán posteriormente, determinando así la toma de decisión por parte del administrador del sistema para validar o no los registros de precipitación.

En los tests de rango dinámico definidos para el control de calidad de otras variables meteorológicas se suele emplear la siguiente expresión (Hubbard et al., 2005):

$$X \leq \bar{x} + f \cdot \sigma_x \quad (3.5)$$

$$X \geq \bar{x} - f \cdot \sigma_x \quad (3.6)$$

Donde  $X$  es la variable meteorológica,  $\bar{x}$  es el valor medio para un mes determinado de toda la serie,  $f$  es un factor que dependerá del rango de valores que se quiera dejar dentro o fuera de la validación y  $\sigma_x$  es la desviación típica de  $x$ .

Debido a que no existen suficientes eventos de lluvia a lo largo de los cuatro años de estudio para caracterizar los meses más secos, habría de considerar el año completo. De forma similar ocurre para los casos de eventos correspondientes a días de riego, sería necesaria una serie histórica mucho más larga para caracterizarlos de esta forma. El valor de  $f$  óptimo es aquel que permite dejar fuera el máximo número de valores erróneos y descartar el mínimo posible de valores ciertos. Habitualmente este factor toma el valor de 3, ya que si los datos se ajustan a una distribución normal, este rango recoge casi el total de la probabilidad.

En esta caso no se pretende realizar un test de rango al uso, ya que para discernir los valores de lluvia cierta de los falsos positivos debidos al riego, es necesario tener en cuenta los valores umbrales a partir de los cuales habitualmente se dan los eventos y también tener en cuenta el histórico de los valores máximos o mínimos observados. Por estas razones no se ha utilizado esta metodología en el presente estudio, sin embargo, se cree conveniente cuando se tenga un volumen de datos considerable estimar el  $f$  óptimo para diferentes situaciones.

### 3.5.2. Valores umbrales de $K_T$ y HR

Los valores umbrales escogidos para definir las regiones de probabilidad de los eventos han sido los correspondientes a un intervalo de confianza del 95% (cuantiles de  $p=0.05$ ) que se exponen en la Tabla 11. Si además se aplica una corrección a cada uno de estos límites debida a la incertidumbre en la medida de cada sensor (Campbell Scientific Ltd., 1999; Skye Instruments Ltd., 1995), se obtienen los valores que se muestran en la Tabla 11, aplicándose para el caso más desfavorable.

Tabla 11. Valor umbral máximo de  $K_T$  y mínimo de HR ( $p=0.05$ ) corregidos con la incertidumbre de cada sensor para los eventos de lluvia cierta

Sensor	Incertidumbre	Valor umbral máximo + incertidumbre	Valor umbral mínimo - incertidumbre
Piranómetro Skye ( $K_T$ )	+/- 3%	0.3626	
Sonda $T^a$ y HR Vaisala (HR %)	+/- 2% ( $T^a=20^\circ\text{C}$ )		60.40%

Como se ha visto anteriormente se han registrado en la estación de la RIAA de Córdoba, durante eventos de lluvia cierta, valores más bajos de HR y valores más altos de  $K_T$  que estos valores umbrales. Se ha llegado hasta un mínimo del 51.68% para la humedad relativa y un máximo de 0.4393 para  $K_T$



(Tabla 10). En la Tabla 12 se muestran estos valores después de aplicar para el caso más desfavorable la incertidumbre para cada sensor.

Tabla 12. Valor umbral máximo de  $K_T$  y mínimo de HR observados y corregidos con la incertidumbre de cada sensor para los eventos de lluvia cierta.

Sensor	Incertidumbre	Valor máximo medido + incertidumbre	Valor mínimo medido - incertidumbre
Piranómetro Skye ( $K_T$ )	+/- 3%	0.4524	
Sonda $T^a$ y HR Vaisala (HR %)	+/- 2% ( $T^a=20^\circ\text{C}$ )		50.60%

Para el caso de los eventos ocurridos en días de riego se han utilizado también los cuantiles correspondientes a un intervalo de confianza del 95%. Los valores corregidos con la incertidumbre en la medida de cada sensor se muestran en la Tabla 13. En este caso, para quedarse del lado de la seguridad, se ha aplicado la corrección más desfavorable.

Tabla 13. Valor umbral máximo de  $K_T$  y mínimo de HR ( $p=0.05$ ) corregidos con la incertidumbre de cada sensor para los eventos en días de riego

Sensor	Incertidumbre	Valor umbral mínimo - incertidumbre	Valor umbral máximo + incertidumbre
Piranómetro Skye ( $K_T$ )	+/- 3%	0.4901	
Sonda $T^a$ y HR Vaisala (HR %)	+/- 2% ( $T^a=20^\circ\text{C}$ )	32.83%	76.91%

En la Tabla 14 se muestran los valores máximos y mínimos observados durante eventos de riego, una vez que se ha aplicado la corrección por la incertidumbre de cada sensor.

Tabla 14. Valores máximos y mínimos de  $K_T$  y HR observados y corregidos con la incertidumbre de cada sensor para los eventos en días de riego

Sensor	Incertidumbre	Valor mínimo medido - incertidumbre	Valor máximo medido + incertidumbre
Piranómetro Skye ( $K_T$ )	+/- 3%	0.4604	
Sonda $T^a$ y HR Vaisala (HR %)	+/- 2% ( $T^a=20^\circ\text{C}$ )	23.35%	85.91%

### 3.5.3. Distribución conjunta de las variables.

Se han calculado las funciones de densidad conjunta de las variables HR y  $K_T$ , para las dos posibilidades consideradas: eventos ciertos de lluvia,  $f_c(HR, K_T)$  y eventos en días en los que ha habido riego,  $f_f(HR, K_T)$ . El primer caso se muestra en la Figura 25a  $f_c(HR, K_T)$  y en la Figura 25b se representa

gráficamente la función de distribución  $F_c(HR, K_T)$  calculada como la probabilidad de que durante el evento registrado los valores promedios  $(\overline{HR}, \overline{K_T})$  se encuentren en sector  $(0, HR) \times (0, K_T)$ :

$$F_c(HR, K_T) = \Pr(\overline{HR} \leq HR, \overline{K_T} \leq K_T) = \int_0^{K_T} \int_0^{HR} f_c(HR, K_T) dHR dK_T \quad (3.7)$$

Puede observarse en la Figura 25a que la mayor parte de las lluvias se dan bajo unas condiciones de  $K_T$  bajas (inferior a los límites establecidos). En cuanto a la humedad relativa, los valores son altos, superiores en la mayoría de los casos al umbral definido. En la Figura 25b se puede apreciar como se distribuye la probabilidad de que un evento de lluvia sea cierto en función de las variables  $HR$  y  $K_T$ .

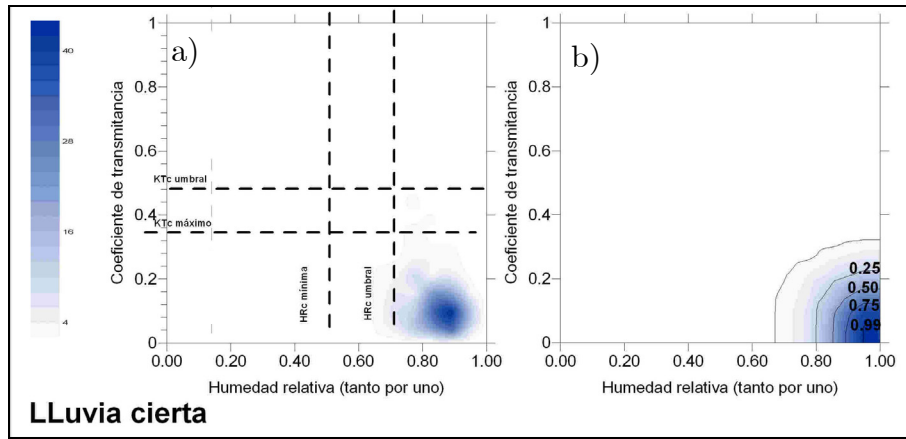


Figura 25. Funciones de densidad conjunta (a) y de distribución conjunta (b) para las variables  $HR$  (tanto por uno) y  $K_T$  (tanto por uno) durante los eventos de lluvia cierta.

En el segundo caso, que corresponde a los eventos de riego, se representa la función de distribución  $F_f(HR, K_T)$  calculada como la probabilidad de que durante el evento registrado los valores promedios  $(\overline{HR}, \overline{K_T})$  se encuentren en sector  $(0, HR) \times (K_T, 1)$ :

$$F_f(HR, K_T) = \Pr(\overline{HR} \leq HR, K_T \leq \overline{K_T}) = \int_{K_T}^1 \int_0^{HR} f_f(HR, K_T) dHR dK_T \quad (3.8)$$

Se puede observar en la Figura 26a como la gran mayoría de los eventos registrados en días de riego se dan dentro de los límites establecidos como umbrales. En la Figura 26b se muestra la distribución de probabilidad de que un evento diurno húmedo sea un falso positivo a partir de los valores promedio de  $HR$  y  $K_T$ .

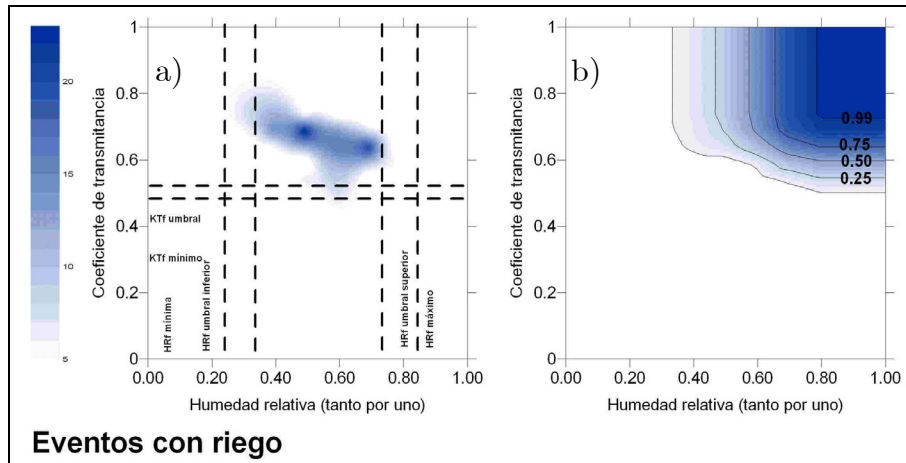


Figura 26. Función de densidad conjunta(a) y función de distribución conjunta (b) para las variables HR (tanto por uno) y  $K_T$  durante los eventos con riego.

En base a las Figuras 25 y 26, y para ser tenidas en cuenta dentro del test de validación, pueden ser consideraradas varias regiones para los diferentes casos, tal y como se representa en la Figura 26.

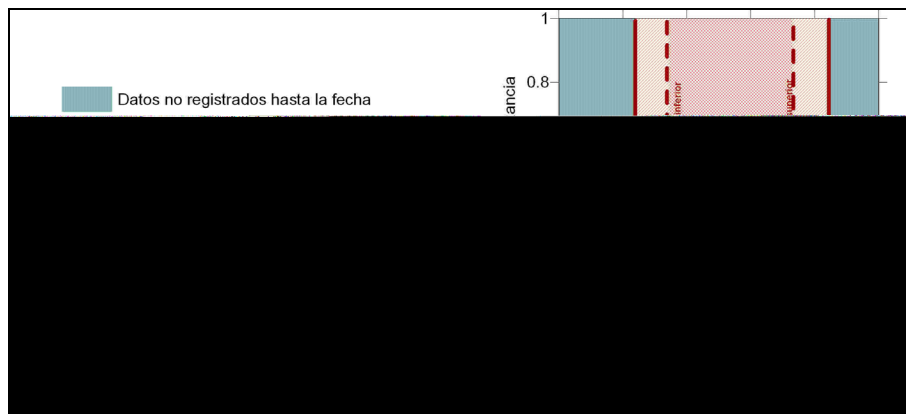


Figura 27. Regiones definidas para el test de validación

Estas regiones están definidas en base al análisis estadístico realizado. Sin embargo, y aunque no se hayan registrado nunca eventos de riego con una HR inferior al 23,83% y con un  $K_T$  por encima de los umbrales establecidos, serán condiciones con alta probabilidad de riego o al menos, con muy poca probabilidad de lluvia. De manera que los 2 límites inferiores de HR para situaciones de riego no serán tenidos en cuenta en el test.

Una vez que se aplique el test de validación y cuando los registros se sitúen entre los valores umbrales y los valores máximos y mínimos medidos, el sistema generará una alerta, debiendo chequear manualmente dichos eventos

para determinar su validez. Si fuesen “ciertos” y a la vez mayores que algún valor extremo medido con anterioridad en esa estación, se incorporarán al sistema como un nuevo máximo ( $K_T$ ) o un nuevo mínimo (HR) medidos. El sistema generará también una alerta si se detecta un evento diurno húmedo cuyos valores de HR y  $K_T$  sean incoherentes, por ejemplo, un coeficiente  $K_T$  por debajo del umbral y una humedad relativa baja, también por debajo de su valor mínimo registrado. Cuando ocurre una inconsistencia de este tipo entre parámetros, en este caso radiación y humedad relativa, es muy importante que se revisen los sensores ya que pueden estar descalibrados, sucios, etc. Hay que tener en cuenta que el parámetro principal en función del cual se tomará la decisión de determinar la validez o no de los datos de precipitación es el coeficiente de transmitancia atmosférica, la humedad relativa es una variable auxiliar que conllevará en determinados intervalos a que el sistema genere o no una alerta.

#### **3.5.4. Diagrama de flujo**

Un diagrama de flujo es la representación gráfica de un conjunto de algoritmos y es de gran utilidad para la programación de cualquier test, aplicación, procedimiento, etc. en un sistema informático. De forma que a partir de él puede ser codificado, en este caso el test de validación, en cualquier lenguaje.

En la Figura 28 se muestra el diagrama de flujo de este nuevo test, siguiendo la metodología recomendada por Joyanes (1997).

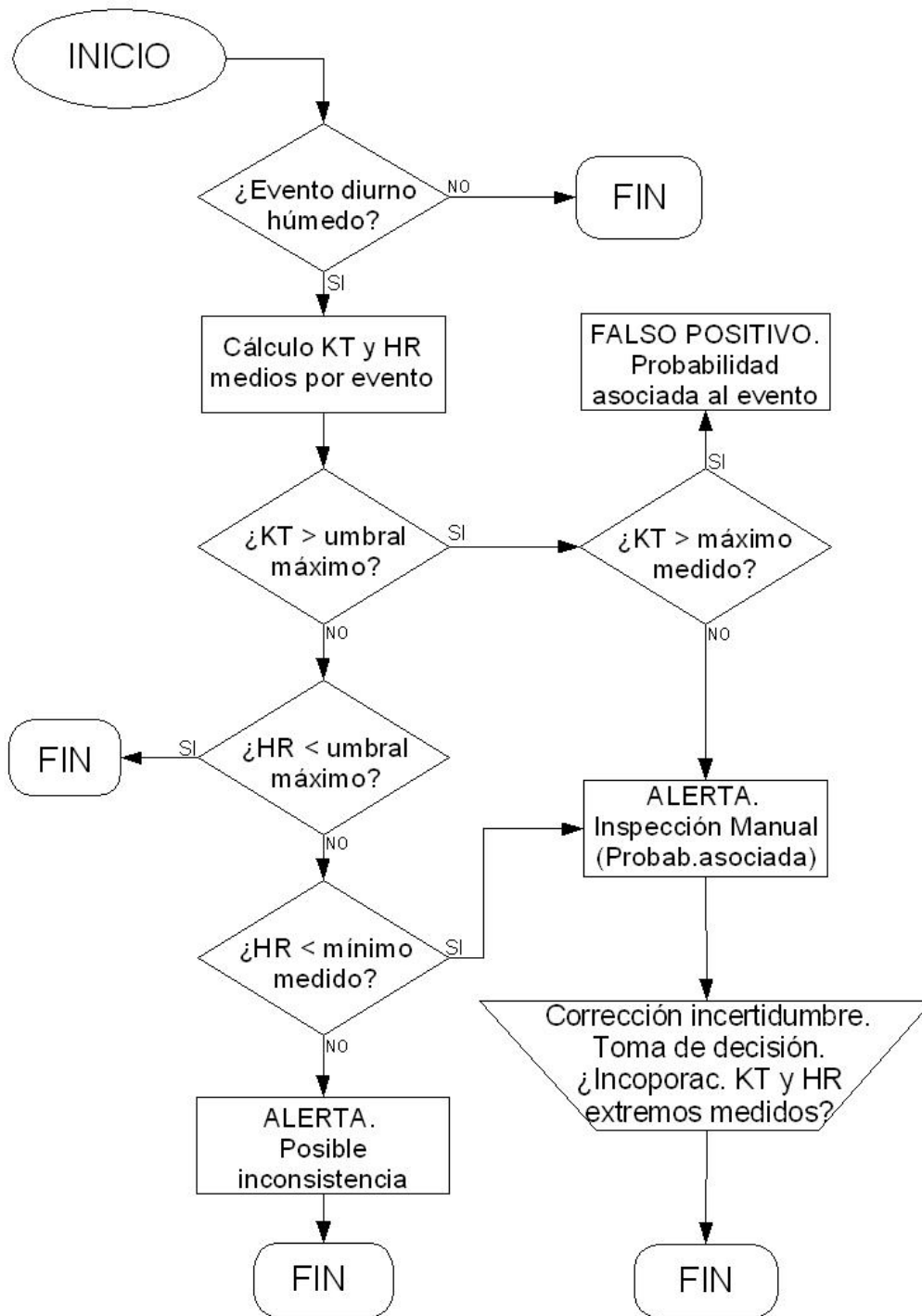


Figura 28. Diagrama de flujo del nuevo test de validación de datos de precipitación semihorarios

## 3.6. Resultados y Discusión

Este nuevo test se ha aplicado en varias estaciones para comprobar así la validez del mismo para diferentes condiciones climáticas. Hay que tener en cuenta que siempre se tendrá un grado de incertidumbre a la hora de afirmar si se ha detectado un falso positivo o no, ya que en algunas estaciones será muy difícil controlar, mediante el personal de las parcelas cercanas a la estación, si se ha efectuado algún riego o no.

Se han seleccionado dos estaciones de la RIAA para aplicar el test de precipitación. La primera situada en el valle del Guadalquivir, la estación de El Carpio (Córdoba), y la segunda, con carácter más costero en Jerez de la Frontera (Cádiz). Se trata de verificar que los valores umbrales establecidos en los apartados anteriores son válidos para estaciones cuyas condiciones meteorológicas son diferentes a las de la estación para la cual se definieron dichos umbrales. También se ha aplicado el test a los registros comprendidos entre Enero y Agosto del año 2005 de la estación de Córdoba. Por otro lado, se han comprobado las alertas generadas en cada estación mediante inspección manual para determinar si los eventos corresponden realmente a falsos positivos o si, por el contrario, son eventos reales de lluvia.

### 3.6.1. Aplicación del test de validación a la estación de la RIAA de Córdoba

Se ha aplicado este nuevo test a datos de precipitación del año 2005, donde se conoce con seguridad que se han efectuado riegos, ya que éstos han sido registrados en el libro de incidencias. De esta forma se ha podido conocer el grado de fiabilidad de los límites y regiones establecidas para validar los registros pluviométricos semihorarios.

En la Figura 29 se observa la distribución de los eventos en función de los límites establecidos en el test. Estos límites representados son los correspondientes a las distintas regiones anteriormente establecidas. Los falsos positivos detectados automáticamente tras la aplicación del test se encuentran situados a la derecha de los límites de  $K_T$  (región verde más oscura). Se observa que todos los eventos con bajo  $K_T$  y una alta HR se sitúan dentro de la zona azul, que es la zona donde es probable que la lluvia sea cierta. La zona azul más oscura es la región de mayor probabilidad, y la zona azul más clara recoge

condiciones de lluvia que se han observado alguna vez, pero que son poco habituales. A continuación se muestra en la Tabla 15 los resultados obtenidos tras aplicar este nuevo test.

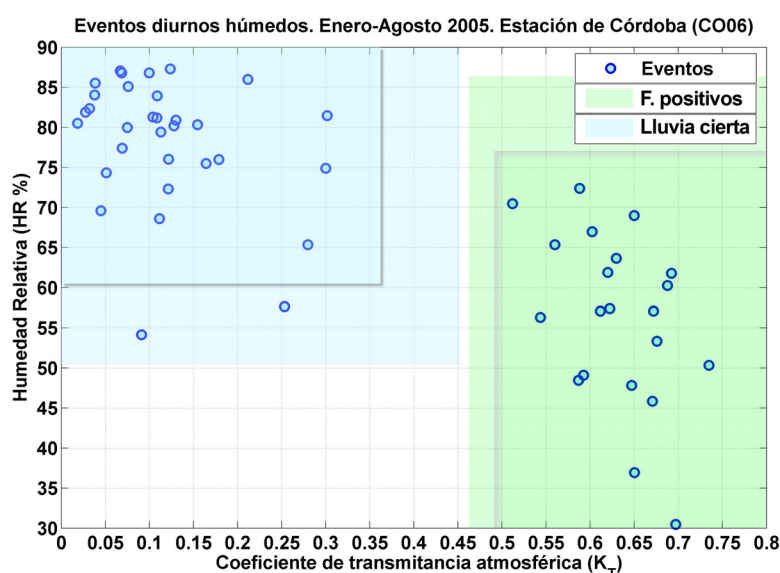


Figura 29. Representación de los eventos diurnos húmedos para la estación de Córdoba (RIAA). Enero-Agosto 2005

Como se puede apreciar, el número de alertas es bastante bajo, solamente 2, las cuales corresponden a valores de humedad del 57,66% y del 54,14% pero con un coeficiente de transmitancia atmosférica bastante bajo. Tras la inspección manual y comprobación con el libro de incidencias se ha comprobado que eran eventos de lluvia cierta. Aplicando la corrección por la incertidumbre del sensor de +/- 2% a 20°C (17,31 °C y 17,6 °C respectivamente) no se muestran ninguno de los dos eventos como nuevos mínimos registrados.

Tabla 15. Resultados del test de validación de datos de precipitación diurnos semihorarios. Estación de la RIAA (Córdoba)

Resultados TEST validación precipitación		
Nº de Eventos húmedos diurnos	53	
Nº de Falsos Positivos	20	Riego (libro incidencias)
Nº Alertas	2	Lluvia (inspección manual)
Nº eventos reales de lluvia	31	Lluvia (estación Centro IFAPA)
Volumen (mm) Falsos positivos	<b>20.8</b>	

Los errores cometidos en el cálculo de las necesidades de riego para este período de tiempo son de 20,8 mm. Este volumen de agua ha sido considerado como lluvia y por tanto, se ha introducido en el balance de agua en el suelo,

afectando por tanto a la programación de riegos de las parcelas cercanas que no han sido regadas.

### 3.6.2. Aplicación del test de validación a la estación de El Carpio (Córdoba)

La estación meteorológica de El Carpio pertenece a la RIAA y sus coordenadas geográficas son: latitud 37° 54' 54" N y longitud 4°30' 09" W. La estación está situada a 165 metros de altitud. Los datos analizados corresponden a los años 2002, 2003 y 2004. Se conoce por la experiencia que es una estación susceptible de recibir agua proveniente de riego, pero no se tiene información sobre la fecha exacta en que se realiza de forma tan controlada como en la estación de la RIAA situada en el centro IFAPA de Córdoba. Tras la aplicación del test de validación, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados del test de validación de datos de precipitación diurnos semihorarios. Estación del El Carpio (Córdoba)

<b>Resultados TEST validación precipitación</b>		
N° eventos diurnos húmedos	246	
N° de falsos positivos	5	
N° de alertas	3	Lluvia (inspección manual)
N° eventos reales de lluvia	238	
Volumen (mm) Falsos positivos	<b>22.2</b>	

La distribución de los eventos diurnos húmedos en función de las regiones y los límites establecidos se representa en la Figura 30. Se aprecia que los falsos positivos se dan todos bajo condiciones de un  $K_T$  superior a los límites definidos en el test. Estos cinco eventos se enmarcan en la región definida anteriormente como de alta probabilidad en la que se han registrado los riegos.

El número de alertas fue solamente de 3, y corresponden a eventos con una humedad relativa alta, mayor del 60,40% (umbral mínimo del test) pero con un  $K_T$  mayor del umbral establecido como el máximo habitual cuando se da una precipitación durante el día ( $K_T=0.3626$ ). De manera que se sitúan en la zona de color azul más claro, donde es poco probable que llueva pero si lo ha hecho alguna vez.



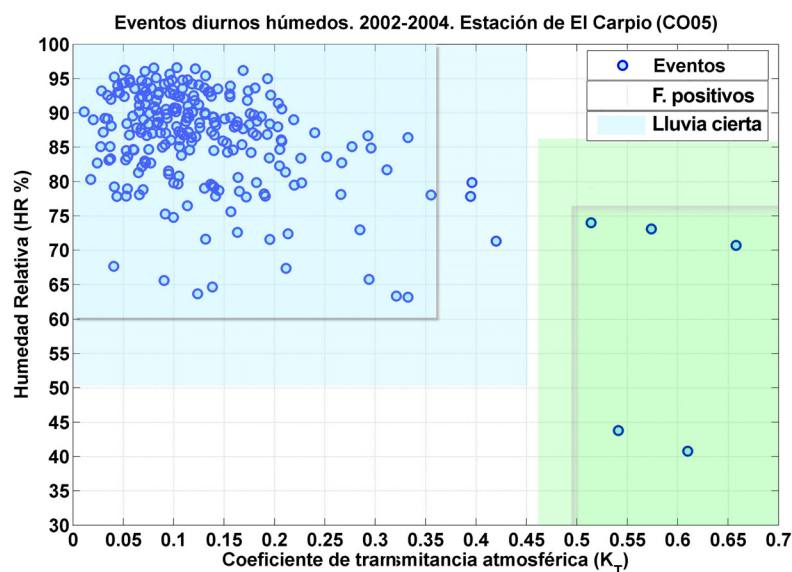


Figura 30. Representación de los eventos diurnos húmedos para la estación de El Carpio (Córdoba). Período: 2002-2004.

Mediante la inspección manual se ha comprobado que son eventos reales de lluvia en los tres casos. Se han aplicado las correcciones por la incertidumbre en la medida del piranómetro (+/- 3%) y no se ha superado el valor de  $K_T$  establecido como límite máximo observado. El valor máximo medido para  $K_T$  promediado durante un evento diurno de lluvia es de 0.4322 en los años analizados de la estación de El Carpio, ligeramente inferior al valor máximo observado en la estación de Córdoba ( $K_T=0.4524$ ).

En la Figura 31 se puede observar, como ejemplo, uno de los tres eventos correspondiente a las alertas generadas. Se puede apreciar como el descenso de la radiación, como consecuencia de la nubosidad, es detectado por el piranómetro antes que el pluviómetro marque la precipitación (17,00h y 17,30h). Debido a este desfase, el test no detecta los valores más bajos de  $K_T$ , que se dan a las 16,00h y a las 16,30h.

Los errores cometidos en el cálculo de las necesidades de riego para este período de tiempo ascienden a 22,2 mm (Tabla 16). Este volumen de agua ha sido considerado como lluvia y por tanto, se ha introducido en el balance de agua en el suelo, afectando por tanto a la programación de riegos de las parcelas cercanas que no han sido regadas.

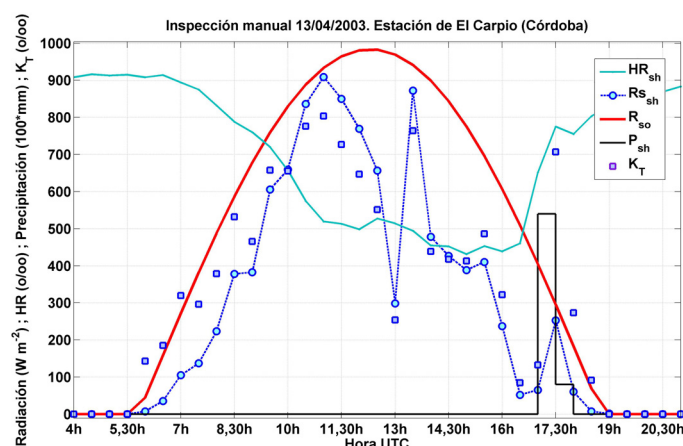


Figura 31. Valores semihorarios de radiación solar medida ( $R_{Ssh}$ ), radiación solar estimada para cielo despejado ( $R_{so}$ ), precipitación ( $P_{sh}$ ), humedad relativa ( $HR_{sh}$ ) y coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ) correspondientes al día 13 de Abril de 2003. Estación de El Carpio (Córdoba).

### 3.6.3. Aplicación del test de validación a la estación de Basurta-Jerez de la Frontera (Cádiz)

La estación agroclimática de Basurta-Jerez de la Frontera pertenece a la RIAA y sus coordenadas geográficas son: latitud  $36^{\circ} 45' 29''$  N y longitud  $6^{\circ} 00' 58''$  W. Esta estación está situada a 60 metros de altitud sobre el nivel del mar. Los datos que se han analizado corresponden a los años 2002, 2003 y 2004. Al igual que la estación de El Carpio, y según la información de los técnicos de mantenimiento que la visitan periódicamente, esta estación recibe con cierta frecuencia agua procedente de riegos efectuados en parcelas cercanas.

Los resultados después de aplicar el test de validación se muestran en la Tabla 17. Se han detectado 192 eventos de precipitación durante el día, de los cuales 11 han sido calificados por el test como falsos positivos. Cinco de estos falsos positivos han sido registrados en las regiones de alerta, debiendo ser inspeccionados manualmente.

Tabla 17. Resultados del test de validación de datos de precipitación diurnos semihorarios. Estación Basurta-Jerez de la Frontera (Cádiz)

Resultados TEST validación precipitación		
Nºeventos diurnos húmedos	192	
Nºde falsos positivos	11	
Nºde alertas	5	Lluvia (inspección manual)
Nºeventos reales de lluvia	181	
Volumen (mm) Falsos positivos	<b>25.8</b>	

En la Figura 32 se representa la distribución de los eventos diurnos húmedos en base a las regiones y límites establecidos. Los eventos detectados por el test como falsos positivos se encuentran en la región verde más oscura, la cual recoge las condiciones más probables de darse un evento debido al riego.

En esta Figura 32 se puede apreciar como los eventos de lluvia en esta estación se dan siempre con una humedad relativa alta, superando en todos los casos el valor umbral máximo establecido. La mayoría de estos eventos se registran con un valor medio de humedad superior al 69%, un valor superior a las dos estaciones estudiadas anteriormente, debido a las condiciones climáticas de esta estación (menos árida que las dos estaciones analizadas de Córdoba).

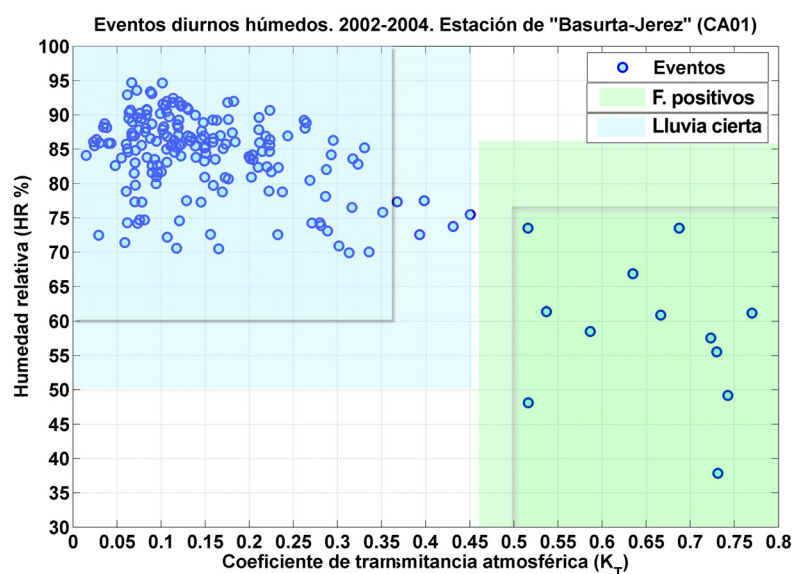


Figura 32. Representación eventos diurnos húmedos para la estación de la RIA de Basurta-Jerez de la Frontera (Cádiz). Período del 2002 al 2004.

Tras analizar mediante inspección manual las cinco alertas generadas, todas ellas han correspondido a eventos reales de lluvia, y se ha detectado un nuevo máximo en el coeficiente  $K_T$ , 0.4575. Todas las alertas corresponden a atenuaciones en la radiación solar producidas antes de registrarse los valores de precipitación. Un ejemplo de estas alertas revisadas manualmente se muestra en la Figura 33, donde se puede comprobar como el descenso de los valores de radiación se producen antes de los registros de precipitación, posiblemente por la baja intensidad de lluvia.

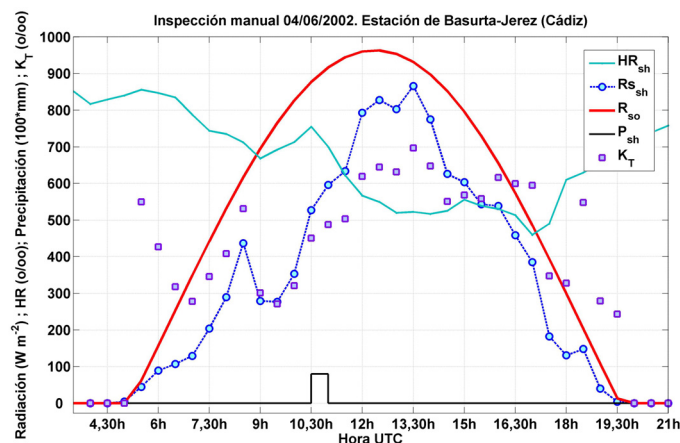


Figura 33. Valores semihorarios de radiación solar medida ( $RS_{sh}$ ), radiación solar estimada para cielo despejado ( $R_{so}$ ), precipitación ( $P_{sh}$ ), humedad relativa ( $HR_{sh}$ ) y coeficiente de transmitancia atmosférica ( $K_T$ ) correspondientes al día 4 de Junio del 2002. Estación de Basurta-Jerez de la Frontera (Cádiz).

### 3.7. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Los resultados del presente trabajo muestran la existencia de una relación entre la precipitación y los fenómenos de nubosidad y atenuación de la radiación solar medida. Sin necesidad de instalar un nuevo sensor en la estación meteorológica y de manera sencilla se puede estimar el grado de nubosidad calculando el coeficiente de transmitancia atmosférica.

El test diseñado se muestra como una herramienta sencilla y eficaz que sirve para detectar falsos positivos de precipitación, de fácil incorporación en cualquier sistema o plataforma informática. Debido a su carácter dinámico a la hora de establecer los umbrales máximos y mínimos y los registros máximos y mínimos históricos este nuevo test irá aumentando su fiabilidad a medida que se vayan teniendo más años de datos.

