

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA Y
TERMODINÁMICA

EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LA CUBIERTA VEGETAL
MEDIANTE LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE
CULTIVO POR TELEDETECCIÓN. EXTENSIÓN A ESCALA
REGIONAL: ACUÍFERO 08.29 MANCHA ORIENTAL

JOSÉ GONZÁLEZ PIQUERAS

UNIVERSITAT DE VALENCIA
Servei de Publicacions
2007

Aquesta Tesi Doctoral va ser presentada a València el dia 15 de Desembre de 2006 davant un tribunal format per:

- D. Joaquín Meliá Miralles
- D. Santiago Castaño Fernández
- D. Francisco Martín de SantaOlalla Mañas
- D. Guido D'Urso
- D. Demetrio Segarra Gomar

Va ser dirigida per:

D^a. Maria Amparo Gilabert Navarro
D. Alfonso Calera Belmonte

©Copyright: Servei de Publicacions
José González Piqueras

Depòsit legal:

I.S.B.N.:978-84-370-6691-2

Edita: Universitat de València
Servei de Publicacions
C/ Artes Gráficas, 13 bajo
46010 València
Spain
Telèfon: 963864115

Evapotranspiración de la Cubierta Vegetal Mediante la Determinación del Coeficiente de Cultivo por Teledetección.

Extensión a escala Regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental

VNIVERSITAT (ò) VALÈNCIA (ò) Facultat de Física



Tesis Doctoral
José González Piqueras
Valencia, 2006



VNIVERSITAT
ID VALÈNCIA (ò) Facultat de Física

Departament de Física de la Terra i Termodinàmica

“EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LA CUBIERTA VEGETAL
MEDIANTE LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE
CULTIVO POR TELEDETECCIÓN.
EXTENSIÓN A ESCALA REGIONAL: ACUÍFERO 08-29 MANCHA ORIENTAL.”

“CROP EVAPOTRANSPIRATION BY MEANS OF REMOTE SENSING
DETERMINATION OF THE CROP COEFFICIENT.
REGIONAL SCALE APPLICATION: 08-29 MANCHA ORIENTAL AQUIFER”

TESIS DOCTORAL

JOSÉ GONZÁLEZ PIQUERAS

Valencia, Octubre de 2006

Nota al Lector

El presente trabajo está escrito en lengua castellana e inglesa de acuerdo con la normativa de la Universitat de València para optar a la modalidad de Doctorado Europeo. Además de la Introducción y Conclusiones que así lo exige dicha normativa se ha incluido una parte del trabajo en el capítulo V que se ha redactado en lengua inglesa. No obstante, algunas partes de la memoria como los títulos de capítulo, secciones, pie de figura y tabla se ha redactado en ambas lenguas dentro del índice bajo el formato:

Español

Inglés

para hacer más fácil la identificación a los lectores de ambas lenguas de la sección correspondiente.

Keynote to the readers

*In accordance to the normative in the Universitat de València concerning the **European Doctorate** this work was written in both languages English and Spanish. As well as the resume and conclusions of the memory the chapter V was translated into English. Added to it, other parts of the work in the table of contents have been written in both languages such as the chapter title, sections, figure and table captions under the format:*

Spanish

English

with the objective of made easier the identification of each section for the English or Spanish readers.

D. Alfonso Calera Belmonte, Catedrático de Escuela Universitaria del área de Física Aplicada en la Universidad de Castilla-La Mancha.

Dña. Maria Amparo Gilabert Navarro, Profesora Titular de Física Aplicada de la Universitat de València,

CERTIFICAN

Que la memoria «**Evapotranspiración de la Cubierta Vegetal Mediante la Determinación del Coeficiente de Cultivo por Teledetección. Extensión a Escala Regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental**» ha sido realizada bajo nuestra codirección por **D. José González Piqueras** y constituye su **Tesis Doctoral** en la modalidad de Doctorado Europeo.

Esta memoria ha sido dirigida conjuntamente desde el Departamento de Física de la Tierra i Termodinàmica de la Universitat de València y desde el Grupo de Teledetección y SIG en el Instituto de Desarrollo Regional (IDR-Universidad de Castilla-La Mancha). Parte de la formación y el trabajo se ha hecho en centros de investigación europeos así como parte de la memoria está redactado en el idioma inglés, de acuerdo con la normativa para optar al Doctorado Europeo. Se ha realizado una estancia de tres meses en colaboración con el Dr. Massimo Menenti en el «*Laboratoire des Sciences de l'image, de l'informatique et de la Télédétection*» en la Universidad Louis Pasteur (Strasburgo) dirigido por la Dra. Françoise Nerry.

Para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente, firmamos el presente certificado en Burjassot (Valencia) a 2 de Mayo de 2006.

D. Alfonso Calera Belmonte

Dña. Maria Amparo Gilabert Navarro

Entidades y proyectos que han ayudado a la financiación del trabajo:

- Proyecto MORE (Modelo Operacional de Recarga y Evapotranspiración- código: REN2003-02956).
- Proyecto DEMETER (DEMostration of Earth Observation technologies in routine irrigation advisory Services- código: EVG1-CT-2002-00078), mediante el que se han financiado las campañas de campo.
- Ayudas de la Universidad de Castilla-La Mancha para la realización de tesis doctoral (1999-2003)
- Ayuda de la Universidad de Castilla-La Mancha para la estancia en el grupo LSiiT (*Laboratoire des sciences de l'image, de l'informatique et de la télédéction*)-TRIO (*Télédétection, Radiometrie et Imagerie Optique*) de la Universidad Louis Pasteur en Estrasburgo (Junio-Septiembre 2005).

Entities and projects that contributed to the memory:

- *The MORE project (Operational Model for Recharge and Evapotranspiration- Code: REN2003-02956).*
- *The DEMETER project (DEMostration of Earth Observation technologies in routine irrigation advisory Services- código: EVG1-CT-2002-00078), financing the field campaigns.*
- *Economical aids from the University of Castilla-La Mancha for developing the Ph. D. (1999-2003)*
- *An Economical aid from the University of Castilla-La Mancha for international stay in LSiiT (Laboratoire des sciences de l'image, de l'informatique et de la télédéction)-TRIO (Télédétection, Radiometrie et Imagerie Optique) group in the University Louis Pasteur in Strasbourg (June-September 2005).*

*A mi hijo Pablo,
a quien espero con gran ilusión,*

ÍNDICE GENERAL

Índice general	IX
Agradecimientos	XV
Índice de figuras	XIX
Índice de Tablas	XXXV
I. Introducción	1
Introduction	11
II. Zona de Estudio: La Unidad Hidrogeológica Mancha Oriental (08.29). 19	
<i>Study Area: The Hydrogeological Unit «Mancha Oriental» (08.29).</i>	
II.1. Marco Geográfico.	20
<i>Geographic Framework.</i>	
II.2. Clima.	22
<i>The Weather.</i>	
II.3. Suelos y funcionamiento hidrogeológico.	24
<i>The soils and hydrogeologic behavior.</i>	
II.4. Evolución y estado actual de su explotación.	27
<i>Evolution and Actual State of Its Exploitation.</i>	
III. Evapotranspiración, Coeficientes de Cultivo e índices de Vegetación. 33	
<i>Evapotranspiration, crop coefficients and vegetation indices.</i>	

III.1. El Concepto de Evapotranspiración.	35
<i>The Evapotranspiration Concept.</i>	
Factores que afectan la evapotranspiración	36
<i>Factors affecting evapotranspiration.</i>	
Terminología y conceptos básicos.	37
<i>Terminology and concepts.</i>	
III.2. Medida y Estimación.	38
<i>Measurement and Estimation.</i>	
Balance de Agua en Suelo.	40
<i>Soil Water Balance.</i>	
Lisímetros de Pesada.	40
<i>Weighing Lysimeters.</i>	
Balance de energía y razón de Bowen.	42
<i>The energy balance and Bowen ratio method.</i>	
El método aerodinámico.	43
<i>The aerodynamic method.</i>	
La covarianza del torbellino.	43
<i>The eddy covariance.</i>	
Método basado en la fisiología de la planta.	44
<i>Plant physiology approaches.</i>	
III.2.1. Ecuación de Penman-Monteith.	46
<i>The Penmann-Monteith equation.</i>	
III.2.2. Cálculo Operativo de la ET_c . El método $K_c \cdot ET_o$	48
<i>Operational calculation of ET. The $K_c \cdot ET_o$ method.</i>	
Método del Coeficiente Único.	50
<i>The Crop Coefficient Method.</i>	
Método de Coeficiente Dual.	55
<i>The Dual Crop Coefficient.</i>	
III.2.3. Estimación de la evapotranspiración desde teledetección.	60
<i>Evapotranspiration approach from remote sensing.</i>	
III.3. Índices de Vegetación.	62
<i>Vegetation Indices.</i>	
III.3.1. Índices Basados en Razones Aritméticas.	63
<i>Vegetation Indices based on rates.</i>	
III.3.2. Índices Basados en la Línea de Suelo.	64
<i>Vegetation Indices based on Soil Line.</i>	
III.3.3. Índices Basados en Parámetros de Optimización.	66
<i>Vegetation Indices based on Optimization Parameters.</i>	
III.4. Relación de Índices de Vegetación con el coeficiente de cultivo.	68
<i>Relationship between the Vegetation Indexes and the Crop Coefficient.</i>	
III.4.1. VI y Coeficiente de Cultivo Basal.	68
<i>VI and Basal Crop Coefficient.</i>	
III.4.2. Fundamentos Teóricos de la relación del coeficiente de cultivo basal con los índices de vegetación.	70
<i>Theoretical Foundations of the relationship between crop coefficient and vegetation indices.</i>	
III.4.3. Ritmos de crecimiento y transpiración de la cubierta e IV	72
<i>Crop Growth and Transpiration Rhythms and IVs.</i>	

III.4.4. Influencia de la Humedad de Suelo en la relación K_C^* - IV.	75
<i>Influence of soil water content in the relationship K_C^*- IV.</i>	
III.5. Conclusiones.	82
<i>Conclusions.</i>	
IV.Datos de Campo.	85
<i>Field Data.</i>	
IV.1. Zona de trabajo: Estación Lisimétrica	86
<i>Work Area: Lysimeter Station.</i>	
IV.1.1. Lisímetro de Pesada Continua.	87
<i>Lysimeter of Continuous Weight.</i>	
Lisímetro de festuca	92
<i>Grass Lysimeter.</i>	
Lisímetro de herbáceos	94
<i>Herbaceous Lysimeter.</i>	
IV.1.2. Datos Meteorológicos Medidos.	97
<i>Meteorological Data Measured.</i>	
IV.1.3. Cálculo de ET_0	102
<i>ET_0 Calculation.</i>	
Cálculo Horario	102
<i>Hourly calculation.</i>	
Cálculo Diario	103
<i>Daily Calculation.</i>	
IV.2. Seguimiento de Cultivos.	111
<i>Crop Monitoring.</i>	
IV.2.1. Las Medidas de Radiometría.	111
<i>The Radiometric Measurements.</i>	
La Medida.	111
<i>The measurement.</i>	
Fuentes de Error.	114
<i>Sources of error.</i>	
Diseño del experimento.	115
<i>Design of the experiment.</i>	
IV.2.2. Fenología	124
<i>Phenology.</i>	
IV.2.3. Fracción de Cobertura: f_c	126
<i>Green Cover Fraction: f_c.</i>	
IV.2.4. Índice de Área Foliar: (LAI).	131
<i>Leaf Area Index: LAI.</i>	
IV.2.5. Biomasa.	137
<i>Biomass.</i>	
IV.2.6. Altura.	142
<i>Crop Height.</i>	
IV.2.7. Evapotranspiración.	143
<i>Evapotranspiration.</i>	
IV.2.8. Coeficiente de Cultivo.	149
<i>Crop Coefficient.</i>	
IV.3. Conclusiones.	152

Conclusions.