Los eventos de lluvia diurnos durante los meses de primavera-verano parecen darse bajo condiciones de un  $K_T$  más alto y una  $HR$  más baja que en Otoño-Invierno. Con más años de registros se pueden establecer, como se ha comentado en el presente estudio, unos umbrales específicos para cada época o mes del año.

Mediante la generación de alertas debidas a posible inconsistencia entre parámetros se podrá comprobar si existe un mal funcionamiento de alguno de

los sensores. También se detectará en estos casos (baja HR y bajo  $K_T$ ) anomalías habituales que ocurren en campo del tipo: piranómetro sucio, protector de la sonda de humedad sucio u obstruido, etc. sin necesidad de realizar un control de campo en la estación.

Debido a la gran cantidad de riegos que afectan a la estación meteorológica de Córdoba (RIAA) y del problema que supone comprobar manualmente la validez de los datos de precipitación, queda demostrada la necesidad de automatizar, mediante un test como este, un mecanismo de validación de los registros pluviométricos generados. De igual manera ocurre con las dos estaciones analizadas: El Carpio en Córdoba y Basurta-Jerez de la Frontera en Cádiz. Estas estaciones también requieren, aunque en menor medida, un procedimiento que elimine los registros que marcan los pluviómetros que no son debidos a la lluvia.

Sería interesante evaluar el comportamiento de estos eventos diurnos húmedos de lluvia en función de los umbrales establecidos de  $K_T$  y HR, en varias estaciones agroclimáticas cercanas a la costa, ya que este tipo de estaciones tienen un régimen climático distinto. También resultaría de gran interés analizar a escala regional este fenómeno. De esta manera se podrían estudiar los diferentes umbrales de  $K_T$  y HR en los eventos diurnos húmedos para toda Andalucía.

## **Capítulo 4. Resultados del Sistema de Control de Calidad**

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de los diferentes procedimientos de validación descritos en los Capítulos 2 y 3 a los datos meteorológicos de la RIAA. Como se ha comentado en capítulos anteriores, este sistema de control de calidad es exportable a otras redes de estaciones meteorológicas automáticas. Se han validado los datos diarios registrados entre los años 1999 y 2006 y los datos semihorarios comprendidos entre 2002 y 2006. Cada uno de los tests de control de calidad se ha aplicado simultáneamente a todas las estaciones de la RIAA analizadas (Tabla 2).

### **4.1. Depuración de la base de datos**

Antes de comenzar a aplicar cualquier proceso de validación sobre los datos meteorológicos es necesario hacer un análisis previo de la base de datos replicada en PostgreSQL. En primer lugar se han detectado los registros en blanco (campos vacíos) para cada una de las variables que se almacenan en la base de datos diaria. Posteriormente, se han contabilizado el número de registros existentes en cada caso agrupándolos por año y variable, tal y como se muestra en las Tablas 18 y 19. En relación a los datos diarios, se puede observar en la Tabla 18 que los años con menor número de registros fueron los años 1999 y 2000 ya que fueron los años en que progresivamente se fueron instalando las estaciones. El mismo procedimiento se ha seguido para los registros semihorarios, determinando para cada variable los registros vacíos y el número de datos existentes (Tabla 19).

No se ha detectado ninguna tendencia en cuanto al número de campos vacíos o “blancos” a lo largo de los años analizados, aunque en general, los años 2005 y 2006 son los que menos campos vacíos tienen. También se puede apreciar que el número de registros en blanco no es igual para todas las variables meteorológicas, lo cual indica que no todos los registros vacíos se producen por

problemas en el sistema (equipo registrador de datos, almacenamiento, etc.) sino debido también a las características específicas de cada sensor.

Tabla 18. Número de datos y registros meteorológicos en blanco para las distintas variables meteorológicas en escala diaria. Distribución porcentual en años

		1999 (%)	2000 (%)	2001 (%)	2002 (%)	2003 (%)	2004 (%)	2005 (%)	2006 (%)	Total
<b>Rs</b>	Datos	0.05	4.51	14.83	15.87	16.02	16.39	16.43	15.91	<b>197,800</b>
	Blancos	0	27.99	63.43	7.46	0	0	1.12	0	<b>268</b>
<b>T<sub>max</sub></b>	Datos	0.05	4.48	14.91	15.86	16.01	16.37	16.42	15.90	<b>197,915</b>
	Blancos	0	76.47	0.65	13.73	0.65	5.88	0	2.61	<b>153</b>
<b>T<sub>min</sub></b>	Datos	0.05	4.49	14.91	15.84	16.02	16.37	16.43	15.90	<b>197,846</b>
	Blancos	0	54.17	0.93	27.78	0	18.06	0	1.85	<b>216</b>
<b>T<sub>med</sub></b>	Datos	0.05	4.48	14.91	15.86	16.01	16.37	16.42	15.90	<b>197,912</b>
	Blancos	0	75.00	0.64	0	7.69	0	1.92	0	<b>156</b>
<b>HR<sub>max</sub></b>	Datos	0.05	4.49	14.91	15.84	16.01	16.37	16.42	15.90	<b>197,877</b>
	Blancos	0	61.26	0.52	26.18	1.57	9.42	0	1.05	<b>191</b>
<b>HR<sub>min</sub></b>	Datos	0.05	4.49	14.92	15.80	16.03	16.35	16.45	15.92	<b>197,548</b>
	Blancos	0	22.54	7.32	37.57	4.05	23.51	0.19	5.01	<b>519</b>
<b>HR<sub>med</sub></b>	Datos	0.05	4.48	14.91	15.86	16.01	16.37	16.42	15.90	<b>197,918</b>
	Blancos	0	78.00	0.67	14.67	0	5.33	0	1.33	<b>150</b>
<b>Vv</b>	Datos	0.05	4.54	14.90	15.85	16.00	16.37	16.41	15.89	<b>198,068</b>
	Blancos	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
<b>Dv</b>	Datos	0.05	4.54	14.90	15.85	16.00	16.37	16.41	15.89	<b>198,067</b>
	Blancos	0	0	0	0	0	0	0	1	<b>1</b>
<b>Vv<sub>max</sub></b>	Datos	0.05	4.54	14.90	15.85	16.00	16.37	16.41	15.89	<b>198,066</b>
	Blancos	0	0	0	1	0	1	0	0	<b>2</b>
<b>P</b>	Datos	0.05	4.51	14.90	15.86	16.00	16.37	16.41	15.89	<b>197,992</b>
	Blancos	0	97.26	2.74	4.11	0	0	0	0	<b>73</b>

Tabla 19. Número de datos y registros meteorológicos en blanco para las distintas variables meteorológicas en escala semihoraria. Distribución porcentual en años

		2002 (%)	2003 (%)	2004 (%)	2005 (%)	2006 (%)	Total
<b>Rs<sub>sh</sub></b>	Datos	19.6	19.8	20.3	20.4	19.9	7,697,242
	Blancos	96.2	0	3.8	0	0	52
<b>T<sub>sh</sub></b>	Datos	19.6	19.8	20.3	20.4	19.9	7,695,376
	Blancos	78.1	0.2	21.7	0	0	1,918
<b>HR<sub>sh</sub></b>	Datos	19.6	19.8	20.3	20.4	19.9	7,695,129
	Blancos	70.9	1.0	28.2	0	0	2,165
<b>Vv<sub>sh</sub></b>	Datos	19.6	19.8	20.3	20.4	19.9	7,697,286
	Blancos	25.0	62.5	12.5	0	0	8
<b>Dv<sub>sh</sub></b>	Datos	19.6	19.8	20.3	20.4	19.9	7,697,291
	Blancos	66.7	0	33.3	0	0	3
<b>P<sub>sh</sub></b>	Datos	19.6	19.8	20.3	20.4	19.9	7,697,278
	Blancos	81.3	6.3	12.5	0	0	16

## 4.2. Radiación Solar

En primer lugar se ha aplicado el **test de rango fijo** (Ecuaciones 2.1a y 2.1b) para detectar los registros fuera del intervalo recomendado en la norma UNE 500540 (2004) y marcarlos como erróneos. Estos registros se etiquetarán con el código de validación 1 y no será necesario aplicarles ningún otro test de validación ni realizar ningún tipo de verificación gráfica, inspección manual, etc. Estos valores no serán utilizados para el cálculo de ninguna otra variable derivada, como por ejemplo, la radiación neta o la evapotranspiración de referencia. Los resultados del test para datos diarios se muestran en la Tabla 20, en la que se indican los porcentajes máximo y mínimo de los registros meteorológicos que no han superado el test aplicado a cada una de las estaciones, así como la media y la desviación típica de estos porcentajes correspondientes a toda la red. La única estación en la que se han detectado valores fuera de este rango rígido para escala diaria ha sido la estación de Puebla de Cazalla (Sevilla), con un valor de  $219 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ . Solamente este dato diario no superó este test, que en términos porcentuales representa aproximadamente el 0.05%. El resto de las estaciones (89) superaron satisfactoriamente el test, obteniéndose un valor medio para toda la red del 0.001% de registros erróneos.

Tabla 20. Porcentaje de datos que no han superado el test de rango rígido aplicado a los registros de  $R_s$  (Radiación solar diaria) y  $R_{s_{sh}}$  (Radiación solar semihoraria)

Test rango fijo	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típ. (%)	Validación
<b><math>R_s</math></b>	0.049	0	0.001	0.005	1
<b><math>R_{s_{sh}}</math></b>	0.016	0	0.000	0.002	1

Para escala semihoraria los resultados han sido parecidos, con tan sólo una estación en la que se han detectado errores, la estación de Tíjola (Almería). Catorce valores semihorarios se situaron fuera de este rango rígido, lo que equivale al 0.016% del total de los datos registrados en esa estación. Estos catorce registros, en promedio para toda la red, supusieron un porcentaje muy bajo (0.0002% de datos erróneos).

El siguiente procedimiento de validación aplicado ha sido el **test de rango flexible** definido por las Ecuaciones 2.24 y 2.25. Este test verifica que el registro de radiación no supera un determinado valor teórico para condiciones de cielo despejado y en él se han utilizado las dos aproximaciones teóricas expuestas en el Capítulo 2 (Ecuaciones 2.2 y 2.14). También este test verifica que el coeficiente de transmitancia atmosférica no es inferior a un valor mínimo. Los resultados de la aplicación de este test para datos diarios y semihorarios se muestran en la Tabla 21, donde se indica el porcentaje medio de errores



detectados, sus valores máximos y mínimos, así como la desviación típica del porcentaje de errores detectados en cada una de las estaciones. En este caso, el código de validación con el que se han marcado los registros que no han superado el test es el 2.

El porcentaje medio de valores anómalos detectados por este test para datos diarios ha sido del 0.34%, con un valor máximo de 11.80% de registros anómalos en la estación de Las Cabezas de San Juan (Sevilla). De las 90 estaciones meteorológicas validadas, 30 de ellas no han generado ningún valor fuera de este rango flexible. El mayor número de registros fuera de rango corresponde al año 2005, debido fundamentalmente a la descalibración de los piranómetros como consecuencia del envejecimiento de la fotocélula de silicio. A partir de esta fecha se empezaron a calibrar algunos piranómetros (Estévez et al., 2005) y se realizaron las primeras sustituciones por sensores nuevos o calibrados. Hasta esta fecha, en general, las estaciones con registros fuera del rango definido por el test han seguido una tendencia creciente, produciéndose generalmente sobreestimaciones en las medidas de radiación solar.

Tabla 21. Porcentaje de datos que no han superado el test de rango flexible aplicado a los registros de  $R_s$  (Radiación solar diaria)

Test rango flexible	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típ. (%)	Validación
$R_s$	11.80	0	0.34	1.32	2
$R_{sh}$	7.04	0.05	0.80	1.10	2

El porcentaje medio de registros semihorarios detectados por este mismo test fue del 0.80%, con un valor máximo del 7.04% en la estación de Las Cabezas de San Juan (Sevilla), la misma en que se registró el mayor porcentaje de datos fuera de este rango flexible a escala diaria. Todas las estaciones analizadas han registrado valores de radiación solar semihoraria que no han superado satisfactoriamente este test, con un mínimo del 0.05% en la estación de Sanlúcar de Barrameda (Cádiz). El año con mayor número de registros anómalos fue, al igual que en datos diarios, el año 2005. Estos resultados indican que el porcentaje de datos semihorarios que se registran por encima del 10% de la radiación teórica en condiciones de cielo despejado es superior al doble del porcentaje de registros diarios que no superaron el mismo test. La reflexión de nubes cercanas en días despejados hace que la radiación solar de onda corta en escala intradiaria que recibe el piranómetro supere su aproximación teórica (Allen, 1996; ASCE-EWRI, 2005). Este fenómeno repetido en el tiempo y los desajustes propios del modelo para estimar la radiación solar en cielo despejado (especialmente al amanecer y al anochecer) hacen que el porcentaje de datos semihorarios marcados sea mayor que el correspondiente a registros diarios. Por otro lado, las fechas en que se han obtenido datos diarios por encima de este

rango flexible, también se han detectado registros semihorarios fuera de su rango correspondiente.

Este mecanismo de validación incorpora una herramienta mediante la cual se pueden representar gráficamente la evolución diaria de la radiación solar así como los registros marcados y etiquetados como sospechosos.

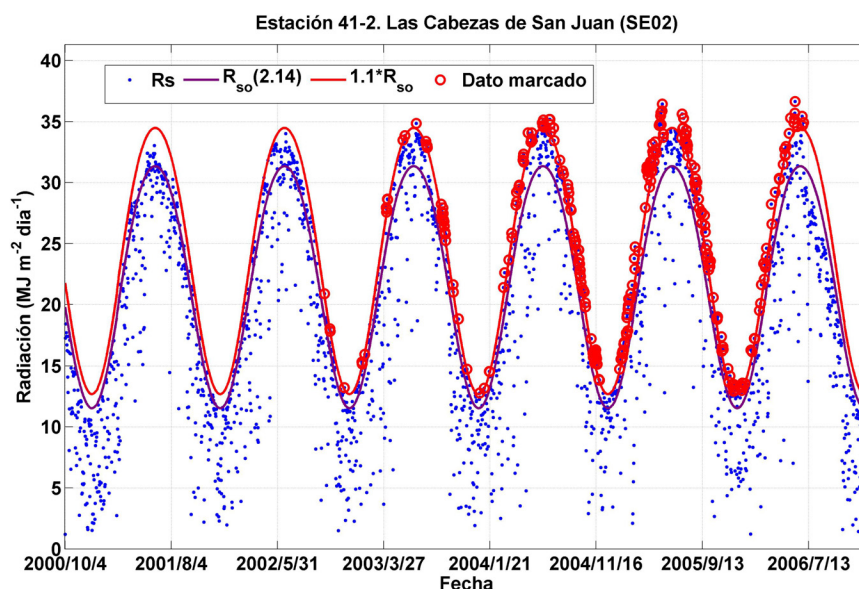


Figura 34. Resultado gráfico de la aplicación del test de rango flexible para los registros de Radiación Solar diaria de la estación de Las Cabezas de San Juan (Sevilla).

Este test ha permitido tomar la decisión de sustituir el piranómetro de la estación de Las Cabezas de San Juan, donde se detectó que el número de registros marcados como potencialmente erróneos aumentaba con el tiempo, como consecuencia de la descalibración del sensor. En la Figura 34 se puede observar como el piranómetro mide sistemáticamente por encima de la radiación solar teórica en condiciones de cielo despejado a partir del año 2004, síntoma inequívoco de que el sensor estaba descalibrado y no funcionaba correctamente. A finales de 2002 comenzaron ya a registrarse valores por encima del 10% de  $R_{so}$ , que son los datos marcados por el test, señalados con un círculo rojo en la Figura 34. En el mes de Junio de 2006 se instaló un piranómetro nuevo de las mismas características. Se aprecia claramente como el sensor nuevo vuelve a medir radiación solar de forma correcta, registrando valores cercanos a la radiación solar teórica en condiciones de cielo despejado.

Como comparación, en la Figura 35 se muestra el resultado gráfico de la aplicación del mismo test para la estación de Córdoba. Se puede apreciar como

los 2 únicos valores etiquetados como sospechosos corresponden a finales del 2000 y principios del año 2001. Ambos valores han sido detectados no por superar el valor de  $R_{so}$  sino por ser medidas de radiación solar demasiado bajas (Ecuación 2.25). En ocasiones, los piránómetros que no están en unas condiciones óptimas de limpieza subestiman las medidas de radiación. Durante el resto de los años se observa que el piránómetro tiene un comportamiento adecuado, con valores de radiación solar medidos que no se alejaron sistemáticamente de la envolvente de radiación solar teórica en condiciones de cielo despejado.

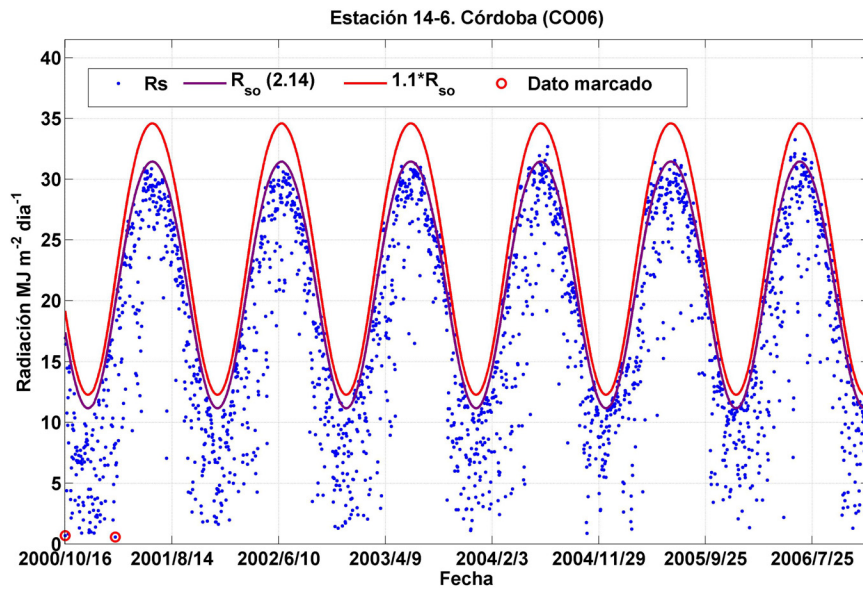


Figura 35. Resultado gráfico de la aplicación del test de rango flexible para los registros de radiación solar diaria de la estación de Córdoba.

Este test de rango flexible para datos de radiación solar ha sido utilizado con frecuencia para verificar la integridad de los mismos, antes de emplearlos en la estimación de otras variables, principalmente la evapotranspiración de referencia. Así, trabajos como los de Allen (2000) y Jensen et al. (1997) destacan la utilidad de este test para comprobar el estado de calibración de los piránómetros antes de introducir los valores de radiación solar en el cálculo de la evapotranspiración de referencia. Otros trabajos ponen de manifiesto algunas limitaciones de este test debido a las incertidumbres en la turbidez de la atmósfera (Irmak et al., 2003) o en el grado de nubosidad durante los meses de verano (Yoder et al., 2005), especialmente en climas húmedos. Sin embargo estos mismos autores destacan su gran utilidad como paso previo a la estimación de la radiación neta.

En términos cuantitativos existen pocos trabajos de este tipo en la bibliografía que comenten los resultados de este test aplicado a una amplia red de estaciones meteorológicas. Geiger et al., (2002) aplica un test similar para datos diarios de una sola estación, con un porcentaje de datos que no superaron el test del 0.11%, un valor similar al de muchas estaciones analizadas en este trabajo. Meek y Hatfield (1994), tras la aplicación de un test de rango basado también en una envolvente de radiación solar teórica para cielo despejado (Howell et al., 1984), obtuvieron para dos estaciones analizadas un porcentaje de datos marcados del 7% en datos horarios, sin embargo en esas mismas estaciones ningún dato diario fue detectado como potencialmente erróneo.

Los resultados de la aplicación del **test de consistencia temporal** para registros semihorarios se muestran en la Tabla 22. Este test verifica el exceso de variabilidad entre medidas consecutivas (Ecuación 2.26). También en esta tabla se han incluido los resultados de la aplicación del **test de persistencia** para registros diarios (Ecuación 2.27) y semihorarios (Ecuación 2.28), donde se comprueba que en una serie de datos, los sucesivos registros no sean iguales.

Tabla 22. Porcentaje de datos que no han superado los tests de consistencia temporal aplicado a registros de  $Rs_{sh}$  y de persistencia aplicado a registros de  $Rs_{sh}$  y  $Rs$

	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típ. (%)	Validación
<b>Consistencia temporal</b> <b><math>Rs_{sh}</math></b>	0.24	0.02	0.10	0.04	4
<b>Persistencia</b> <b><math>Rs</math></b>	0.82	0	0.01	0.09	5
<b>Persistencia</b> <b><math>Rs_{sh}</math></b>	0	0	0	0	5

El test de consistencia temporal detectó un 0.1% de valores anómalos, con un valor máximo del 0.24% en la estación de Jerez del Marquesado (Granada). El porcentaje mínimo de registros potencialmente erróneos se obtuvo en la estación de Sanlúcar de Barrameda (Cádiz) con tan sólo un 0.02%. La aplicación del test de persistencia a los registros diarios detectó un promedio del 0.01% de registros potencialmente erróneos. En tan sólo 4 estaciones se obtuvieron resultados positivos tras la aplicación del test, siendo la estación de Almonte (Huelva) la que registró un mayor porcentaje de datos que no pasaron el test (0.82%). Finalmente, todos los datos semihorarios superaron satisfactoriamente el test de persistencia.

Los porcentajes descritos en la Tabla 22 son similares a los obtenidos por Meek y Hatfield (1994) para dos estaciones analizadas. En este trabajo, el test de persistencia para datos horarios tampoco detectó ningún registro anómalo, al igual que ocurrió en nuestro caso, y el test de consistencia temporal detectó

también porcentajes muy bajos de registros potencialmente erróneos. En este mismo trabajo todos los registros diarios superaron satisfactoriamente el test de persistencia, al igual que en 86 de las 90 estaciones de la RIAA analizadas.

### 4.3. Temperatura del aire

El primer test que se ha aplicado ha sido el definido por la Ecuación 2.29 denominado **test de rango fijo**, que viene determinado por los límites físicos recomendados en la norma UNE 500540 (2004). Los resultados indican que todos los registros de temperatura diaria (máxima, mínima o media) y semihoraria superaron satisfactoriamente el test.

El resultado de los **tests de consistencia interna** (Ecuaciones 2.30 a 2.34) aplicados a los registros diarios se muestra en la Tabla 23, así como los resultados del **test de ceros** (Ecuación 2.36) y el **test del salto térmico** (Ecuación 2.35). Estos tests verifican la coherencia entre las diferentes variables medidas relacionadas con la temperatura (máxima, mínima y media). La aplicación de los tests de consistencia interna a los registros de temperatura máxima detectó un porcentaje medio de datos anómalos del 0.012% sobre el total de la RIAA, con un valor máximo del 0.091% en la estación de La Puebla del Rio II (Sevilla), mientras que hubo un total de 69 estaciones cuyos datos superaron satisfactoriamente estos tests. Estos valores son ligeramente superiores a los detectados por Feng et al. (2004) en una red de 726 estaciones y muy similares a los obtenidos por Reek et al. (1992) para 138 estaciones (0.019%). El porcentaje medio de datos de temperatura mínima que no superaron estos tests fue del 0.005%, con un valor máximo en la estación de Adra (Almería) del 0.175%. Para esta misma variable, todos los registros de 85 estaciones superaron los tests satisfactoriamente. El test de ceros detectó un promedio del 0.024% de datos anómalos, con un máximo en la estación de Padul (Granada) del 0.788% y un total de 83 estaciones cuyos registros lo superaron satisfactoriamente. Estos porcentajes son también algo mayores que los obtenidos por Feng et al. (2004) y similares a los presentados por Reek et al. (1992).

Tabla 23. Porcentaje de datos que no han superado los diferentes tests de consistencia interna aplicados a Temperatura máxima, mínima y media diaria ( $T_{max}$ ,  $T_{min}$  y  $T_{med}$  respectivamente)

<b>Consistencia Interna</b>	<b>Max (%)</b>	<b>Min (%)</b>	<b>Media (%)</b>	<b>Desv.Típ. (%)</b>	<b>Validación</b>
$T_{max}$	0.091	0	0.012	0.023	3
$T_{min}$	0.175	0	0.005	0.022	3
$T_{med}$	0	0	0	0	3
<b>Test de ceros <math>T_{min}</math></b>	0.788	0	0.024	0.112	7
<b>Test salto térmico <math>T_{max}-T_{min}</math></b>	6.190	0	0.585	1.135	7

Como se puede apreciar en la Tabla 23, todos los registros de temperatura media superaron satisfactoriamente los tests de consistencia interna. Por último, el test del salto térmico diario fue el que detectó el mayor porcentaje de datos que no superaron dicho test, con un valor medio del 0.59% y un máximo del 6.19% registrado en la estación de Úbeda (Jaén). Todos los registros correspondientes a 16 estaciones superaron este test satisfactoriamente. Los resultados del mismo muestran unos porcentajes muy por encima de los que se han revisado en la bibliografía (Feng et al., 2004; Reek et al., 1992; Kunkel et al., 1998). Debido a la rigidez del umbral del salto térmico que emplea este test, se han obtenido resultados nulos en algunas estaciones y en otras se han registrado porcentajes mucho más elevados, por esa razón la desviación típica entre las diferentes estaciones es del 1.14%, por encima de la media.

El siguiente test que se ha aplicado ha sido el de **consistencia temporal** para datos semihorarios (Ecuación 2.37), donde se han detectado aquellos registros consecutivos cuya diferencia térmica haya sido mayor que las tolerancias especificadas en WMO (1993). En la Tabla 24 se recogen los resultados de este test, así como los resultados del **test de persistencia** aplicado también al conjunto de datos semihorarios (Ecuación 2.38). Para el test de consistencia temporal se ha obtenido un porcentaje medio de datos anómalos del 0.11%, con un valor máximo del 0.77% en la estación de Úbeda (Jaén). En todas las estaciones se encontraron datos anómalos, registrándose el mínimo porcentaje en la estación de Hornachuelos (Córdoba). No se detectó ninguna tendencia a lo largo del periodo analizado, si bien 2005 fue el año en el que este test detectó los porcentajes más altos. Los resultados obtenidos por Meek y Hatfield (1994) para este mismo test reflejan resultados similares para las dos estaciones analizadas (0.1%). Un porcentaje similar de registros anómalos de temperatura intradiaria ha sido presentado por diferentes autores (Kunkel et al., 1998; Guttman, 2002; Eskridge et al., 1995 y Graybeal et al., 2004a).

Tabla 24. Porcentaje de datos que no han superado los tests de consistencia temporal y persistencia aplicados a datos semihorarios de temperatura del aire ( $T_{sh}$ )

$T_{sh}$	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv. Típica (%)	Validación
<b>Consistencia temporal</b>	0.77	0.01	0.11	0.14	4
<b>Persistencia</b>	0	0	0	0	4

Los resultados del test de persistencia son idénticos a los obtenidos por Meek y Hatfield (1994) para datos horarios, donde ningún registro anómalo fue detectado por el test.

## 4.4. Humedad Relativa del aire

El test que se ha aplicado en primer lugar ha sido el **test de rango fijo** (Ecuación 2.39), que viene dado por las características propias del sensor (Tabla 1) y por los límites físicos de la variable medida (Tabla 3). Su correspondiente código de validación etiqueta al registro marcado como no válido, este código es el 1. Los registros que se encuentren por encima del valor máximo meteorológico pero dentro del rango de medida de la sonda serán corregidos y etiquetados adecuadamente (1C).

Tabla 25. Porcentaje de registros que no han superado el test de rango fijo para los registros de Humedad Relativa máxima, mínima, media y semihoraria ( $HR_{max}$ ,  $HR_{min}$ ,  $HR_{med}$  y  $HR_{sh}$ , respectivamente)

Test rango fijo	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típica (%)	Validación
$HR_{max}$	1.63	0	0.07	0.20	1C
$HR_{min}$	0	0	0	0	1C
$HR_{med}$	0	0	0	0	1C
$HR_{sh}$	0	0	0	0	1C

Se puede observar en la Tabla 25, tal y como cabría esperar en una región semiárida como es Andalucía, que sólo algunos registros de humedad relativa máxima han tomado valores por encima del 100%. Todos los datos anómalos detectados han registrado valores por debajo del 103%, que es el valor máximo que puede medir la sonda, por lo que, en principio, se puede afirmar que el sensor está funcionando correctamente dentro de sus especificaciones técnicas. Estos valores serán corregidos igualándolos al máximo valor físico que puede tomar la humedad relativa (100%) y etiquetados con su correspondiente código (1C). El porcentaje medio de datos anómalos detectados por este test ha sido del 0.07%, con un valor máximo para la estación de Lepe (Huelva) del 1.63%. En 69 estaciones no se han obtenido ningún registro fuera de este rango fijo. El mayor porcentaje de datos que no superaron este test se detectó en el año 2000.

En la Tabla 26 se muestran los resultados del test de rango modificado, para detectar los registros que alcanzan el límite físico más alto de humedad relativa (100%). Este límite fue alcanzado, en promedio, por el 0.22% de los datos de humedad relativa máxima y por un 0.14% de los registros semihorarios de esta variable. Los porcentajes máximos de registros detectados por el test se dieron para ambas variables en la estación de Isla Mayor (Sevilla). Sólo se detectaron estos valores de saturación en 14 estaciones para  $HR_{sh}$  y en 16 estaciones para  $HR_{max}$ .

Tabla 26. Porcentaje de datos de  $HR_{max}$  (humedad relativa máxima) y de  $HR_{sh}$  (humedad relativa media semihoraria) que alcanzan el valor físico máximo (100%)

	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típica (%)	Validación
$HR_{max}=100\%$	26.50	0	0.22	2.82	-
$HR_{sh}=100\%$	5.07	0	0.14	0.68	-

Se ha observado también, una tendencia claramente creciente desde 2003 a 2006. Este tipo de test no sirve para marcar los datos como erróneos o como sospechosos, pero se utiliza para detectar tendencias en determinadas estaciones y generar alertas para sustituir el sensor o calibrarlo.

Los siguientes procedimientos de validación que se aplicaron fueron los **tests de consistencia interna**. Estos tests incluyen, además de las verificaciones diarias del tipo  $HR_{max} > HR_{med} > HR_{min}$  o  $HR_{max} > \max(HR_{sh})$  (Ecuaciones 2.40 a 2.42) las atribuidas a la temperatura del punto de rocío ( $T_{dew}$ ), donde se han generado alertas para los registros cuya diferencia entre  $T_{dew}$  y  $T_{min}$  supera el valor de  $1^{\circ}C$  (Ecuación 2.44). Los resultados obtenidos después de aplicar estos tests de consistencia interna se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Porcentaje de datos que no han superado los tests de consistencia interna aplicados a las variables de Humedad Relativa máxima, mínima, media y semihoraria ( $HR_{max}$ ,  $HR_{min}$ ,  $HR_{med}$  y  $HR_{sh}$ , respectivamente)

Consistencia interna	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típica (%)	Validación
$HR_{max}$	0.649	0	0.044	0.080	3
$HR_{min}$	0.240	0	0.007	0.030	3
$HR_{med}$	0.239	0	0.004	0.029	3
$HR_{sh} (T_{dew})$	0.034	0	0.002	0.004	3

Se puede apreciar como el mayor porcentaje de datos que no superaron los tests se obtuvo para la  $HR_{max}$  diaria, con un promedio del 0.044% y un máximo del 0.649% en la estación de Padul (Granada). Hubo 43 estaciones cuyos registros superaron el test satisfactoriamente en su totalidad. Para la  $HR_{min}$  el porcentaje medio fue del 0.007%, con un máximo del 0.240% en la estación de Guillena (Sevilla) y un total de 83 estaciones donde no se etiquetó ningún registro. Para la  $HR_{med}$ , los porcentajes fueron inferiores, con tan sólo 2 estaciones con datos erróneos, y un máximo en la misma estación de Guillena (Sevilla). Estos porcentajes tan bajos muestran bastante similitud con los resultados presentados por Feng et al. (2004) para la humedad relativa media, donde el porcentaje de datos detectados por los tests de consistencia interna para la red analizada fue del 0.0039%. No se han detectado tendencias a lo largo de los años. Se trata de casos aislados en determinadas estaciones, donde puntualmente se han detectado datos erróneos, como es el caso de la citada estación de Sevilla. Los porcentajes obtenidos tras la aplicación del test de consistencia interna para la temperatura del punto de rocío han resultado ser los



más bajos (0.002%). La mayor parte de ellos corresponden a valores de temperatura mínima igual a 0, registros que ya han sido etiquetados por los tests aplicados a la temperatura. Por esta razón,  $T_{dew}$  supera en más de 1 °C a  $T_{min}$ , tratándose por tanto de errores en la variable temperatura mínima y no de inconsistencias en relación al comportamiento diario entre ambas variables. Tan sólo 3 de los registros anómalos detectados se han dado con temperaturas mínimas distintas de 0. El valor máximo se ha obtenido en la estación de Villanueva del Río (Sevilla), con un 0.034% de datos que no superaron el test, mientras que en 19 de las estaciones analizadas no se detectó ningún registro anómalo. Tampoco se han detectado tendencias en el tiempo para este test, resultando ser todos ellos casos aislados que corresponden a circunstancias locales concretas. En Feng et al. (2004) se presentan resultados aún más bajos para esta variable.

Los resultados obtenidos después de aplicar el **test de consistencia temporal** a los registros semihorarios se muestran en la Tabla 28, donde se comprueba el exceso de variabilidad entre dos medidas consecutivas (Ecuación 2.45). En esta misma tabla se recogen también los resultados de **los tests de persistencia** (Ecuaciones 2.46 a 2.49) aplicados a los diferentes registros de humedad relativa, donde se ha comprobado la existencia de datos sucesivos de igual valor.

Tabla 28. Porcentaje de datos que no han superado los tests de persistencia aplicados a las variables de Humedad Relativa máxima, mínima, media y semihoraria ( $HR_{max}$ ,  $HR_{min}$ ,  $HR_{med}$  y  $HR_{sh}$ , respectivamente) y de consistencia temporal aplicados a  $HR_{sh}$ .

	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típica (%)	Validación
<b>Persistencia</b> $HR_{max}$	16.019	0	0.252	1.717	5
<b>Persistencia</b> $HR_{min}$	0.147	0	0.006	0.029	5
<b>Persistencia</b> $HR_{med}$	0.234	0	0.008	0.034	5
<b>Persistencia</b> $HR_{sh}$	1.535	0	0.094	0.194	5
<b>Consist. Temporal</b> $HR_{sh}$	0.021	0	0.002	0.004	4

El porcentaje de registros anómalos más alto para el test de persistencia se ha obtenido para la humedad relativa máxima, con un promedio del 0.252% y un valor máximo en la estación de Isla Mayor (Sevilla) del 16.019%. Todos los registros detectados de  $HR_{max}$  se han dado en rangos de humedad alta (90-100%), donde el sensor responde más lentamente a los cambios de humedad debido a la histéresis de la propia sonda. En esta ocasión también se ha detectado una tendencia creciente en el porcentaje de datos etiquetados,

situándose el máximo en el año 2006, de forma similar a la aplicación del test de rango modificado para la humedad relativa. Sin embargo, para esta misma variable no se ha detectado ningún registro sospechoso en 35 de las estaciones analizadas. Para  $HR_{\min}$  y  $HR_{\text{med}}$ , los porcentajes obtenidos por el test de persistencia fueron muy parecidos, a excepción de las estaciones donde se han dado los valores máximos. Para ambas variables se han detectado datos anómalos en tan sólo 4 de las 90 estaciones analizadas. Finalmente, para los registros semihorarios el test de persistencia detectó un porcentaje medio del 0.09%, con un máximo en la estación de La Puebla de Guzmán (Huelva) del 1.53%, mientras que hubo 32 estaciones donde todos los registros superaron satisfactoriamente el test. Este valor es parecido al obtenido para valores de humedad relativa horaria (0.1%) en Graybeal et al. (2004a). Por último, el test de consistencia temporal fue el que detectó los porcentajes más bajos, con un promedio del 0.002% y un máximo del 0.021% para la estación de La Higuera de Arjona (Jaén). Este test no detectó ningún registro anómalo en 55 de las estaciones analizadas y prácticamente la totalidad de los registros detectados estaban asociados a episodios de lluvia con un rango de humedad elevado (90-100%).

## 4.5. Velocidad y Dirección de Viento

El primer procedimiento de validación aplicado ha sido el definido por la Ecuación 2.50, un **test de rango fijo** donde no se detectó ningún registro fuera de los límites establecidos en la Tabla 3. Las variables analizadas fueron las velocidades de viento máxima y media diarias y la velocidad de viento semihoraria. Por otro lado, también se aplicó este test a la variable dirección de viento a diferentes escalas (Ecuación 2.51), con los mismos resultados.

Los resultados obtenidos tras la aplicación de los diferentes **tests de consistencia interna** se muestran en la Tabla 29. Este tipo de tests verifican, por un lado, la consistencia meteorológica de los datos registrados y, por otro, la consistencia de las diferentes variables (instantáneas o promediadas) dentro del propio sistema de almacenamiento (Ecuaciones 2.52 a 2.55).

Tabla 29. Porcentaje de datos que no han superado los tests de consistencia interna aplicados a la velocidad de viento máxima y media diaria y semihoraria ( $V_{v_{max}}$ ,  $V_v$  y  $V_{v_{sh}}$ ) y para dirección de viento media diaria y semihoraria ( $D_v$  y  $D_{v_{sh}}$ )

Consistencia interna	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típica (%)	Validación
$V_{v_{max}}$	2.70	0	0.32	0.42	3
$V_v$	0.65	0	0.01	0.07	3
$V_{v_{sh}}$	0.93	0	0.06	0.15	3
$D_v$	0.65	0	0.01	0.05	3
$D_{v_{sh}}$	0.93	0	0.06	0.15	3

Los datos de la velocidad máxima diaria que no superaron los tests de consistencia han sido fundamentalmente aquellos valores que no cumplieron las Ecuaciones 2.52 y 2.53. El incumplimiento de ambas condiciones ha dado lugar a un promedio del 0.32% de registros no válidos, con un valor máximo del 2.70% en la estación de Almuñecar (Granada), existiendo un total de 11 estaciones cuyos registros superaron los tests correctamente. Estos porcentajes son mayores que los descritos por Feng et al. (2004) o Schroeder et al. (2005), aunque este último aplicó el test a registros de velocidad de viento medidos a 10 m. de altura. Para la velocidad del viento media diaria, el valor máximo se registró en la estación de Padul (Granada) (0.65% de los datos no superaron los tests durante el año 2002), obteniéndose un porcentaje medio del 0.01%. Estos registros, al igual que los correspondientes a la dirección de viento diaria, fueron producidos por inconsistencias entre velocidad y dirección de viento (Ecuaciones 2.54 y 2.55). Análogamente, los resultados obtenidos por estos tests a escala semihoraria detectaron un porcentaje máximo del 0.93% en la misma estación citada de Granada, con un promedio para ambas variables del 0.06%. Estos registros inconsistentes para ambas escalas se produjeron mayoritariamente en el año 2002, lo cual indica un mal funcionamiento de la anemoveleta de esta estación en este periodo concreto. Los porcentajes de errores detectados para velocidad y dirección de viento semihorarios son similares a los descritos por DeGaetano (1997) para datos horarios. En términos generales, los resultados expuestos son superiores a los porcentajes obtenidos por Feng et al. (2004) y muy similares a los de Schroeder et al. (2005), que se obtuvieron para sensores instalados a una altura de 10 m.

Los resultados de los **tests de consistencia temporal** aplicados a velocidad y dirección de viento se exponen en la Tabla 30. Con estos tests (Ecuaciones 2.56 a 2.59) se ha comprobado el exceso de variabilidad entre medidas sucesivas para diferentes escalas.

Tabla 30. Porcentaje de datos que no han superado los tests de consistencia temporal aplicados a las variables de velocidad y dirección de viento media diaria y semihoraria ( $V_v$ ,  $V_{v_{sh}}$ ,  $D_v$  y  $D_{v_{sh}}$ )

Consistencia Temporal	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típica (%)	Validación
$V_v$	0.09	0	0.00	0.00	4
$V_{v_{sh}}$	0	0	0	0	4
$D_v$	7.46	0.237	2.64	1.40	4
$D_{v_{sh}}$	2.92	0.362	1.30	0.59	4

Se observa que, en general, todos los registros de velocidad de viento diaria superaron el test de consistencia temporal satisfactoriamente, mientras que solo una estación (Jimena de la Frontera en Cádiz) registró valores anómalos de velocidad media diaria (0.09%). Los porcentajes de datos sospechosos detectados para dirección de viento fueron más elevados, con un promedio del 2.64% a escala diaria y del 1.30% a escala semihoraria. Los porcentajes máximos se dieron en las estaciones de Padul (Granada) y Pizarra (Málaga), mientras que los mínimos se registraron en Velez (Málaga) y Lepe (Huelva) para escala diaria y semihoraria, respectivamente. Meek y Hatfield (1994), tras la aplicación de este mismo test tampoco detectaron anomalías en los datos de velocidad de viento media diaria y horaria. Los porcentajes de datos de dirección de viento diaria que no superaron este test presentados por estos autores fueron algo mayores para escala diaria (4.2% y 6.8%) y ligeramente inferiores para escala horaria (0.3 y 0.5%) en las dos estaciones analizadas.

A continuación se muestran en la Tabla 31 los resultados obtenidos tras la aplicación de los **tests de persistencia** a los datos de velocidad y dirección de viento a diferentes escalas (Ecuaciones 2.60 a 2.64). Un 0.12% de los registros semihorarios de velocidad de viento no superaron satisfactoriamente el test, mientras que en 40 estaciones no se detectó ningún registro anómalo. Los registros sospechosos de velocidades media y máxima diarias fueron similares (0.04% y 0.05% respectivamente). Además, sólo en 4 estaciones se detectaron registros sospechosos. Para las tres variables analizadas, los máximos porcentajes se detectaron en la estación de Almuñecar (Granada). Los porcentajes medios detectados por el test de persistencia para dirección de viento media diaria y semihoraria fueron del 0.01% y 0.02% respectivamente. Tan sólo en la estación de Padul (Granada) existieron registros que no superaron el test de persistencia (0.65% y 0.58% para datos diarios y semihorarios, respectivamente). En ningún caso se detectaron tendencias en el tiempo para ninguna de las variables analizadas. Este comportamiento aislado en esta estación en concreto obedece a una señal constante durante un tiempo determinado, la cual puede ser debida a trabajos de mantenimiento.

Tabla 31. Porcentaje de datos que no han superado los tests de persistencia aplicados a velocidad de viento máxima diaria, media diaria y semihoraria ( $V_{v_{max}}$ ,  $V_v$  y  $V_{v_{sh}}$ ) y para dirección de viento media diaria y semihoraria ( $D_v$  y  $D_{v_{sh}}$ )

Persistencia	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típica (%)	Validación
$V_{v_{max}}$	3.78	0	0.05	0.43	5
$V_v$	2.31	0	0.04	0.33	5
$V_{v_{sh}}$	3.07	0	0.12	0.45	5
$D_v$	0.65	0	0.01	0.07	5
$D_{v_{sh}}$	0.58	0	0.02	0.05	5

Los tests de persistencia aplicados por Meek y Hatfield (1994) no detectaron ningún registro anómalo de velocidad de viento diaria, y el porcentaje obtenido para datos horarios fue del 0.3% en una de las estaciones analizadas. En este mismo trabajo no se detectaron registros sospechosos de dirección de viento. En cambio, Schroeder et al. (2005) describen porcentajes de datos anómalos detectados por este tipo de test para registros de dirección de viento medidos a 10 m. de altura iguales al 0.07%, del mismo orden de magnitud que los presentados en la Tabla 31.

En relación al test del **ratio entre  $V_{v_{max}}$  y  $V_v$** , se generaron dinámicamente gráficos para comprobar su evolución, tal y como se muestran en la Figura 36.

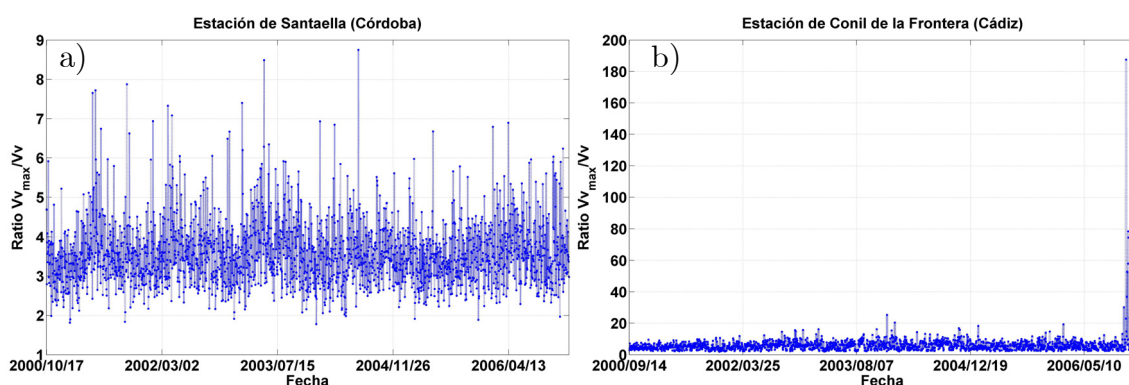


Figura 36. Evolución diaria del Ratio entre la  $V_{v_{max}}$  y  $V_v$  en la estación de Santaella (Córdoba) (a) y en la estación de Conil de la Frontera (Cádiz) (b)

Como se puede apreciar en la Figura 36a no se observa ninguna tendencia en la evolución temporal de esta relación para la estación de Santaella (Córdoba), aunque existen días en que este cociente toma valores algo más elevados, pero corresponden a fechas aisladas que no parecen deberse a anomalías continuas en el tiempo. Para el caso que se presenta en la Figura 36b, se observa claramente la existencia de valores muy elevados de esta relación a finales del año 2006. Parece lógico pensar que el sensor de la estación de Conil de la Frontera no

estuvo funcionando de forma correcta y, por tanto, hubiera sido recomendable una revisión de sus elementos mecánicos o la calibración del mismo. Para establecer un procedimiento automático que posibilite la detección de estos casos y la evaluación de sus posibles tendencias en el tiempo, se ha fijado un umbral de este ratio igual a 20, por encima del cual se generen alertas. Los resultados de este test se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32. Porcentaje de datos que no han superado el test del Ratio entre  $V_{V_{max}}$  y  $V_V$  (Velocidad de viento máxima diaria y media diaria)

	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típica (%)	Validación
<b>Ratio <math>V_{V_{max}}/V_V</math></b>	2.00	0	0.05	0.25	-

Se puede observar como el porcentaje medio de datos detectados por este test fue del 0.05%, con un máximo en la estación de Isla Mayor (Sevilla) del 2%. En tan sólo 19 estaciones de la red se registraron anomalías, siendo gran parte de ellas las mismas que fueron detectadas tras la aplicación de los tests cuyos resultados se han presentado anteriormente. Del mismo orden de magnitud son los resultados obtenidos por Feng et al. (2004) para la velocidad de viento diaria (0.079%) y para la velocidad de viento máxima diaria (0.015%). Graybeal (2005) obtuvo también resultados similares, aunque utilizó una relación entre la velocidad de viento media diaria y la máxima medida cada cinco minutos.

Por último, se ha desarrollado una herramienta que permite generar de forma dinámica las **funciones de distribución conjunta de velocidad y dirección de viento** a diferentes escalas, con el fin de caracterizar el regimen de vientos de cada estación. En la Figura 37 se muestra un ejemplo a escala anual. Este mecanismo de validación no sirve para detectar posibles errores en cada uno de los registros, sino para visualizar posibles cambios en las direcciones más frecuentes y generar la alerta correspondiente. Para la estación presentada en ella parece lógico pensar que las direcciones predominantes y sus respectivas velocidades permanecen constantes a lo largo de los años. Se trata de detectar la aparición de obstáculos cercanos a la estación, árboles, nuevas edificaciones, etc. que producirían un cambio en los patrones de velocidad de viento y sus respectivas direcciones más frecuentes.

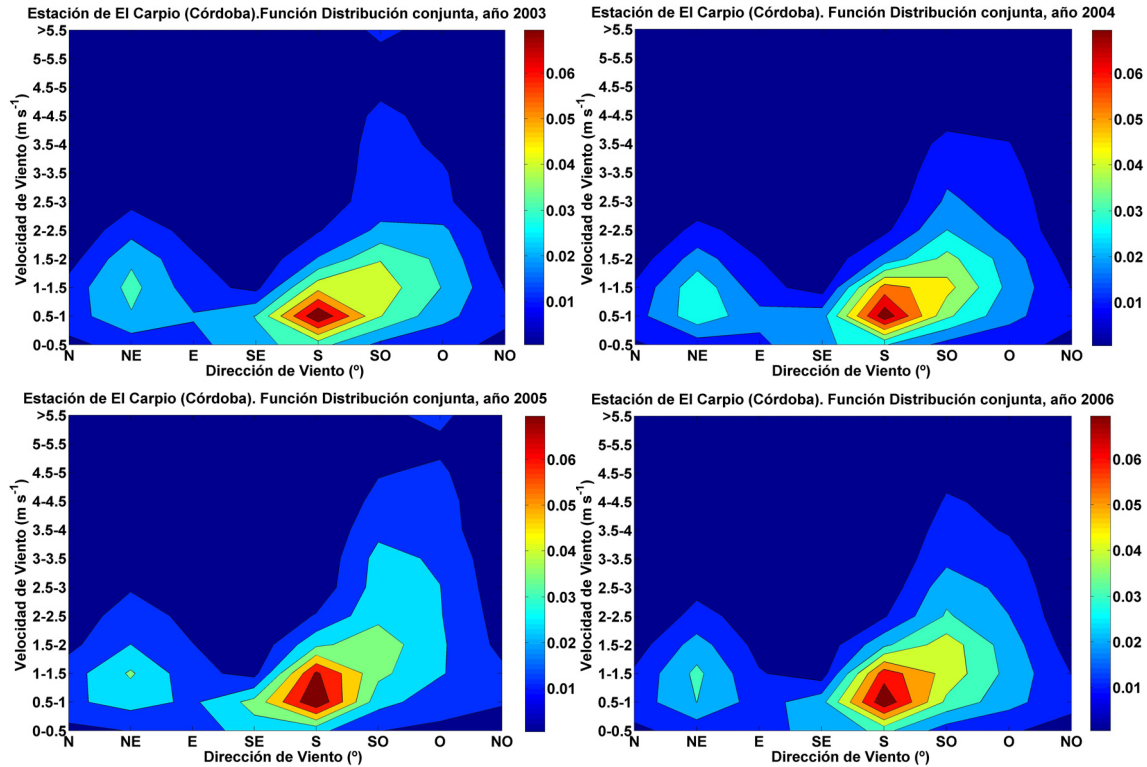


Figura 37. Función de densidad conjunta Velocidad de Viento-Dirección de Viento para los años 2003 a 2006 en la estación de El Carpio (Córdoba)

También se han analizado las posibles tendencias en los periodos de calma. Los resultados se muestran en la Tabla 33, donde se recogen los resultados para registros diarios y semihorarios de velocidad de viento. Para los registros de la velocidad de viento media diaria se obtuvieron un total de medidas calificadas como calmas del 6.88%, con un máximo en la estación de Almuñecar (Granada), donde el 76.61% de los registros de velocidad estuvieron por debajo de los 0.67 m/s. En 8 de las estaciones analizadas no se detectaron valores de viento por debajo de este umbral. A escala semihoraria se detectó un promedio del 25.09% de calmas, con un máximo en la misma estación del 69.11%.

Tabla 33. Porcentaje de datos marcados como calma para datos de velocidad de viento diaria y semihoraria ( $V_v$  y  $V_{v_{sh}}$ )

	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típica (%)	Validación
<b>Calmas <math>V_v</math></b>	76.61	0	6.88	11.80	-
<b>Calmas <math>V_{v_{sh}}</math></b>	69.11	2.82	25.09	14.43	-

Se ha detectado una tendencia creciente en toda la red desde la instalación de las estaciones hasta el 2004, año en el que se registraron el máximo

porcentaje de calmas, tanto para datos diarios como semihorarios. A partir de este año se comenzaron a reemplazar algunos sensores, aunque en 2005 y 2006 no se ha bajado del 1% (Figura 38), lo cual puede indicar que existen estaciones, como la de Almuñecar en Granada, cuyos datos de velocidad de viento tan bajos no son debidos a problemas en el sensor sino al propio emplazamiento de la estación.

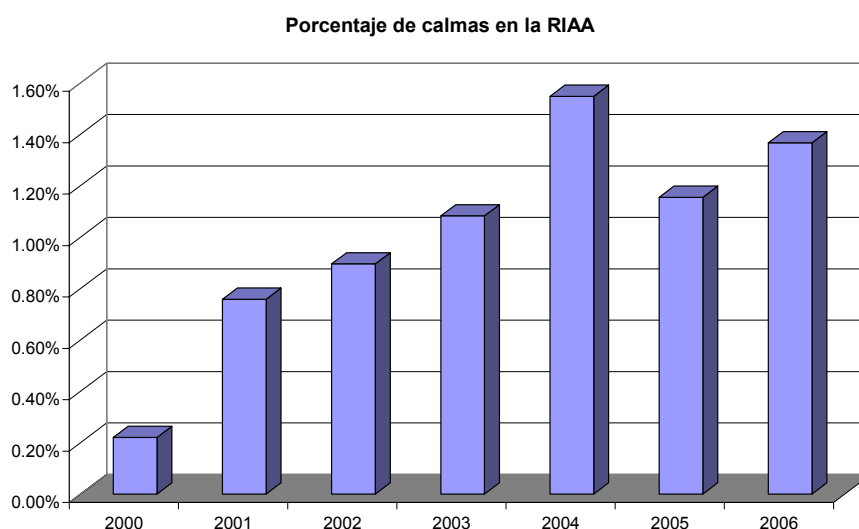


Figura 38. Porcentaje de datos semihorarios de velocidad de viento ( $V_{v,sh}$ ) correspondientes a calma (velocidad < 0.67 m/s)

## 4.6. Precipitación

El primer test aplicado a los registros diarios y semihorarios de precipitación fue el **test de rango fijo** definido por las Ecuaciones 2.68 y 2.69 respectivamente, cuyos resultados se muestran en la Tabla 34. Este test de rango fijo solamente detectó valores erróneos en la estación de Tíjola (Almería), tanto para registros diarios como semihorarios. Las fechas en que se produjeron estas medidas son las mismas, lo cual parece indicar que pudiera ser debida a operaciones de mantenimiento, quizá provocadas por los técnicos al comprobar la correcta generación de pulsos en los pluviómetros en sus visitas periódicas a las estaciones. Tres datos de precipitación semihorarios sobre un total de más de siete millones de registros equivalen a un porcentaje muy bajo (0.000 en la Tabla 34). El porcentaje correspondiente a la estación de Tíjola (Almería) fue del 0.003% para valores semihorarios. A escala diaria, donde solamente un registro fue marcado como erróneo, se obtuvieron un promedio de 0.001% y un valor máximo correspondiente a la estación citada del 0.105%



Tabla 34. Porcentaje de datos que no han superado el test de rango fijo para datos de precipitación diarios ( $P$ ) y semihorarios ( $P_{sh}$ )

Test Rango fijo	Max (%)	Min (%)	Media (%)	Desv.Típica (%)	Validación
$P$	0.105	0	0.001	0.011	1
$P_{sh}$	0.003	0	0.000	0.000	1

Resultados similares han sido descritos por otros autores para este test, cuyos porcentajes fueron del mismo orden de magnitud (Reek et al., 1992) y trabajos donde ningún registro fue detectado (Meek y Hatfield, 1994; Feng et al., 2004).

El siguiente test aplicado fue el **test de consistencia interna** (Ecuación 2.70), donde no se detectaron registros anómalos en ninguna de las estaciones analizadas, todos los datos de precipitación no nulos, fueron iguales o mayores que la precisión del pluviómetro, 0.2 mm.

Finalmente se aplicó el llamado **test de falsos positivos** para la validación de datos semihorarios de precipitación diseñado en el Capítulo 3. Estos falsos positivos detectados serán etiquetados con su correspondiente código de validación, y serán eliminados de los datos diarios que se ponen a disposición de los usuarios. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 35, donde se ha cuantificado el volumen de precipitación correspondiente a los falsos positivos detectados para cada una de las estaciones.

Tabla 35. Resultados del test de falsos positivos para precipitación semihoraria (porcentaje de datos que no han superado el test y volumen de falsos positivos en mm)

Provincia	Nombre Estación	Datos marcados (%)	Falsos Positivos (mm)
Almería	La Mojenera	0.01	2.4
Almería	Fiñana	0.00	3
Almería	Virgen Fátima-C.A.	0.01	12.6
Almería	Adra	0.00	1.8
Almería	Tíjola	0.15	3249.4
Cádiz	Basurta-Jerez Frtra.	0.07	51.8
Cádiz	Vejer de la Frontera	0.00	28.8
Cádiz	Jimena de la Frontera	0.00	2
Cádiz	Pto. Santa María	0.00	2
Córdoba	El Carpio	0.04	78.4
Córdoba	Córdoba	0.37	352.2
Córdoba	Santaella	0.11	81.4
Granada	Baza	0.03	26.6
Granada	Iznalloz	0.02	10.6
Granada	Jerez del Marquesado	0.10	50.8
Granada	Cádir	0.03	30.8
Granada	Zafarraya	0.00	2
Granada	Padul	0.02	13
Huelva	Lepe	0.05	81.6

Provincia	Nombre Estación	Datos marcados (%)	Falsos Positivos (mm)
Huelva	Almonte	0.05	47.6
Jaén	Huesa	0.01	12
Jaén	Pozo Alcón	0.04	24.6
Jaén	S.José de los Propios	0.01	2.8
Jaén	Sabiote	0.01	2.8
Jaén	Alcaudete	0.02	12.2
Jaén	Mancha Real	0.01	6
Jaén	Linares	0.00	1.4
Jaén	Marmolejo	0.06	64
Jaén	Chiclana de Segura	0.01	4.6
Jaén	Jaén	0.01	3.8
Málaga	Vélez-Málaga	0.05	43.6
Málaga	Antequera	0.00	2.6
Sevilla	Lebrija I	0.05	29.6
Sevilla	Écija	0.01	10

En 36 estaciones se detectaron falsos positivos de precipitación, con un máximo del 0.37% en la estación del Córdoba, donde los riegos efectuados sobre la pradera de gramíneas sobre la cual se asienta la estación meteorológica alcanzan al pluviómetro registrando los pulsos correspondientes. El volumen de falsos positivos detectados en la estación de Tíjola (Almería) fue de 3249.4 mm y coincide con el periodo en que algunos registros no superaron el test de rango fijo. Un ejemplo de lo ocurrido en esta estación se puede ver en la Figura 39. Se observa como los valores semihorarios de radiación solar ( $R_{s_{sh}}$ ) describen una curva típica de ausencia de nubes, acercándose a la envolvente de Radiación solar teórica en cielo despejado ( $R_{s_0}$ ). Al mismo tiempo, se aprecia en la figura como se producen registros de precipitación ( $P_{sh}$ ) a partir de las 7h. Estos registros corresponden a falsos positivos.

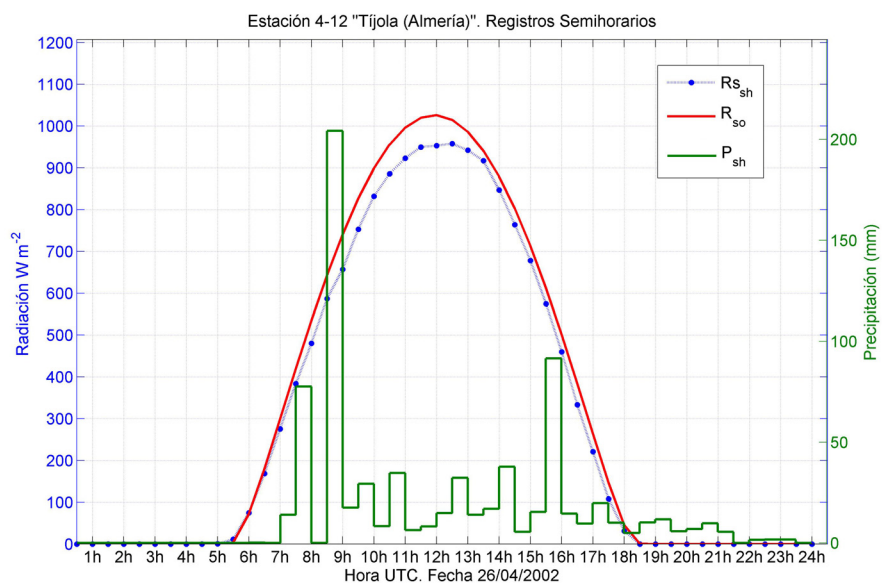


Figura 39. Valores semihorarios de Radiación solar ( $R_{s_{sh}}$ ), Radiación solar en cielo despejado ( $R_{so}$ ) y Precipitación ( $P_{sh}$ ) para el 26 de Abril de 2002 en la estación de Tíjola (Almería)

Además, este test no sólo detecta los volúmenes de agua de riego que pueden llegar a provocar pulsos en los pluviómetros sino aquellos registros de precipitación que no se dan bajo unas condiciones de humedad relativa y radiación solar propias de un evento diurno de lluvia. Trabajos de mantenimiento, labores con maquinaria en las parcelas que hagan vibrar el soporte del sensor, etc. pueden provocar pulsos en los pluviómetros que deben ser corregidos antes de ponerlos a disposición de los usuarios.

## 4.7. Tests basados en decisiones estadísticas

Como ya se ha expuesto en el Apartado 2.6.6 existen procedimientos de validación que están basados en decisiones estadísticas, donde se producirán errores Tipo I cuando un dato verdadero sea marcado como erróneo y errores Tipo II cuando datos erróneos no sean detectados por los tests. Este conjunto de tests se ha aplicado al conjunto de registros diarios de temperatura. En este apartado se ha realizado un estudio de los errores Tipo I y Tipo II para los registros de temperaturas máxima, mínima y media, siguiendo la metodología de Hubbard et al. (2005).

El primer test aplicado ha sido **el test de rango dinámico**. Este test ha sido definido en el Capítulo 2 mediante la Ecuación 2.71. El análisis se ha aplicado para diferentes valores del factor  $f$ , haciéndolo variar desde 0.2 hasta 5, en cada una de las estaciones meteorológicas de la red. De esta forma se ha establecido una relación entre el número de potenciales errores y el factor  $f$  empleado.

De forma análoga se han aplicado **el test de consistencia temporal** (Ecuación 2.72), **el test de persistencia** (Ecuación 2.73) y **el test de coherencia espacial** (Ecuación 2.77). Con este tipo de análisis se trata de relacionar los potenciales errores en tanto por uno (fracción marcada) con los diferentes valores del factor  $f$ . Siguiendo esta metodología, el porcentaje de detección de errores puede ser preseleccionado. De esta forma, este tipo de análisis permite seleccionar un valor específico de  $f$  para las diferentes condiciones climáticas de cada estación que nos permita mantener uniforme el % de errores Tipo I en toda la red.

### 4.7.1. Errores Tipo I

Resulta de gran importancia el análisis de los errores Tipo I derivados de la aplicación de los tests diseñados en función de los diferentes valores del factor  $f$ . La forma general de las relaciones entre  $f$  y la fracción de potenciales errores se presenta en la Figura 40 para los tests de rango dinámico y consistencia temporal y la Figura 41 para los tests de persistencia y de coherencia espacial.

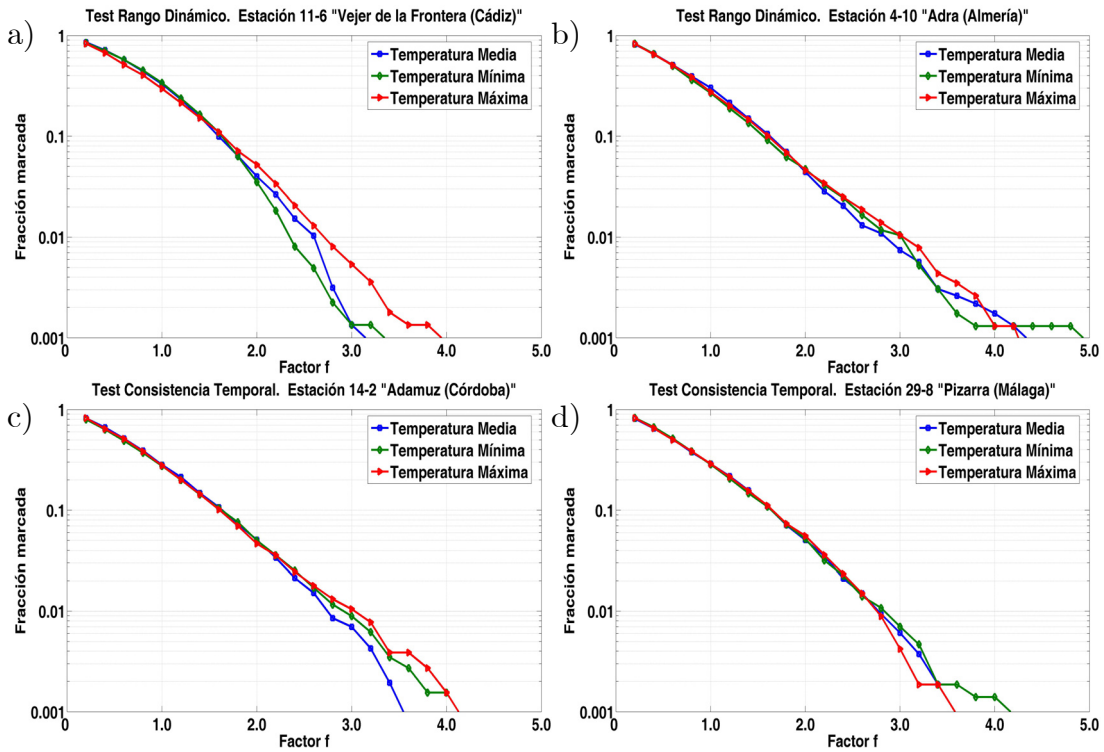


Figura 40. Fracción de datos detectados por los tests de rango dinámico (a-b) y de consistencia temporal (c-d) en función de los diferentes valores del factor f.

La cantidad de potenciales errores Tipo I (expresados en tanto por uno) se muestra en escala logarítmica en el eje de ordenadas, en función de los valores de f en el eje de abscisas. Los resultados para el test de rango dinámico muestran que en la estación de Vejer de la Frontera (Cádiz) el 1 % de los datos serían marcados como potencialmente erróneos utilizando un valor de f de 2.38 para la temperatura mínima, 2.60 para la temperatura media y 2.65 para la temperatura máxima (Figura 40a). Sin embargo, para la estación de Adra (Almería) el valor de f que detectaría ese mismo porcentaje de errores sería de 3.0 para las temperaturas máxima y mínima, y de 2.8 para la temperatura media (Figura 40b). Los resultados del test de consistencia temporal se muestran en las Figuras 40c y d para las estaciones de Adamuz (Córdoba) y Pizarra (Málaga), respectivamente. Se puede observar que el valor de f que marcaría el 1% de los datos como potencialmente erróneos se sitúa entre 2.7 y 3.0 para las tres variables de temperatura (máxima, mínima y media) en ambas estaciones. Estos resultados son representativos de la mayoría de las estaciones analizadas y guardan bastante similitud con los resultados obtenidos por Hubbard et al.(2005) en varias de las estaciones estudiadas en Estados Unidos.

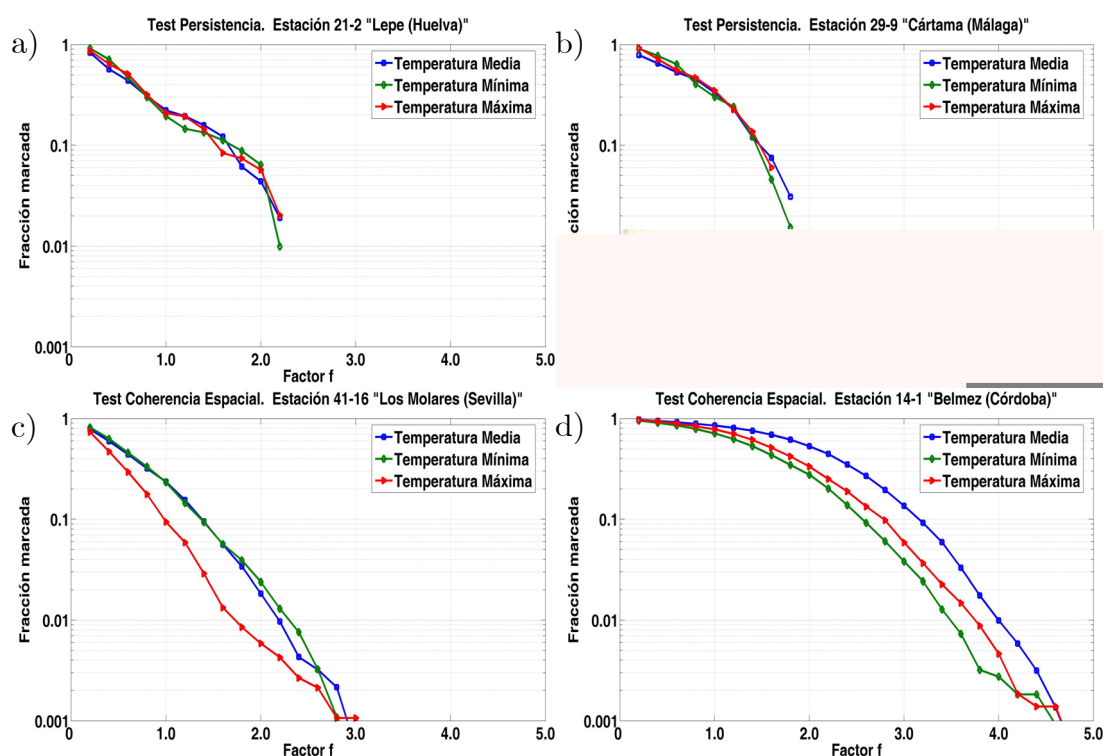


Figura 41. Fracción de datos detectados por los tests de persistencia (a-b) y de coherencia espacial (c-d) en función de los diferentes valores del factor  $f$

El mismo análisis se realizó para los tests de persistencia (Figuras 41a y b) y de coherencia espacial (Figuras 41c y d). En relación con el test de persistencia es conveniente indicar que debido a la poca longitud de las series disponibles para el análisis mensual de la desviación típica (Ecuación 2.73), el test no es capaz de detectar más datos como potencialmente erróneos aunque se aumente el valor de  $f$  (ver los puntos finales donde acaban las curvas en las Figuras 41a y b). Debido a la longitud de las series temporales disponibles, el test no puede ser aplicado convenientemente a escala mensual, sin embargo con series de 30 años se obtienen resultados bastante más consistentes (Hubbard et al., 2005). Los resultados del test de coherencia espacial presentados en la Figura 41c, correspondiente a la estación de Los Molares (Sevilla), muestran un comportamiento muy distinto a los obtenidos en la estación de Belmez (Córdoba), representados en la Figura 41d. En la primera estación, con un factor de  $f$  entre 1.7 y 2.5 para las tres variables analizadas el test detectaría un 1% de registros potencialmente erróneos. Sin embargo, en el segundo caso,  $f$  tendría que tomar valores por encima de 3.5 para detectar ese mismo porcentaje de potenciales errores. Esto muestra como la serie de referencia creada para la estación de Los Molares (Sevilla) tiene un comportamiento bastante parecido a la serie candidata, debido a la cercanía de varias estaciones bajo condiciones

climáticas similares en el Bajo Guadalquivir. El caso contrario ocurre para la estación de Belmez (Córdoba), fundamentalmente por ser una estación aislada, la única situada en la sierra del norte de Córdoba.