European Section	157
V. Field Data Analysis.	159
<i>Análisis Datos de Campo.</i>	
V.1. Vegetation Indices.	161
<i>Índices de Vegetación.</i>	
V.2. Relationship between Vegetation Indices and f_c	165
<i>Relación Índices de Vegetación con f_c.</i>	
V.3. Relationship between Vegetation Indices and LAI.	167
<i>Relación Índices de Vegetación con LAI</i>	
V.4. Relationship between f_c and LAI.	168
<i>Relación entre f_c y LAI.</i>	
V.5. Biomass estimation by vegetation indices.	169
<i>Estimación de biomasa mediante los índices de vegetación.</i>	
V.6. Vegetation Indices vs. K_{cb}	171
<i>Índices de Vegetación vs. K_{cb}.</i>	
V.6.1. FAO56 K_{cb} curve.	172
<i>La curva K_{cb} FAO56.</i>	
V.6.2. Basal Crop coefficient and Vegetation Index.	175
<i>Coefficiente de cultivo basal e índice de vegetación.</i>	
V.7. Vegetation Indices and K_c	178
<i>Índices de Vegetación y K_c.</i>	
V.8. Conclusions	182
<i>Conclusiones.</i>	
VI. Aplicación a Escala Regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental.	187
<i>Regional Scale Application: 08.29 Mancha Oriental Aquifer.</i>	
VI.1. Metodología.	188
<i>Methodology.</i>	
VI.2. Mapa de Usos de Suelo del Año 2003.	189
<i>Land Use Map of year 2003.</i>	
VI.2.1. Imágenes disponibles.	189
<i>Imagery.</i>	
VI.2.2. Selección de Clases.	192
<i>Class Selection.</i>	
VI.2.3. Elaboración del Mapa de Usos de Suelo.	194
<i>Land Use Map procedure.</i>	
Marco de Trabajo.	194
<i>Framework.</i>	
Análisis de Calidad.	194
<i>Quality Analysis.</i>	

VI.3. Coeficiente de cubierta en lisímetro frente al coeficiente medio en la zona.	196
<i>Lysimeter Crop coefficient curve compared to the average in the area.</i>	
VI.4. Evolución temporal de NDVI de cada clase.	197
<i>Time Evolution of class NDVI.</i>	
VI.4.1. Clase regadío de primavera	198
<i>Spring irrigation class.</i>	
VI.4.2. Clase regadío de verano	199
<i>Summer irrigation class.</i>	
VI.4.3. Clase alfalfa.	200
<i>Alfalfa class.</i>	
VI.4.4. Clase doble cosecha.	201
<i>Double harvest.</i>	
VI.4.5. Clase cereal de secano.	203
<i>Dry grain class.</i>	
VI.4.6. Clase forestal.	203
<i>Forest class.</i>	
VI.4.7. Clase matorral.	204
<i>Shrub class.</i>	
VI.4.8. Clase vid.	204
<i>Vineyard class.</i>	
VI.5. Aplicación de la metodología $K_c^* \cdot ET_0$ a la zona del acuífero.	205
<i>Application of $K_c^* \cdot ET_0$ methodology to the aquifer area.</i>	
VI.5.1. Relación $NDVI_{TOA}$ con K_c^*	206
<i>Relationship $NDVI_{TOA}$ to K_c^*.</i>	
VI.5.2. Cálculo de la Evapotranspiración máxima de cubierta, ET_c^* , para cada clase	208
<i>Maximum cover evapotranspiration calculation, ET_c^*, for each class.</i>	
VI.5.3. Balance entre precipitaciones y evapotranspiración máxima de cubierta.	215
<i>Precipitation and Maximum evapotranspiration balance.</i>	
VI.6. Conclusiones	217
<i>Conclusions.</i>	
VII. Conclusiones y Perspectivas	221
Conclusions and Perspectives	229
Apéndice	235
A. Símbolos	237
B. Cálculo de ET_0	241
B.1. Determinación de la evapotranspiración de referencia mediante la ecuación FAO-56 Penman-Monteith	241

Cálculo Diario.	241
Cálculo Horario.	242
B.1.1. Parámetros intermedios en el Método FAO-Penman Monteith.	243
Resistencia Aerodinámica.	243
Resistencia de Superficie.	243
B.1.2. Parámetros atmosféricos.	244
Presión Atmosférica.	244
Densidad del Aire.	244
Constante Psicrométrica.	245
Pendiente de la curva de presión de saturación, Δ	245
Presión de vapor de Saturación, (e_s).	245
Presión de vapor Actual (e_a).	246
Radiación Solar Neta (R_n).	246
Densidad de Flujo de Calor en Suelo (G).	246
C. Cálculo de Índices de Vegetación.	247
C.1. Evolución en el tiempo de los IVs.	248
C.2. f_c e Índices de Vegetación	250
C.3. LAI e Índices de Vegetación	251
C.4. Biomasa e Índices de Vegetación	252
C.5. Relación entre Coeficiente de Cultivo e índices de vegetación.	254
D. Mapa de Usos de Suelo para el año 2003	259
E. Seguimiento de alfalfa desde satélite.	263
F. Curvas K_c de cultivos en la zona.	265
F.1. Regadío de primavera	265
F.2. Clase regadío de verano	268
Bibliografía	271

Agradecimientos

Durante las diferentes fases en el desarrollo del trabajo, varias han sido las personas e instituciones que de una forma u otra han contribuido en mi formación y en lo que es esta tesis doctoral. Por ello quiero dedicar estas primeras páginas de la memoria a destacar y agradecer algunas de las aportaciones más importantes.

Al Dr. Alfonso Calera Belmonte, a quien un cierto día en los pasillos de la facultad de física, durante una conversación en mi último año de carrera me animó a iniciarme en el mundo de la teledetección. El paso del tiempo ha demostrado que el marco de trabajo y el equipo humano era una oportunidad que no se podía desaprovechar. El camino que posteriormente he continuado en la Universidad de Castilla-La Mancha observando y aprendiendo de su experiencia me ha hecho madurar personal y científicamente. Durante este tiempo, las discusiones, debates y los razonamientos desarrollados han ido configurando día a día el trabajo que ahora tenemos en las manos.

A la Dra. Maria Amparo Gilabert Navarro, quien me inició en la teledetección dirigiéndome la tesis de licenciatura. Durante esta etapa y su continuación en la formación doctoral, me ha aportado el lado perfeccionista de la actividad investigadora. La implicación por avanzar en un tema nuevo y su paciencia conmigo en las visitas a Valencia, han sido clave durante estos años para avanzar en cada etapa del trabajo. Sin el esfuerzo por mantener los lazos profesionales y de amistad en mi distancia en la Universidad de Castilla-La Mancha no hubiese sido posible llevar a su fin la tesis doctoral.

Al Dr. Joaquín Meliá Miralles, por el trato humano que siempre ha tenido conmigo. Hay momentos de la vida que siempre quedarán en la memoria personal, fue la persona que me incorporó al grupo de teledetección del departament de Termodinàmica y me dió la oportunidad de iniciarme en la investigación, con una beca de colaboración y la codirección de la tesina. Ha sido y es un referente en teledetección.

Al Dr. Demetrio Segarra Gomar, por ser tan agradable y humano en el trato personal, por su actitud comprensiva en el trabajo. Durante este tiempo, siempre he tenido la tranquilidad de tener cerca a una persona como Demetrio.

Al Dr. Santiago Castaño, director del IDR en Albacete, donde se ha hecho gran parte del trabajo doctoral. Director, inicialmente de la que fue sección de teledetección y S.I.G., me hizo un hueco en un grupo de investigadores que no ha parado de crecer desde entonces.

A D. Antonio Quintanilla Ródenas, que ha sido en los últimos años director del grupo de teledetección y S.I.G. en la Universidad de Castilla-La Mancha. Comunicativo en el terreno personal, inquieto, eficiente e involucrado en las actividades diarias. Esas capacidades han quedado impresas en el grupo y en mi actitud hacia el trabajo.

A la Dra. Eva Rubio, con quien he compartido inquietudes en el trabajo diario. Por sus opiniones y consejos siempre valiosos y acertados.

A la Dra. Anne Jochum a quien quiero agradecer su entrega y dedicación en la revisión de la parte inglesa así como los consejos desde su experiencia en la exposición de conceptos y del trabajo. Ha sido una aportación muy valiosa que, sin duda, ha sido clave en la recta final del trabajo.

A todo el grupo de teledetección y SIG del IDR, a compañeros como Cecilia Martínez, a Antonio Moreno, José Reyes, Javi, . . . Trabajar y aprender codo a codo con ellos ha sido un auténtico privilegio.

A los miembros del departament de Termodinàmica de la Universitat de València. En especial a Fernando Camacho, Javi García-Haro, Juan Carlos Fortea y Beatriz Martínez a quienes aprecio por tantos ratos buenos pasados hace años.

Al director de la Escuela Universitaria Politécnica de Almadén, D. Luis Mansilla Plaza. Descrito en una frase por un vicerrector no hace mucho tiempo «*es difícil que Almadén aprecie lo que Luis ha hecho por la Escuela y por el pueblo*». Desde que llegué a la escuela siempre me ha tratado como un amigo, es en gran parte responsable del buen ambiente de trabajo en el centro y de transmitirnos su ilusión a los que hemos llegado de fuera, que ahora nos sentimos como en casa. Quiero hacer extensivo el agradecimiento al centro que me ha permitido iniciarme en la profesión universitaria, a mis compañeros Angel Martínez, Jesús Frades, Miguel Angel Alonso, Manu Carmona, Ignacio Garrido, Luis Rodríguez y Teresa García por esos ratos tan agradables en Almadén.

Al Dr. Massimo Menenti, director de investigación del «*Laboratoire des Sciences de l'image, de l'informatique et de la Télédétection*» de la Universidad Louis Pasteur, por acogerme amablemente en el grupo de investigación durante tres meses. Sus consejos, aunque me han exigido un esfuerzo donde yo pensaba que no quedaba energía, han contribuido sin lugar a dudas, a elevar el nivel de calidad del trabajo.

A Jérôme Colin, por las discusiones científicas sobre el modelo MSSEBS. Quiero agradecer su ayuda siempre y en todo momento que la he necesitado durante mi estancia en Estrasburgo a sabiendas que era tiempo no dedicado a su vida familiar.