Una comparación del porcentaje de errores Tipo I que son detectados por los tests de rango dinámico, consistencia temporal y coherencia espacial en todas las estaciones para un factor  $f$  de 3.0 se muestra en las Figuras 42, 43 y 44. Se puede apreciar cómo se distribuye geográficamente el porcentaje de potenciales errores para estos tests aplicados a las distintas variables y para un valor fijo del factor  $f$ . Es importante resaltar que la interpolación realizada se ha extendido a toda Andalucía para facilitar la interpretación visual de la distribución espacial y detectar así posibles tendencias. Esta interpolación no tiene ninguna relevancia significativa fuera del alcance del emplazamiento de las diferentes estaciones meteorológicas.

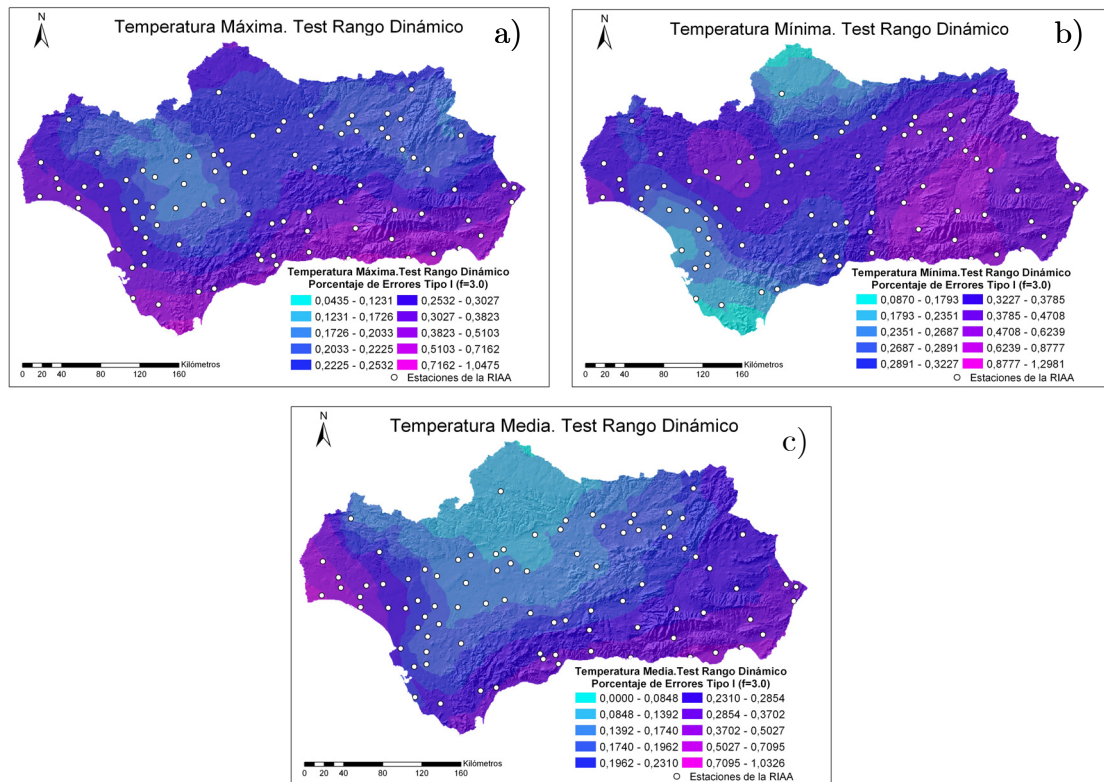


Figura 42. Porcentaje de potenciales errores Tipo I con  $f=3.0$  para el Test de Rango Dinámico aplicado a temperatura máxima (a), mínima (b) y media (c).

Los resultados obtenidos para el test de rango dinámico muestran que el mayor porcentaje de potenciales errores para temperatura máxima utilizando un factor  $f$  de 3.0 se encuentran en las zonas costeras (Figura 42a). Los valores más

elevados (en torno al 1%) se han observado en las estaciones cercanas al mar. En general, el resto de las estaciones muestra un comportamiento más o menos uniforme (alrededor del 0.2-0.3%), a excepción de algunas estaciones situadas en el valle del Guadalquivir a la altura de la provincia de Sevilla donde se registran los valores más bajos (0-0.2%), con un mínimo del 0,09% en la estación de San José de la Rinconada (Sevilla). Esta distribución geográfica de los errores Tipo I puede ser atribuida al efecto amortiguador de las temperaturas que, en general, sufren las estaciones más cercanas a la costa, donde la inercia térmica del mar hace que las temperaturas máximas sean más bajas que en las estaciones del interior, donde las masas de aire no están tan influenciadas por la poca distancia al mar. La aplicación de este mismo test a la variable temperatura mínima (Figura 42b) muestra que la distribución geográfica del porcentaje de potenciales errores presenta los valores más bajos en la costa de Cádiz y Huelva (0-0.26%). En cambio, los valores más elevados de estos errores se han registrado en las provincias de Jaén, Granada y Almería, con un máximo del 1.12% en la Estación de Padul (Granada). En vista de los resultados obtenidos, y sin considerar el significado de los valores estimados fuera de los límites de influencia de las estaciones (caso del norte de la provincia de Córdoba por ejemplo), se aprecia que la fracción de errores aumenta en aquellas estaciones situadas en el tercio sureste de Andalucía y fuera de la influencia advectiva del valle del Guadalquivir. La temperatura mínima de estas estaciones puede verse influenciada por la cercanía a zonas de elevada altitud como es el caso de Sierra Nevada en Granada. En relación a la temperatura media (Figura 42c) se observa como, al igual que para la temperatura máxima, las estaciones con mayor porcentaje de errores están situadas en zonas cercanas a la costa, con un máximo en la provincia de Huelva (1.03% en la estación de Lepe). Se puede apreciar como la influencia del mar es mucho menor que en el caso de la temperatura máxima, registrándose valores por debajo del 0.3% en estaciones de provincias costeras como Cádiz o Málaga. Las fracciones más bajas se han dado en las provincias de Córdoba y Sevilla, con un valor mínimo en la estación de Córdoba del 0.04%.



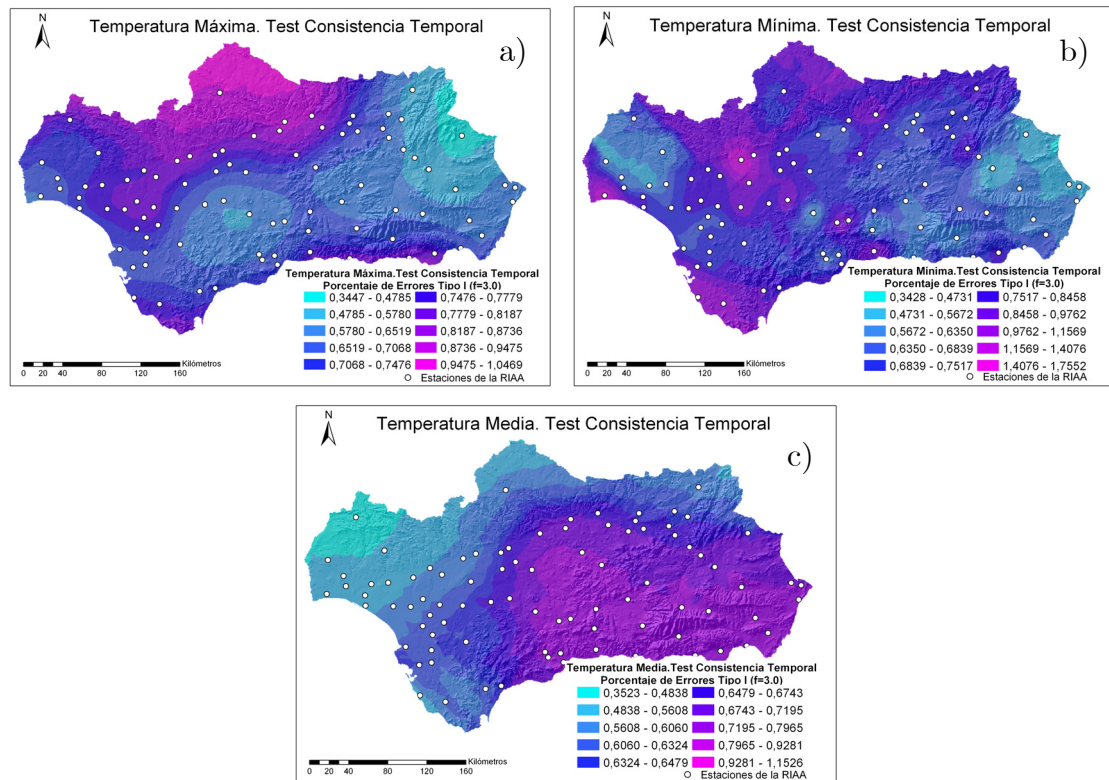


Figura 43. Porcentaje de potenciales errores Tipo I con  $f=3.0$  para el Test de Consistencia Temporal aplicado a temperatura máxima (a), mínima (b) y media (c).

En la Figura 43a se representa la distribución geográfica de la fracción de errores del **test de consistencia temporal** para la temperatura máxima. A la vista de los resultados obtenidos no se puede apreciar un patrón geográfico o alguna determinada tendencia espacial en la distribución de los errores. Sin embargo, se pueden distinguir dos zonas claramente diferenciadas donde se registran los valores más bajos de esta fracción de potenciales errores; se trata de la zona noreste de las provincias de Almería, Granada y Jaén, con un mínimo del 0.34% en la estación de la Puebla de Don Fadrique (Granada), y otra zona en el norte de Málaga y sureste de Sevilla, donde se han dado valores del 0.49% en la estación de Sierra de Yeguas (Málaga). Las mayores fracciones de errores detectados por este test aplicado a la temperatura máxima se han registrado en el valle del Guadalquivir, con un máximo del 1.04% en la estación de Adamuz (Córdoba). La aplicación del test a los registros de temperatura mínima (Figura 43b), tampoco han permitido detectar tendencias espaciales claras que determinen algún tipo de patrón geográfico. El valor más elevado (1.75%) se registró en la estación de Villanueva del Río (Sevilla), situada en el valle del Guadalquivir. En cambio, la fracción de errores más baja se registró en la estación de Baza (Granada) con un valor del 0.34%. Para la temperatura media

(Figura 43c) si se aprecia una tendencia creciente de oeste a este, donde se alcanzaron los mayores porcentajes en las provincias de Málaga, Granada y Almería. La fracción mínima de errores se registró en la estación de Gibralfaro (Huelva), con un valor del 0.35%. En cambio, el valor máximo de esta fracción de potenciales errores se registró en la estación de Tabernas (Almería) con un valor del 1.15%.

Para el análisis de la distribución geográfica del porcentaje de errores detectados por el **test de coherencia espacial** (Figura 44) no se ha realizado una interpolación por krigeado como en los casos anteriores. Debido a la numerosa existencia de valores nulos y la escasa continuidad en los porcentajes obtenidos se ha optado por representar los resultados de cada una de las estaciones en su propia localización, diferenciando su magnitud por tamaños y colores.

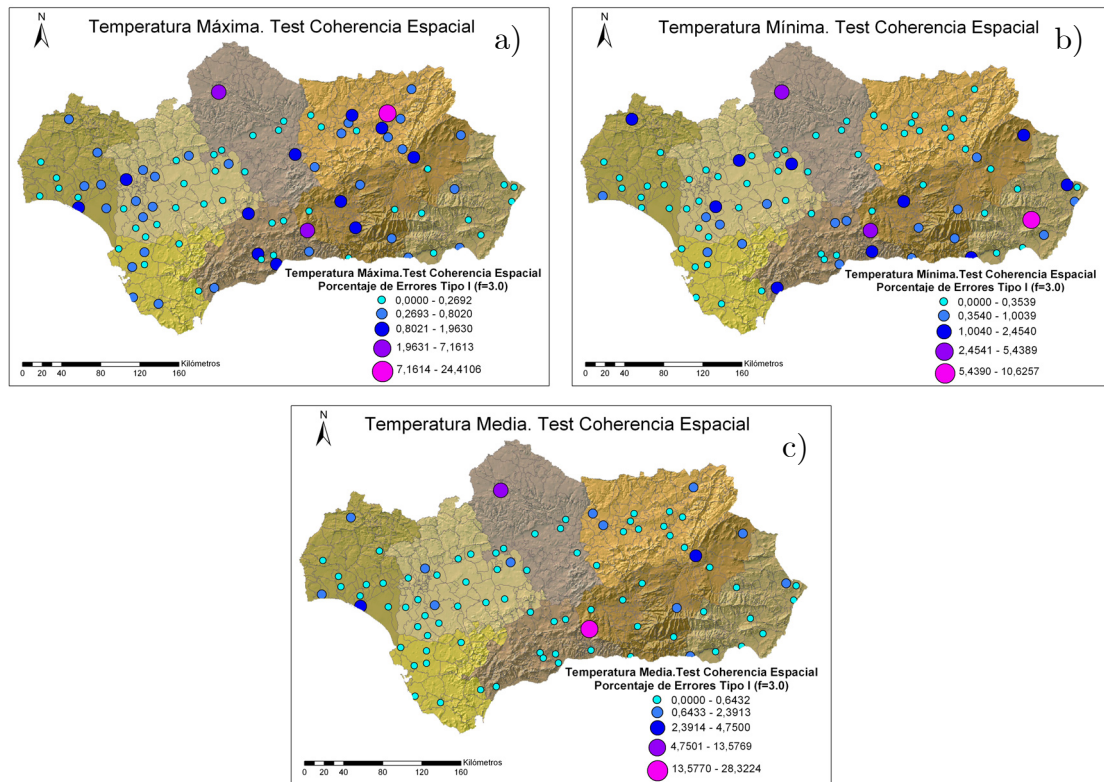


Figura 44. Porcentaje de potenciales errores Tipo I con  $f=3.0$  para el Test de Coherencia Espacial aplicado a temperatura máxima (a), mínima (b) y media (c).

En la Figura 44a se puede apreciar como se distribuyen los valores más bajos (inferiores al 0.26%) en la mayoría de las provincias de Andalucía, en color azul claro. Dentro de esta categoría, las estaciones que han registrado valores nulos han sido las de Málaga (Málaga), Tojalillo-Gibralfaro y Moguer-El

Cebollar (Huelva) y Fiñana (Almería). En general, porcentajes entre el 0.26% y el 1.96% se han dado también en todas las provincias, incluyendo varias estaciones cercanas a la costa. Existen dos casos aislados, con un mayor porcentaje de potenciales errores (color morado) en las estaciones de Belmez (Córdoba) y Zafarraya (Granada), con un 5.87% y 7.16% respectivamente. Por último, resaltar que el valor máximo de este porcentaje de errores en temperatura máxima se ha registrado en la estación de Sabiote (Jaén) con un 24,41%. La estación de Bélmez, en el norte de la provincia de Córdoba, es una estación aislada que no tiene estaciones cercanas que mantengan un régimen térmico similar, por tanto, la serie de referencia creada para la aplicación del test resulta menos representativa que en otros casos. De igual modo, los valores tan elevados registrados en Sabiote (Jaén) y Zafarraya (Granada) ponen de manifiesto que las condiciones climáticas locales son determinantes a la hora de generar una serie de referencia a partir de estaciones vecinas que nos permita discriminar valores anómalos en nuestra estación candidata. Se puede afirmar por tanto, que las estaciones vecinas a estas dos no se comportan de forma similar en cuanto a la temperatura máxima se refiere.

En la Figura 44b se puede observar algo más de continuidad en el porcentaje de errores detectados en los datos de temperatura mínima para todo el territorio de Andalucía. Valores por debajo del 0.35% han sido registrados en más de 50 estaciones, obteniéndose valores nulos en Sierra de Yeguas (Málaga) y Conil de la Frontera (Cádiz). De forma análoga a los resultados presentados en la Figura 44a, en las estaciones de Belmez (Córdoba) y Zafarraya (Granada) se han obtenido también valores elevados entre el 2.45-5.43%, lo cual indica una gran diferencia climática con las estaciones que las rodean, en relación a la temperatura mínima. Por último, el valor más elevado se ha registrado en la estación de Tabernas (Almería) con un 10.62% de errores detectados. En relación a la temperatura media (Figura 44c) se ha observado la mayor homogeneidad de los resultados, como consecuencia de ser una variable con más continuidad en toda la región. Más de 70 estaciones han registrado un porcentaje de errores por debajo del 0.64%, repartidas prácticamente en todas las provincias. De nuevo las estaciones de Belmez (Córdoba) y Zafarraya (Granada) muestran los valores más elevados, iguales a 13.57% y 28.32%, respectivamente.

#### **4.7.2. Errores Tipo II**

En este apartado se pretende determinar la cantidad de errores conocidos que no pueden ser detectados por los diferentes procedimientos de validación diseñados, en función de la magnitud del propio error. Para ello se ha

programado un sistema que introduce errores de forma controlada en la base de datos diaria, de forma que los valores que sean alterados puedan ser identificados de una forma inequívoca. Mediante un proceso aleatorio se seleccionaron un 10% de los registros de la base de datos diaria para ser alterados con un determinado error. La magnitud del error introducido se ha determinado de una forma aleatoria. Mediante la generación de un número aleatorio,  $r$ , insertado para cada registro, y que se distribuye según una distribución uniforme de media 0 y un rango de  $\pm 3.5$ . Multiplicando este valor  $r$  por la desviación típica de la variable meteorológica en cuestión, se obtiene la magnitud del error, de acuerdo con la Ecuación 4.1.

$$E_{iT} = \sigma_T r_i \quad (4.1)$$

donde  $E_{iT}$  es la magnitud del error introducido en el valor de  $T$  original (temperatura máxima, mínima o media),  $\sigma_T$  es la desviación típica de la variable  $T$  para el mes en cuestión y  $r_i$  es el valor del número aleatorio generado para cada fecha o registro  $i$ . La distribución de la magnitud del error tendrá una media igual a 0 y un rango de 3.5 veces la desviación típica observada de la variable  $T$  para cada mes en cuestión. La elección de 3.5 asegura que los diferentes tests incluyen los casos más cercanos a los extremos de las series temporales analizadas.

Finalmente, los registros son modificados sumando este error controlado al valor original de la variable  $T$  en la base de datos, según la Ecuación 4.2.

$$T^* = T + E_{iT} \quad (4.2)$$

donde  $T^*$  es el valor de temperatura “erróneo” (máxima, mínima o media) al que posteriormente se le aplicarán los diferentes tests de validación. De esta forma el valor original de  $T$  se verá modificado aumentando o disminuyendo según el signo de  $r_i$ , ya que esta nueva variable toma valores en el rango  $\pm 3.5$ .

Los resultados de la aplicación de los diferentes tests al conjunto de datos “alterado” con estos errores se muestran en términos de porcentaje de errores que ha sido correctamente identificado, en función de la magnitud del error introducido. El porcentaje de errores reales no identificados (Tipo II) resultaría de restar 100 al porcentaje de errores correctamente detectados. En la Tabla 36 se muestran los resultados de este análisis para la estación de Córdoba situada en el valle del Guadalquivir, para la variable temperatura máxima.

Tabla 36. Porcentaje de errores introducidos en los registros de temperatura máxima diaria en la estación de Córdoba que ha sido detectado por cada uno de los tests, en función de la magnitud del error.

Magnitud relativa del error (r)	Test Rango Dinámico	Test Consistencia Temporal	Test Persistencia	Test Coherencia Espacial	% Total marcado
$r \leq -3.0$	50.00	95.00	0.00	100.00	100.00
$-3.0 < r \leq -2.5$	47.69	61.54	0.00	92.31	92.31
$-2.5 < r \leq -2.0$	30.00	50.00	0.00	100.00	100.00
$-2.0 < r \leq -1.5$	7.14	28.57	0.00	91.86	91.86
$-1.5 < r \leq -1.0$	0.00	5.56	0.00	84.44	84.44
$-1.0 < r \leq -0.5$	0.00	7.69	0.00	38.46	38.46
$-0.5 < r \leq 0.0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$0.0 < r \leq 0.5$	0.00	6.67	0.00	13.33	13.33
$0.5 < r \leq 1.0$	0.00	25.00	0.00	62.50	62.50
$1.0 < r \leq 1.5$	5.88	5.88	0.00	100.00	100.00
$1.5 < r \leq 2.0$	15.38	15.38	0.00	92.31	92.31
$2.0 < r \leq 2.5$	20.00	53.33	0.00	100.00	100.00
$2.5 < r \leq 3.0$	52.94	88.24	0.00	94.12	94.12
$r > 3.0$	70.59	76.47	0.00	94.12	94.12
<b>Total</b>	<b>18.92</b>	<b>37.39</b>	<b>0.00</b>	<b>75.68</b>	<b>75.68</b>

Se puede apreciar en esta tabla que ninguno de los tests fue capaz de identificar errores entre  $-0.5 < r < 0.0$ ; sin embargo, todos los tests resultaron más eficaces conforme la magnitud del error fue aumentando, a excepción del test de persistencia. Este test no detectó ningún error, lo cual implica que un error introducido aleatoriamente en el conjunto de datos diarios no tuvo el suficiente peso como para modificar las desviaciones típicas mensuales y no pudo ser detectado cuando se aplicó este procedimiento. Esto ocurre debido a la escasa longitud de las series temporales disponibles en esta red. El test de coherencia espacial fue el que más errores detectó (75.68%), seguido del de consistencia temporal (37.39%) y el de rango dinámico (18.92%). La combinación de todos los tests juntos identificaron un total del 75.68% de los errores introducidos. Por lo general, los errores que son identificados por los tests de rango dinámico y de consistencia temporal fueron un subconjunto de los errores detectados por el de coherencia espacial.

En la Tabla 37 se muestran los resultados obtenidos para la estación de Cádiar (Granada), donde se puede apreciar un comportamiento parecido a la anterior. El test más eficaz fue nuevamente el de coherencia espacial, aunque en menor cuantía que en la estación de Córdoba, si bien no consiguió identificar ningún error en el rango  $-0.5 < r < 1.0$ . Todos los tests, en general, mostraron una eficacia superior a medida que la magnitud del error fue aumentando, a excepción del de persistencia que resultó completamente ineficaz.

Tabla 37. Porcentaje de errores introducidos en los registros de temperatura máxima en la estación de Cádiar (Granada) que ha sido identificado por cada uno de los tests, en función de la magnitud del error.

Magnitud relativa del error (r)	Test Rango Dinámico	Test Consistencia Temporal	Test Persistencia	Test Coherencia Espacial	% Total marcado
$r \leq -3.0$	71.43	85.71	0.00	92.86	92.86
$-3.0 < r \leq -2.5$	35.29	82.35	0.00	88.24	88.24
$-2.5 < r \leq -2.0$	27.78	44.44	0.00	100.00	100.00
$-2.0 < r \leq -1.5$	7.14	28.57	0.00	85.71	85.71
$-1.5 < r \leq -1.0$	0.00	38.46	0.00	61.54	61.54
$-1.0 < r \leq -0.5$	0.00	5.56	0.00	5.56	5.56
$-0.5 < r \leq 0.0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$0.0 < r \leq 0.5$	0.00	16.67	0.00	0.00	0.00
$0.5 < r \leq 1.0$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$1.0 < r \leq 1.5$	11.11	11.11	0.00	33.33	33.33
$1.5 < r \leq 2.0$	18.75	37.50	0.00	43.75	43.75
$2.0 < r \leq 2.5$	23.08	53.85	0.00	61.54	61.54
$2.5 < r \leq 3.0$	36.36	90.91	0.00	81.82	90.91
$r > 3.0$	56.25	75.00	0.00	81.25	81.25
<b>Total</b>	20.90	40.80	0.00	53.23	53.23

En términos generales, el resto de estaciones tuvieron resultados similares en relación a la eficacia de los diferentes tests aplicados. El test de coherencia espacial es el procedimiento de validación que más errores identificó, seguido del de consistencia temporal y, por último, del de rango dinámico. El test de persistencia no consiguió detectar ningún error introducido de forma controlada debido a las causas comentadas anteriormente. Por otro lado, en aquellas estaciones rodeadas de un menor número de estaciones con un régimen térmico similar, como el caso de Cádiar (Granada), el test de coherencia espacial mostró una eficacia menor. Por el contrario, en estaciones situadas en zonas climatológicamente más homogéneas (p.ej. el valle del Guadalquivir), rodeadas de varias estaciones con un comportamiento térmico parecido, se obtuvieron mejores resultados en la aplicación del test de coherencia espacial. Los resultados obtenidos por Hubbard et al. (2005) fueron muy similares. Incluso el test de persistencia, pese a que estos autores emplearon una serie temporal de 30 años, fue poco eficiente, pues tan sólo detectó un 1% de los errores introducidos en una de las estaciones.

### 4.7.3. Conclusiones

El estudio de los errores Tipo I y Tipo II resultó esencial para evaluar el desarrollo y la capacidad de los diferentes procedimientos de validación que se aplican a los registros de temperatura máxima, mínima y media. Se ha realizado

un análisis del comportamiento de cada una de las estaciones meteorológicas de la RIAA en relación a los diferentes tests diseñados en el Apartado 2.6.6.

Los resultados muestran un comportamiento similar en cuanto a errores Tipo I en estaciones con diferente clima, aunque existen algunas diferencias dependiendo de la variable analizada. En términos generales, el uso de un factor  $f=3.0$  garantiza un número de errores Tipo I por debajo del 2% en todos los tests, si bien lo más adecuado para una región tan extensa y heterogénea como Andalucía sería prefijar un porcentaje de errores Tipo I tolerable para nuestras aplicaciones, y definir un valor  $f$  específico para cada estación meteorológica.

En relación a los errores Tipo II, y a la vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que los errores introducidos de forma controlada cercanos a cero no fueron detectados, por lo general, por ninguno de los tests; pero a medida que la magnitud del error aumentó, también lo hizo la eficacia de los diferentes procedimientos de validación. Para errores de gran magnitud (comparable al uso de un valor de  $f$  mayor que 2.0), el test de coherencia espacial fue capaz de identificar entre el 90-100% de los errores introducidos para las tres variables analizadas, en todas las estaciones meteorológicas. Por el contrario, el test de persistencia se mostró totalmente ineficaz a la hora de detectar este tipo de errores.

# Capítulo 5. Análisis de sensibilidad de la ecuación estandarizada para el cálculo de la $ET_0$ (ASCE-Penman-Monteith) a escala diaria

## 5.1. Introducción

La cuantificación precisa de la evapotranspiración de los cultivos ( $ET_C$ ) en la agricultura de regadío resulta crucial para la optimización de la producción, la planificación de los recursos hídricos y el manejo eficiente del riego. El procedimiento más común para la estimación de la  $ET_C$  es el basado en el producto de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) por un determinado coeficiente de cultivo ( $K_C$ ), de acuerdo con la ecuación:

$$ET_C = K_C \cdot ET_0 \quad (5.1)$$

El coeficiente  $K_C$  representa aquellas características que diferencian el cultivo cuya  $ET_C$  se pretende estimar de la superficie de referencia (cultivo herbáceo ideal definido en el apartado 1.4). Estas características diferenciales entre el cultivo y la superficie de referencia son la altura del cultivo, el albedo de la cubierta, el área foliar, el área expuesta de suelo desnudo, el método de riego y las prácticas en el manejo del cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1977). El término  $ET_C$  hace referencia a la evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones estándar. Ésta es la correspondiente a la cubierta vegetal de un cultivo libre de enfermedades, bajo condiciones óptimas de suministro de agua, con un adecuado suministro de nutrientes y en extensas superficies, de tal forma que se obtenga la máxima producción bajo unas condiciones climáticas dadas.



Por tanto, la  $ET_0$  es una de las variables hidrológicas más necesarias para la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos y la aplicación de las técnicas de programación de riegos basadas en el modelo de balance de agua en el suelo. La  $ET_0$  es una medida de la demanda evaporativa de la atmósfera en un lugar específico y en un determinado momento, independiente del tipo de cultivo, de su fase de desarrollo, del tipo de suelo y de las prácticas de manejo empleadas. Solamente los factores climáticos afectan a su determinación. Por esta razón, este parámetro se puede estimar exclusivamente a partir de datos meteorológicos (Allen et al., 1998). Recientemente, el “ASCE Evapotranspiration in Irrigation and Hydrology Committee” estableció una estandarización del cálculo de la  $ET_0$  (ASCE-EWRI, 2005). En base diaria, esta ecuación es idéntica a la ecuación de Penman-Monteith recomendada por la FAO en su Manual de Riego y Drenaje n° 56 (Allen et al., 1998).

Algunas de las ventajas de utilizar esta ecuación estandarizada son la extensión de una metodología para el uso y evaluación de datos de  $ET_0$  (Allen et al., 2000; Walter et al., 2000) y la posibilidad de aumentar la capacidad de transferencia de coeficientes de cultivo en diferentes condiciones (ASCE-EWRI, 2005). Recientes trabajos concluyen que la metodología empleada en el procedimiento estandarizado ASCE-PM, tanto en base horaria como diaria, proporciona una base consistente para analizar objetivamente el desarrollo relativo de la evapotranspiración de referencia sobre una gran variedad de condiciones climáticas (Itenfisu et al., 2003; Gavilán et al., 2008).

El análisis de sensibilidad resulta de gran interés para el conocimiento de la importancia relativa de las diferentes variables meteorológicas sobre la  $ET_0$  (Irmak et al., 2006). La sensibilidad de la ecuación estandarizada ASCE Penman-Monteith para la  $ET_0$  no ha sido estudiada en las condiciones climáticas del sur de España. En el presente capítulo se aborda uno de los objetivos planteados en esta Tesis. Se trata de cuantificar el efecto de los errores en las medidas de las variables meteorológicas sobre la estimación de la  $ET_0$ . Por definición, un análisis de sensibilidad determina cuantitativamente las variaciones de un factor con respecto a otro (McCuen, 1973). Este análisis de sensibilidad debe ser realizado para todas las estaciones meteorológicas de la Red de Información Agroclimática de Andalucía y han de determinarse los coeficientes de sensibilidad para cada una de las variables. Existen otros trabajos en la bibliografía donde se han realizado estudios de sensibilidad de esta misma ecuación respecto a variables climatológicas estimadas, como el déficit de presión de vapor (Irmak et al., 2006), y de otras ecuaciones de evapotranspiración respecto a otras variables como la radiación neta (Saxton, 1975), el punto de rocío (Ley et al., 1994a), la temperatura de bulbo húmedo (Piper, 1989) o parámetros característicos de varios cultivos analizados (Rana y

Katerji, 1998). Beven (1979) realizó un análisis de sensibilidad de la evapotranspiración estimada según Penman-Monteith respecto a variables climáticas y a parámetros como las resistencias aerodinámica y de la cubierta. En este trabajo se ha realizado un análisis de sensibilidad de la  $ET_0$  considerando las variables medidas directamente por los sensores (temperatura y humedad relativa del aire, velocidad de viento y radiación solar), con el objetivo de estudiar cómo afectan a la estimación de la  $ET_0$  los errores en las medidas de estas variables, y por tanto, al cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos.

## **5.2. Materiales y Métodos**

### **5.2.1. Datos analizados**

El conjunto de datos utilizado para el presente análisis ha sido obtenido de la base de datos diaria de la RIAA, desde el año 1999 hasta el año 2006 inclusive. Las estaciones meteorológicas cuya serie temporal fue menor de tres años completos no se han tenido en cuenta para este estudio, de forma que las que han sido recientemente implantadas o las que ya no están operativas no se han considerado en el análisis. El conjunto de datos utilizado en el presente estudio de sensibilidad fue validado aplicando los diferentes tests descritos en los Capítulos 2 y 3, y cuyos resultados se han presentado en el Capítulo 4. Considerando la longitud de la serie temporal de cada estación (Tabla 2) y las lagunas de datos existentes (Tabla 19) se seleccionaron finalmente un total de 87 estaciones. Después de aplicar los diferentes mecanismos de control de calidad, se obtuvieron los valores medios mensuales de las diferentes variables meteorológicas que han sido utilizadas en el presente estudio. Estos valores junto con los promedios mensuales de la precipitación y la  $ET_0$  de cada estación se detallan en la Tabla 41 del Anejo I. Las estimaciones de  $ET_0$  se obtuvieron utilizando sólo los datos meteorológicos validados.

Un análisis de sensibilidad realizado para 87 estaciones situadas en distintas zonas regables del sur de España se plantea como una oportunidad única para el estudio cuantitativo de los efectos producidos por cada variable meteorológica en las estimaciones de  $ET_0$  y la evolución de los coeficientes de sensibilidad en diferentes condiciones climáticas.