A la institución y al personal del Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete. Nos han hecho accesibles las instalaciones del ITAP en el marco de esta tesis y de otras actividades paralelas, como las sucesivas campañas de campo en colaboración con la Agencia Espacial Europea, y que soy consciente implica un sobreesfuerzo en el quehacer diario.

La comprensión, el apoyo personal vinculado al profesional, son el otro pilar de apoyo necesario en el trabajo diario y del que me siento privilegiado. Por ello, es difícil especular qué hubiese pasado si un día no hubiese conocido en mis años de bachillerato en La Roda a Sonia, para mi ese día no existía una vía alternativa. Hemos recorrido un camino juntos que ha ido cubriendo diferentes etapas en la vida, cada una de ellas especial, intensa e inolvidable, disfrutamos ya de una memoria repleta de buenos recuerdos. Iniciamos con el inminente nacimiento de nuestro hijo Pablo una etapa que abordamos con una tremenda ilusión. Mi agradecimiento va más allá del trabajo en la tesis doctoral donde, por supuesto, muchos han sido mis cambios de humor e inquietudes que has soportado y resuelto, se extiende a todo lo aprendido y experimentado en media vida.

Por mucho que escriba nunca agradeceré suficientemente a quienes han hecho lo que soy hoy, mis padres, Pablo y Francisca. A ellos agradezco su sacrificio siempre en silencio y paciente, su apoyo incondicional, su interés por cada momento de mi vida y poder disfrutar de sus consejos. Por mucho que me esfuerce siempre he recibido y recibiré infinitamente más de lo que os he dado.

Quienes me hacen disfrutar cada momento que paso con ellos. Mis sobrinos, José Miguel, César y Lucía. En cada mirada y en cada gesto me transmitís vuestra ilusión y energía.

A mis hermanos, Pablo y Miguel, y a mi cuñada Mari Jose, que siempre han reconocido mi trabajo y mi persona, incluso creo que a veces en exceso.

A la persona que es mi defensora siempre y en todo momento de forma incondicional, que no puede ser otra que mi abuela Ana María.

A los padres de Sonia, Antonio y Juani, por haberme ofrecido desde el primer día un trato familiar. Muchas han sido las conversaciones y los consejos siempre útiles.

A Mari Llanos, Noelia y Toni, hermanos de Sonia y casi míos. A Cesáreo cuya obstinación y valía personal es ejemplar. Al de más reciente incorporación en la familia José Francisco.

Finalmente y para terminar, a mis amigos y amigas donde nací y resido, en Trazzona de la Mancha, de cuya compañía disfruto de forma habitual. Citarlos personalmente me llevaría alargar esta lista, y correría el riesgo de olvidar en el relato injustamente alguno de los nombres.

Verdaderamente de corazón, gracias.

ÍNDICE DE FIGURAS

I.1.	Mapa con las zonas de regadío en la cuenca mediterránea y Europa (Siebert, Döll, Hoogeveen, Faures, Frenken and Feick, 2005; Siebert, Döll, Feick and Hoogeveen, 2005). / <i>Irrigated Map in the Mediterranean basin and Europe (Siebert, Döll, Hoogeveen, Faures, Frenken and Feick, 2005; Siebert, Döll, Feick and Hoogeveen, 2005)</i>	4
I.2.	Esquema resumen de la tesis doctoral. / <i>Dissertation's diagram</i>	9
II.1.	Localización Geográfica y límite del acuífero Mancha Oriental (Unidad Hidrológica 08.29). / <i>Geographic location and extent of Mancha Oriental Aquifer (Hydrologic Unit 08.29)</i>	21
II.2.	Principales ríos de drenaje dentro del ámbito del acuífero. Está detallado el modelo digital del terreno a escala 1:1 000 000 procedente del USGS obtenido a partir de radar. / <i>Main drainage streams in the aquifer. It is shown the digital terrain model at 1:1 000 000 obtained from USGS from radar</i>	23
II.3.	Distribución de las precipitaciones medias dentro del límite geográfico del Acuífero. Dentro de la misma figura están representadas las isolíneas de temperatura media constante dentro de los períodos estacionales de invierno y verano. Datos obtenidos de valores registrados en el intervalo desde el año 1940-1980 dentro de la red de estaciones del INM de León-Llamazares (1988). / <i>Rainfall distribution in the aquifer. It shown the winter and summer average temperature isolines. The data were acquired during the period of 1940-1980 by the meteorological station network of INM</i>	24

II.4.	Mapa de suelos en el entorno de la Unidad hidrológica 08.29. Clasificación según el Soil Taxonomy (USDA, 1987). (C.S.I.C., 2004) / <i>Soil map obtained corresponding to the Hydrogeologic Unit 08.29. Soil Taxonomy Classification (USDA, 1987). (C.S.I.C., 2004)</i>	26
II.5.	Evolución de las extracciones así como de la extensión de los regadíos en el período 1978-2003 (López-Urrea, 2004; Fuster, 2000). / <i>Water extraction evolution and irrigated lands extension during the period 1978-2003 (López-Urrea, 2004).</i>	27
II.6.	Figuras con la evolución de los regadíos y consumo de agua en el Sistema Mancha Oriental. También aparecen reflejados los descensos en las once unidades de explotación en las que se divide el acuífero. / <i>Figures with the evolution of the irrigated lands and water consumption in La Mancha Oriental aquifer. It is indicated the slope down of the water level in the eleven exploitation units composing the aquifer.</i>	29
II.7.	Representación de la evolución de los regadíos distinguiendo entre regadíos de verano, primavera y doble cosecha desde el año 1982 hasta el año 2003. / <i>Evolution on time of irrigated crops distinguishing between summer irrigated, spring and double harvest from year 1982 to 2003. Data obtained from ERMOT project.</i>	31
III.1.	Comparación de la <i>ET</i> medida por el método razón de Bowen, mediante el balance de agua en suelo utilizando el TDR y por el método gravimétrico a escala diaria aplicado a maíz en la zona del Sur de Italia (Mastrorilli <i>et al.</i> , 1998). / <i>ET comparison between measured by Bowen ratio, soil water balance using TDR and gravimetric methodology at daily scale for corn at Southern Italy (Mastrorilli et al., 1998).</i>	41
III.2.	Plano del Lisímetro (Ruíz <i>et al.</i> , 2003). / <i>Lysimeter plan (Ruíz et al., 2003).</i>	42
III.3.	Comparación entre los valores de <i>ET</i> medida mediante una torre covarianza de torbellino para el flujo de calor sensible y la <i>ET</i> medida por el método razón de Bowen, a escala diaria sobre una cubierta de sorgo dulce en el sur de Italia (adaptado de (Rana and Katerji, 1996)). / <i>Comparison between ET measured by eddy covariance for sensible heat flux and ET measured by Bowen ratio method, at daily scale, on sweet sorghum grown in Southern Italy (adapted from Rana and Katerji (1996)).</i>	45

- III.4. Diagrama esquemático de la evolución estacional del K_c para un cultivo de regadío estacional (Maidment, 1992; Doorenbos and Pruitt, 1977b). Se representan cuatro estados de crecimiento (inicial, desarrollo, medio y final) cuya longitud viene indicada por la duración de cada estado (D_i , $i = 1, 2, 3, 4$) desde el día de plantación (D_1). / *Schematic diagram of the seasonal changes in K_c for an irrigated field crop (Maidment, 1992; Doorenbos and Pruitt, 1977b). There are represented four growth stages (initial, crop development, midseason and late) indicating the terminating dates (D_i , $i = 1, 2, 3, 4$) from the planting date (D_1).* 52
- III.5. Variación del coeficiente de transpiración con el índice de área foliar para varios cultivos. Los datos corresponden a una colección bibliográfica hecha por Choudhury *et al.* (1994). / *Transpiration coefficient variation with leaf area index for various crops. The data correspond to a bibliographic collection made by Choudhury et al. (1994).* 54
- III.6. Valor de la curva de coeficiente de cultivo basal, K_{cb} , coeficiente de cultivo, K_c , coeficiente de cultivo medio K_{cm} , utilizados para obtener el coeficiente de cultivo único referido a alfalfa (adaptado de Wright (1982)). / *Generalized basal crop coefficient, K_{cb} , the crop coefficient K_c , and the average crop coefficient K_{cm} , used to derive an overall crop coefficient referred to alfalfa (adapted from Wright (1982)).* 56
- III.7. Evolución de la evaporación de suelo antes de consumir el agua fácilmente evaporable (REW) y hasta el consumo del agua totalmente evaporable (TEW) (Allen *et al.*, 1998). / *Soil evaporation evolution before consumption of readily evaporation water (REW) and to consumption of total evaporation water (TEW).* 57
- III.8. Valor del coeficiente f_{ew} en diferentes situaciones de aporte hídrico y en varias etapas del desarrollo del cultivo. / *Coefficient f_{ew} under different situation for water supply and for different growth stages.* 58
- III.9. Evolución de K_c (línea punteada) y K_{cb} (línea continua) durante cada una de las fases de desarrollo del cultivo. Los datos correspondientes a cada fase han sido extraídos de los valores promedio para el cultivo propuestos por FAO para maíz grano (Allen *et al.*, 1998; Tabla 12, Tabla 17, Anexo 7). / *Evolution of K_c (dotted line) and K_{cb} (continuous line) during each growth stage. Data corresponding to each growth stage have been obtained from average values for crop proposed by FAO (Allen et al., 1998; Table 12, Table 17, Annex 7).* 60

<p>III.10. Representación de la reflectividad en la banda del rojo (ρ_R) e infrarrojo cercano (ρ_{IRC}) para los puntos de suelo desnudo (+), que definen la línea de suelo (indicada en la figura). Dentro de la misma figura se encuentran representados los puntos con igual LAI que definen las isolíneas de vegetación. / <i>Reflectance in red (ρ_R) versus near infrared (ρ_{IRC}) for soil (+) that defines the soil line (solid line). In the same figure are shown the points with equal LAI values over different soil backgrounds defining the vegetation isolines. The PVI represents the distance from vegetation point to soil line.</i></p>	<p>65</p>
<p>III.11. Representación del coeficiente de cultivo basal frente a dos índices de vegetación NDVI y SAVI variando el cociente de las variables κ/κ'. / <i>Representation of the basal crop coefficient versus NDVI and SAVI varying the ratio κ/κ'.</i></p>	<p>72</p>
<p>III.12. Relación entre el coeficiente de transpiración y dos índices de vegetación NDVI y SAVI. Se representan seis tipos de suelo, para cada valor de IV se ha representado los valores de K_{cb} para los tres suelos propuestos (seco y mojado). Se han utilizado tres símbolos diferentes para los diferente suelos siendo idénticos para el mismo suelo mojado y seco (adaptado de Choudhury <i>et al.</i> (1994)). / <i>The transpiration coefficient and NDVI versus SAVI are plotted in the graph. Each VI value was plotted versus K_{cb} calculated for three soils wet and dry. Three symbols are used to show the results for the three soils types, while wet and dry soils for each soil type are shown by identical symbols (adapted from Choudhury <i>et al.</i> (1994)).</i></p>	<p>77</p>
<p>III.13. Representación análoga a la figura III.12 pero introduciendo aportes hídricos localizados en el tiempo, es decir, variando la humedad de suelo. Se muestra la relación del coeficiente de cultivo basal con NDVI y SAVI. Los resultados para los tres tipos de suelo presentados se muestran con tres símbolos diferentes (adaptado de Choudhury <i>et al.</i> (1994)). / <i>Same as figure III.12 except than transpiration are for variable weather conditions introducing irrigations. It is shown the relationship between transpiration coefficient with NDVI and SAVI. The results for three soil types are shown in three separate symbols (adapted from Choudhury <i>et al.</i> (1994)).</i></p>	<p>78</p>
<p>III.14. Representación de K_c frente a NDVI en varios días de su ciclo fenológico para una parcela de patata durante el año 2000 (adaptado de Tasumi <i>et al.</i> (2006)). / <i>K_c versus NDVI for a plot of potato on several dates of its crop cycle during year 2000 (adapted from Tasumi <i>et al.</i> (2006)).</i></p>	<p>79</p>