### 5.2.2. Ecuación estandarizada para el cálculo de $ET_0$ según ASCE-Penman-Monteith (ASCE-PM)

Para el cómputo diario de la  $ET_0$  sobre una superficie de gramíneas, se utiliza una altura de 0.12 m y una resistencia de la cubierta ( $r_s$ ) de  $70 \text{ m s}^{-1}$ , idénticos parámetros que los empleados en la ecuación de Penman-Monteith en la versión FAO56. La ecuación estandarizada ASCE-PM adopta la forma:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} Vv(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d Vv)} \quad (5.2)$$

donde

$ET_0$  = evapotranspiración de referencia diaria ( $\text{mm d}^{-1}$ ),

$\Delta$  = pendiente de la curva de presión de vapor en saturación frente a la temperatura ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),

$R_n$  = radiación neta diaria ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), calculada como la diferencia entre la radiación neta de onda corta incidente ( $R_{ns}$ ), utilizando un albedo=0.23, y la radiación neta de onda larga saliente ( $R_{nl}$ ),

$G$  = flujo de calor hacia el suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ),

$T$  = temperatura media diaria del aire medida a 1.5 m de altura ( $^\circ\text{C}$ ),

$Vv$  = velocidad media diaria del viento medida a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),

$e_s$  = presión de vapor en saturación ( $\text{kPa}$ ), calculada como la presión media de vapor en saturación para temperaturas máxima y mínima,

$e_a$  = presión de vapor ( $\text{kPa}$ ), calculada a partir de la humedad relativa diaria y su correspondiente temperatura del aire,

$\gamma$  = constante sicrométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),

$C_n$  = constante del numerador, que adopta un valor para la superficie de referencia de gramíneas de 900 ( $\text{K mm s}^3 \text{ Mg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ),

$C_d$  = constante del denominador, que adopta un valor de 0.34 para el cálculo diario ( $\text{s m}^{-1}$ ).

Las unidades para el coeficiente 0.408 son  $m^2 \text{ mm MJ}^{-1}$ . Los valores de  $C_n$  y  $C_d$  se comentan ampliamente en Walter et al. (2001), Itenfisu et al. (2003) y ASCE-EWRI (2005). Todos los cálculos de las variables diarias ( $R_n$ ,  $e_s$ ,  $e_a$ ) fueron realizados siguiendo el Manual de Riego y Drenaje FAO-56 (Allen et al., 1998) y ASCE-EWRI (2005). Además, las constantes y parámetros utilizados en los cálculos fueron tomadas de las fuentes descritas. Para la estimación de  $e_a$  y  $e_s$  se utilizaron los valores medidos de  $HR_{\max}$ ,  $HR_{\min}$ ,  $T_{\max}$  y  $T_{\min}$ . La constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ ) para el cálculo de la radiación de onda larga ( $R_{nl}$ ) tomó un valor de  $4.901 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . El valor del calor específico ( $c_p$ ) del aire húmedo a presión constante tomó un valor promedio de  $1.01310^{-13} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . El calor latente de vaporización ( $\lambda$ ) tomó un valor de  $2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$ . La constante sicrométrica ( $\gamma$ ) fue estimada como una función de la presión atmosférica,  $\lambda$ ,  $c_p$  y el cociente entre el peso molecular del vapor de agua y el aire seco ( $\varepsilon=0.622$ ). La presión atmosférica se calculó en función de la elevación de cada estación meteorológica y el flujo de calor hacia el suelo ( $G$ ) se consideró cero en base diaria.

### 5.2.3. Análisis y coeficientes de sensibilidad

Debido a las diferentes aproximaciones utilizadas para la estimación de la  $ET_0$ , existen diferentes definiciones de los coeficientes de sensibilidad y diferentes formas de llevar a cabo un análisis de sensibilidad de las ecuaciones de  $ET_0$  (Gong, et al., 2006). La bibliografía revisada revela que no existe un procedimiento estándar para el cálculo de los coeficientes de sensibilidad de las variables meteorológicas (Irmak et al., 2006).

McCuen (1974) fue uno de los primeros investigadores en estudiar la sensibilidad en modelos de evaporación. En su trabajo, que fue continuado posteriormente por Beven (1979), los coeficientes de sensibilidad adimensionales vienen definidos matemáticamente según la ecuación:

$$S_i = \frac{\partial ET_0}{\partial V_i} \frac{V_i}{ET_0} \quad (5.3)$$

donde  $S_i$  representa la variación en la variable  $V_i$  (temperatura, radiación solar, humedad relativa o velocidad de viento en el presente trabajo) que es transmitida a la variación de  $ET_0$ . Estos coeficientes relativos son sensibles a los valores de  $V_i$  y  $ET_0$ . Coeficientes de sensibilidad ( $S_i$ ) positivos o negativos de una variable  $V_i$  indican que la  $ET_0$  aumentará o disminuirá respectivamente, con respecto a los incrementos de  $V_i$ . Aquellos coeficientes más elevados provocarán

un efecto de mayor magnitud en las estimaciones de la  $ET_0$ . Además de McCuen (1974) y Beven (1979) son diversos los autores que han empleado también esta metodología para caracterizar la sensibilidad (Saxton, 1975; Coleman y DeCoursey, 1976; Camillo y Gurney, 1984; Piper, 1989; Meyer et al., 1989; Rana y Katerji, 1998), aunque no todos utilizaron las mismas variables  $V_i$  ni las mismas ecuaciones.

Como base para el desarrollo de este análisis, se han calculado los coeficientes de sensibilidad para cada mes del año, de forma que cada uno de ellos es el resultado de promediar siete coeficientes, correspondientes a los siete años utilizados en este estudio, de 2000 a 2006 ambos años incluidos. Trabajos recientes como el llevado a cabo por Irmak et al. (2006) utilizaron una serie temporal de tres años de datos y solamente siete estaciones meteorológicas. El presente trabajo se plantea como un estudio lo suficientemente amplio temporal y geográficamente para caracterizar la sensibilidad de la  $ET_0$  con respecto a las variables meteorológicas en el Sur de España.

#### 5.2.4. Simulación e introducción de errores

Los errores aleatorios y sistemáticos, inherentes a cualquier medida meteorológica, afectan a los valores de las variables empleadas en la estimación de la  $ET_0$ . En este trabajo se han realizado una serie de simulaciones para estudiar el efecto de estos errores en los valores de la  $ET_0$  diaria a lo largo del año. Las alteraciones de los datos meteorológicos consistieron en añadir errores sistemáticos y aleatorios a los datos originales, de acuerdo con la expresión:

$$X_{iE} = X_{iO} + x_{iSE} + x_{iRE} \quad (5.4)$$

donde

$X_{iE}$  = valor de una de las variables de entrada (temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad de viento o radiación solar) medida el día  $i$  una vez introducido el error,

$X_{iO}$  = valor original o medido de la variable citada el día  $i$ ,

$x_{iSE}$  = error sistemático en el día  $i$ ,

$x_{iRE}$  = error aleatorio en el día  $i$ .

Los errores sistemáticos y aleatorios se han analizado de forma independiente introduciéndolos en cada una de las variables de entrada. El error sistemático es una desviación consistente positiva o negativa, que puede ser debida a una calibración incorrecta del sensor o al uso de coeficientes de calibración inadecuados (Ley et al., 1994a). Los errores aleatorios son desviaciones positivas o negativas de valores reales que ocurren por azar. Para la introducción de estos errores aleatorios se utilizó el método de Monte Carlo (Camillo y Gurney, 1984; Ley et al., 1994a). Posteriormente, se realizaron una serie de simulaciones con cada variable meteorológica para determinar el efecto de estos errores sobre los valores de la  $ET_0$  durante las diferentes estaciones del año.

La magnitud de estos errores debe ser meteorológicamente consistente y su determinación resulta crucial para este tipo de análisis. Por ejemplo, no es comparable el efecto producido por variaciones de  $1^\circ\text{C}$  de la temperatura del aire con variaciones de  $1\text{ m/s}$  de la velocidad del viento. Del mismo modo, no se pueden comparar el efecto de idénticas variaciones de la humedad relativa del aire y la radiación solar. Trabajos recientes como el de Irmak et al. (2006) emplean incrementos arbitrarios para cada variable ( $5^\circ\text{C}$  para la temperatura o  $4\text{ MJ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$  para la radiación solar). Es importante establecer un mecanismo que permita tener en cuenta el rango de variación de cada variable en los diferentes periodos de tiempo, para que los efectos obtenidos en la  $ET_0$  sean meteorológica y temporalmente consistentes. Los ratios de error fueron definidos como el cociente entre la cantidad de error (sistemático o aleatorio) y la desviación estándar ( $\sigma_X$ ) de la variable meteorológica medida en un período de tiempo determinado (Meyer et al., 1989). Estos ratios fueron utilizados para determinar la sensibilidad del modelo con respecto a los errores en los datos meteorológicos y permiten comparar directamente los efectos de estas variaciones en la estimación de la  $ET_0$ , ya que los errores introducidos en las diferentes variables meteorológicas varían de forma homogénea. Se evaluaron errores sistemáticos ( $x_{iSE}/\sigma_X$ ) iguales a  $\pm 1.0$ ,  $\pm 0.8$ ,  $\pm 0.6$ ,  $\pm 0.4$  y  $\pm 0.2$  para simular las desviaciones meteorológicas tanto positivas como negativas. Debido a la simetría en los resultados solamente se analizaron los errores aleatorios positivos ( $x_{iRE}/\sigma_X$ ), correspondientes a los ratios de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0.

Los estadísticos empleados para evaluar los efectos de los dos tipos de errores fueron el BIAS para los errores sistemáticos (Ecuación 5.5) y el error estándar de la estimación (SEE) para errores aleatorios (Ecuación 5.6). Estos mismos estadísticos han sido empleados por diversos autores en trabajos de este tipo (Ley et al., 1994a; Ley et al., 1994b; Meyer et al., 1989).

$$BIAS = \overline{ET_{0_{ERROR}}} - \overline{ET_{0_{ORIGINAL}}} \quad (5.5)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (ET_{0_{ERROR}} - ET_{0_{ORIGINAL}})^2}{n - 2}} \quad (5.6)$$

donde

$\overline{ET_{0_{ERROR}}}$  = valor medio de la evapotranspiración de referencia estimada después de introducir los errores,

$\overline{ET_{0_{ORIGINAL}}}$  = valor medio de la evapotranspiración de referencia estimada a partir de los datos originales,

n = número de días evaluados.

Los dos grados de libertad fueron eliminados en la Ecuación 5.6 para hacer del SEE un estimador no sesgado (Ley et al., 1994a).

Los errores sistemáticos y aleatorios se introdujeron en todas las variables de entrada cuyos registros son medidos por los sensores instalados en las estaciones meteorológicas. Por ejemplo, los errores en la temperatura afectaron a los valores de las temperaturas máxima y mínima (la media es la semisuma diaria de éstas). Esta hipótesis asume que cuando el sensor de temperatura no realiza las medidas correctamente, su descalibración o falta de funcionalidad afectan a todas las variables de temperatura.

### 5.3. Resultados y Discusión

En las Figuras 45 y 46 se muestran las desviaciones medias trimestrales de  $ET_0$  después de introducir los errores sistemáticos y aleatorios en las distintas variables meteorológicas. En estas figuras se muestran los resultados medios obtenidos a partir de los valores del BIAS y el SEE de cada una de las estaciones. Así, “EFM” corresponde a los meses de Enero, Febrero y Marzo (Figuras 45a y b), “AMJ” a los meses de Abril, Mayo y Junio (Figuras 45c y d), “JAS” a los meses de Julio, Agosto y Septiembre (Figuras 46a y b), y “OND” a los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre (Figuras 46c y d). Los puntos marcados en estas figuras corresponden al promedio de errores en la  $ET_0$  (BIAS o SEE) expresado como el porcentaje de la  $ET_0$  diaria de toda la red para el

periodo de tiempo definido y para cada ratio de error. Las líneas que conectan los puntos se han incluido para facilitar el análisis visual y no implican ningún tipo de regresión, aunque se observa una tendencia lineal evidente en todos los casos que se representan.

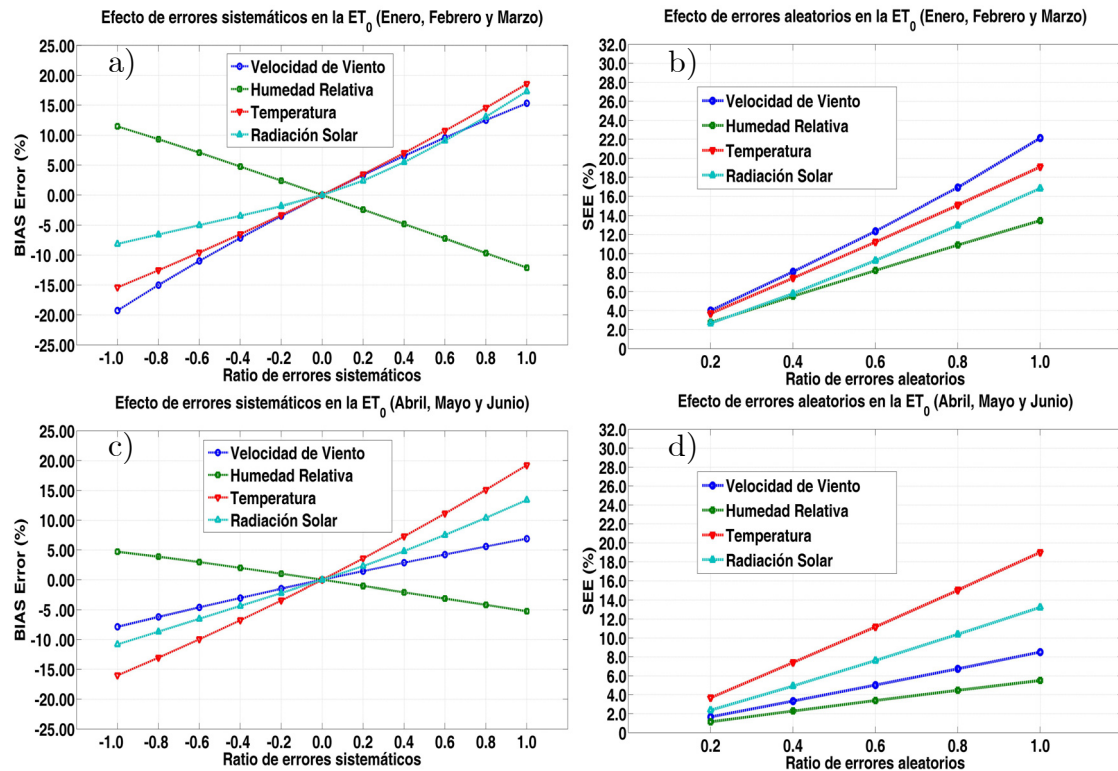


Figura 45. Sensibilidad de la ecuación de la  $ET_0$  (ASCE-PM) a los errores sistemáticos (a y c) y aleatorios (b y d) introducidos en las variables meteorológicas para los meses de Enero, Febrero, Marzo (a y b) y para Abril, Mayo, Junio (c y d).

En todos los períodos de tiempo analizados, los errores sistemáticos positivos en las medidas de temperatura, radiación solar y velocidad del viento produjeron una sobreestimación de los valores de  $ET_0$ , dando como resultado desviaciones (BIAS) positivas (Figuras 45a y c, 46a y c). En cambio, estos mismos errores en las medidas de humedad relativa produjeron desviaciones negativas, subestimando los valores de  $ET_0$ . Según los resultados obtenidos, la ecuación de  $ET_0$  fue más sensible a los errores sistemáticos de la temperatura durante los meses comprendidos entre Enero y Septiembre (Figuras 45a, 45c y 46a), mientras que para los meses de Octubre a Diciembre esta ecuación fue más sensible a los errores en la velocidad del viento (Figura 46c). Se observa así mismo en las Figuras 45a y 46c que errores sistemáticos en la medida de la humedad relativa tuvieron el mismo efecto desde Octubre hasta Marzo



(aproximadamente igual a  $\pm 12\%$  para ratios de error iguales  $\pm 1.0$ ), siendo menor el efecto desde Abril hasta Septiembre (alrededor de un  $\pm 5\%$  para ratios de  $\pm 1.0$ ), (Figuras 45c y 46a).

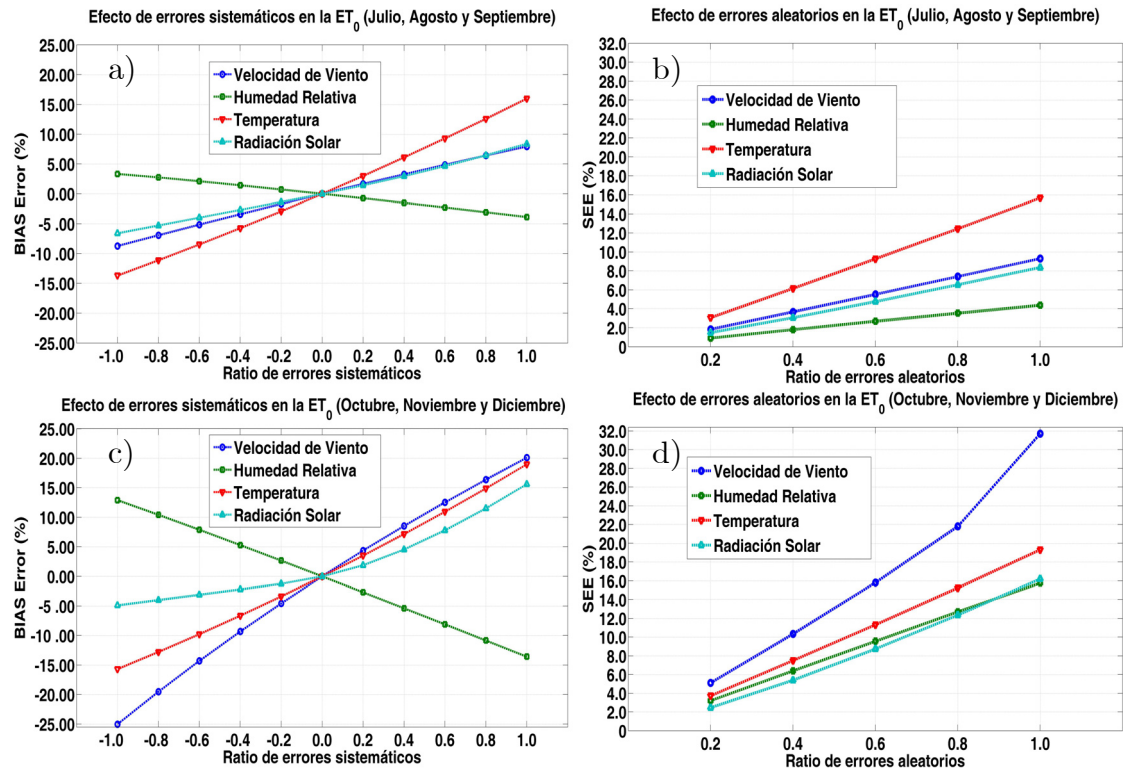


Figura 46. Sensibilidad de la ecuación de la  $ET_0$  (ASCE-PM) a los errores sistemáticos (a y c) y a los errores aleatorios (b y d) introducidos en las variables meteorológicas para los meses de Julio, Agosto, Septiembre (a y b) y para Octubre, Noviembre y Diciembre (c y d)

En la Figura 46d se aprecia que los errores aleatorios añadidos a los datos de velocidad del viento son los que más contribuyeron a aumentar los valores de  $ET_0$  desde octubre hasta Diciembre, con un SEE igual al 32% para un ratio de error de 1.0. La ecuación ASCE-PM fue menos sensible a los errores aleatorios introducidos en la radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa desde Enero hasta Septiembre. Finalmente, los errores sistemáticos y aleatorios introducidos en la variable temperatura proporcionaron aproximadamente el mismo porcentaje de error durante cualquiera de los períodos de tiempo analizados.

En la Tabla 38 se muestran los coeficientes de sensibilidad máximo, mínimo y medio, calculados según la Ecuación 5.3 para las diferentes variables

meteorológicas para cada uno de los dos tipos de errores introducidos. El coeficiente de variación, que viene dada en la última columna, representa el grado de variabilidad entre las diferentes estaciones meteorológicas analizadas y los doce meses del año.

Tabla 38. Coeficientes de sensibilidad mensuales máximo, mínimo y medio de las variables meteorológicas  $T$ ,  $Rs$ ,  $Vv$  y  $HR$  para cada uno de los errores introducidos

	<b>Tipo de Error</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Media</b>	<b>Coef. Variación</b>
<b>T</b>	<b>Sistemático</b>	1.53	0.24	0.93	0.34
	<b>Aleatorio</b>	1.81	0.27	1.01	0.33
<b>Rs</b>	<b>Sistemático</b>	0.73	0.01	0.42	0.35
	<b>Aleatorio</b>	0.92	0.21	0.55	0.20
<b>Vv</b>	<b>Sistemático</b>	0.60	0.03	0.29	0.34
	<b>Aleatorio</b>	1.31	0.04	0.36	0.44
<b>HR</b>	<b>Sistemático</b>	-1.68	-0.01	-0.49	0.73
	<b>Aleatorio</b>	-1.56	-0.03	-0.57	0.73

Para la temperatura, el coeficiente de sensibilidad mensual más alto se obtuvo en la estación de Guillena (Sevilla), con un valor de 1.53 en el mes de Agosto para los errores sistemáticos. Para los errores aleatorios el coeficiente fue mayor aún (1.81) y se obtuvo en la estación de Carmona-Tomejil (Sevilla), también en el mes de Agosto. Por tanto, el mayor efecto en la  $ET_0$  que producen los incrementos de temperatura se dio en el mes de Agosto pese a que estas dos estaciones registraron sus temperaturas máximas mensuales en el mes de Julio (Tabla 41). Los coeficientes más bajos para esta misma variable se obtuvieron en la estación de La Puebla de Don Fadrique (Granada) durante el mes de Enero, con valores iguales de 0.24 y 0.27 para errores sistemáticos y aleatorios respectivamente. Esta estación, situada a 1212 m de altitud se caracteriza por registrar temperaturas muy bajas con un valor medio de 3.7 °C en el mes de Enero. El valor medio anual del coeficiente de sensibilidad para la temperatura fue de 0.93 para los errores sistemáticos y de 1.01 para errores aleatorios, siendo éstos los coeficientes medios más elevados obtenidos en este estudio. Por tanto, la temperatura es la variable que anualmente afecta en mayor proporción a la  $ET_0$ . El coeficiente de sensibilidad máximo obtenido para la radiación solar se dio en la estación de Almuñecar (Granada), con un valor de 0.73 en el mes de Julio y 0.92 en el mes de Mayo, para errores sistemáticos y aleatorios respectivamente. Por el contrario, los coeficientes más bajos para esta variable se dieron en los meses de Diciembre y Enero, en las estaciones de Linares (Jaén) y Vejer de la Frontera (Cádiz) con unos valores de 0.01 (errores sistemáticos) y 0.21 (errores aleatorios) respectivamente. Se observa que, al igual que para la temperatura, los coeficientes más elevados se dan en los meses de primavera-verano y los más bajos en otoño-invierno. A escala anual, la humedad relativa resultó ser la segunda variable que más efecto produjo en las estimaciones de  $ET_0$ , seguida de la radiación solar y la velocidad del viento, por este orden. Para

la velocidad del viento los mayores coeficientes se obtuvieron en el mes de Diciembre, con valores de 0.60 y 1.31 en las estaciones de Huércal-Overa (Almería) y Puebla de Don Fadrique (Granada) para errores sistemáticos y aleatorios, respectivamente. Los coeficientes mínimos para esta misma variable se dieron en la estación de Almuñecar (Granada) para errores sistemáticos en el mes de Agosto (0.03) y en la estación de Moguer (Huelva) para errores aleatorios en el mes de Julio (0.04). Al contrario que en las dos variables anteriores, para la velocidad de viento los coeficientes más altos ocurrieron durante el mes de Diciembre y los más bajos durante los meses de verano. Esta variable resultó ser la menos significativa a escala anual tanto para errores sistemáticos como aleatorios. En relación a la humedad relativa, se ha comprobado previamente (Figuras 45 y 46) que es la única variable estudiada que provoca una disminución en los valores de  $ET_0$  ante desviaciones positivas en la medida de la misma. La estación donde se produjeron los mayores efectos de esta variable fue la de Belmez (Córdoba) con un valor del coeficiente de sensibilidad de -1.68 para errores sistemáticos en el mes de Diciembre. En este mismo mes se obtuvo un coeficiente de -1.56 en la estación de Basurta-Jerez de la Frontera (Cádiz) para errores aleatorios. Por el contrario, los coeficientes mínimos en valor absoluto para esta variable se dieron en los meses de Julio (-0.03) y Agosto (-0.01), en las estaciones de Pinos Puente (Granada) y Alcaudete (Jaén), respectivamente. En términos de variabilidad de los coeficientes en relación a las distintas condiciones climáticas de cada estación a lo largo del año, la humedad relativa fue la variable que presentó mayores coeficientes de variación para ambos tipos de errores. El resto de las variables presentaron valores similares de este estadístico para los coeficientes de sensibilidad derivados a partir de errores sistemáticos. Para el caso de los errores aleatorios, los coeficientes de sensibilidad para la radiación solar fueron los que presentaron menor variabilidad.

Para conocer el comportamiento estacional del efecto de los diferentes errores sobre las estimaciones de  $ET_0$  a escala regional, se han calculado los coeficientes de sensibilidad medios para cada trimestre y cada variable meteorológica, considerando una relación lineal en las Figuras 45 y 46. Como se ha comentado anteriormente, estos coeficientes de sensibilidad son el promedio de los coeficientes calculados para cada una de las estaciones meteorológicas de la red, agrupados en los 4 periodos de tiempo anteriormente descritos. Estos coeficientes de sensibilidad pueden ser empleados para cuantificar la importancia relativa de las diferentes variables meteorológicas en cada periodo de tiempo analizado. Los resultados se muestran en la Tabla 39, donde las cifras entre paréntesis corresponden a los valores de la desviación típica.

Tabla 39. Coeficientes de sensibilidad medios de la ecuación ASCE Penman-Monteith para la estimación de la  $ET_0$  para los diferentes periodos de tiempo analizados. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación típica entre estaciones

Variables	Tipo de Error	Periodo EFM	Periodo AMJ	Periodo JAS	Periodo OND
T	Sistemático	0.58 (0.08)	1.05 (0.07)	1.31 (0.09)	0.79 (0.10)
	Aleatorio	0.66 (0.09)	1.13 (0.09)	1.40 (0.11)	0.88 (0.11)
Rs	Sistematico	0.37 (0.06)	0.54 (0.03)	0.51 (0.07)	0.27 (0.06)
	Aleatorio	0.53 (0.09)	0.62 (0.07)	0.59 (0.08)	0.48 (0.10)
Vv	Sistematico	0.32 (0.04)	0.19 (0.06)	0.25 (0.06)	0.41 (0.06)
	Aleatorio	0.41 (0.11)	0.22 (0.05)	0.28 (0.07)	0.56 (0.10)
HR	Sistematico	-0.71 (0.17)	-0.25 (0.09)	-0.18 (0.10)	-0.85 (0.21)
	Aleatorio	-0.81 (0.20)	-0.27 (0.09)	-0.22 (0.09)	-1.01 (0.24)

Se observa que las variables más significativas para ambos tipos de errores durante los meses de primavera (AMJ) y verano (JAS) fueron la temperatura y la radiación solar, seguidas de la humedad relativa en los meses de primavera y la velocidad de viento durante los meses de verano. Para los meses de otoño (OND) e invierno (EFM), las variables más influyentes fueron la humedad relativa y la temperatura, seguidos de la velocidad de viento durante los meses de otoño y la radiación solar durante los meses de invierno. Se puede observar que los coeficientes para velocidad de viento resultaron ser más bajos durante los meses de primavera y verano y más elevados en los meses de otoño e invierno. Lo contrario ocurrió para la radiación solar y la temperatura. Esto es debido a que durante los meses de invierno el término de radiación en la ecuación de ASCE-PM disminuye a favor del término aerodinámico. Hay que tener en cuenta que los errores simulados en las diferentes variables analizadas tienen diferentes efectos cuando se introducen en los cálculos de la  $ET_0$  (Ecuación 5.2). Así por ejemplo, las temperaturas máxima y mínima afectan al déficit de presión de vapor ( $e_a - e_s$ ), a la radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ ), a la temperatura media ( $T = (T_{max} + T_{min})/2$ ) y a la pendiente de la curva de saturación del vapor de agua ( $\Delta$ ). La radiación solar solamente influye en el cálculo de la radiación neta y por tanto no afecta al término aerodinámico de la  $ET_0$ . Las variables de humedad relativa ( $HR_{max}$  y  $HR_{min}$ ) afectan al cálculo de la presión de vapor ( $e_a$ ) y, por tanto al déficit de presión de vapor, y a la radiación neta de onda larga. Por último, la velocidad de viento solamente afecta al término aerodinámico de la Ecuación 5.2 y es directamente una variable de entrada. En relación a la variabilidad estacional de los coeficientes de sensibilidad entre las diferentes localizaciones analizadas, la humedad relativa resultó ser la variable cuyos efectos obtuvieron mayores diferencias, especialmente en los meses de otoño e invierno. En general, para el resto de variables se obtuvieron unos valores medios de la desviación típica entre 0.04 y 0.11 en cualquiera de los periodos analizados.

Dentro de las diferentes estaciones del año existieron también variaciones de los valores de los coeficientes de sensibilidad. La evolución anual de los valores medios mensuales de estos coeficientes se representa en la Figura 47, donde están dibujados en línea discontinua los coeficientes obtenidos a partir de los errores aleatorios y en trazo continuo los coeficientes de sensibilidad calculados para los errores sistemáticos. Se observa que los coeficientes con mayores fluctuaciones a lo largo del año fueron la temperatura y la humedad relativa. Los coeficientes de sensibilidad para temperatura más bajos se dieron en el mes de Enero para ambos tipos de errores, mientras que los valores máximos se obtuvieron en el mes de Agosto. Se aprecia igualmente que durante todos los meses del año los efectos sobre la  $ET_0$  de los errores aleatorios superaron ligeramente, y prácticamente en la misma cuantía, a los de los errores sistemáticos. La humedad relativa presentó los mayores coeficientes de sensibilidad, en valor absoluto, durante el mes de Diciembre para los dos tipos de errores. Por el contrario, en Julio los efectos de ambos errores fueron más bajos. Desde Abril hasta Septiembre los coeficientes de sensibilidad de los errores aleatorios y sistemáticos para esta variable fueron prácticamente iguales, mientras que en los meses de otoño e invierno existieron pequeñas diferencias, siendo los coeficientes de los errores aleatorios de mayor magnitud, en términos absolutos, que los de los errores sistemáticos. En general, la evolución de los coeficientes de sensibilidad para la temperatura fue creciente desde Enero hasta Agosto, disminuyendo desde este mes hasta Diciembre. Para la humedad relativa ocurrió justamente al contrario, apreciándose que sigue una curva similar pero con valores negativos, con lo cual las variaciones de estos coeficientes fue decreciendo desde Enero hasta Julio, y a partir de este mes fue aumentando hasta Diciembre. Se puede comprobar en la Tabla 41 que, los mínimos de precipitación y humedad relativa se dieron en Julio, fecha en que la temperatura toma su valor mensual más alto. Por el contrario, durante los meses de Diciembre y Enero se dieron las temperaturas más bajas y las condiciones de humedad más elevadas.

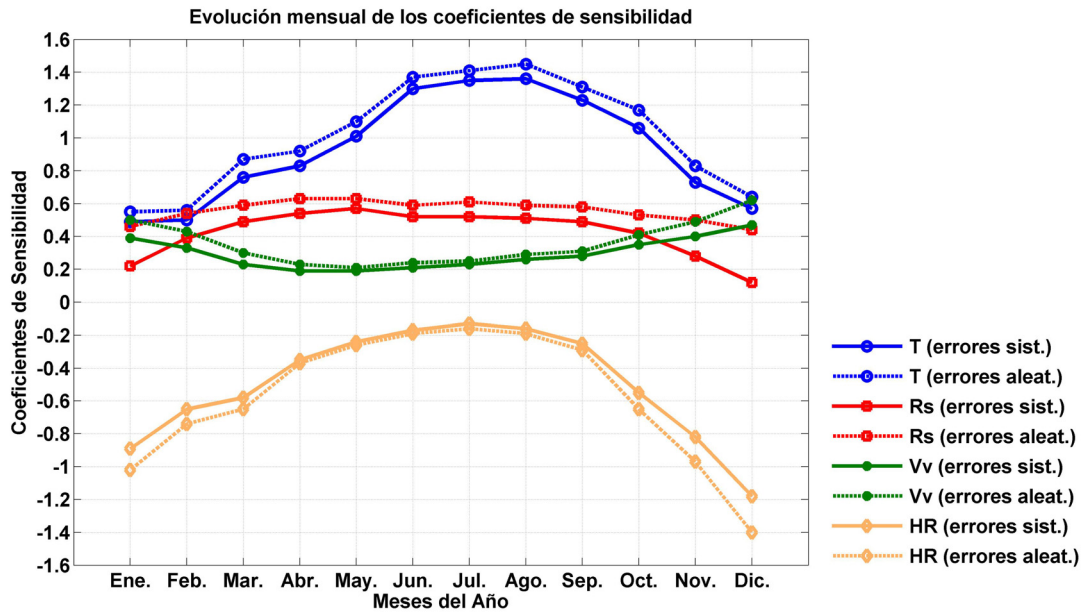


Figura 47. Evolución anual de los coeficientes de sensibilidad medios mensuales para los dos tipos de errores y para las variables meteorológicas: T (Temperatura), Rs (Radiación Solar), Vv (Velocidad de viento) y HR (Humedad Relativa).

En relación a la radiación solar, se aprecia en la Figura 47 que entre los meses de Abril y Septiembre apenas hay variaciones en los valores de los coeficientes de sensibilidad para ambos tipos de errores. Los efectos de los errores aleatorios fueron superiores durante todos los meses del año a los de los errores sistemáticos, registrándose las mayores diferencias durante los meses de Diciembre y Enero, fechas en que los coeficientes de sensibilidad registraron sus valores más bajos. Siendo la radiación solar una variable cuya magnitud sigue una evolución anual fuertemente marcada por el régimen estacional de la posición de la Tierra con respecto al Sol, no se ha observado una relación tan acusada como en los coeficientes obtenidos para la temperatura, aunque los valores más bajos se han registrado durante los meses de menor radiación solar. Por último, los efectos de los errores introducidos en la velocidad del viento (los de menor magnitud en general) tuvieron una evolución decreciente desde Enero hasta Mayo, siguiendo posteriormente un curso ascendente hasta el mes de Diciembre. Las diferencias para esta variable de los coeficientes de sensibilidad de ambos tipos de errores fueron mayores durante los meses de Diciembre y Enero, siendo prácticamente nulas durante los meses de primavera y verano. A pesar de que la velocidad de viento es una variable cuyos valores medios mensuales para toda la red no son muy fluctuantes a lo largo del año, variando desde 1.6 hasta 1.9  $m s^{-1}$  (Tabla 41), sus coeficientes de sensibilidad resultaron ser, aunque en menor proporción que para la temperatura o la humedad

relativa, mayores durante los meses de otoño-invierno que durante los de primavera-verano.

La distribución espacial de los coeficientes de sensibilidad para los errores sistemáticos durante los meses de primavera (AMJ) se muestra en la Figura 49. Se observa que en este periodo de tiempo, la  $ET_0$  fue más sensible a la temperatura en las estaciones situadas en el valle del Guadalquivir (Figura 49a), donde todos los coeficientes fueron mayores que 1, con un máximo de 1.14 en la estación de Guillena (Sevilla), situada a 35 m de altitud. En las estaciones de mayor cota se obtuvieron los coeficientes de sensibilidad más bajos, con unos valores de 0.81, 0.85 y 0.86 en las estaciones de Zafarraya (905 m), Puebla de Don Fadrique (1110 m) y Jerez del Marquesado (1212 m) en Granada, respectivamente. La variable meteorológica para la cual se obtuvieron unos resultados más homogéneos en toda la red fue la radiación solar (Figura 49b), registrándose un máximo de 0.70 en Almuñecar (Granada) y un mínimo de 0.36 en la estación de Huesa (Jaén). En general, en la mayoría de las estaciones se obtuvieron coeficientes similares para esta variable, variando entre 0.4 y 0.6. En la Figura 49c se han representado los coeficientes de sensibilidad para la velocidad del viento. Se observa que las estaciones de las provincias de Sevilla (Bajo Guadalquivir) y Jaén son las que han registrado valores más elevados, y las de Huelva, Málaga y Granada en las que se han obtenido los coeficientes más bajos. Esta distribución espacial de los coeficientes de sensibilidad de esta variable viene determinada, fundamentalmente por el carácter más o menos ventoso de la propia estación. Se han calculado los valores medios de la velocidad de viento para cada una de las estaciones en el periodo de tiempo analizado y se ha representado frente a los coeficientes de sensibilidad obtenidos. Los resultados se muestran en la Figura 48, donde se observa una correlación entre la velocidad del viento media de cada estación en el periodo analizado y el coeficiente de sensibilidad obtenido.

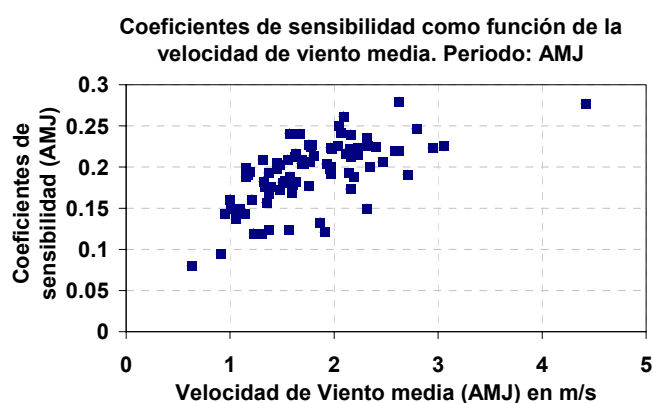


Figura 48. Coeficientes de sensibilidad para errores sistemáticos en la Velocidad de Viento ( $V_v$ ) como función de los valores medios de  $V_v$  (meses de Abril, Mayo y Junio).

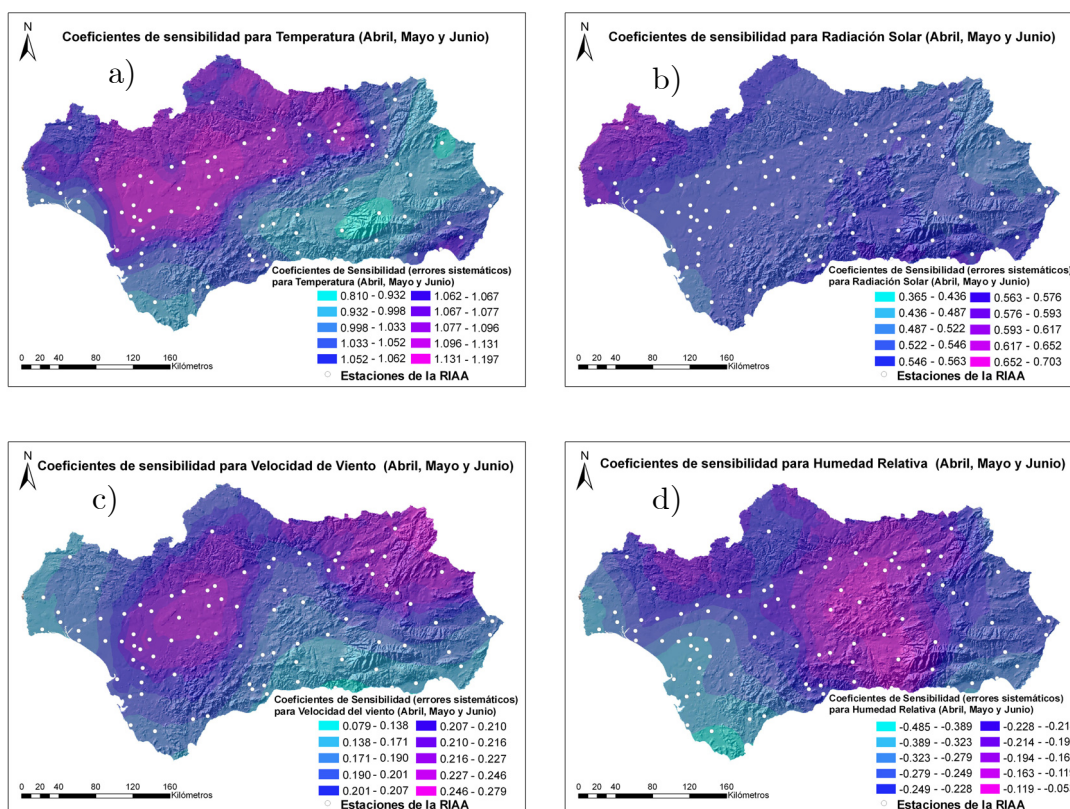


Figura 49. Distribución espacial de los coeficientes de sensibilidad para los errores sistemáticos durante los meses de Abril, Mayo y Junio para temperatura (a), radiación solar (b), velocidad del viento (c) y humedad relativa (d).

Por último en la Figura 49d se han representado los coeficientes de sensibilidad correspondientes a la humedad relativa. El signo negativo indica que las variaciones positivas en los valores de humedad relativa provocaron una disminución en las estimaciones de  $ET_0$ . En valor absoluto, los coeficientes de sensibilidad más elevados se han obtenido en las estaciones situadas en las provincias costeras de Cádiz, Huelva y Almería, con un máximo en Vejer de la Frontera (Cádiz) de -0.48. Los coeficientes más bajos en valor absoluto se han registrado en las estaciones situadas en las provincias de Granada y Jaén, con un mínimo en la estación de Pinos Puente (Granada) de -0.05. Pese a que en las estaciones situadas cerca de la costa de Málaga y Granada no se han obtenido coeficientes tan elevados como en el resto de las provincias costeras, la cercanía al mar o el grado de aridez sí parece tener un efecto en las variaciones que la humedad relativa produce sobre las estimaciones de  $ET_0$ .

En la Tabla 40 se exponen los errores unitarios mensuales para cada variable meteorológica derivados de la introducción de errores sistemáticos, en



las estaciones de Padul (Granada) y Palma del Río (Córdoba). Los errores unitarios son los coeficientes de sensibilidad (adimensionales) pasados a unidades porcentuales de variación de la  $ET_0$  con respecto a la variación unitaria de la variable en cuestión. Así, el error unitario para la variable temperatura (T) viene expresado en  $\%/^{\circ}\text{C}$ , para la radiación solar (Rs) en  $\%/\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , para la velocidad de viento (Vv) en  $\%/m \text{ s}^{-1}$  y la para la humedad relativa (HR) en  $\%/\%$ .

Tabla 40. Errores unitarios para las diferentes variables meteorológicas para las estaciones de Padul (Granada) y Palma del Río (Córdoba), derivados de la introducción de errores sistemáticos.

Estac.		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Padul (GRA)</b>	T	5.74	5.51	6.33	5.54	5.49	4.45	3.92	5.19	5.52	5.89	6.29	6.01
	Rs	4.54	4.36	3.88	2.96	2.89	1.58	1.38	2.66	3.27	3.98	4.27	3.81
	Vv	29.62	22.03	13.47	10.55	10.11	11.31	15.80	18.21	20.65	27.89	33.58	33.07
	HR	-0.84	-0.63	-0.53	-0.30	-0.20	-0.14	-0.10	-0.11	-0.23	-0.50	-0.74	-1.14
<b>Palma del Río (COR)</b>	T	7.61	7.66	7.64	7.09	6.57	6.16	5.85	5.99	6.44	7.47	7.64	8.17
	Rs	2.12	2.65	2.61	2.16	2.06	1.66	1.62	1.77	2.16	2.89	2.66	1.59
	Vv	16.56	17.00	12.28	11.26	13.10	13.44	14.29	17.26	15.63	19.40	19.44	22.65
	HR	-1.51	-1.23	-1.19	-0.70	-0.49	-0.46	-0.40	-0.47	-0.60	-1.01	-1.43	-1.92

A modo de ejemplo, supongamos que se identifican errores sistemáticos en las variables de temperatura, radiación solar y humedad relativa de  $+0.8^{\circ}\text{C}$ ,  $+3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  y  $+15\%$ , respectivamente, durante el mes de Junio. Veamos el efecto de esto mismos errores en dos estaciones meteorológicas de la red. La estación de Palma del Río (Córdoba) situada en el valle de Guadalquivir, a 55 m de altitud y la estación de Padul (Granada), con una cota de 781 m. Multiplicando estos errores sistemáticos por los errores unitarios correspondientes en la estación de Padul (en este caso, 4.45%, 1.58% y -0.14%, respectivamente), los porcentajes de variación de los valores de  $ET_0$  obtenidos serían de 3.56%, 4.74% y -2.1% para la temperatura, la radiación solar y la humedad relativa, respectivamente. Como en Junio la  $ET_0$  media estimada en la estación de Padul fue de  $5.98 \text{ mm d}^{-1}$  (Tabla 41) los errores sobre la  $ET_0$  para cada una de las variables citadas serían iguales a  $0.21 \text{ mm d}^{-1}$ ,  $0.28 \text{ mm d}^{-1}$  y  $-0.12 \text{ mm d}^{-1}$ , respectivamente. En este ejemplo, el error resultante debido a estos tres errores sistemáticos provocaría una sobreestimación de  $0.37 \text{ mm d}^{-1}$  en el mes de Junio para la estación de Padul (Granada). Del mismo modo, y considerando los mismos errores sistemáticos en la estación de Palma del Río para las mismas variables, se obtendrían unos errores en la estimación de  $ET_0$  iguales a  $0.38 \text{ mm d}^{-1}$ ,  $0.39 \text{ mm d}^{-1}$  y  $-0.54 \text{ mm d}^{-1}$  con respecto a la temperatura, radiación solar y humedad relativa, respectivamente. El error acumulado en este caso para la estación de Palma del Río en el mes de Junio sería de  $0.23 \text{ mm d}^{-1}$ . En ambos casos se producen sobreestimaciones de la  $ET_0$ , pero con unas diferencias del 38% entre ambas estaciones. Como se puede comprobar, los mismos errores introducidos en la misma época del año en distintas localizaciones producen

diferentes desviaciones en la  $ET_0$ . Un análisis similar se podría realizar en una única estación, aplicando errores de la misma magnitud en distintos meses del año.

Resulta complicado realizar comparaciones con los resultados obtenidos en trabajos anteriores, ya que no existe ninguno que haya estudiado con la misma metodología la sensibilidad de la ecuación ASCE-PM para estimar la  $ET_0$ . Gong et al. (2006) obtuvieron los coeficientes de sensibilidad más bajos para la velocidad de viento, utilizando esta misma ecuación. Los coeficientes de sensibilidad presentados en la Tabla 39 son también similares a los presentados por Ley et al. (1994a) para radiación solar y velocidad de viento, aunque este trabajo se realizó para la ecuación de Penman-Wright. Irmak et al. (2006) concluyeron que las variables que más afectaron a la  $ET_0$  (ASCE-PM) en varias estaciones de los EEUU fueron el déficit de presión de vapor seguido de la velocidad de viento, existiendo una similitud con los resultados presentados en la Tabla 39, ya que la temperatura y la humedad relativa afectan directamente al déficit de presión de vapor. Meyer et al. (1989), utilizando la ecuación de Penman, concluyeron que ésta fue más sensible a la humedad relativa y la radiación solar que a la velocidad de viento y la temperatura. En cambio, los resultados mostrados en Piper (1989) para esta misma ecuación señalaron a la temperatura como la variable más sensible.

## **5.4. Conclusiones**

En general, los coeficientes de sensibilidad derivados del presente estudio han mostrado diferencias considerables entre variables meteorológicas, así como entre cada una de las 87 estaciones analizadas. Del mismo modo, estos coeficientes presentaron también variaciones a lo largo del año, especialmente para la temperatura y la humedad relativa, obteniéndose los valores más elevados en valor absoluto en los meses de Agosto y Diciembre, respectivamente. Los coeficientes de sensibilidad derivados para la humedad relativa (los únicos negativos) fueron los que presentaron mayor variabilidad espacial y temporal. Los errores aleatorios introducidos en la velocidad del viento provocaron en los meses de invierno las mayores desviaciones sobre la  $ET_0$ , aunque a escala anual, esta variable resultó ser la menos significativa para ambos tipos de errores. La radiación solar resultó ser, en general, la tercera variable que más afectó a las estimaciones de  $ET_0$ , precedida por la humedad relativa y la temperatura en primer lugar, ya que el coeficiente de sensibilidad medio para esta última variable resultó ser el más elevado a escala anual.

Gracias al análisis realizado en el presente capítulo es posible conocer cuantitativamente las desviaciones de la  $ET_0$  en cada localización en función de las variaciones de cada variable meteorológica medida a lo largo del año. Los errores cometidos en las mediciones de las distintas variables meteorológicas producen efectos de magnitud diferente, que dependen de la época del año y de la estación meteorológica en concreto. El presente estudio resulta de gran utilidad para optimizar la calibración de los sensores y las rutinas de mantenimiento de las estaciones a lo largo del año, atendiendo al efecto que cada variable meteorológica produce sobre la  $ET_0$ . En términos generales y a modo de ejemplo, resulta más importante, desde el punto de vista de la precisión en las estimaciones de  $ET_0$ , medir correctamente la temperatura o la radiación solar durante los meses de verano que en invierno, pudiendo establecerse prioridades en los protocolos de mantenimiento de los sensores. Análogamente, resulta más importante durante los meses de primavera garantizar el funcionamiento adecuado de las sondas de humedad relativa en la provincia de Cádiz que en la de Jaén, ya que los errores transmitidos en el proceso de cálculo de la  $ET_0$  son mayores en la primera. Por otro lado, será posible pronosticar en cada estación las variaciones en las medidas de  $ET_0$  en función de las previsiones que señalan los estudios de cambio climático para las diferentes variables meteorológicas.

## Conclusiones generales

Los resultados obtenidos de la aplicación de los diferentes tests de control de calidad descritos en el presente trabajo ponen de manifiesto la existencia de registros meteorológicos erróneos y sospechosos en las dos bases de datos validadas (diaria y semihoraria). El análisis temporal de los registros detectados por los tests y el uso de gráficos de control generados de forma dinámica han permitido tomar decisiones tan importantes como la sustitución de algún sensor o la depuración de registros fuera de rango antes de ser empleados en el cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ).

El sistema de control de calidad diseñado para la validación de los datos meteorológicos ha resultado ser una herramienta de gran utilidad para poder utilizar formatos normalizados compatibles con los Sistemas de Información Geográfica, lo cual ha permitido estudiar la distribución espacial de los registros validados de una forma ágil y eficaz. Este sistema puede ser ejecutado de forma remota y los procedimientos automáticos empleados para la validación pueden ser modificados según las necesidades y requerimientos del usuario. Las tecnologías empleadas y la arquitectura del propio sistema permiten en un futuro, la exportación de esta herramienta para su aplicación a otras redes de estaciones meteorológicas automáticas. El sistema desarrollado en este trabajo ha permitido validar simultáneamente millones de registros meteorológicos generados en todas las estaciones de la red, garantizando la integridad referencial de las diferentes funciones, algoritmos, etc. que han sido aplicados sobre la base de datos replicada.

El estudio de los errores Tipo I y Tipo II para las variables de temperatura máxima, mínima y media mostró unos resultados satisfactorios en diferentes condiciones climáticas. El empleo de un valor específico del factor  $f$  para cada estación permite prefijar un porcentaje de errores igual para toda la red. Los resultados obtenidos mostraron que la eficacia de los tests basados en decisiones estadísticas aumenta con la magnitud del error, siendo el test de coherencia espacial el que más errores identifica.

El análisis de sensibilidad de la ecuación estandarizada para el cálculo de la  $ET_0$  (ASCE-PM) llevado a cabo en el presente trabajo ha permitido cuantificar la importancia relativa en Andalucía de las diferentes variables meteorológicas medidas por los sensores que son empleadas en el cálculo de la  $ET_0$ . El estudio pormenorizado de la distribución espacial y temporal de los coeficientes de sensibilidad ha puesto de manifiesto su gran variabilidad a lo largo del año para las diferentes condiciones climáticas que existen en Andalucía.

El modelo de metadatos propuesto en este trabajo para su futura incorporación dentro del sistema resulta de gran importancia para conseguir una estandarización de la información que debe acompañar a los registros meteorológicos cumpliendo con la normativa vigente en diferentes ámbitos. Este modelo de metadatos permitirá el intercambio, la gestión y la interoperabilidad de la información meteorológica entre los diferentes usuarios, garantizando el uso adecuado de los registros generados en las diferentes redes de estaciones.

Finalmente, el sistema de control de calidad diseñado en este trabajo constituye un gran avance para los estudios climáticos y medioambientales a diferentes escalas. El legado de unos datos meteorológicos de calidad permitirá mejorar enormemente los resultados futuros de las aplicaciones y modelos que utilizan actualmente esta información.

# Anejo I

Tabla 41. Valores medios mensuales de las variables  $T$  (Temperatura, °C),  $R_s$  (Radiación Solar, MJ m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>),  $V_v$  (Velocidad de viento, m s<sup>-1</sup>),  $HR$  (Humedad Relativa, %),  $P$  (Precipitación, mm) y  $ET_0$  (Evapotranspiración de referencia, mm d<sup>-1</sup>)

Nombre corto	Var.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
AL01	T	11.9	12.3	14.4	15.9	19	23.5	25.1	25.4	22.7	19.5	15.2	12.9	18.2
AL01	Rs	11.0	13.9	17.7	23.2	25.1	28.1	27.9	24.9	20.5	15	10.9	9.4	19.0
AL01	Vv	1.8	1.9	2.2	2.2	2.1	2.1	1.9	1.9	1.8	1.9	1.7	1.8	1.9
AL01	HR	62.5	63.2	65.2	63.4	62.1	57.6	59.8	60.4	65	65.8	62.8	62.4	62.5
AL01	P	23	27	32	26	20	4	3	4	15	24	30	41	249
AL01	ET <sub>0</sub>	1.7	2.2	3.1	4.1	5	6.2	6.3	5.7	4.3	3	1.9	1.5	3.7
AL02	T	12.5	13	15	16.7	19.9	24.2	25.6	26.2	23.7	20.7	16.1	13.6	18.9
AL02	Rs	10.7	13.9	17.8	23.2	25.2	28.2	28	25.2	20.2	14.8	10.6	9	18.9
AL02	Vv	1.4	1.4	1.5	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.2	1.4	1.4
AL02	HR	64.1	64.7	67.1	65.3	64.1	60.8	63.7	64.1	67.2	66.9	63.4	63.2	64.6
AL02	P	19	25	26	28	23	3	0	1	8	6	28	38	205
AL02	ET <sub>0</sub>	1.5	2.1	3	4	4.9	6	6	5.4	4	2.8	1.7	1.4	3.6
AL04	T	8.5	9.5	12.6	14.7	18.2	23.5	25.6	25.4	21.6	17.7	11.9	9.3	16.5
AL04	Rs	10.5	13.4	17.2	22.1	23.8	27.4	27	24.2	19.2	14.2	10.1	8.6	18.1
AL04	Vv	1.9	1.9	2.1	2.2	2.1	2.2	2.1	2	1.8	1.8	1.7	1.8	2.0
AL04	HR	66	64.7	61.5	56.6	55	46.1	46.7	49	59.4	62.9	67.7	70	58.8
AL04	P	18	20	26	37	30	4	0	2	14	38	41	28	258
AL04	ET <sub>0</sub>	1.7	2.2	3.2	4.3	5.1	6.7	6.8	6.2	4.4	3	1.8	1.4	3.9
AL05	T	7	7.9	10.8	12.6	16.4	22.6	25.1	24.4	20.1	15.9	10	7.6	15.0
AL05	Rs	10.4	13.6	17.2	22.7	24.3	28.3	28.8	25.1	20	14.3	10.3	8.5	18.6
AL05	Vv	3.3	2.9	2.8	3	2.5	2.3	2.3	2.2	2.2	2.4	2.8	2.9	2.6
AL05	HR	60.2	59.1	58.1	55.5	52.5	40.2	36.7	41.1	52.7	59.1	63.6	65.2	53.7
AL05	P	16	30	31	34	30	8	4	7	20	39	40	26	285
AL05	ET <sub>0</sub>	2.0	2.4	3.3	4.3	5.1	6.9	7.4	6.4	4.6	3.1	2	1.6	4.1
AL06	T	10	10.9	13.8	15.8	19	23.6	25.5	25.7	22.7	19.1	13.8	11.1	17.6
AL06	Rs	9.9	12.8	16.8	22.2	24.2	27.8	27.7	23.9	19.1	13.8	9.9	8.4	18.0
AL06	Vv	2.2	2.2	2.3	2.5	2.3	2.3	2.1	2.2	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2
AL06	HR	67	65	62	58.1	57.8	52.3	55.7	57	63.6	64.8	66	67.2	61.4
AL06	P	26	17	19	32	32	4	2	0	13	30	38	29	242
AL06	ET <sub>0</sub>	1.8	2.3	3.3	4.4	5.2	6.5	6.5	5.9	4.4	3.2	2.1	1.7	3.9
AL07	T	8.6	9.7	13.1	15.1	18.5	23.4	25.2	25.2	21.8	17.9	12.4	9.7	16.7
AL07	Rs	9.9	13	16.9	22.2	24.1	28	27.7	24.1	19.2	13.7	10	8.4	18.1
AL07	Vv	1.3	1.4	1.5	1.5	1.4	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.2	1.4	1.4
AL07	HR	70.3	67.7	64.1	59.6	59	51.8	54.2	56.5	64.9	67.5	69.2	70.6	63.0
AL07	P	21	23	33	41	33	11	2	1	17	41	37	33	293
AL07	ET <sub>0</sub>	1.4	2	3	4	4.7	6	6.1	5.4	3.9	2.5	1.5	1.2	3.4
AL08	T	10.9	11.8	14.5	16.4	19.3	23.5	25.5	26.1	23.4	19.9	14.6	11.9	18.2
AL08	Rs	9.4	12.2	16	20.9	22.9	25.7	25.6	22.3	18.1	13.2	9.6	7.9	17.0
AL08	Vv	0.9	1	1.2	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1	1	0.9	0.8	1.1
AL08	HR	67.8	66.8	65.2	61.7	63.4	60.7	63.5	62.4	66.3	66.5	65.4	68.6	64.9
AL08	P	26	21	19	27	25	6	2	1	14	26	28	30	225
AL08	ET <sub>0</sub>	1.2	1.8	2.7	3.8	4.4	5.3	5.4	4.9	3.6	2.5	1.4	1.1	3.2

Nombre corto	Var.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
AL10	T	12.4	12.5	14.7	16.3	18.8	22.5	23.6	23.7	22.2	19.6	15.5	13.3	17.9
AL10	Rs	10.7	13.3	16.7	22	24.2	26.5	26	23.6	19.3	14.1	10.4	8.9	18.0
AL10	Vv	2	1.9	2	2	2	1.7	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8
AL10	HR	63.9	64	69.1	68.2	68.6	68.5	70.7	71.5	72.2	70.4	65.5	63.9	68.0
AL10	P	17	39	41	28	19	1	1	1	10	30	39	45	271
AL10	ET <sub>0</sub>	1.8	2.2	2.9	3.8	4.5	5.3	5.3	4.8	3.7	2.6	1.9	1.6	3.3
AL11	T	10.8	11.3	13.8	16.1	19.6	24.5	26.4	26.2	23.2	19.9	14.6	12	18.2
AL11	Rs	10	12.3	16.2	21.5	23.9	26.4	26.5	23.5	18.8	13.9	9.8	8.5	17.6
AL11	Vv	1.6	1.8	2.1	2.1	2.2	2.3	2.1	2.1	1.9	1.9	1.6	1.6	1.9
AL11	HR	68	66.7	67.4	62.3	58	51.4	54.3	57	63.7	67	68	68.8	62.7
AL11	P	26	31	33	42	21	6	1	5	10	13	29	29	246
AL11	ET <sub>0</sub>	1.5	2.1	3	4.1	5.2	6.5	6.6	5.9	4.3	3	1.7	1.3	3.7
AL12	T	7	7.5	10.4	12.9	16.6	22	24.5	23.8	20	16.3	10.5	7.7	14.9
AL12	Rs	10.5	12.6	16.5	22	24	26.7	27.5	24.4	19	13.6	9.4	8.1	17.9
AL12	Vv	2.1	2	2	2.1	2.1	2.2	2.1	2	1.9	1.9	1.8	1.9	2.0
AL12	HR	64.8	64.8	64.9	59.7	54.9	46.7	45.4	49.7	59.8	63.7	67.8	70.2	59.4
AL12	P	24	35	52	85	95	90	4	7	23	19	49	32	515
AL12	ET <sub>0</sub>	1.6	2	2.8	4	4.9	6.3	6.7	5.9	4.2	2.8	1.6	1.3	3.6
CA01	T	10.2	10.6	13.9	15.8	19.1	23.5	25.1	25.4	22.5	18.9	13.8	11.2	17.5
CA01	Rs	9.5	12.4	15.7	21.1	24.7	27	27.1	23.6	19	13.1	9.9	8	17.6
CA01	Vv	1.9	1.8	2.1	1.8	1.8	1.8	1.6	1.8	1.8	2	1.9	2.1	1.9
CA01	HR	77	75.2	74	66.4	60.6	55.2	53.1	55.2	60.7	70.4	74	78.4	66.7
CA01	P	64	59	60	37	29	15	0	3	31	86	96	81	561
CA01	ET <sub>0</sub>	1.4	1.9	2.8	4.0	5.2	6.2	6.4	5.9	4.5	2.9	1.8	1.3	3.6
CA02	T	10.5	11	14.1	15.9	19.2	23.5	24.9	25.2	22.4	19.2	14.1	11.6	17.6
CA02	Rs	9.6	12.8	16.3	21.8	25.4	27.9	28	24.7	19.8	13.5	10.1	7.9	18.2
CA02	Vv	1.4	1.5	1.8	1.5	1.5	1.7	1.5	1.5	1.5	1.7	1.5	1.5	1.6
CA02	HR	75.1	73	72.1	65.5	59.3	53.8	53.8	56.4	62.1	69.9	73.1	76.7	65.9
CA02	P	69	62	56	36	20	5	0	4	32	81	107	92	564
CA02	ET <sub>0</sub>	1.3	1.9	2.8	3.9	5.1	6.2	6.3	5.7	4.2	2.8	1.7	1.2	3.5
CA04	T	9.7	10.1	13.5	15.3	18.8	23.8	25.8	26	22.7	19	13.4	10.6	17.4
CA04	Rs	10.1	12.9	16.2	22.1	25.2	28.5	28.5	25.6	20.4	13.5	10.5	8.3	18.5
CA04	Vv	1.9	1.7	2.1	1.8	1.6	1.7	1.8	2	2.1	2.4	1.9	1.9	1.9
CA04	HR	74.8	74.1	73.1	66.5	59.3	51	45.8	47.9	55.6	67.7	70.3	76.4	63.5
CA04	P	61	65	76	43	25	3	1	4	48	90	80	87	583
CA04	ET <sub>0</sub>	1.4	1.9	2.8	4.0	5.1	6.5	7.0	6.6	4.9	3.1	1.8	1.2	3.8
CA05	T	11	11.5	14.2	15.9	18.7	22.7	23.6	23.9	21.8	19.2	14.4	12.1	17.4
CA05	Rs	9.5	13.1	16.6	22.2	25.9	27.8	27.6	24.3	19.7	13.5	10.1	7.8	18.2
CA05	Vv	1.2	1.2	1.4	1.3	1.4	1.5	1.1	1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.2
CA05	HR	78.6	76.3	76.4	70.1	65.4	61.1	64.5	67.5	70.5	75.2	76.7	79.4	71.8
CA05	P	45	53	38	34	12	2	0	3	17	69	73	73	419
CA05	ET <sub>0</sub>	1.2	1.8	2.6	3.8	4.9	5.9	5.6	5	3.8	2.5	1.5	1.1	3.3
CA06	T	11.1	11.6	14.3	15.9	19.1	22.8	24.3	24.7	22.5	19.4	14.4	12.4	17.7
CA06	Rs	9.3	12.6	15.5	21	24.9	27.1	27.5	24.5	19.6	13.2	9.7	7.7	17.7
CA06	Vv	2.9	3	3.5	3	3	2.9	2.7	2.7	2.8	3.1	2.8	3	3.0
CA06	HR	76.7	74.1	73.6	67.8	62.2	59.4	60.1	61.5	64.3	71.8	75.3	77.8	68.7
CA06	P	66	60	62	50	23	3	0	3	18	100	82	116	583
CA06	ET <sub>0</sub>	1.7	2.3	3.1	4.2	5.5	6.4	6.7	6.2	4.8	3.2	2.0	1.6	3.9
CA07	T	10.9	11	13.6	15.3	18.1	22.6	25.2	25.2	22.2	18.6	14	11.6	17.4
CA07	Rs	9.7	12.6	15.8	22.9	25.8	29.5	29.4	26.6	20.9	13.7	10	7.8	18.7
CA07	Vv	1.9	2	2.2	2	2.1	2.5	2.3	2.5	2.5	2.2	1.9	2.1	2.2
CA07	HR	75.7	76.1	76.5	70.6	65.1	58.8	53.8	57.5	64.8	75	75.9	79.7	69.1
CA07	P	78	84	100	50	28	4	0	2	19	111	93	143	712
CA07	ET <sub>0</sub>	1.4	1.9	2.6	3.9	4.9	6.4	6.8	6.3	4.7	2.7	1.6	1.2	3.6
CA08	T	10.6	11	14.1	16.2	19.3	23.1	23.8	23.8	21.6	19.3	14.2	11.6	17.4
CA08	Rs	9.9	12.7	16.4	22.1	25.7	27.8	28	24.8	19.9	13.4	10.1	8.2	18.3
CA08	Vv	2.6	2.6	3.3	3.1	3.1	2.9	2	2	2	2.5	2.4	2.6	2.6
CA08	HR	72.7	71.4	70	63.4	59.3	57.4	61.3	65.6	68.2	71.8	72.3	76.3	67.5
CA08	P	52	63	53	39	20	5	0	5	24	92	112	71	536
CA08	ET <sub>0</sub>	1.8	2.2	3.3	4.5	5.8	6.8	6.3	5.5	4.3	3.1	2.0	1.5	4.0

Nombre corto	Var.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
CO01	T	6.7	7.5	11.3	13.4	17.6	24.3	26.1	25.8	21.6	16	10.2	7.2	15.6
CO01	Rs	9.5	12.4	16.3	22.4	25.4	29.7	30.6	26.9	20.9	13.4	9.6	8	18.8
CO01	Vv	2.2	2.2	2.3	2.4	2.1	2.2	2.3	2.2	2.1	2.4	2.2	2.2	2.2
CO01	HR	78.8	74.8	72.5	65.1	59.1	42.2	34.9	37.5	49.2	68.9	77.1	79.5	61.6
CO01	P	44	43	64	39	44	11	1	16	30	96	59	53	500
CO01	ET <sub>0</sub>	1.2	1.8	2.7	4.0	5.2	7.2	7.8	6.9	4.9	2.8	1.5	1.1	3.9
CO02	T	7.6	9.3	13.1	15.4	19.7	25.4	27.3	27.2	23.1	17.8	11.8	8.8	17.2
CO02	Rs	8.3	11.6	15.2	20.1	23.1	26.7	27	24	18.9	12.3	9.1	7.2	17.0
CO02	Vv	1.1	1	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1	1.1	1.1
CO02	HR	79	74.7	71.8	66	58.4	45.9	39.5	40.7	50.9	68.8	76.9	79.9	62.7
CO02	P	52	53	84	53	37	1	2	5	26	107	56	75	551
CO02	ET <sub>0</sub>	1.0	1.6	2.5	3.6	4.6	6.1	6.4	5.6	4.0	2.3	1.3	0.9	3.3
CO03	T	9.5	10.4	13.9	16.4	20.3	25.6	27.6	27.3	23.7	18.9	13.2	10.3	18.1
CO03	Rs	9.3	12.2	15.9	21.7	25.1	29.3	29.3	26.1	20.6	13.3	9.9	8	18.4
CO03	Vv	2.3	2.4	2.7	2.7	2.5	2.7	2.6	2.6	2.4	2.4	2.3	2.4	2.5
CO03	HR	74.3	70.9	70.4	60.8	52.9	45.2	40.3	43.9	52.7	66.3	71.9	75.5	60.4
CO03	P	50	57	78	33	42	2	0	7	39	98	62	82	550
CO03	ET <sub>0</sub>	1.4	2.1	3.1	4.6	5.9	7.9	8.3	7.5	5.4	3.2	1.8	1.3	4.3
CO04	T	9.2	10.1	13.8	16.3	20.2	25.8	27.8	27.5	23.7	18.8	12.9	10	18.0
CO04	Rs	9.5	12.2	16.1	22.1	24.8	28.7	28.8	25.8	20.4	13.1	9.8	7.9	18.3
CO04	Vv	1.7	1.8	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.7	1.6	1.8	1.7
CO04	HR	74.8	71.2	69.7	60.2	52.5	44.1	38.8	42.4	51.6	66.3	72.5	75.9	60.0
CO04	P	52	64	87	38	38	2	0	7	40	112	65	88	593
CO04	ET <sub>0</sub>	1.3	1.9	2.9	4.2	5.4	6.9	7.3	6.5	4.7	2.8	1.6	1.2	3.8
CO05	T	8	9	13	15.4	19.3	25.5	28.1	28.1	23.7	18.2	11.8	8.8	17.4
CO05	Rs	8.5	11.2	15.1	21.3	23.7	27.4	27.4	24.3	18.9	12.1	9.1	7.1	17.2
CO05	Vv	1.5	1.5	1.8	1.7	1.4	1.6	1.9	2.3	2.1	1.9	1.5	1.5	1.7
CO05	HR	79.5	76.4	75.1	66	58.3	45.4	36	37.6	48.8	67	76.3	80.2	62.2
CO05	P	51	58	81	37	42	2	1	5	31	88	43	74	513
CO05	ET <sub>0</sub>	1.1	1.7	2.6	4	4.9	6.6	7.4	7.2	5	2.7	1.4	1	3.7
CO06	T	8.5	9.6	13.5	15.8	19.8	25.5	27.7	27.6	23.6	18.4	12.4	9.4	17.7
CO06	Rs	9	11.4	15.1	21.2	24.2	28	28.2	25.1	19.6	12.2	9.1	7.4	17.5
CO06	Vv	1.4	1.4	1.6	1.6	1.5	1.8	1.9	2	1.7	1.5	1.4	1.4	1.6
CO06	HR	78.1	74.7	72.8	64.8	57.2	46.8	40.2	42.6	52.2	69.3	75.8	78.9	62.8
CO06	P	62	71	96	41	34	4	0	3	31	114	61	94	611
CO06	ET <sub>0</sub>	1.1	1.7	2.6	3.9	5.1	6.8	7.4	6.8	4.7	2.5	1.4	1.1	3.7
CO07	T	9	10	13.4	15.6	19.6	25.2	27.2	27.1	23.3	18.6	12.7	9.9	17.6
CO07	Rs	9.4	12.2	15.5	21.5	24.1	27.7	27.9	24.6	19.4	12.7	9.6	7.8	17.7
CO07	Vv	1.8	1.9	1.8	1.7	1.6	1.8	1.9	2	1.9	2	1.8	1.9	1.8
CO07	HR	74.6	71.8	70.8	62.7	54.9	44.8	39.6	42.3	51.7	66.7	71.8	75.9	60.6
CO07	P	45	52	79	33	42	2	1	2	30	81	56	70	493
CO07	ET <sub>0</sub>	1.3	1.9	2.7	4	5.1	6.8	7.4	6.7	4.8	2.9	1.6	1.2	3.8
CO08	T	8.3	9.4	13.2	15.6	19.7	26.1	28.2	27.8	23.3	18.1	12	9.2	17.6
CO08	Rs	9.6	12.5	16	22.4	24.7	28.6	29.2	26	20.5	13.3	10	8.1	18.4
CO08	Vv	1.3	1.4	1.5	1.6	1.4	1.6	1.6	1.6	1.3	1.3	1.2	1.2	1.4
CO08	HR	74.6	71.6	69.1	60.2	53	40.4	33.9	36.8	48.9	65.8	73.4	75.6	58.6
CO08	P	45	50	67	35	36	9	0	2	25	61	39	57	426
CO08	ET <sub>0</sub>	1.1	1.7	2.7	4.1	5.1	6.9	7.3	6.5	4.4	2.5	1.4	1	3.6
GR01	T	5.5	6.5	10.4	12.9	16.7	22.8	25.3	24.4	20.1	15.4	9.1	6.3	14.6
GR01	Rs	9.6	12.5	16.5	22.4	23.9	27.6	27.4	24.7	19.8	13.9	9.6	7.8	18.0
GR01	Vv	2	1.9	2.2	2.2	2	2	2	1.9	1.7	1.8	1.7	1.7	1.9
GR01	HR	71.1	67.8	64.4	58.6	53.7	43.1	38.5	43.2	55.6	64.2	70.2	73.7	58.7
GR01	P	33	39	40	36	34	23	1	7	23	37	39	37	349
GR01	ET <sub>0</sub>	1.3	1.9	2.9	4.1	5.1	6.8	7.2	6.3	4.5	2.8	1.5	1.1	3.7
GR02	T	3.7	4.4	8.6	10.9	14.6	21	23.5	22.6	18.3	13.7	7.3	4.6	12.8
GR02	Rs	9.9	13	16.8	22.6	24	27.8	28.4	25.1	19.8	14.4	9.7	8.2	18.3
GR02	Vv	3	2.9	3.2	2.7	2.3	2.3	2.5	2.6	2.5	2.8	2.8	2.7	2.7
GR02	HR	73.6	68.4	67.6	62.5	59.3	46.1	40	45.9	59.2	67.1	74.7	77.3	61.8
GR02	P	20	24	32	36	47	12	4	11	29	35	33	30	313
GR02	ET <sub>0</sub>	1.5	2	3	4	4.8	6.7	7.5	6.7	4.7	3	1.6	1.2	3.8