- III.15. Curvas del coeficiente de cultivo basal correspondientes a maíz obtenidas según el algoritmo SCHED, según Wright, según la relación III.24 y los valores de LAI en el mismo ciclo del cultivo (adaptado de Bausch (1995)). / *Basal crop coefficient for maize obtained using algorithm SCHED, by Wright, applying the relationship III.24 and the LAI values (adapted from Bausch (1995)).* 80
- III.16. En la figura superior se han representado K_{cb} y NDVI para el cultivo de algodón durante el año 1990 donde también se indican los valores medios de cada magnitud. En la figura inferior se ha representado la comparación del K_{cb} diario calculado en el balance de agua en suelo con las indicaciones FAO56 con el modelo $K_{cb} - NDVI$ para algodón en el año 1998 (adaptado de Hunsaker *et al.* (2003)). / *K_{cb} and NDVI are represented on top figure for cotton during the year 1990 where the average values of each magnitude are indicated. The comparison of daily K_{cb} values based on soil water-content measurements and back-calculations of the FAO-56 procedures is plotted with estimated daily K_{cb} based on $K_{cb} - NDVI$ model for cotton on year 1998 (adapted from Hunsaker *et al.* (2003)).* 81
- IV.1. Fotografía aérea de la zona experimental de «Las Tiesas». En azul están indicados los tres lisímetros: herbáceos, festuca y vid. / *Aerial photography of the experimental area in «Las Tiesas». The lysimeters sites are indicated in blue: Herbaceous, grass and vineyard.* 88
- IV.2. Vista panorámica de la estación lisimétrica el día 6 de Julio de 2001 donde se aprecia en el centro la parcela de protección de festuca. / *Panoramic view of the lysimetric facilities on July 6th on year 2001 where is shown in the center of the picture the protection area corresponding to grass.* 93
- IV.3. Vista de diferentes componentes y situaciones de los lisímetros: (A) El lisímetro de festuca en plena operación de replantación (Noviembre 2004), (B) Lisímetro de herbáceos en invierno (Noviembre 2004), (C) Panel de evaporación anexo al lisímetro de festuca, (D) Estación agrometeorológica Campbell anexa al lisímetro de festuca, (E) Cabina interior con los dataloggers, (F) Vista interior del tanque continente del suelo, (G) Vista sobre la vertical del lisímetro de festuca (Agosto 2001), (H) Vista sobre la vertical del lisímetro de herbáceos (Julio 2001). / *Different views of the lysimeters: (A) Festuca lysimeter during planting (November 2004), (B) Herbaceous lysimeter during winter (November 2004), (C) Evaporation pannel close to reference lysimeter, (D) Campbell agrometeorological station close to the reference lysimeter, (E) Box with the dataloggers, (F) Interior view of the soil tank, (G) Vertical view of reference lysimeter (August 2001), (H) Vertical view of herbaceous lysimeter (July 2001).* 95

IV.4.	En la figura (A) se representan los valores de medida directa en el lisímetro dentro de dos períodos en el desarrollo del trigo, máximo desarrollo y senescencia. El mismo periodo esta representado en la figura (B) con la pesada del lisímetro de festuca durante el año 2003. / <i>On figure (A) are represented the measured values by the lysimeter several days during two growth stages of wheat, maximum development and senescence. On figure (B) are represented the same values for grass during the same periods on year 2003.</i>	96
IV.5.	Valores de Velocidad de viento, Temperatura del aire y Humedad Relativa tanto a 10 m como a 2 m de altura. Datos correspondientes a la estación Anchor Station situada en la finca experimental de Las Tiasas para la campaña del año 2001. / <i>Wind velocity, air temperature and relative humidity at 10 and 2 meters height. Data obtained from the Anchor Station sited on Las Tiasas for year 2001.</i>	100
IV.6.	Valores de Radiación de Onda Corta, Radiación de Onda Larga, Radiación Difusa y Pluviometría registrados durante el año 2001 por la estación Anchor Station situada en la finca experimental de Las Tiasas. / <i>Shortwave Radiation, Longwave Radiation, Diffuse Radiation and Pluviometry during year 2001 acquired by the Anchor Station in Las Tiasas.</i>	101
IV.7.	Comparación de datos obtenidos a partir de los sensores montados en Anchor Station (—◆—) y Campbell (—◇—) para algunos días dentro del ciclo del cultivo de maíz (Año 2001). / <i>Comparison of data obtained from sensor mounted on Anchor Station (—◆—) and Campbell (—◇—) for some days during the maize culture (2001).</i>	104
IV.8.	Comparación de datos obtenidos a partir de los sensores montados en Anchor Station (—◆—) y Campbell (—◇—) para algunos días dentro del ciclo del cultivo de maíz (Año 2003). / <i>Comparison of data obtained from sensor mounted on Anchor Station (—◆—) and Campbell (—◇—) for some days during the wheat culture (2003).</i>	105
IV.9.	Figura correspondiente a la radiación incidente de onda corta (Rso) en la estación Anchor Station. Aparecen representados la radiación medida en la estación (+), radiación extraterrestre (Ra), radiación incidente en la superficie (Rso75) calculada como $0,75 \cdot Ra$, radiación incidente calculada según las dos metodologías FAO56 (Allen <i>et al.</i> , 1998): —Rso56a (ver nota pie 1) y —Rso56c (ver nota pie 2). / <i>Incident shortwave solar radiation (Rso) in the Anchor Station. In the graph is shown the incident radiation measured at the station (+), the extraterrestrial radiation (—Ra), incident at surface radiation calculated as $0,75 \cdot Ra$, and two FAO"56 methodologies to calculate incident shortwave radiation (Allen <i>et al.</i>, 1998): —Rso56a (see footnote 1) and —Rso56c (see footnote 2).</i>	106

- IV.10. ET_o ($mm \cdot dia^{-1}$) durante el ciclo del cultivo de maíz (año 2001). En la figura se representa el valor de evapotranspiración de referencia obtenido a partir de tres fuentes: Lisímetro de festuca (●), SAR (-o-) y calculados desde *Anchor Station* (-●-). / ET_o ($mm \cdot day^{-1}$) values for maize (year 2001). The evapotranspiration values were obtained by: Grass Lysimeter (●), SAR (-o-) and calculated using Anchor Station data (-●-). . . . 108
- IV.11. ET_o ($mm \cdot dia^{-1}$) durante el ciclo del cultivo de trigo (año 2003). Valor de evapotranspiración de referencia obtenido a partir de tres fuentes: Lisímetro de festuca (●), SAR (-o-) y calculados desde *Anchor Station* (-●-). / ET_o ($mm \cdot day^{-1}$) values for wheat (year 2003). The evapotranspiration values were obtained by: The grass Lysimeter (●), SAR (-o-) and calculated using Anchor Station data (-●-). . . . 109
- IV.12. Representación de los valores de ET_o medidos por el lisímetro y estimados por dos métodos, mediante la ecuación FAO56 utilizada por el SAR (FAO56-SAR) y el método ASCE a partir de datos horarios (Manual ASCE). En las figuras (a) y (b) se comparan los valores medidos en el lisímetro con los estimados por ambos métodos para el año 2001 y 2003 respectivamente. En las figuras (c) y (d) se comparan el método utilizado por el SAR para datos diarios y el recomendado por ASCE a partir de datos horarios para los años 2001 y 2003. / The ET_o values measured in the lysimeter and estimated by two methodologies are shown: applying the equation FAO56 used by the SAR (FAO56-SAR) and the ASCE methodology using hourly data (Manual ASCE). In figure (a) and (b) are compared the values measured in the lysimeter and the estimated using the both methodologies for the years 2001 and 2003. In figures (c) and (d) are compared the methodology used by the SAR and the ASCE for years 2001 and 2003. . . . 110
- IV.13. Configuración geométrica usada en la definición y medida del BRF (Snyder, 1998). En dicha figura se indican los ángulos cenital y acimutal de incidencia (θ_i, ϕ_i) y de reflexión (θ_r, ϕ_r). También están indicados los ángulos sólidos de incidencia (dw_i) y reflexión (dw_r). / Geometric configuration used in definition and BRF measurement (Snyder, 1998). There are shown the zenith and azimuth incident (θ_i, ϕ_i) and reflected angle (θ_r, ϕ_r). There are shown the incident (dw_i) and reflected (dw_r) solid angle. 113

IV.14. Diagrama del espectrorradiómetro GER3700 indicando (1) el puerto de transmisión de datos PS2, (2) la conexión de alimentación eléctrica, (3) la disposición de la óptica, (4) la cámara fotográfica auxiliar -que no viene suministrada por el fabricante y es una adaptación hecha en la Universidad de Castilla-La Mancha-, (5) el sistema de anclaje, (6) asa portadora, (7) el pulsador del láser para localizar el campo de visión. / *Diagram of the spectroradiometer GER3700 showing (1) the data transmission port PS2, (2) energy supply connection, (3) view optic, (4) Photographic camera -not supplied by the manufacturer adapted in the University of Castilla-La Mancha, (5) setting system, (6) handling system, (7) laser button to locate the field of view.* 117

IV.15. Fotografías del montaje del radiómetro junto al sistema de ordenador portátil de adquisición. El montaje se ha realizado sobre festuca, montando el radiómetro 2 m por encima de la cubierta. / *Photograph showing the radiometer system connected to the storing laptop. The system showed was mounted over festuca, with the spectroradiometer 2 m above the crop.* 121

IV.16. Reflectividad espectral (%) de varios días adquirida durante la campaña de maíz. / *Spectral reflectance (%) acquired during the maize campaign.* 122

IV.17. Reflectividad espectral (%) de varios días adquirida durante la campaña de trigo. / *Spectral reflectance (%) acquired during the wheat campaign.* 123

IV.18. Diagrama de la fenología del maíz durante el año 2001. / *Phenological diagram of corn during year 2001.* 125

IV.19. Imagen ejemplo de maíz donde observa a la izquierda la fotografía original y a la derecha la misma clasificada, distinguiendo entre componentes de vegetación (en color verde), suelo (marrón) y sombra (negro). En la parte superior se muestra un caso para maíz el día 13 de Junio de 2001 con $f_c = 0,14$; en la parte inferior se muestra el caso de trigo el día 6 de Junio de 2003 con $f_c = 0,89$. / *Example image of maize observing on the left original photography and the classification on the right, distinguishing between vegetation components (green color), soil background (brown) and shadows (black). The upper figure corresponds to maize on June 13th in 2001 with $f_c = 0,14$; the figure below corresponds to wheat on June 6th with $f_c = 0,89$.* 127

IV.20. Fotografía vertical de la cubierta de maíz sobre el lisímetro (izquierda) y en el exterior (derecha). / *Vertical photography of maize cover inside of the lysimeter (left) and outside (right).* 130

IV.21.	Evolución de la fracción de cobertura (f_c) para los cultivos de maíz (azul--+-) y trigo (verde--+-). Con la trama $\cdots\diamond\cdots$ se han indicado las observaciones en el exterior del lisímetro para cada cultivo. / Time evolution of f_c for maize (blue--+-) and wheat (green--+-). The data inside the lysimeter are plotted with $\cdots\diamond\cdots$.	130
IV.22.	Representación de todas las hojas correspondiente a una muestra de maíz. Corresponde al día 1 de Agosto de 2001, con un valor de LAI=4,8. / Sample with every leaves projected. The sample corresponds to August 1st of 2001 with LAI=4,8.	132
IV.23.	Evolución del LAI para trigo y maíz. En la figura aparecen indicados las fases en el desarrollo de ambos cultivos. / LAI evolution for wheat and maize. The growth stages are plotted for both crops	134
IV.24.	Fotografías indicativas de la evolución del LAI y f_c para trigo y maíz. / Some photographs of maize and wheat indicating the LAI and f_c.	136
IV.25.	Evolución de biomasa (g/m^2) para trigo y maíz. En la figura aparecen indicados las fases en el desarrollo de ambos cultivos. / Biomass (g/m^2) evolution for wheat and maize. On this figure can be seen different growth stages for both crops.	140
IV.26.	Evolución de biomasa (g/m^2) para trigo distinguiendo entre componentes: hojas (\circ), tallo (+) y espigas (\bullet). / Biomass (g/m^2) evolution for wheat distinguishing between components: leaves (\circ), stems (+) and ears (\bullet).	141
IV.27.	Evolución del contenido en agua (%) para trigo distinguiendo entre componentes: hojas (\circ), tallo (+) y espigas (\bullet). / Water Content (%) evolution for wheat distinguishing between components: leaves (\circ), stems (+) and ears (\bullet).	143
IV.28.	Evolución de la altura del cultivo (H) para los cultivos de maíz y trigo. / Crop height (H) evolution for maize and wheat.	145
IV.29.	Evolución de la evapotranspiración del cultivo de maíz (ET_c in $\frac{mm}{día}$) junto a la evapotranspiración de referencia (ET_0) durante el año 2001. / ET_c ($\frac{mm}{day}$) evolution in time for maize and ET_0 during the same time.	147
IV.30.	Evolución de la evapotranspiración del cultivo de trigo (ET_c in $\frac{mm}{día}$) junto a la evapotranspiración de referencia (ET_0) durante el año 2003. / ET_c ($\frac{mm}{day}$) evolution in time for wheat and ET_0 during the same time.	148
IV.31.	Evolución del coeficiente cultivo de maíz (K_c) junto a los aportes hídricos por lluvia o riego durante el año 2001. / Evolution in time of Maize crop coefficient (K_c) during year 2001.	150
IV.32.	Evolución del coeficiente de cultivo de trigo (K_c) junto a los aportes hídricos por lluvia o riego durante el año 2003. / Evolution in time of wheat crop coefficient (K_c) during the year 2003.	151

V.1.	Evolución en el tiempo de NDVI y SAVI durante los años 2001 (parte superior) y 2003 (parte inferior). <i>Time evolution of NDVI and SAVI during year 2001 (on top) and year 2003 (on bottom).</i>	162
V.2.	Representación simultánea de f_c , LAI, Biomasa y NDVI para el año 2001 (a la izquierda, maíz) y 2003 (a la derecha, trigo). / <i>Time evolution of f_c, LAI, Biomass and NDVI for year 2001 (maize, figure on the left) and year 2003 (wheat, figure on the right).</i>	164
V.3.	Representación de la fracción de cobertura vegetal verde (f_c) frente a NDVI y SAVI distinguiendo entre los datos obtenidos sobre maíz (+) y trigo (\times). Los símbolos indicados con un círculo corresponden a la f_c durante EFC. / <i>The green cover fraction (f_c) versus NDVI and SAVI is shown distinguishing between data from maize (+) and wheat (\times). Circled symbols correspond to the f_c at EFC.</i>	166
V.4.	Representación de NDVI y SAVI frente a LAI distinguiendo entre los datos obtenidos sobre maíz (+) y trigo (\times). / <i>The NDVI and SAVI versus LAI are shown distinguishing between data from maize (+) and wheat (\times).</i>	168
V.5.	Representación de f_c frente a los valores de LAI distinguiendo entre datos correspondientes a maíz (+) y trigo (\times). En la misma figura se ha representado el ajuste a la función exponencial con $R^2=0,96$. / <i>The f_c versus LAI values are shown, distinguishing between data from maize (+) and wheat (\times). In the same figure the exponential fitted curve is shown with $R^2=0,96$.</i>	169
V.6.	Representación de la biomasa ($-\blacklozenge-$) y del valor integrado en el tiempo de los IV (IntVI - \diamond para NDVI SAVI) frente al DoY para maíz. / <i>The biomass ($-\blacklozenge-$) and integrated on time of the VI (IntVI - \diamond for NDVI and SAVI) versus DoY for maize are shown.</i>	171
V.7.	Representación de los valores de K_c para trigo (\blacklozenge) y maíz (\bullet). Se ha representado la curva de cultivo basal obtenida siguiendo las indicaciones de la metodología FAO56 para trigo ($---$) y maíz ($- - -$). El coeficiente de evaporación de trigo (\diamond) y maíz (\circ) se ha calculado bajo la hipótesis de no estrés hídrico en los cultivos ($K_s = 1$). / <i>The K_c for wheat (\blacklozenge) and maize (\bullet) are plotted along DoY. The basal crop curve was obtained by FAO56 methodology for wheat ($---$) and maize ($- - -$). The evaporation coefficient for wheat (\diamond) and maize (\circ) was calculated assuming no crop water stress ($K_s = 1$).</i>	174
V.8.	Representación de los valores acumulados de evapotranspiración para maíz y trigo. / <i>The cumulative values of evapotranspiration for maize and wheat along DoY are shown in the graph.</i>	175

- V.9. Representación del coeficiente de cultivo basal frente a los índices de vegetación seleccionados para maíz (◆) y trigo (◇). / *The basal crop coefficient versus the selected vegetation indices for maize (◆) and wheat (◇) is shown in the graph.* 176
- V.10. Representación del coeficiente de cultivo basal del maíz FAO56 frente a DoY comparando diferentes modelos: (a) utilizando los modelos de Neale (1989), Bausch & Neale (1987) y la ecuación obtenida en este trabajo para NDVI, (b) utilizando los modelos de Bausch (1993), Choudhury (1994) y la ecuación obtenida en este trabajo para SAVI. / *The maize basal crop coefficient FAO56 versus DoY are compared to different models: (a) By using the NDVI models from Neale (1989), Bausch & Neale (1987) and the equation proposed in this work for NDVI, (b) By using the SAVI models from Bausch (1993), Choudhury (1994) and the equation proposed in this work for SAVI.* 177
- V.11. Representación del coeficiente de cultivo basal (línea continua) y del coeficiente de cultivo basal obtenido a partir de los IV (rombos y línea punteada) frente al DoY para maíz. / *The basal crop coefficient (continuous line) and the basal coefficient from VI (diamonds and dotted line) versus the DoY for maize are shown in the graph.* 180
- V.12. Representación del coeficiente de cultivo basal y el índice de vegetación para maíz y trigo. / *The basal crop coefficient versus the vegetation indices are shown for maize and wheat.* 182
- V.13. Representación del coeficiente de cultivo del maíz medido por el lisímetro frente a DoY. Se compara la estimación del coeficiente de cultivo a través del NDVI en el presente trabajo y la estimación de K_{cb} de los modelos de Neale (1989), Bausch & Neale (1987), Bausch (1993) y Choudhury (1994). / *The maize crop coefficient measured by the lysimeter versus DoY is compared with the models:(i) the K_c -NDVI in this work, (ii) the models from Neale (1989), (iii) Bausch & Neale (1987), (iv) Bausch (1993) and (v) Choudhury (1994).* 183
- VI.1. Diagrama de la metodología para estimar la ET_c^* a la escala del acuífero. / *Diagram of methodology to estimate ET_c^* at aquifer scale.* 189
- VI.2. Gráfico con la cobertura en las pasadas de IRS 1C (Path-row) 14-42, IRS 1D 18-42, Landsat 7 TM (Path-row) 199-33 y 200-33 sobre la delimitación administrativa del acuífero 08.29. / *Coverage for satellite IRS 1C (Path-row) 14-42, IRS 1D 18-42, Landsat 7 TM (Path-row) 199-33 and 200-33 over administrative delimitation of the aquifer 08.29.* 190

VI.3.	Diagrama de evolución en el tratamiento de las imágenes de satélite para obtener el mapa de usos de suelo en el año 2003 (adaptado de Calera (2003)). / <i>Evolution diagram of imagery treatment to obtain land use map on year 2003 (adapted from Calera (2003)).</i>	192
VI.4.	Clases consideradas en el mapa de usos de suelo (adaptado de Calera (2003)). / <i>Considered classes in the land use map (adapted from Calera (2003)).</i>	193
VI.5.	Diagrama del proceso de clasificación (adaptado de Calera (2003)). / <i>Classification diagram (adapted from Calera (2003)).</i>	195
VI.6.	Curva de K_c^* obtenida en el lisímetro para maíz y trigo frente a la curva media de los mismos cultivos en la zona de estudio. / <i>Lysimeter K_c^* curve for maize and wheat compared to the average crop coefficient curve in the study area for the same cultures.</i>	196
VI.7.	Evolución del histograma de valores para cada fecha sobre la clase regadío de primavera. El histograma está representado sobre la horizontal en cada fecha junto al valor medio de $NDVI_{TOA}$. / <i>Histogram evolution for each date in the spring irrigated class. The histogram is represented in horizontal shape with its average $NDVI_{TOA}$ value.</i>	199
VI.8.	Evolución del histograma de valores para cada fecha sobre la clase regadío de verano. El histograma está representado sobre la horizontal en cada fecha junto al valor medio de $NDVI_{TOA}$. / <i>Histogram evolution for each date in the summer irrigated class. The histogram is represented in horizontal shape with its average $NDVI_{TOA}$ value.</i>	200
VI.9.	Curva del coeficiente de cultivo para Alfalfa, obtenida a partir de la campaña extensiva (puntos negros) y en un seguimiento intensivo sobre una parcela ubicada en La Felipa (línea azul), dentro del ámbito del acuífero 08.29. / <i>Crop coefficient curve for Alfalfa, obtained from the extensive campaign (black points) and monitoring the crop development by an intensive field campaign (blue line) in La Felipa plot, inside the 08.29 aquifer.</i>	202
VI.10.	Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de cultivo alfalfa. / <i>Evolution on time of $NDVI_{TOA}$ values obtained from image histogram in the alfalfa class.</i>	202
VI.11.	Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de cultivo doble cosecha. / <i>Evolution on time of $NDVI_{TOA}$ values obtained from image histogram in the double harvest class.</i>	203
VI.12.	Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de cultivo cereal de secano. / <i>Time evolution of $NDVI_{TOA}$ values obtained from image histogram in the dry grain class.</i>	204