Nombre corto	Var.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
GR03	T	6.9	8.3	12	14.4	18.4	24.5	26.3	25.7	21.5	16.6	10.5	7.8	16.1
GR03	Rs	9.4	12.4	16	22.2	24.6	28.5	28.6	25.4	20.3	13.6	9.5	7.6	18.2
GR03	Vv	2	2	2	2	2	2.1	1.9	1.9	1.7	1.7	1.7	1.9	1.9
GR03	HR	74.7	71	68.1	60.6	53.9	43.3	37.6	41.6	53.5	67.5	74.2	77.5	60.3
GR03	P	39	54	66	38	34	8	1	2	22	53	50	54	421
GR03	ET <sub>0</sub>	1.5	2.1	3.0	4.2	5.3	7.1	7.2	6.4	4.6	2.8	1.6	1.2	3.8
GR04	T	6.9	8.2	11.8	14.2	18.3	24.9	26.7	26.2	21.9	16.6	10.2	7.7	16.1
GR04	Rs	9.8	12.7	16.2	22.6	24.3	28.4	28.5	25.5	20.5	13.6	10.2	8.1	18.4
GR04	Vv	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	1	1.1	1	1	0.9	0.7	0.7	0.9
GR04	HR	72.9	69.6	67.7	59.6	52.5	39	33.5	36.5	48.4	64.3	71.2	76	57.6
GR04	P	40	50	64	38	28	2	0	0	14	47	53	59	395
GR04	ET <sub>0</sub>	1	1.6	2.5	3.7	4.7	6.2	6.4	5.6	4.1	2.3	1.2	0.8	3.2
GR05	T	6	6.8	10.2	12.4	16.4	23.2	25.5	24.8	20.3	15.3	9.1	6.7	14.7
GR05	Rs	9.6	12.2	15.7	21.7	23.2	27.4	27.6	24.4	19.6	13.4	9.8	8.2	17.7
GR05	Vv	2	2	2.3	2	1.9	2	1.9	1.9	1.8	2	2	2	2.0
GR05	HR	69.4	67.1	65.1	59.1	52.5	38.3	32	36	48.9	63.3	71	72.5	56.3
GR05	P	64	57	83	58	43	8	2	3	24	66	75	68	551
GR05	ET <sub>0</sub>	1.3	1.8	2.7	3.9	4.9	6.8	7.2	6.3	4.5	2.7	1.5	1.1	3.6
GR06	T	4.8	5.4	8.8	10.8	14.5	21.1	23.5	22.9	18.5	14	7.9	5.3	13.1
GR06	Rs	10.4	13.3	17.1	22.2	23.5	26.9	27.6	24.1	19	13.8	10.1	8.5	18.0
GR06	Vv	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8
GR06	HR	62	61	60.2	58.7	55.5	42.4	35	38.1	48.7	58	64.9	67	54.3
GR06	P	23	36	39	43	39	21	3	4	18	41	34	36	337
GR06	ET <sub>0</sub>	1.4	1.9	2.8	3.7	4.5	6.1	6.7	5.8	4.2	2.7	1.5	1.2	3.4
GR07	T	6.9	7.3	10.5	12.5	16.2	22.7	25.1	24.3	20.1	15.7	9.9	7.5	14.9
GR07	Rs	10.5	12.9	16.6	21	23.2	26.9	27	24	18.9	13.5	9.9	8.3	17.7
GR07	Vv	1.4	1.4	1.5	1.3	1.3	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.2	1.4	1.3
GR07	HR	65	64.7	63.7	60.5	55.4	41.7	37.8	43.4	53.8	62.4	68.2	68.9	57.1
GR07	P	37	59	69	51	38	5	2	3	24	56	60	83	487
GR07	ET <sub>0</sub>	1.3	1.7	2.6	3.5	4.4	5.9	6.1	5.3	3.7	2.3	1.3	1	3.1
GR08	T	5.2	6	9.3	11.3	14.6	20.5	22.8	22	18	13.9	8.8	6.2	13.2
GR08	Rs	9.1	11.8	15.1	21.4	23.5	27.5	27.2	24.7	19.6	12.6	9.2	7.4	17.4
GR08	Vv	1.4	1.3	1.4	1.4	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3
GR08	HR	75.3	74	74.1	67.5	64.5	52.7	46.4	52.8	63.6	73.3	75.9	79.2	66.6
GR08	P	75	115	160	62	50	6	1	5	47	126	129	121	897
GR08	ET <sub>0</sub>	1.1	1.5	2.2	3.3	4.1	5.5	5.7	5	3.5	2	1.2	0.9	2.9
GR09	T	12.2	12.4	14.7	16.5	19	23	24.5	25	22.7	19.5	15.1	13	18.1
GR09	Rs	8.9	11.7	15.2	21.2	23.4	26.7	25.8	23.4	18.6	12.7	9	7	17.0
GR09	Vv	0.5	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5
GR09	HR	62.4	65	66.8	63	61.6	60.1	61.9	62.7	66	67.3	64.8	65.3	63.9
GR09	P	30	46	70	37	16	2	1	0	18	55	59	47	381
GR09	ET <sub>0</sub>	1.0	1.5	2.3	3.5	4.1	5	5	4.4	3.2	2	1.2	0.8	2.9
GR10	T	7.2	8.1	11.5	13.5	16.9	22.8	25.3	24.7	20.7	16.8	10.8	7.9	15.5
GR10	Rs	11.1	13.3	17	22.9	24.8	27.4	27.1	25.8	20.6	13.8	10.9	9	18.6
GR10	Vv	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.1	1.2
GR10	HR	66.1	66.2	64.8	59.8	56.7	46	41	45.2	54.9	62.3	66.6	70.3	58.3
GR10	P	30	54	58	49	35	12	0	1	19	50	58	49	415
GR10	ET <sub>0</sub>	1.3	1.7	2.7	3.8	4.5	6	6.3	5.5	4	2.5	1.5	1	3.3
H01	T	10.3	11.5	14.1	15.7	19.3	23.8	25.7	25.4	22.3	18.7	13.9	11.4	17.7
H01	Rs	9.4	13	16.4	21.3	24.8	28.6	28.8	25.5	19.8	13.3	10	7.9	18.2
H01	Vv	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.7	2.4	2.1	2	1.9	1.9	2.1
H01	HR	75.8	72.4	72.8	67.8	61	52.4	47.1	51.8	60.7	72.5	74.6	77	65.5
H01	P	51	52	64	66	29	8	0	4	25	103	110	88	600
H01	ET <sub>0</sub>	1.4	2.1	2.9	4.0	5.4	6.8	7.7	6.6	4.7	2.7	1.8	1.3	3.9
H02	T	10.4	10.5	14	15.2	18.7	22.8	24.6	24.5	21.9	18.9	14.5	11.5	17.3
H02	Rs	10	13.8	17.3	22.2	26.1	29.6	29.6	26.6	20.8	14.4	10.3	8.6	19.1
H02	Vv	1.5	1.5	1.7	2	2.2	2.8	3.2	2.9	2.5	2.3	1.8	1.4	2.2
H02	HR	76.4	71.9	74.4	68	65	57.4	51.9	56.8	64.7	73.7	75.9	78.3	67.9
H02	P	43	47	46	67	27	4	0	8	36	98	97	71	544
H02	ET <sub>0</sub>	1.2	1.9	2.7	3.9	5.1	6.7	7.6	6.6	4.6	2.8	1.7	1.1	3.9

Nombre corto	Var.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
H03	T	10	11.2	13.7	15.2	18.9	23.6	25.3	25.2	22.1	18.2	13.4	10.9	17.3
H03	Rs	9.8	13.5	16.7	21.7	25.8	29.9	30	26.6	20.8	13.7	10.4	8.4	18.9
H03	Vv	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8	2	2	1.8	1.6	1.5	1.3	1.4	1.7
H03	HR	76.1	72.1	72	67	60.9	51.4	46.8	51.2	60.2	73.1	75.3	77.8	65.3
H03	P	50	59	76	70	37	9	0	11	34	119	104	97	666
H03	ET <sub>0</sub>	1.2	2.0	2.8	3.9	5.2	6.7	7.1	6.2	4.4	2.5	1.5	1.0	3.6
H04	T	9.8	10.4	13.5	15.3	18.3	22.1	23.6	23.4	20.9	18.2	13.2	10.8	16.6
H04	Rs	9.5	13.1	16.7	22.5	25.8	28.7	29	25.5	20	13.4	10.1	8.2	18.5
H04	Vv	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8
H04	HR	81	77.9	78.2	72	67.2	64	60	66.3	72.7	79.6	80	81.4	73.4
H04	P	64	71	69	43	16	6	0	1	28	91	98	91	578
H04	ET <sub>0</sub>	0.9	1.5	2.4	3.6	4.5	5.4	5.6	4.8	3.4	2.0	1.1	0.8	2.9
H05	T	9.5	10.2	13.5	15.4	19	23.8	25.7	25.3	22.1	18.5	13.2	10.5	17.2
H05	Rs	8.9	12.3	15.9	21.9	25.3	28.5	28.8	25.6	19.8	12.9	9.7	7.9	18.1
H05	Vv	1.2	1.3	1.4	1.3	1.3	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2	1.4	1.3
H05	HR	79.7	76.3	76	69.6	61.4	53.1	47.2	53.2	61.3	73.3	77.2	79.3	67.3
H05	P	62	59	75	56	21	8	0	6	27	113	92	84	603
H05	ET <sub>0</sub>	1.1	1.7	2.6	3.8	5.0	6.2	6.6	5.7	4.1	2.4	1.4	1.0	3.4
H06	T	8.3	8.9	12.4	14.2	17.7	23.7	25.5	25.5	21.9	17.5	11.8	9.3	16.4
H06	Rs	9.2	12.5	16.1	21.8	25.3	29.5	29.9	26.2	20.5	13.2	9.4	7.6	18.4
H06	Vv	1.3	1.3	1.5	1.4	1.3	1.5	1.5	1.5	1.4	1.5	1.2	1.3	1.4
H06	HR	78.8	75.4	72.9	67.4	60.7	47.7	41.8	44	53.4	69.8	77.1	79.4	64.0
H06	P	62	74	83	52	42	20	2	8	26	124	79	103	675
H06	ET <sub>0</sub>	1.0	1.6	2.5	3.6	4.8	6.4	6.8	6.0	4.2	2.4	1.3	0.9	3.4
H07	T	9.6	10.2	12.9	14.9	18.4	23.6	25.1	25.2	22	18	12.6	10.3	16.9
H07	Rs	9.3	12.8	16	21.9	25.7	30.1	30.3	26.7	20.6	13.1	10	8	18.7
H07	Vv	2.5	2.5	2.9	2.8	2.6	2.8	2.8	2.6	2.4	2.6	2.3	2.5	2.6
H07	HR	77.5	73.2	73.9	65.6	58.6	48.7	45.1	48.5	57.6	72.2	75.1	78.5	64.5
H07	P	49	48	65	47	27	3	1	8	32	114	68	97	559
H07	ET <sub>0</sub>	1.3	2.0	2.8	4.2	5.6	7.5	7.9	7.0	4.9	2.8	1.6	1.2	4.0
H08	T	9.8	10.3	12.9	15	18.6	24.1	26.1	25.9	22.1	17.6	12.7	10.3	17.1
H08	Rs	9.8	13.1	16.2	22.2	25.7	29.6	30.4	26.9	20.9	13.2	10.1	8.2	18.9
H08	Vv	1.9	2	2.1	2.1	1.9	1.9	1.9	1.7	1.7	1.9	1.9	2.1	1.9
H08	HR	71.2	68	69.8	61.7	54.8	45.6	39.4	43.9	54.8	70.3	71.5	74.2	60.4
H08	P	66	72	92	50	25	20	0	10	46	144	95	108	728
H08	ET <sub>0</sub>	1.4	2.0	2.8	4.1	5.3	6.9	7.4	6.4	4.5	2.6	1.6	1.2	3.7
H09	T	10.2	10.9	13.5	15.7	19.3	24.2	26.2	25.9	22.5	18.7	13.6	10.9	17.6
H09	Rs	9.4	12.8	16.5	21.7	25	28	28.4	25.1	19.5	12.8	9.8	8.1	18.1
H09	Vv	1.7	1.8	1.8	1.9	1.7	1.7	1.8	1.7	1.6	1.7	1.6	1.9	1.7
H09	HR	74.7	70.7	70.6	64	57.4	49.9	44	49.6	58.7	71.4	72.5	75.7	63.3
H09	P	68	58	79	56	27	13	1	5	28	111	79	91	616
H09	ET <sub>0</sub>	1.2	1.9	2.8	4.0	5.1	6.5	6.9	6.1	4.3	2.5	1.5	1.1	3.6
H10	T	9.9	10.8	14.1	16.1	19.4	23.9	25.5	25.4	22.5	19.2	13.6	10.6	17.6
H10	Rs	9.5	12.6	16.1	22.2	25.4	28.3	28.6	24.9	20.1	12.4	9.5	8.2	18.2
H10	Vv	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.7	2.1	2.1	1.9	1.9	1.5	1.4	1.6
H10	HR	80.8	78	77.4	70.6	66.5	58.6	52.8	58.1	64.8	75.4	77.7	80.4	70.1
H10	P	76	56	73	41	24	7	0	15	35	138	75	80	620
H10	ET <sub>0</sub>	1.2	1.8	2.6	3.9	5.0	6.4	7.1	6.3	4.7	2.7	1.6	1.1	3.5
H101	T	9.8	10.5	13.6	15.5	19	23	25.1	24.8	21.7	18.7	13.7	11	17.2
H101	Rs	9.3	12.6	15.9	21.1	24.9	27.2	27.9	24.6	18.7	12.5	9.7	8.2	17.7
H101	Vv	1.1	1.3	1.4	1.4	1.6	1.5	1.6	1.5	1.3	1.3	1.2	1.3	1.4
H101	HR	76.4	73.7	73.4	68.8	60.2	56.8	50.3	56	64.2	74.4	74.7	76	67.1
H101	P	51	61	75	64	18	8	0	4	31	102	102	64	580
H101	ET <sub>0</sub>	1.1	1.7	2.6	3.7	5.0	5.8	6.5	5.6	3.9	2.3	1.4	1.1	3.3
JA01	T	6.6	7.6	11.2	13.5	17.5	24.3	26.7	25.9	21.5	16.4	10	7.6	15.7
JA01	Rs	9.8	12.8	16.7	22.9	25.4	29.4	29.8	26.3	21.2	14.5	10.3	8.3	19.0
JA01	Vv	3.8	3.8	4.1	4.2	4.3	4.7	4.4	4.3	4.1	3.7	3.6	3.8	4.1
JA01	HR	70.2	65.8	62.5	57.4	51.2	38.2	33.3	37.1	49.6	61.3	69.1	70.4	55.5
JA01	P	29	27	33	35	39	11	0	4	17	36	30	29	290
JA01	ET <sub>0</sub>	1.7	2.3	3.5	4.9	6.4	9.1	9.8	8.7	6.3	3.8	2.1	1.6	4.9

Nombre corto	Var.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
JA02	T	5	6	9.8	12.3	16.1	22.5	24.9	24.1	19.7	14.8	8.4	5.9	14.1
JA02	Rs	10	13.1	17	23.7	25.4	29.5	29.8	26.3	21.1	14.5	10.2	8.2	19.1
JA02	Vv	1.3	1.4	1.6	1.5	1.6	1.8	1.6	1.5	1.4	1.4	1.3	1.4	1.5
JA02	HR	76.7	72.3	68.6	61.5	56.2	42.8	38.6	42.8	56.5	67.9	76.1	77.9	61.5
JA02	P	40	36	41	40	43	27	2	8	16	44	41	39	377
JA02	ET <sub>0</sub>	1.0	1.6	2.6	3.9	4.9	6.7	6.9	6.0	4.2	2.5	1.2	0.9	3.4
JA03	T	7.5	8.6	12.4	15.1	19	25.8	27.9	27.1	22.8	17.4	11	8.4	16.9
JA03	Rs	10.2	13.3	16.9	24.1	25.7	30.6	30.9	27.3	21.7	14.3	10.4	8.6	19.5
JA03	Vv	2.3	2.3	2.5	2.7	2.7	3	2.7	2.6	2.5	2.3	2	2.2	2.5
JA03	HR	69.1	64.7	62.3	54.4	48.6	35.6	30.8	34.6	46.6	61.6	68.9	70.6	54.0
JA03	P	32	37	46	35	29	7	1	6	15	49	35	35	327
JA03	ET <sub>0</sub>	1.5	2.1	3.2	4.7	6.0	8.4	8.6	7.7	5.5	3.2	1.7	1.3	4.4
JA04	T	6.7	7.7	11	13.2	17.3	24	26.3	25.6	21.3	16	9.9	7.6	15.6
JA04	Rs	9.5	12.6	15.6	22	24	28.7	28.8	25.7	20.5	13.6	9.7	8	18.2
JA04	Vv	2.4	2.4	2.7	2.5	2.2	2.5	2.3	2.4	2.3	2.8	2.4	2.4	2.4
JA04	HR	73.1	68.6	67.4	60.9	53.9	40	33.5	37.4	50.4	65.3	72.4	72.1	57.9
JA04	P	39	45	64	40	41	9	1	2	17	59	44	42	403
JA04	ET <sub>0</sub>	1.3	1.8	2.8	4.0	5.2	7.5	7.7	7.0	5.0	3.0	1.5	1.1	3.9
JA05	T	6.7	8.1	12.5	15.4	19.6	26.2	27.9	27.1	22.6	17	10.6	7.7	16.8
JA05	Rs	8.7	11.4	15	21.6	23.4	27.5	27.6	24.7	19.7	12.9	9.4	7.4	17.4
JA05	Vv	0.9	0.9	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.1	1	0.9	0.8	0.8	1.0
JA05	HR	79.1	74.5	70.5	61.1	52.5	39.9	33.8	37	49.9	68.9	77.5	79.8	60.4
JA05	P	47	51	65	38	41	5	0	3	18	63	41	57	429
JA05	ET <sub>0</sub>	1.0	1.5	2.4	3.8	4.7	6.3	6.4	5.6	4.0	2.2	1.2	0.8	3.2
JA06	T	7.8	8.7	12	14.2	18.1	24.6	26.8	26.4	21.9	17.2	11.1	8.5	16.4
JA06	Rs	9.6	12.1	15.4	21.6	23.6	27.9	28.4	25.3	19.9	13	9.6	8	17.9
JA06	Vv	1	1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	0.9	0.9	0.8	1.1
JA06	HR	67.5	67.5	65.5	59	52.5	40.7	32.9	36.3	49.1	63.2	68.8	70.6	56.1
JA06	P	35	57	71	41	64	6	0	28	71	56	55	484	
JA06	ET <sub>0</sub>	1.0	1.5	2.4	3.6	4.5	6.1	6.4	5.7	3.9	2.2	1.2	0.8	3.3
JA07	T	8	9.1	13	15.6	19.7	26.3	28.3	27.6	23.3	17.9	11.5	8.8	17.4
JA07	Rs	9	11.9	15.3	21.8	23.6	27.7	27.7	24.7	19.7	13	9.5	7.7	17.6
JA07	Vv	1.8	1.9	2.1	2.1	2	2.1	2.2	2	1.9	1.9	1.7	1.8	2.0
JA07	HR	70.7	66.6	63.5	55.7	48.8	36.8	30.8	34.9	46.4	62.6	70.9	72.2	55.0
JA07	P	39	42	53	35	34	3	0	13	19	48	33	43	362
JA07	ET <sub>0</sub>	1.3	1.9	2.9	4.3	5.4	7.3	7.7	6.7	4.8	2.8	1.5	1.2	3.9
JA08	T	6.5	7.8	12.2	14.9	18.9	25.5	26.9	26.1	22.1	16.6	10.2	7.4	16.3
JA08	Rs	9	12.2	15.6	22.4	24.1	28.7	28.6	25.5	20.4	13.3	9.6	7.8	18.1
JA08	Vv	1	1	1.1	1.2	1.1	1.2	1	1	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0
JA08	HR	77.3	72.7	69.5	61.4	55.6	42.4	38.1	41.6	52.9	69.7	77	78.8	61.4
JA08	P	47	50	64	39	44	10	0	2	21	64	43	53	437
JA08	ET <sub>0</sub>	1.0	1.6	2.6	3.9	4.8	6.4	6.4	5.5	4.0	2.2	1.2	0.9	3.3
JA09	T	7.9	9	12.7	15.2	19.4	26.1	28.1	27.5	23.2	17.7	11.3	8.7	17.2
JA09	Rs	8.4	11.4	15.6	22.7	24.7	29.4	29.5	26.1	20.5	12.8	9	7.1	18.1
JA09	Vv	1.8	1.8	1.9	1.8	1.6	1.9	2.1	2.1	1.9	1.8	1.7	1.8	1.9
JA09	HR	72.3	67.8	65.7	58	49.8	36.8	30.5	34.3	45.6	62.6	70.8	72.9	55.6
JA09	P	47	48	68	35	36	3	0	4	22	61	43	52	419
JA09	ET <sub>0</sub>	1.2	1.8	2.7	4.1	5.2	7.2	7.9	6.8	4.8	2.6	1.4	1.1	3.8
JA10	T	7.3	8.5	13	15.7	19.7	25.3	26.4	26	21.9	17	11.1	8.2	16.7
JA10	Rs	8.3	11.3	14.7	21	22.9	26.9	27	24	18.9	12.2	9.1	7.2	17.0
JA10	Vv	1.2	1.4	1.7	1.8	1.7	1.5	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4
JA10	HR	80.2	75.3	72.3	62.5	56.3	48.5	47.5	50.2	59.1	73	79.3	81.7	65.5
JA10	P	55	52	84	39	47	7	0	5	29	106	54	75	553
JA10	ET <sub>0</sub>	1.1	1.7	2.7	4.1	5.0	6.4	6.3	5.6	4.0	2.3	1.3	1.0	3.4
JA11	T	5.7	6.9	11.3	14.1	18.3	25.3	27	26.2	21.5	16	9.6	6.7	15.7
JA11	Rs	8.1	11.1	14.3	20.3	22.3	26.8	27	24	18.6	12.3	8.7	7.2	16.7
JA11	Vv	1.2	1.3	1.6	1.5	1.5	1.7	1.7	1.6	1.4	1.3	1.2	1.2	1.4
JA11	HR	79.1	74.6	70.6	62.7	55.9	41.2	34.2	37.8	52.2	70.2	77.9	79.7	61.3
JA11	P	49	42	57	46	42	11	1	3	21	67	45	46	430
JA11	ET <sub>0</sub>	0.9	1.5	2.5	3.7	4.7	6.6	6.9	6.1	4.1	2.3	1.2	0.9	3.3

Nombre corto	Var.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
JA12	T	6.9	8.3	11.7	14.9	19.3	25.5	27.5	27.3	22.7	17.5	11	7.9	16.7
JA12	Rs	9.1	11.6	15.3	21.7	24.2	28.5	28.7	25.6	20.1	12.9	9.4	7.7	17.9
JA12	Vv	1	1.1	1.2	1.1	1	1	1	1	0.9	0.9	0.9	1	1.0
JA12	HR	78.6	76.1	70.3	63.2	54.6	44	36.3	38.1	50.2	69.6	77.1	79.8	61.5
JA12	P	48	55	70	36	32	8	1	3	22	76	43	52	446
JA12	ET <sub>0</sub>	1.0	1.5	2.5	3.7	4.6	6.0	6.2	5.5	3.9	2.2	1.2	0.8	3.3
JA14	T	6.7	8	11.8	14.6	18.6	25.5	27.7	27	22.3	16.9	10.4	7.6	16.4
JA14	Rs	9.3	11.7	15.3	21.4	23.2	27.9	28.1	25.2	19.8	13	9.4	7.7	17.7
JA14	Vv	1	1	1	1.1	1	1.1	1.1	1	0.9	0.9	0.9	0.8	1.0
JA14	HR	73.7	69.6	66.1	59.5	53.7	39.2	32	35.5	49.4	66.8	75.4	76.7	58.1
JA14	P	38	43	53	43	42	9	1	1	27	65	46	43	411
JA14	ET <sub>0</sub>	1.0	1.5	2.4	3.7	4.6	6.2	6.4	5.6	3.8	2.2	1.1	0.8	3.3
JA15	T	6.3	7.8	12.2	15.1	19.1	25.8	27.8	27.3	22.6	17.3	10.6	7.3	16.6
JA15	Rs	9.4	12	15.7	22	24.1	28.4	28.4	25.4	20.1	13.2	9.5	7.9	18.0
JA15	Vv	1.1	1.2	1.3	1.5	1.4	1.5	1.5	1.4	1.3	1.1	1	0.9	1.3
JA15	HR	77.2	73.2	68.6	61.2	53.3	40.3	33.2	35.8	49.3	67.5	76.2	79.4	59.6
JA15	P	37	56	58	35	34	7	1	2	24	57	40	44	395
JA15	ET <sub>0</sub>	1.0	1.6	2.6	3.9	4.9	6.7	6.9	6.1	4.2	2.4	1.2	0.8	3.6
MA01	T	11.4	11.7	14.4	16.5	19.3	24	26.1	26.1	23.1	18.9	14.5	12	18.2
MA01	Rs	10.1	12.4	15.7	22.1	24.8	28.1	27.7	24.8	20	12.8	9.9	8.2	18.1
MA01	Vv	1.2	1.2	1.2	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1	1.3
MA01	HR	68	68.5	68.7	60.7	57.4	51.1	49.6	53.1	59.2	70	69.8	73.2	62.4
MA01	P	31	60	84	33	23	1	0	1	23	58	71	85	470
MA01	ET <sub>0</sub>	1.4	1.9	2.7	4.0	4.8	6.0	6.2	5.5	4.1	2.4	1.5	1.1	3.4
MA02	T	10.9	11.6	14.2	16.4	19.2	23.6	25.7	25.7	22.8	19	14.5	12	18.0
MA02	Rs	9.9	12.1	15.3	21.2	23.7	26.2	25.9	23.3	18.6	13.3	9.7	8.4	17.3
MA02	Vv	1.7	1.7	1.6	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6	1.6
MA02	HR	69.3	68.7	70.1	63	59.7	55.1	54.7	57	62.9	69.7	68.8	72.2	64.3
MA02	P	43	64	115	49	18	2	1	1	46	47	91	70	547
MA02	ET <sub>0</sub>	1.6	2.1	2.7	3.9	4.8	5.8	6.1	5.4	4.1	2.7	1.9	1.5	3.6
MA03	T	7.4	8.3	12	14.1	17.7	23.7	25.9	25.8	21.9	17.6	11.4	8.6	16.2
MA03	Rs	9	12	15.5	21.4	24.1	27.8	27.8	24.9	19.5	12.6	8.8	7.2	17.6
MA03	Vv	1.1	1.1	1.3	1.2	1.3	1.5	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1	1.2
MA03	HR	74.3	71.4	69.3	62.3	56.9	45.4	38.6	41.1	51	64.4	71	76.2	60.2
MA03	P	36	45	63	28	37	2	1	1	22	58	67	69	429
MA03	ET <sub>0</sub>	1.1	1.6	2.5	3.6	4.7	6.2	6.3	5.6	4.1	2.5	1.3	1.0	3.3
MA04	T	12.1	12.1	14.1	16	18.8	23.2	25.8	25.7	22.9	19	15.1	12.7	18.1
MA04	Rs	9.4	11.9	15	21.5	24.1	27.8	27.7	24.9	19.9	12.5	9.5	7.6	17.7
MA04	Vv	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.4	2.4	2.5	2.4	2.3	2.5	2.5
MA04	HR	65.7	66.5	68.9	61.2	57.4	52	47.9	52.5	58.5	68.7	67	70.9	61.4
MA04	P	99	96	123	52	21	9	0	3	21	110	115	167	816
MA04	ET <sub>0</sub>	1.8	2.2	2.8	4.2	5.1	6.5	6.9	6.3	4.7	2.9	2.0	1.5	3.9
MA05	T	6.5	7.5	11.3	13.3	16.9	23.1	25	24.7	20.6	16.8	10.2	7.7	15.3
MA05	Rs	9.3	12.1	15.8	21.7	24.5	28.7	28.9	25.9	20.2	13.3	9.6	7.5	18.1
MA05	Vv	0.9	1	1.1	1.1	1	1.1	1.1	1	0.9	0.9	0.8	0.9	1.0
MA05	HR	78.4	75.6	73.1	66.3	59.8	46.8	40.3	44.2	56	68.1	76.2	79.7	63.7
MA05	P	40	46	71	34	41	6	0	3	22	62	69	73	467
MA05	ET <sub>0</sub>	1.0	1.5	2.4	3.5	4.4	5.9	6.2	5.4	3.8	2.3	1.2	0.8	3.2
MA06	T	8	8.7	11.8	14.1	17.7	23.5	25.6	25.3	21.5	17	11.4	8.8	16.1
MA06	Rs	9.2	12.1	15.8	21.7	24.5	28	27.9	25	19.4	12.8	9.6	7.9	17.8
MA06	Vv	2.1	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4	2.3	2.2	2.1	1.9	2.1	2.2
MA06	HR	77	74.7	71.9	63.5	56	45.6	41.3	45.9	56.6	70.8	74.7	78.7	63.1
MA06	P	41	54	67	30	28	2	0	2	21	86	61	62	454
MA06	ET <sub>0</sub>	1.3	1.8	2.7	3.9	5.1	6.9	7.3	6.5	4.6	2.7	1.5	1.1	3.7
MA07	T	11.6	11.8	14.3	16.4	19.2	23.7	25.7	25.8	22.9	19.2	14.7	12.2	18.1
MA07	Rs	10.2	12.4	15.7	21.9	24.2	26.7	26.5	23.9	19.2	13	10	8.4	17.7
MA07	Vv	2.4	2	2	1.9	1.9	2	2.1	2	1.8	1.7	2	2.2	2.0
MA07	HR	65.5	67.8	69.1	62.6	59	53.8	53.7	56.1	61.5	69.9	68.5	70.9	63.2
MA07	P	35	73	112	41	17	1	0	1	21	60	94	98	553
MA07	ET <sub>0</sub>	2.0	2.2	2.9	4.2	5.0	6.3	6.6	5.9	4.4	2.8	2.1	1.6	3.8