VI.13.	Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de forestal. / <i>Evolution on time of $NDVI_{TOA}$ values obtained from image histogram in the forest class.</i>	205
VI.14.	Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de matorral. / <i>Evolution on time of $NDVI_{TOA}$ values obtained from image histogram in the shrub class.</i>	206
VI.15.	Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de vid. / <i>Evolution on time of $NDVI_{TOA}$ values obtained from image histogram in the vineyard class.</i>	207
VI.16.	Curvas de K_c^* obtenidas a partir del $NDVI_{TOA}$ para las clases regadío de verano, regadío de primavera, alfalfa, doble cosecha, barbecho y forestal. / <i>K_c^* curves obtained from $NDVI_{TOA}$ for the classes summer irrigated, spring irrigated, alfalfa, double harvest, fallow and forest.</i>	209
VI.17.	Curvas de K_c^* obtenidas a partir del $NDVI_{TOA}$ para las clases matorral, seco, vid y otros. / <i>K_c^* curves obtained from $NDVI_{TOA}$ for the classes shrub, dry crops, vineyard and others.</i>	210
VI.18.	ET_c^* acumulada (mm/año) para cada clase el año 2003 en el ámbito del acuífero Mancha Oriental. / <i>Accumulated ET_c^* (mm/year) for the year 2003 in the aquifer Mancha Oriental.</i>	211
VI.19.	ET_c^* acumulada (mm/semana) semanal para cada clase el año 2003 en el ámbito del acuífero Mancha Oriental junto a los valores de pluviometría de la estación principal en <i>Los Llanos</i> . / <i>Accumulated ET_c^* per week (mm/week) for the year 2003 in the aquifer Mancha Oriental and the precipitation in the principal station in Los Llanos.</i>	213
VI.20.	ET_c^* acumulada (mm/mes) mensual para el año 2003 en el ámbito del acuífero Mancha Oriental junto a los valores de pluviometría de la estación principal en <i>Los Llanos</i> . / <i>Accumulated ET_c^* per month (mm/month) for the year 2003 in the aquifer Mancha Oriental and the precipitation in the principal station in Los Llanos.</i>	214
VI.21.	Balance entre ET_c^* y precipitación a lo largo del año 2003 dentro del acuífero 08.29. / <i>ET_c^* minus precipitation during year 2003 in the aquifer 08.29.</i>	219
C.1.	Evolución de los índices de vegetación sobre la parcela de maíz durante el año 2001. / <i>Time evolution of Maize spectral indices during year 2001.</i>	248
C.2.	Evolución de los índices de vegetación sobre la parcela de trigo durante el año 2003. / <i>Time evolution of wheat spectral indices during year 2003.</i>	249

C.3.	Representación de la fracción de cobertura vegetal verde (f_c) frente a cada uno de los índices de vegetación (IVs) seleccionados distinguiendo entre los datos obtenidos sobre maíz (+) y trigo (\times). / <i>Green cover fraction (f_c) versus selected vegetation indices (VIs) distinguishing between data from maize (+) and wheat (\times).</i>	250
C.4.	Representación del LAI frente a cada uno de los índices de vegetación (IV) seleccionados distinguiendo entre los datos obtenidos sobre maíz (+) y trigo (\times). / <i>LAI versus the selected vegetation indices (IV) distinguishing between data from maize (+) and wheat (\times).</i>	251
C.5.	Representación de la biomasa ($-\blacklozenge-$) y del valor integrado en el tiempo de los IVs (IntVI - \diamond) frente al DoY para maíz. / <i>Biomass ($-\blacklozenge-$) and the IntVI ($-\diamond$) versus DoY for maize.</i>	252
C.6.	Representación de la biomasa ($-\blacklozenge-$) y del valor integrado en el tiempo de los IVs (IntVI - \diamond) frente al DoY para trigo. / <i>Biomass ($-\blacklozenge-$) and the IntVI ($-\diamond$) versus DoY for wheat.</i>	253
C.7.	Representación del coeficiente de cultivo basal frente a los índices de vegetación seleccionados para maíz y trigo. / <i>The basal crop coefficient versus the selected vegetation indices for maize and wheat is shown in the graph.</i>	255
C.8.	Representación del coeficiente de cultivo y el índice de vegetación para maíz y trigo. / <i>The crop coefficient versus the vegetation indices for maize and wheat is shown in the graph.</i>	256
C.9.	Representación del coeficiente de cultivo y el índice de vegetación para maíz y trigo. / <i>The crop coefficient plotted versus the vegetation indices for maize and wheat is shown in the graph.</i>	257
D.1.	Mapa de usos de suelo dentro del acuífero 08.29 correspondiente al año 2003 (Calera, 2003). / <i>Land use map in the aquifer 08.29 corresponding to year 2003 (Calera, 2003).</i>	261
E.1.	Composición RGB de una parcela de alfalfa (izquierda) y suelo (derecha) junto a su evolución temporal de $NDVI_{TOA}$ (figuras inferiores) a lo largo de un ciclo de crecimiento durante el año 2003. / <i>RGB composition for an alfalfa plot (left) and soil (right) and the time evolution of $NDVI_{TOA}$ (bottom figures) during the crop growth cycle in year 2003.</i>	264
F.1.	Curvas de coeficiente de cultivo obtenidas a partir de los registros realizados en la campaña extensiva del ITAP para los cultivos mayoritarios que caen dentro de la clase regadío de primavera. / <i>Crop coefficient curve obtained from the extensive campaign conducted by the ITAP corresponding to main crops in the spring irrigated class.</i>	267

- F.2. Curvas de coeficiente de cultivo obtenidas a partir de los registros realizados en la campaña extensiva del ITAP para los cultivos mayoritarios que caen dentro de la clase regadío de verano. / *Crop coefficient curve obtained from extensive campaign conducted by the ITAP over 600 smallholdings corresponding to main crops in the summer irrigated class. . . 269*

ÍNDICE DE TABLAS

II.1. Distribución de cultivos y del consumo de agua para riego en el Sistema Mancha Oriental (López-Urrea, 2004; Fuster, 2000). / <i>Crops distribution and water consumption for irrigation in the Mancha Oriental aquifer (López-Urrea, 2004; Fuster, 2000)</i>	28
II.2. Distribución de regadíos y año según el proyecto ERMOT (Calera, 2003). / <i>Irrigated Crops distribution and year from ERMOT project (Calera, 2003)</i>	30
III.1. Relación de Índices basados en cocientes, donde ρ_{IR} y ρ_R representan la reflectividad en infrarrojo cercano y rojo respectivamente. / <i>Indexes based on rates, where ρ_{IR} and ρ_R are the infrared and red reflectances</i>	64
III.2. Tabla resumen de los índices propuestos en el trabajo junto con las características más destacables. / <i>Proposed Indexes emphasizing on main indications</i>	67
III.3. Tabla resumen de las relaciones K_{cb}^* vs IV más utilizadas en la bibliografía. Aparecen indicado el cultivo de referencia (alfalfa o gramínea) así como el autor. / <i>Most used K_{cb}^* vs IV relationship in the bibliography. The reference crop surface (alfalfa or grass) and the author have been indicated</i>	82
IV.1. Variables adquiridas por la estación meteorológica Anchor Station ubicada en la finca experimental de Las Tiesas (Barrax). / <i>Acquired variables by the meteorological station Anchor Station sited on experimental facilities in Las Tiesas (Barrax)</i>	99
IV.2. Valores semanales de ET_0 ($\text{mm}\cdot\text{semana}^{-1}$) facilitados por el SAR del ITAP. / <i>Acquired variables by the meteorological station Anchor Station sited on experimental facilities in Las Tiesas (Barrax)</i>	111

IV.3. Día, hora (GMT) y ángulo de elevación solar (grados) al inicio y final de cada adquisición en las campañas respectivas durante los años 2001 y 2003. / <i>Day, time (GMT) and zenith angle (degree) at the beginning and ending in each spectral acquisition during the maize (2001) and wheat (2003) campaign.</i>	118
IV.4. Estado del desarrollo para ambos cultivos, maíz y trigo respectivamente. / <i>Growth stage development for the crops maize and wheat.</i>	125
IV.5. Valores de fracción de cobertura f_c para ambas campañas, maíz y trigo respectivamente. / <i>Green Fraction Cover f_c during the whole cycle for maize and wheat.</i>	128
IV.6. Valores de LAI para ambas campañas, maíz y trigo respectivamente. / <i>LAI values during the whole cycle for maize and wheat.</i>	135
IV.7. Valores de Biomasa para ambas campañas, maíz y trigo respectivamente. / <i>Biomass values(B) during the whole cycle for maize and wheat.</i>	139
IV.8. Valores de Biomasa (B) y contenido en agua (CA) para el cultivo del trigo distinguiendo entre hojas, tallo y espigas. / <i>Biomass values(B) and water content for wheat distinguishing between leaves, stems and ears.</i>	142
IV.9. Valores de Altura (h) durante todo el ciclo tanto para maíz como trigo. / <i>Height values(h) during the whole cycle for maize and wheat.</i>	144
V.1. Valores de pendiente y corte en ordenadas en la regresión lineal entre f_c y los IV. / <i>Slope and intercept in the linear fit between the f_c and the VI.</i>	166
V.2. Regresión de los IV propuestos frente a LAI para en conjunto de datos incluyendo maíz y trigo. La relación exponencial es del tipo: $IV = P_1 - P_2 \cdot e^{k \cdot LAI}$. / <i>Regression of the VI versus LAI for the whole dataset including maize and wheat. The exponential relationship used is the type: $IV = P_1 - P_2 \cdot e^{k \cdot LAI}$.</i>	168
V.3. Coeficientes de regresión lineal entre las magnitudes biomasa y $IntIV$ para cada uno de los índices de vegetación. / <i>Coefficients in the linear regression between biomass ($kg \cdot m^{-2}$) and $IntVI$ (VI-day) for each of the vegetation indices.</i>	172
V.4. Pendiente, abcisa y coeficiente de correlación en la relación lineal establecida entre el coeficiente de cultivo basal y cada uno de los índices de vegetación propuestos para los cultivos de trigo y maíz. / <i>Slope, intercept and correlation coefficient for the linear relationship established between the basal crop coefficient and each of the VI proposed for both crops wheat and maize.</i>	178

V.5. Adaptación de la ecuación lineal K_{cb} vs IV de la superficie de referencia alfalfa a festuca utilizando las indicaciones ASCE (Allen, 1996). / <i>Adaptation of the linear equations K_{cb} vs VI from the alfalfa reference surface to grass using the ASCE 28 methodology (Allen, 1996).</i>	178
V.6. Pendiente, abcisa y coeficiente de correlación en la relación lineal ($K_c = a \cdot IV + b$) establecida entre el coeficiente de cultivo y cada uno de los índices de vegetación propuestos para los cultivos de trigo y maíz. Entre paréntesis está indicado el error en la estimación. Los cálculos de regresión se han hecho para los tres intervalos de tiempo promedio, diario, 7 días y 15 días. / <i>Slope, intercept and correlation coefficient for the linear relationship ($K_c = a \cdot IV + b$) established between the crop coefficient and each of the VI proposed for wheat and maize averaged at three time intervals: daily, 7 days and 15 days. The error in the estimation is indicated between brackets.</i>	181
VI.1. Imágenes utilizadas en la elaboración del mapa de usos de suelo (ULxmap y ULymap son respectivamente las coordenadas x e y del píxel superior izquierdo en la imagen). / <i>Images used to elaborate land use map.</i>	191
VI.2. Día del año en que se inicia el cambio de fase en cada clase de cultivo obtenido como información auxiliar desde la campaña de campo extensiva. La ausencia de dato indica que la curva se reproduce directamente desde satélite. / <i>Day of the year in where phase change take place for each crop class obtained from ancillary information in the extensive field campaign. Data absence indicates that crop curve is obtained from satellite.</i>	207
VI.3. Evapotranspiración máxima de cubierta (ET_c^*) acumulada durante el año 2003 para cada clase de cultivo. / <i>Cumulative maximum evapotranspiration (ET_c^*) on year 2003 for each of the crop class.</i>	210
VI.4. Valores de precipitación mensual medios en el año 2003 y los valores medios en el intervalo 1945-2002 en la estación de <i>Los Llanos</i> INM (de León-Llamazares, 1988). / <i>Monthly average precipitation during the years 2003 and the average values in the 1945-2002 from the INM meteorologic station in Los Llanos (de León-Llamazares, 1988).</i>	216

CAPÍTULO I

Introducción

Marco del trabajo.

El agua es la base de la vida en la Tierra y un elemento clave en el medio ambiente. Desempeña un papel crucial en el mantenimiento de un nivel de vida de calidad así como en el desarrollo económico y social. Los estudios realizados y el mejor conocimiento del medio ambiente durante las últimas décadas han puesto de manifiesto que los recursos naturales, en general, y el agua, en particular, son limitados. Consiguientemente, sólo su utilización racional permitirá un desarrollo sostenible que garantice las necesidades hídricas del presente y del futuro.

El continuo aumento demográfico del planeta unido a la creciente demanda de energía, alimentos, materias primas y agua hace que los recursos naturales en algunas zonas del planeta estén sobreexplotados. De entre todos los recursos naturales, el agua es probablemente el más explotado. Así, la actividad humana altera el medio ambiente y es considerada como una de las principales causas del Cambio Global (IGBP, 2001). En los últimos años, la sociedad se ha hecho eco de los continuos procesos de deforestación, desertificación, el cambio en el ritmo de lluvias (lluvias torrenciales y sequías persistentes), . . . fruto en gran medida de la acción humana en combinación con el cambio climático. Más bien, como aseguran algunos autores, la sequía no avanza sino que somos nosotros los que avanzamos hacia ella al sobreexplotar los recursos hídricos y eliminar las cubiertas vegetales haciendo el suelo más fácilmente erosionable.

Desde los círculos de expertos se vienen marcando las líneas de actuación generales para reducir el impacto que la acción humana y el cambio climático tienen sobre el ciclo del agua (Gleick, 2000). La podríamos resumir en cinco líneas de actuación:

1. Desarrollo y aplicación de los programas nacionales de seguimiento del clima y agua que garantizan la sostenibilidad de recursos y evitan las acciones irreversibles en zonas climáticamente sensibles.
2. Mejora en la eficiencia del uso final así como una gestión racional del agua.
3. Revisión de la ingeniería de diseño, normas de operación, planes de contingencia y políticas de almacenamiento de agua, de forma que se adapten a un rango más amplio de condiciones climáticas de lo que viene siendo tradicional.
4. Reconocimiento del papel en el balance entre suministro y demanda que, desde el punto de vista económico, desempeñan los precios y el mercado.
5. Mantenimiento de un sistema legal actualizado y en continuo desarrollo para la gestión y almacenamiento de las reservas hídricas.

Desde el ámbito de la investigación se puede dar respuesta a varias de estas líneas de acción, mediante el desarrollo investigador de hidrólogos, ingenieros, gestores hídricos, y comunidad científica que de forma importante está siendo llevado a cabo por las universidades. Actualmente, aún es poca la información disponible sobre cómo los cambios en el clima pueden afectar a los acuíferos subterráneos, sobre calidad, ritmos de recarga y dinámicas de flujo. Es por tanto necesario que se mantenga el ritmo de investigación en el desarrollo de modelos que proporcionen información sobre la disponibilidad de recursos hídricos y su explotación, para evaluar e identificar el impacto hidrológico a escala regional.

A finales del siglo XX el total de agua extraída a nivel global se estimaba en torno a 3790 km³/año (Shiklomanov, 2000). Las previsiones auguran un crecimiento entorno a un 10-12 % por cada período de diez años, por lo que se estima que dicha cantidad llegará a ser aproximadamente de 5240 km³/año para 2025. De este volumen la agricultura recibe el 70 % del total de extracciones de agua con una eficiencia media en el uso del 37 % (Shiklomanov, 2000; Postel, 1993). Aunque las previsiones de futuro indican que el papel de la agricultura disminuirá relativamente hacia otros usos debido a la desviación hacia sectores emergentes como la industria y el consumo público, nadie duda que el peso que ésta continuará teniendo en términos económicos e hídricos será muy importante (sobre todo en las zonas en vías de desarrollo donde la economía se basa principalmente en la actividad agrícola). El uso del regadío en agricultura se ha basado tradicionalmente en la mayor producción media que ofrecen los cultivos regados frente a los no regados (Veneman *et al.*, 2004; Bruinsma, 2003), esto ha hecho que ante la demanda de alimentos en el mundo unido al bajo coste en el valor y la extracción del agua, la superficie de regadíos ha ido en continuo aumento. La superficie total mundial de regadío a finales de siglo pasado era de 253 millones de hectáreas, y se estima que para 2025 será de 330 millones de hectáreas. Con estas cifras el porcentaje actual de extracciones de agua con respecto a los recursos

hídricos mundiales no es elevado, en torno a un 8,4 %. A priori, una cifra que no pone en riesgo la sostenibilidad de los recursos hídricos a nivel mundial, pero que pone en evidencia la desigual explotación de los recursos en diferentes partes del planeta. En Europa, que supone el 9 % del regadío mundial (Siebert, Döll, Hoogeveen, Faures, Frenken and Feick, 2005), esta cifra asciende al 15 % (Shiklomanov, 2000) siendo mayor en la zona de la cuenca mediterránea donde se concentran la mayor parte de los regadíos tal y como se muestra en la figura I.1. En España actualmente la escorrentía superficial se cifra en unos 110 000 hm³/año (89 000 hm³/año aprovechables) de los cuales 29 000 hm³/año corresponden a la recarga de los acuíferos (Ministerio Medio Ambiente, 2000b). Se estima que se explotan 5500 hm³/año de los recursos subterráneos y aunque este valor está por debajo del valor total de recarga a nivel nacional, en cuencas como la del Júcar ha superado la recarga (Ministerio Medio Ambiente, 2000b). En la mayoría de los casos, la necesidad, y la sensibilización de administración, usuarios y sociedad en general, han contribuido que haya sido en las zonas en que la explotación está en el límite de los propios recursos hídricos donde se han producido los mayores avances en la adecuación de las vías de suministro y en el desarrollo de herramientas de gestión del agua. Dada la importancia, como se ha visto en términos hídricos, del regadío es imprescindible desarrollar herramientas de gestión operativas y que contribuyan a mejorar la eficiencia en el consumo del agua.

Desde el punto de vista agronómico, hidrológico y medioambiental, la evapotranspiración es una componente importante en la evaluación de las necesidades hídricas de las cubiertas vegetales. La evapotranspiración es el proceso físico por el cual se transfiere agua y energía asociada desde el sistema «cubierta vegetal y suelo» a la atmósfera como resultado de la evaporación y de la transpiración de las plantas. Este concepto ha sido ampliamente tratado durante el último siglo por diferentes autores existiendo diferentes métodos en su medida y estimación. Estos métodos son más o menos adecuados en función de la precisión o el coste de cálculo, o son preferentes para determinadas escalas de tiempo o espacio (Rana and Katerji, 2000). En aplicaciones agronómicas, la estimación de las necesidades de riego en cultivos es un parámetro básico para la mejora en la eficiencia de los sistemas de regadío. El suministro de agua por exceso hace que a partir del valor de óptimo uso de la planta no aumente la producción: por el contrario un déficit hídrico reduce la producción y puede llegar a causar la senescencia de la cubierta.

Dada la importancia que tiene la adecuación del suministro hídrico a las necesidades de la cubierta, la Organización para la Alimentación y la Agricultura de Naciones Unidas (*Food and Agriculture Organization*, FAO) ha elaborado sucesivas publicaciones para calcular la evapotranspiración del cultivo mediante la metodología denominada « K_c-ET_o » donde la demanda evaporativa de la atmósfera es la evapotranspiración de referencia ET_o , calculada solamente desde datos meteorológicos y el efecto del cultivo se establece mediante el denominado coeficiente de cultivo, K_c (Allen *et al.*, 1998; Doorenbos and Pruitt, 1977a). Mediante este método, ampliamente uti-

Zonas de Regadío en la Cuenca Mediterránea y Europa

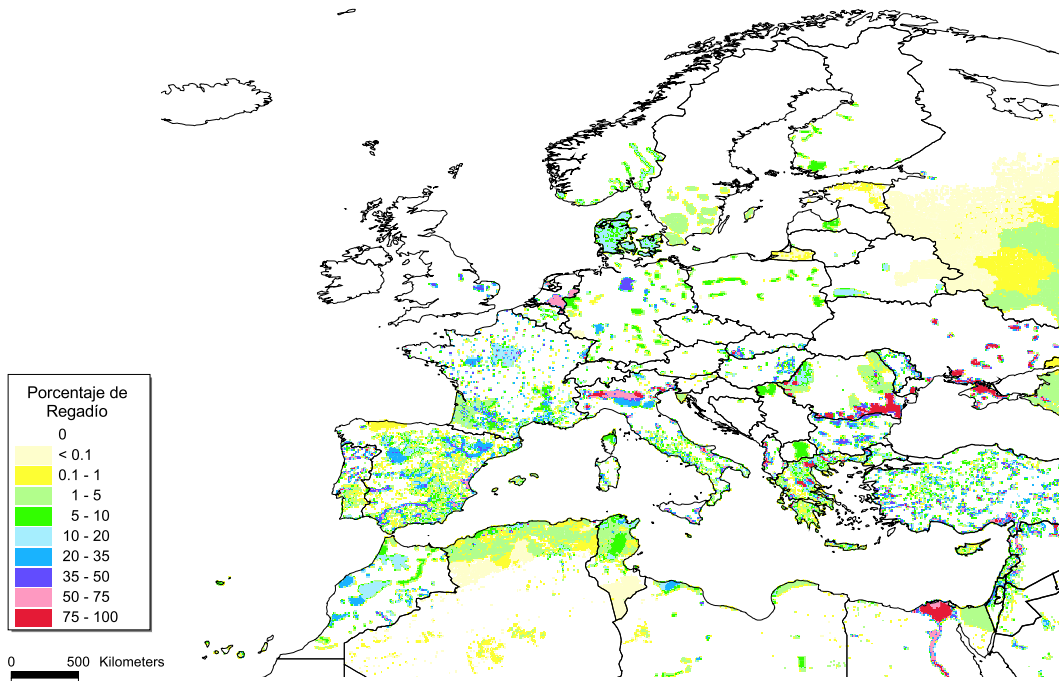


Figura I.1: Mapa con las zonas de regadío en la cuenca mediterránea y Europa (Siebert, Döll, Hoogeveen, Faures, Frenken and Feick, 2005; Siebert, Döll, Feick and Hoogeveen, 2005).

lizado, se calcula la evapotranspiración del cultivo en condiciones óptimas de manejo y nutrientes como el producto de un coeficiente de cultivo (K_c) por la evapotranspiración de una cubierta de referencia (ET_o). En el coeficiente de cultivo se pueden separar la componente debida a la transpiración, a la que se denomina coeficiente de cultivo basal K_{cb} , de la componente debida a la evaporación, K_e (Wright, 1982).