Nombre corto	Var.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
MA08	T	11	11.4	14.1	16.4	19.5	24.4	26.7	26.6	23.2	18.9	14.2	11.5	18.2
MA08	Rs	9.8	11.9	15.3	21.4	23.8	27.2	27	24.2	19.1	12.6	9.5	7.9	17.5
MA08	Vv	1.6	1.4	1.4	1.6	1.6	1.8	1.8	1.7	1.5	1.2	1.3	1.4	1.5
MA08	HR	68.7	70.2	70.1	62.1	57.2	49.9	46.9	50.9	58.9	71.1	71.8	75.1	62.7
MA08	P	25	64	82	28	22	1	0	1	19	64	88	82	476
MA08	ET <sub>0</sub>	1.6	1.9	2.7	4.1	5.0	6.4	6.8	6.0	4.3	2.5	1.6	1.3	3.7
MA09	T	10.9	11.2	13.8	16.1	19.4	24.3	26.3	26.2	23	18.9	14.2	11.5	18.0
MA09	Rs	9.3	11.7	15.4	21	24.1	27.2	27	24.1	19	12.6	9.3	7.5	17.4
MA09	Vv	0.8	0.8	0.8	0.9	1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.8	0.7	0.7	0.9
MA09	HR	70.8	72.1	72.6	65.5	59.2	51.8	50	54.1	61.3	72.6	73.2	76.8	65.0
MA09	P	27	75	78	39	21	1	0	1	4	50	76	75	447
MA09	ET <sub>0</sub>	1.1	1.6	2.4	3.6	4.6	5.8	6.0	5.3	3.8	2.2	1.3	0.9	3.2
SE01	T	9.9	10.7	14.2	16.3	19.8	23.7	24.8	24.8	22.1	18.4	13	10.9	17.4
SE01	Rs	9.4	12.3	16.2	21.5	25.3	27.9	28.2	24.9	19.6	13	9.7	7.9	18.0
SE01	Vv	2	1.9	2.2	2.2	1.9	1.7	1.5	1.4	1.4	1.7	1.7	2	1.8
SE01	HR	79.2	75.9	75.9	66.9	61.4	61	60.8	63.3	66.5	74.4	76.5	80.3	70.2
SE01	P	55	52	67	44	25	6	0	3	44	90	78	72	536
SE01	ET <sub>0</sub>	1.4	2.0	2.8	4.2	5.3	6.1	6.3	5.6	4.2	2.6	1.6	1.2	3.5
SE02	T	9.7	10.5	14	16	19.3	23.6	25.1	25.6	23	19.1	13.5	10.7	17.5
SE02	Rs	10.8	14	18.3	24.3	28.2	31	30.3	26.8	21.8	14.5	10.9	8.9	20.0
SE02	Vv	2.2	2.2	2.4	2.4	2.1	2	1.9	2.1	2.1	2.2	2.1	2.3	2.2
SE02	HR	77.4	74	73.4	65.9	61.5	58.5	56.7	57.1	59.8	69.6	74.4	79.6	67.3
SE02	P	54	49	56	39	25	5	1	1	33	84	78	69	494
SE02	ET <sub>0</sub>	1.5	2.2	3.2	4.6	5.7	6.8	7.0	6.5	5.1	3.2	1.9	1.4	4.0
SE03	T	9.4	10.2	13.7	15.6	19	23	24.7	25	22.4	18.6	13.1	10.3	17.1
SE03	Rs	9.9	13	17	23.1	26.8	29.2	29.3	26	20.7	13.6	10.2	8.3	18.9
SE03	Vv	2.2	2.1	2.3	2.2	2	2.1	2.2	2.3	2.1	2.2	2	2.1	2.2
SE03	HR	79.5	76.6	75.8	69.2	64.3	61.3	57.7	58.7	62.5	72.3	76.8	80.6	69.6
SE03	P	60	62	63	38	28	5	3	4	36	82	85	68	534
SE03	ET <sub>0</sub>	1.4	2.0	2.9	4.2	5.4	6.5	7.1	6.5	4.8	3.0	1.8	1.3	3.8
SE04	T	9.9	10.5	14	15.4	18.9	24	25.5	26.1	22.9	18.9	13.3	11.2	17.6
SE04	Rs	10	13.2	16.7	23.1	26.5	29.2	29.5	25.8	20.5	13.8	10.6	8.1	18.9
SE04	Vv	2.2	2.1	2.4	2.1	1.8	2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.3	2.4	2.3
SE04	HR	77.3	74.5	74	66.7	60.7	53.4	50.3	51.3	57.9	69.6	73.1	79.6	65.7
SE04	P	48	54	58	47	35	1	1	0	28	78	79	84	513
SE04	ET <sub>0</sub>	1.5	2.0	2.9	4.2	5.3	6.8	7.3	7.0	5.3	3.2	1.9	1.4	4.0
SE05	T	9.3	10	13.5	15.3	18.9	23.5	24.9	24.8	21.9	18.5	13.1	10.4	17.0
SE05	Rs	9.4	12.5	16.3	21.8	25.3	28	28.4	24.7	19.8	13	9.8	8	18.1
SE05	Vv	2.1	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	2.3	2.3	2.1	2.3	2.1	2.2	2.2
SE05	HR	78.3	75.8	76.3	68.7	61.3	55.7	53.2	56.8	61.9	72.7	75.4	79.1	67.9
SE05	P	63	39	75	38	23	3	0	20	39	103	84	74	561
SE05	ET <sub>0</sub>	1.4	2.0	2.8	4.2	5.5	6.9	7.2	6.4	4.8	2.9	1.8	1.3	3.8
SE07	T	9.8	10.6	14	16	19.9	24.1	25	24.6	21.7	18.5	13.4	10.8	17.4
SE07	Rs	9	12.3	16.1	21.5	25.1	27.7	28	24.6	19	12.3	9.6	7.8	17.8
SE07	Vv	1.9	1.9	2	1.9	2	1.9	1.6	1.5	1.4	1.6	1.8	2	1.8
SE07	HR	78.4	74.8	74.3	64.8	58.3	58.4	60.3	64.4	68.2	74.9	76.4	78.9	69.3
SE07	P	63	43	74	43	25	3	1	3	44	107	79	81	566
SE07	ET <sub>0</sub>	1.3	2.0	2.8	4.1	5.5	6.4	6.3	5.5	4.0	2.5	1.7	1.2	3.5
SE08	T	10.1	10.9	14.3	16.3	20	23.8	24.4	24.2	21.6	18.7	13.5	10.9	17.4
SE08	Rs	9.5	12.9	16.8	22.5	26.1	28.8	29	25.5	20.5	13.1	9.9	8.3	18.6
SE08	Vv	1.9	1.9	2.1	2.1	2.4	2.2	1.7	1.5	1.4	1.7	1.7	1.9	1.9
SE08	HR	77.4	74.5	73.6	64.3	59	61.9	64.5	67.8	69.8	74.9	75.4	77.9	70.1
SE08	P	63	50	62	36	25	3	1	3	35	86	78	63	505
SE08	ET <sub>0</sub>	1.4	2.0	2.9	4.3	5.7	6.5	6.4	5.5	4.2	2.6	1.6	1.2	3.7
SE09	T	8.6	9.3	12.9	15.5	19.5	25.4	27.7	27.6	23.8	18.9	12.9	9.6	17.6
SE09	Rs	9.7	12.7	16.5	22.6	25.8	29.9	29.4	26	20.6	13.4	10	8.1	18.7
SE09	Vv	1.7	1.8	1.9	1.8	1.7	1.9	2	2.1	1.9	1.9	1.7	1.8	1.9
SE09	HR	76.4	73.2	72.5	63.7	55.9	45	38.5	41.2	50.2	65.4	71.5	76.5	60.8
SE09	P	41	58	75	31	37	3	0	7	31	86	54	62	485
SE09	ET <sub>0</sub>	1.3	1.9	2.8	4.1	5.3	7.2	7.7	7.0	5.0	3.0	1.7	1.2	3.9

Nombre corto	Var.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
SE10	T	8.7	9.6	13.3	15.7	19.6	25.1	27.2	27.1	23.3	18.6	12.6	9.6	17.5
SE10	Rs	9.3	12.2	15.8	21.7	24.7	28.1	28.2	25.2	19.9	12.9	9.6	7.8	18.0
SE10	Vv	1.2	1.3	1.5	1.5	1.4	1.5	1.4	1.5	1.3	1.3	1.1	1.2	1.4
SE10	HR	78.4	74.3	73	63.1	55.2	45.7	39.7	42.9	52.8	68.6	75.2	79.2	62.3
SE10	P	49	55	68	37	34	3	0	8	34	88	68	77	521
SE10	ET <sub>0</sub>	1.0	1.6	2.6	3.9	5.0	6.5	6.8	6.1	4.3	2.5	1.3	0.9	3.5
SE11	T	9	9.8	13.2	15.5	19.5	25.1	27.1	26.9	23.2	19.1	12.9	10.1	17.6
SE11	Rs	9.7	12.5	15.8	21.5	25	28.7	28.9	25.7	20.2	13.5	9.9	8.1	18.3
SE11	Vv	2.1	2.2	2.4	2	1.9	2.2	2.2	2.4	2.4	2.8	2.2	2.3	2.3
SE11	HR	75.9	73.5	71.6	62.7	54.7	43.8	38.2	41.5	51.3	64.6	71.9	76.8	60.5
SE11	P	44	52	65	32	35	1	0	1	23	66	50	53	422
SE11	ET <sub>0</sub>	1.4	2.0	2.9	4.2	5.5	7.3	7.8	7.2	5.3	3.5	1.8	1.3	4.1
SE12	T	9.5	10.6	14.2	16.7	20.2	24.6	25.6	25.6	22.7	18.6	13	10.2	17.6
SE12	Rs	9	12.1	15.5	21.3	24.4	27.4	27.9	24.7	19.5	12.6	9.7	7.9	17.7
SE12	Vv	2	2	2.4	2.4	2	1.5	1.3	1.3	1.6	1.8	1.8	2.1	1.9
SE12	HR	77.1	72.1	71.2	60.9	56	54.1	54.5	56.4	60	71.5	75.7	78.2	65.6
SE12	P	52	45	73	41	28	3	0	10	38	124	80	82	576
SE12	ET <sub>0</sub>	1.3	2.0	3.0	4.5	5.4	6.2	6.2	5.5	4.4	2.7	1.6	1.3	3.6
SE13	T	9.1	9.9	13.4	15.6	19.3	24.9	26.6	26.6	22.9	18.4	12.8	10.3	17.5
SE13	Rs	9	12.2	15.5	21	24.3	27.2	27.4	24.3	18.9	12.5	9.6	7.5	17.5
SE13	Vv	1	1.1	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5	1.6	1.5	1.4	0.9	1	1.3
SE13	HR	80	76.5	76.9	67.9	59.7	49.2	43.7	46.9	56.4	72.3	75	80.9	65.5
SE13	P	62	59	73	45	36	2	0	1	28	102	71	85	564
SE13	ET <sub>0</sub>	0.9	1.5	2.4	3.7	4.8	6.3	6.7	6.2	4.4	2.4	1.2	0.8	3.3
SE14	T	9	10.2	14.1	16.5	20	24.7	26.1	26	22.4	18.3	12.6	9.9	17.5
SE14	Rs	9	12	15.7	21	24	26.8	27.3	24.2	19	12.2	9.4	7.7	17.4
SE14	Vv	1.1	1.2	1.4	1.3	1.2	1.1	1	1	0.9	1	0.9	1.2	1.1
SE14	HR	77.6	72.8	70.8	64.1	58.9	54.5	51.6	54	60.8	73.5	76.8	78.1	66.1
SE14	P	57	55	66	38	27	1	0	9	40	145	80	84	602
SE14	ET <sub>0</sub>	1.1	1.7	2.7	3.8	4.8	5.8	6.0	5.4	3.8	2.2	1.3	1.0	3.2
SE15	T	9	10.1	14	16.4	20.3	25.2	26.6	26.5	23	18.7	12.9	9.8	17.7
SE15	Rs	8.9	12	15.8	21.8	25.1	28.4	28.9	25.7	20	12.8	9.5	7.6	18.0
SE15	Vv	1.3	1.4	1.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3
SE15	HR	78.7	74	72.4	63.7	57	51.4	48.5	51.1	57.8	71.2	76.1	79.7	65.1
SE15	P	63	57	70	38	28	2	0	3	24	131	76	90	582
SE15	ET <sub>0</sub>	1.1	1.8	2.8	4.0	5.1	6.4	6.6	5.9	4.2	2.5	1.4	1.0	3.5
SE16	T	8.9	9.9	13.5	15.5	19.3	24.2	26.2	26.3	23	18.9	13	10.2	17.4
SE16	Rs	10.3	13.3	16.7	22.9	26.3	29.4	29.7	26.4	21	13.8	10.6	8.7	19.1
SE16	Vv	2.2	2.2	2.5	2.4	2.1	2.1	2.2	2.5	2.6	2.6	2.1	2.4	2.3
SE16	HR	76.5	75.5	75.4	67	59.4	52.4	46.9	48.9	56.5	69.6	73.4	78	65.0
SE16	P	46	47	68	45	25	3	1	1	40	91	67	56	490
SE16	ET <sub>0</sub>	1.5	2.1	2.9	4.4	5.5	6.9	7.5	7.1	5.4	3.1	1.9	1.4	4.1
SE17	T	9.9	10.7	14.1	16.6	20.5	25.6	27.7	27.5	24	19.4	13.8	10.8	18.4
SE17	Rs	10.2	12.9	16.7	22.2	25.4	28.7	29.1	26	20.4	13.3	10.4	8.6	18.7
SE17	Vv	1.4	1.5	1.6	1.7	1.5	1.7	1.7	1.9	1.7	1.7	1.5	1.5	1.6
SE17	HR	74.2	71.6	71.1	63.3	55.4	47.7	42.1	45.8	54.6	69.6	73	76.2	62.1
SE17	P	41	59	64	42	30	7	0	5	35	128	74	66	551
SE17	ET <sub>0</sub>	1.2	1.9	2.9	4.2	5.4	6.8	7.3	6.7	4.9	2.7	1.6	1.1	3.9
SE18	T	9.5	10.3	13.8	16.1	20.1	25.2	27	26.9	23.3	19.1	13.2	10.3	17.9
SE18	Rs	10	12.6	16.8	22.1	25.4	30.2	28.8	25.7	20.5	13.4	10.3	8.4	18.7
SE18	Vv	1.2	1.3	1.5	1.5	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.1	1.2	1.3
SE18	HR	71.3	69.1	65.9	59.7	52.4	45.8	41.2	44.4	53.2	65	69.4	74.1	59.3
SE18	P	46	66	60	43	32	2	0	1	36	82	59	51	478
SE18	ET <sub>0</sub>	1.2	1.8	2.8	4.0	5.2	6.8	6.6	5.9	4.3	2.6	1.5	1.0	3.6
SE101	T	9.2	9.9	13.4	15.6	19.8	24.8	27.4	27.2	23.5	19.1	13.3	10.3	17.8
SE101	Rs	9.9	12.5	16.2	21.2	25.1	27.7	28.4	25.4	19.7	13	10.1	8.3	18.1
SE101	Vv	2.5	2.5	2.6	2.3	2	2.1	2.2	2.6	2.6	2.6	2.4	2.8	2.4
SE101	HR	75.4	73.1	73.3	67.4	57.3	51	42.9	45.4	54.2	69.2	72	77	63.2
SE101	P	34	55	63	34	30	2	0	5	47	85	61	56	472
SE101	ET <sub>0</sub>	1.6	2.1	3.1	4.2	5.5	6.9	7.7	7.4	5.4	3.2	2.0	1.5	4.1

Nombre corto	Var.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
	T	8.8	9.6	12.9	15.1	18.7	24.0	25.9	25.7	22.2	18.0	12.4	9.7	16.9
Promedio de	Rs	9.6	12.5	16.1	21.9	24.7	28.1	28.2	25.1	19.9	13.3	9.8	8.0	18.1
todas las	Vv	1.7	1.7	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	1.6	1.7	1.7
estaciones de	HR	73.7	71.2	70.1	63.4	57.8	49.4	45.7	48.9	57.5	68.7	72.7	75.5	62.9
la RIAA	P	46	52	65	42	32	7	1	4	26	77	65	67	485
	ET <sub>0</sub>	1.3	1.9	2.8	4.0	5.1	6.5	6.8	6.1	4.4	2.7	1.6	1.2	3.6

## **Bibliografía**

Alexanderson, H., 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climat.*, 6, 661-675.

Alexanderson, H., Moberg A., 1997. Homogenization of Swedish temperature data. Part I: A homogeneity test for linear trends. *Int. J. Climatol.*, 17, 25-34.

Allen, R. G., 1996. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *J. Irrig. Drainage Eng.*, 122(2), 97-106.

Allen, R.G., 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated regions as part of an evapotranspiration intercomparison study. *J. of Hidrol.*, 229, 27-4.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper no.24, Roma.

Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S., Perrier, A., 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bull.*, 43(2), 35-92.

Allen, R.G., Walter, I. A., Elliott, L., Itenfisu, D., Brown, P., Jensen, M.E., Mecham, B., Howell, T.A., Snyder, R., Echings, T., S., Spofford, T., Hattendorf, M., Cuenca, R.H., Wright, J.L., Martin, D.L., 2000. Issues, requirements and challenges in selecting and specifying a satandardized ET equation. *Proc. 4<sup>th</sup> Nat. Irrig. Symp.*, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich.

Allen, R.G., Wright, J.L., 1997. Translating wind measurements from Weather Stations to Agricultural Crops. *J. Hydrolog. Eng.*, 2(1), 26-35.

Ardanuy, R., Martín, Q., 1993. *Estadística para Ingenieros*. Ed. Hespérides. Salamanca.



ASCE-EWRI, 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Environmental and Water Resources Institute of the ASCE Standardization of Reference Evapotranspiration Evapotranspiration Task Committee. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, p.216.

Barnes, S.L., 1964. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. *J. Appl. Meteor.*, 3, 396-409.

Benjamin, J.R., Cornell, C.A., 1970. Probability, statistics and decision for civil engineers. McGraw-Hill. Nueva York.

Berengena, J., Gavilán, P., 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 131(2), 147-163.

Beven, K., 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *J. of Hydrol.*, 44, 169-190.

Bosen, J.F., 1958. An approximation formula to compute relative humidity from dry bulb and dew point temperatures. *Monthly Weather Rev.*, 86(12), 486.

Bristow, K.L., Campbell, G.S., 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric. For. Meteorol.*, 31, 159-166.

Camillo, P.J., Gurney, R.J., 1984. A sensitivity análisis of a numerical model for estimating evapotranspiration. *Water Resources Res.*, 12(5), 873-879

Campbell Scientific Ltd., 1998a. ARG100 Tipping Bucket Raingauge. User Guide. U.K.

Campbell Scientific Ltd., 1998b. 05103 Wind Monitor (including optical Wind Tracker). User Guide. U.K.

Campbell Scientific Ltd., 1999. HMP45C Temperature and Relative Humidity Probe. User Guide. U.K.

Campbell Scientific Ltd., 2000. CR10X Measurement and Control Module. Instruction Manual. U.K.

Carlson, J.D., 1989. The importance of agricultural weather information: A Michigan survey. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 70:366-380.

- Coleman, G., DeCoursey, D.G., 1976. Sensitivity and model variance analysis applied to some evapotranspiration and evapotranspiration models. *Water Resources Res.*, 12(5), 873-879.
- Cuadrat, J.M., Vicente, S.M., Saz, M.A., 2002. Fuentes de información en climatología: Incertidumbres de las series de datos climáticos en España. VII Reunión Nacional de Climatología. 27-29 Junio. Albarracín (Zaragoza).
- Cuadrat, J.M., Pita, M.F., 1997. *Climatología*. Cátedra, Madrid.
- De Haro, J.M., Gavilán, P., Fernández, R., 2003. The Agroclimatic Information Network of Andalucía. 3<sup>rd</sup> International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations. 19, 20 y 21 Febrero 2003. Torremolinos (Málaga).
- DeGaetano, A. T., 1997. A quality control procedure for hourly wind data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 14, 308-317.
- Decreto 141/2006, de 18 de julio, por el que se ordena la actividad cartográfica de la Comunidad Autónoma Andaluza. (BOJA 09/08/2006).
- DIRECTIVE 2007/2/EC of the European Parliament and of the council, 2007. "Establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community". Official Journal of the European Union. L 108/1:14
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for prediction of crop water requirements. *FAO Irrig. Drain. Paper No.24.*, 2<sup>a</sup> Ed., FAO, Roma.
- Doraiswamy, P.C., Pasteris, P.A., Jones, K.C., Motha, R.P., Nejedlik, P., 2000. Techniques for methods of collection, database management and distribution of agrometeorological data. *Agric. For. Meteorol.*, 103, 83-97.
- Duffie, J. A., Beckman, W.A., 1991. *Solar engineering of thermal processes*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y.
- Eischeid, J.K., Baker, T.K., Díaz H.F., 1995. The quality control of long-term climatological data using objective data analysis. *J. Appl. Meteor.*, 34, 2787-2795.
- Eskridge, R.E., Alduchov, O.A., Chernykh, I.V., Panmao, Z., Polansky, A.C. y Doty, S.R., 1995. A comprehensive aerological reference data set (CARDS): Rough and systematic errors. *Bull.Amer.Meteor.Soc.*, 76, 1759-1775.

Estévez, J., Gavilán, P., 2006. Quality control procedures in the Agroclimatic Stations Network of Andalusia. Proceedings of the 4th International Conference on Experiences with Automated Weather Stations. 24-26 Mayo 2006. Lisboa.

Estévez, J., Gavilán, P., De Haro, J., 2005. Calibración de piranómetros en la Red de Información Agroclimática de Andalucía. XXIII Congreso Nacional de Riegos. Elche, del 14 al 16 de Junio. Asociación Española de Riegos y Drenajes.

Estévez, J., Ruiz, N., Gavilán, P., 2007. Distribución de la aridez en los regadíos de Andalucía. Agricultura, 899, 634-636.

Evans, M., Hastings, N., Peacock, B., 2000. Statistical Distributions. 3ed. John Wiley and Sons, 221 pp.

Feng, S., Hu, Q., Qian, Q., 2004. Quality control of daily meteorological data in China, 1951-2000: a new dataset. Int. J.Climatol., 24, 853-870.

Fiebrich, C. A., Crawford, K. C., 2001. The impact of unique meteorological phenomena detected by the Oklahoma Mesonet and ARS Micronet on automated quality control. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, 2173-2187.

Gandin, L.S., 1988. Complex quality control of meteorological data. Mon. Wea. Rev., 116, 1137-1156.

Gavilán, P., De Haro, J., Fernández, R., López, D., 2003. Use of a network of automated weather stations for the determination and dissemination of referente evapotranspiration. 3<sup>rd</sup> International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations. 19, 20 y 21 Febrero 2003. Torremolinos (Málaga).

Gavilán, P., Estévez, J., Berengena, J., 2008. Comparison of Standardized Referente Evapotranspiration Equations in Southern Spain. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE, 134(1), 1-12.

Gavilán, P., Lorite, I.J., Tornero, S., Berengena, J., 2006. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating referente ET in a semiarid environment. Agric. Water Manage., 81(3), 257-281.

Geiger, M.L., Diabate, L. M., Wald, L., 2002. A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation. Solar Energy, 73, 475-480.

Getz, R.R., 1978. A survey of New Jersey's agricultural weather service users. Bull. Amer. Meteor. Soc., 59, 1297-1304.

- Gong, L., Xu, C., Chen, D., Halldin, S., Chen Y.D., 2006. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *J. Hydrol.*, 329, 620-629.
- Graybeal, D. Y., 2005. Relationships among daily mean and maximum wind speeds with application to data quality assurance. *Int. J. Climatol.*, 26, 29-43.
- Graybeal, D. Y., DeGaetano, A. T., Eggleston, K.L., 2004a. Improved quality assurance for historical hourly temperature and humidity: development and application to environmental analysis. *J. Appl. Meteor.*, 43, 1722-1735.
- Graybeal, D. Y., DeGaetano, A. T., Eggleston, K.L., 2004b. Complex quality assurance of historical hourly surface airways meteorological data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21, 1156 -1169.
- Grüter, E., Häberli, C., Küng, U., Mumenthaler, P., Mettler, J., Bassi, M., Konzelmann, T., Dösseger, R., 2001. The next generation of quality control tools for meteorological data at Meteoswiss DACH-MT 2001.
- Guttman, N.B., 2002. Digitization of historical daily cooperative network data. Preprints, 13<sup>th</sup> Conf. On Applied Climatology, Portland, OR, Amer. Meteor. Soc., 43-46.
- Guttman, N.B., Karl, C., Reek, T., Shuler, V., 1988. Measuring the performance of data validators. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 69, 1448-1452.
- Howell, T.A., Meek, D.W., Phene, C.J., Davis, K.R., McCormick, R.L., 1984. Automated weather data collection for research on irrigation scheduling. *ASAE.*, 27(2), 386-391.
- Hubbard, K.G., 2001. Multiple station quality control procedures. Automated weather stations for applications in agriculture and water resources management. World Meteorological Organization Tech. Doc. AGM-3 WMO/TD No. 1074, 133-136.
- Hubbard, K. G., Goddard, S., Sorensen, W. D., Wells, N., Osugi, T.T., 2005. Performance of quality assurance procedures for an applied climate information system. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22, 105-112.
- Hubbard, K. G., You, J., 2005. Sensitivity analysis of quality assurance using the spatial regression approach. A case study of the maximum/minimum air temperature. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22, 1520-1530.

Infraestructura de Datos Espaciales de Andalucía.  
<http://www.andaluciajunta.es/IDEAndalucia/IDEA.shtml>

International Organization for Standardization, 1994. Quality Management and Quality Assurance Standards: Guidelines for Selection and Use. ISO 9000.

International Standard Organization, 2003. ISO 19115:2003 “Geographic Information Metadata”. ISO 19000.

Irmak S., Irmak, A., Allen, R.G., Jones, J.W., 2003. Solar and Net Radiation-Based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129(5), 336-347

Irmak, S., Payero, J.O., Martin, D.L., Irmak, A., Howell, T.A., 2006. Sensitivity Analyses and Sensitivity Coefficients of Standardized Daily ASCE-Penman-Monteith Equation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 132(6), 564-578.

Itenfisu, D., Elliot, R.L., Allen, R.G., Walter, I.A., 2003. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129(6), 440-448.

Jensen, D.T., Hargreaves, G.H., Temesgen, B., Allen, R.G., 1997. Computation of  $ET_0$  under nonideal conditions. *J. Irrig. Drainage. Eng.*, 123(5), 394-400.

Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G., 1990. Evapotranspiration and water irrigation requirements. Committee on Irrigation Water Requirements, Irrigation and Drainage Division of ASCE, Manual No.70. ASCE. N.Y.

Johnson, N.L., Kotz, S., Balakrishnan, N., 1995. Continuous Univariate Distributions. 2ed. Vol. 2, John Wiley and Sons, 752 pp.

Joyanes Aguilar, L., 1997. Metodología de la programación: diagramas de flujo, algoritmos y programación estructurada. McGraw-Hill. Madrid.

Junta de Andalucía, 2007. Consejería de Agricultura y Pesca. Dirección General de la Producción Agrícola y Ganadera. [www.cap.junta-andalucia.es/agriculturaypesca/raif/inforaif.html](http://www.cap.junta-andalucia.es/agriculturaypesca/raif/inforaif.html)

Kunkel, K.E., Andsager, K., Conner, G., Decker, W.L., Hillacker, H.J., Kmox, P.N., Nurnberger, F.V., Rogers, J.C., Scheeringa, K., Wendland, W.M., Zandlo, J., Angel, J.R., 1998. An expanded digital daily database for climatic resources applications in the midwestern United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 1357-1366.

Kunkel, K.E., Easterling, D.R., Hubbard, K., Redmond, K., Andsager, K., Kruc, M.C., Spinar, M.L., 2005. Quality control of pre-1948 cooperative network observer data. *J.Atmos.Oceanic Technol.*, 22, 1691-1705.

Lanzante, J.R., 1996. Resistant, robust and nonparametric techniques for the analysis of climate data: theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. *Int. J. Climatol.*, 16, 1197-1226.

Ley, T.W., Hill, R.W., Jensen, D.T., 1994a. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: I. Model sensitivity analyses. *Transactions of the ASAE*, 37(6), 1863-1870.

Ley, T.W., Hill, R.W., Jensen, D.T., 1994b. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: II. Effects of weather sensor measurement variability. *Transactions of the ASAE*, 37(6), 1863-1870.

McCuen, R.H., 1973. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. *J. of Hydrol.*, 18, 37-53.

McCuen, R.H., 1974. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation. *W. Resource Bull.*, 10(3), 486-498.

McNew, K.P., Mapp, H.P., Duchon, C.E., Merrit, E.S., 1991. Sources and uses of weather information for agricultural decisions makers. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 72, 491-198.

Meek, D. W., Hatfield, J.L., 1994: Data quality checking for single station meteorological databases. *Agric. For. Meteor.*, 69, 85-109.

Meyer, S.J., Hubbard, K.G., Wilhite, D.A., 1989. Estimating potential evapotranspiration: The effect of random and systematic errores. *Agric. And Forest Meteor.*, 46, 285-296.

Meyer, S.J., Hubbard, K.G., 1992. Nonfederal automated weather stations and networks in the United States and Canada: a preliminary survey. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 449-157.

Miller, P.A., Bath, M.F., 2003. Ingest, integration, quality control, and distribution of observations from State Transportation Departments using MADIS. International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography and Hidrology (IIPS). 9-13 Febrero 2003, Long Beach, California.

Núcleo Español de Metadatos.  
<http://www.ideo.es/resources/recomendacionesCSG/NEM.pdf>

O'Brien, K.J., Keefer, T. N., 1985: Real-time data verification. Proc. ASCE Special Conf., Buffalo, NY, American Society of Civil Engineers, 764-770.

Pérez de los Cobos, P., Carazo, J.I., Padilla, F., 2003: Agroclimatic Information System for Irrigation Areas. 3<sup>rd</sup> International Conference on experiences with automatic weather stations. 19, 20 y 21 Febrero 2003. Torremolinos (Málaga).

Peterson, T.C., Vose R., Schmoyer R., Razuvaev, V., 1998: Global historical climatology network (GHCN) quality control of monthly temperature data. Int. J. Climatol., 18, 1169-1179.

Piper, B., 1989. Sensitivity of Penman estimates of evaporation to errors input data. Agric. Water Manmagement, 15, 279-300.

Podestá, G.P., Núñez, L., Villanueva, C.A., Skansi, M.A., 2004. Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas. Agric. For. Meteorol., 123, 41-53.

PostGIS: <http://postgis.refractions.net>

Rana, G., Katerji, N., 1998. A measurement based sensitivity análisis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration model for crops of diferent height and in contrasting water status. Theor. Appl. Climatol., 60, 141-149.

Reek, T., Doty, S. R., Owen, T.W 1992. A deterministic approach to the validation of historical daily temperature and precipitation data from the Cooperative Network. Bull. Amer. Meteor. Soc., 73, 753-765.

Ruiz, N., Lorite, I.J., Gavilán, P., Navarro, C., Estévez, J., 2007. Efecto de las heladas en el olivar andaluz: identificación y evaluación, análisis térmico y técnicas de teledetección. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa. Junta de Andalucía. Pp.78.

Saxton, K.E., 1975. Sensitivity analyses of the combination evapotranspiration equation. *Agric. Meteorol.*, 15, 343-353.

Schroeder, J.L., Burgett, W.S., Haynie, K.B., Sonmez, I., 2005: The West Texas Mesonet: a technical overview. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22, 211-222.

Shafer, M.A., Fiebrich, C.A., Arndt, D. S., Fredrickson, S. E., Hughes, T. W., 2000. Quality assurance procedures in the Oklahoma Mesonet. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17, 474-494.

Skye Instruments Ltd., 1995. Single Channel Light Sensor Reference Manual.

Sopoco, T.H., Boudreau, D., Armstrong, M., 2004. A new automated and interactive system for solar radiation data processing and quality control. Preprints, 20<sup>th</sup> Int. Conf. On Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography and Hydrology, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, 9.9.

Stonebraker, M., Kmnitz, G., 1991. The Postgres next-generation database-management system. *Communicat. ACM.*, 34, 78-92.

Thornton, P.E., Running, S.W., 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation. *Agric. For. Meteorol.*, 93, 211-228.

UNE 500510, 2005. Redes de Estaciones Meteorológicas Automáticas. Aspectos generales y nomenclatura. AENOR.

UNE 500520, 2002. Redes de Estaciones Meteorológicas Automáticas. Criterios de localización de emplazamientos e instalación de sensores. Características de adquisición y muestreo. AENOR.

UNE 500540, 2004. Redes de Estaciones Meteorológicas Automáticas. Directrices para la validación de registros meteorológicos procedentes de redes de estaciones automáticas. Validación en tiempo real. AENOR.

UNE 500550, 2003. Redes de Estaciones Meteorológicas Automáticas. Formatos de intercambio de registros meteorológicos y climatológicos. Metadatos. AENOR.



Vejen, F., Jacobsson, C., Fredriksson, U., Moe, M., Andresen, L., Hellsten, E., Rissanen, P., Palsdottir, T., Arason, T., 2002. Quality control of meteorological observations. Report 8/2002 KLIMA. Norwegian Meteorological Institute, Oslo.

Vining, K. C., Pope III, C.A., Dugas Jr., W.A., 1984. Usefulness of weather information to Texas agricultural producers. Bull. Amer. Meteor. Soc., 65, 1316-1320.

Wade, C. G., 1987. A quality control program for surface mesometeorological data. J. Atmos. Oceanic Technol., 4, 435-453.

Walter, I. A., Allen, R.G., Elliott, L., Itenfisu, D., Brown, P., Jensen, M.E., Mecham, B., Howell, T.A., Snyder, R., Echings, T., S., Spofford, T., Hattendorf, M., Cuenca, R.H., Wright, J.L., Martin, D.L., 2000. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. Proc. 4<sup>th</sup> Nat. Irrig. Symp., American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich.

Walter, I. A., Allen, R.G., Elliott, L., Itenfisu, D., Brown, P., Jensen, M.E., Mecham, B., Howell, T.A., Snyder, R., Echings, T., S., Spofford, T., Hattendorf, M., Martin, D.L., Cuenca, R.H., Wright, J.L., 2001. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Report. Reston, Va., ASCE Environmental and Water Resources Institute.

Weiss, A., Robb, J.G., 1986. Results and interpretations from a survey on agriculturally weather information. Bull. Amer. Meteor. Soc., 67, 10-15.

Wilks, D.S., 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press. Nueva York.

World Meteorological Organization, 1981. Manual on the Global observing System. Vol. I-Global aspects. WMO-No.544, Ginebra

World Meteorological Organization, 1992. Manual on the Global Data-Processing System. WMO-No.485, Ginebra.

World Meteorological Organization, 1993. Guide on the Global Data-Processing System. WMO-No.305, Ginebra.

World Meteorological Organization, 1996. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No.8, Ginebra.

World Meteorological Organization, 2005. Guidelines on Climate and Metadata and Homogenization. WMO Technical Document 1186, World Meteorological Organization, Ginebra.

World Meteorological Organization, 2006. Commission for Agricultural Meteorology (CAgM): The First Fifty Years. WMO-No.999, Ginebra.

Worsley, J., Drake, J., 2001. Practical PostgreSQL. O'Reilly & Associates, California.

Yoder, R.E., Odhiambo, L.O., Wright, W.C., 2005. Effects of vapor-pressure deficit and net-irradiance calculation methods on accuracy of standardized Penman-Monteith equation in humid climate. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 131(3), 228-237.

You, J., Hubbard, K.G., 2006. Quality Control of Weather Data during Extreme Events. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 23(2), 184-197.

You, J., Hubbard, K.G., 2007. Performance of quality assurance procedures on Daily Precipitation. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 24, 821-834.

Zahumensky, I., 2004. Guidelines on Quality Control Procedures for Data from Automatic Weather Stations. WMO-No.955, Ginebra.