La determinación del coeficiente de cultivo desde la respuesta espectral de la cubierta vegetal es el enfoque en el que se va a profundizar en este trabajo. La semejanza entre la evolución temporal del coeficiente de cultivo y la evolución temporal del índice de vegetación de una determinada cubierta ya fue señalada por Heilman (1982). Con este objetivo, autores como Choudhury *et al.* (1994) y Neale *et al.* (1989) encuentran una relación entre la componente debida a la transpiración, coeficiente de cultivo basal, y la reflectividad espectral a través del índice de vegetación. Mediante el uso del coeficiente de cultivo derivado de la respuesta espectral y a partir de los datos meteorológicos, se proporcionan valores comparables con modelos físicos y datos de campo (Allen, 2000b; Kite and Droogers, 2000). Desde el punto de vista metodoló-

gico los índices de vegetación se han mostrado tradicionalmente como herramientas robustas y consistentes en el seguimiento de las cubiertas vegetales, aunque al estar la mayoría de ellos definidos en el rango del óptico y por su propia definición son insensibles a la componente de evaporación de suelo. No obstante, esta robustez, sobre todo de índices tradicionales como NDVI, SAVI y otros desarrollados posteriormente, garantiza la descripción de la curva de la componente debida a la transpiración del cultivo desde los índices de vegetación.

El papel que juega la teledetección en el ámbito de la gestión y evaluación de recursos hídricos es clave al permitir la observación de forma simultánea de grandes áreas, de forma periódica y a distintas resoluciones espaciales, lo que es especialmente útil para proporcionar información a diferentes escalas. La estimación de la evapotranspiración real desde satélite se inicia con el desarrollo del balance de energía simplificado publicado en los trabajos de Idso *et al.* (1975) y Jackson *et al.* (1977). En estos modelos la evapotranspiración se estima a partir de la relación empírica con la temperatura. Por este motivo, los sensores que proporcionan las imágenes en el rango del visible e infrarrojo térmico han sido decisivos para la determinación de la evapotranspiración real. Desarrollos posteriores de los trabajos mencionados ofrecen alternativas de cálculo, estableciendo diversas modalidades según sea la información de campo requerida, la banda espectral utilizada, la información meteorológica auxiliar o la necesidad o no de modelos numéricos (Bastiaanssen *et al.*, 2000).

Durante la década de los noventa se han desarrollado versiones más avanzadas del balance de energía en superficie. Modelos como SEBAL (Bastiaanssen *et al.*, 1998), SEBI-SEBS (Menenti *et al.*, 2003; Su, 2002) o la versión extendida de SEBAL conocida bajo el acrónimo METRIC (Tasumi *et al.*, 2006) estiman los flujos de calor latente y calor sensible. Estos modelos son las herramientas más avanzadas y muestran resultados similares en la estimación de los flujos de energía desde teledetección. Su principal limitación en el seguimiento temporal de la evapotranspiración radica en la disponibilidad de imágenes condicionada por la presencia de nubes o la programación de pasadas del satélite, así como una baja resolución espacial principalmente en el canal térmico. Estos modelos permiten derivar, bajo algunas hipótesis, el coeficiente de cultivo y así constituyen una forma adicional de contrastación.

La simulación continua de la evapotranspiración se hace mediante modelos de seguimiento en ecosistemas basados en la transferencia de agua entre suelo-planta-atmósfera (Oliosio *et al.*, 2003) y también mediante los modelos hidrológicos que utilizan el balance de agua en suelo (Engman, 1995). La combinación de éstos con los datos de teledetección proporcionan estimaciones continuas del balance de agua y energía distribuidas espacialmente. El principal inconveniente que presentan estos modelos es su complicación en la puesta a punto y su validación en un contexto operacional (Verhoef and Bach, 2003; Oliosio *et al.*, 2003; Kimes *et al.*, 2000; Jacquemoud *et al.*, 2000).

Desde la perspectiva operacional, la determinación desde satélite del coeficiente de cultivo permite hacer una estimación continua de la evapotranspiración y una previsión de las necesidades hídricas de la cubierta vegetal. Así, el entorno o aplicación marcan la selección de la metodología a seguir en la estimación de la evapotranspiración. En el seguimiento de regadíos, tal y como se comentó anteriormente, la mayoría de las recomendaciones de la cantidad de agua a aplicar en prácticamente todo el mundo están basadas en la metodología « K_c-ET_0 ». Por estos motivos los sistemas de asesoramiento de riegos utilizan la metodología «en dos pasos» para proporcionar las recomendaciones de riego a nivel de campo. La teledetección proporciona la estimación del coeficiente de cultivo a través de las imágenes de satélite y por ello el coeficiente de cultivo puede ser calculado sobre grandes áreas. Teniendo en cuenta estos precedentes, en este trabajo se parte de los trabajos previos existentes en la bibliografía sobre la relación del coeficiente de transpiración con los índices de vegetación para obtener una estimación de la evapotranspiración (evaporación de suelo y transpiración de vegetación) a partir de los índices de vegetación. Esta línea viene impulsada por la manifiesta necesidad de los usuarios (servicios de asesoramiento de riegos, modelos hidrológicos, sistemas de gestión ambiental,...) de una herramienta operacional de estas características (Calera *et al.*, 2005).

Objetivos.

El **objetivo general** del trabajo es **analizar y desarrollar la metodología que permite obtener el coeficiente de cultivo de una cubierta desde su respuesta espectral utilizando índices de vegetación y estimar así la evapotranspiración.**

Este objetivo general se ha desglosado en los siguientes objetivos principales:

1. **Tratar de acercarnos a entender, un poco más allá de la relación empírica, las causas de la relación entre K_c-IV .**
2. **Establecer ecuaciones de cálculo del coeficiente de cultivo basal y del coeficiente de cultivo derivadas del IV , sus limitaciones y aplicabilidad.**
3. **Profundizar en el concepto físico del coeficiente de cultivo derivado del IV , sus limitaciones y aplicabilidad.**

Por un lado, se abordan los fundamentos teóricos de la relación empírica del coeficiente de cultivo basal con el IV en dos caminos: uno, a través de parámetros biofísicos tales como el Índice de Área Foliar, LAI, y la fracción de cobertura vegetal verde; otro camino es mediante el uso de los modelos de «Eficiencia en el Uso de la Luz», LUE (*Light Use Efficiency*), en que el IV es un buen estimador de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida, f_{APAR} , lo que junto con las funciones clásicas

de producción que consideran la producción de biomasa relacionada directamente con la masa de agua transpirada en un ciclo de cultivo permite acercarnos en primera aproximación al fundamento de la relación K_{cb-IV} . Este tratamiento se ha desarrollado en el capítulo III.

Por otro lado, se han aplicado las consideraciones conceptuales realizadas a los datos experimentales obtenidos en campañas sobre maíz y trigo, extendidas ambas a lo largo de un ciclo de crecimiento, en las que, entre otros parámetros biofísicos que se detallan en el capítulo IV, se ha medido la evapotranspiración mediante lisímetros de pesada continua y la reflectividad mediante radiometría de campo, estableciendo ecuaciones lineales entre el coeficiente de cultivo y el IV.

Se profundiza en el concepto físico del coeficiente de cultivo derivado de la respuesta espectral. El uso conjunto de los modelos y datos experimentales indican que el producto $K_c(IV) \cdot ET_o$, proporciona una estimación del «potencial» máximo de evapotranspiración de una determinada cubierta bajo unas determinadas condiciones atmosféricas que son dadas por la evapotranspiración de referencia ET_o , y se denominará ET_c^* . Para una determinada cubierta y bajo unas condiciones atmosféricas determinadas, el valor $K_c^* \cdot ET_o$ es el techo que puede alcanzar la evapotranspiración, ET_c^* . Así, bajo condiciones de escasez de agua, esto es estrés hídrico, y otros limitantes, el valor de la evapotranspiración será inferior al que señala la envolvente determinada por $K_c^* \cdot ET_o$.

Cada punto de la curva temporal determinada por dicha envolvente a lo largo del ciclo de desarrollo puede representar el acople de la demanda evaporativa de la atmósfera y del estado de desarrollo de la cubierta en un instante dado, si esta estuviera en ese instante en condiciones ideales, esto es sin limitaciones de agua y nutrientes. El valor acumulado a lo largo del tiempo indicará el valor máximo del flujo de vapor de agua que una determinada cubierta sometida a unas determinadas condiciones climáticas ha podido intercambiar con la atmósfera.

La relación obtenida a nivel de campo entre los coeficientes de cultivo e IV puede ser aplicada a nivel de satélite. Mediante el uso de una secuencia temporal de imágenes en teledetección, es posible obtener las curvas de cultivo para cada uno de las parcelas de la escena, y por tanto determinar la ET_c^* extendida al ámbito del acuífero. Con este cálculo se consiguen abordar los siguientes objetivos:

- 4. Aplicar las relaciones establecidas a escala de parcela a escala regional mediante una secuencia temporal de imágenes de satélite.**
- 5. Estimar la evapotranspiración del cultivo en condiciones óptimas en el ámbito espacial del acuífero 08-29 de cerca de 10 000 km² para las condiciones atmosféricas y de vegetación dadas durante el año 2003.**

Se ha dado el salto de la escala de parcela a la escala regional utilizando para ello imágenes de satélite, aplicando el concepto de coeficiente de cultivo a cualquier superficie. De esta forma se ha establecido la curva típica de evolución de determinadas

cubiertas y se ha calculado el flujo de vapor de agua máximo en las condiciones de observación, esto es el máximo que hubieran podido intercambiar con la atmósfera a lo largo de un año dichas superficies. Para algunas de estas cubiertas, tales como los cultivos regados, en los que se asume que en su ciclo de desarrollo las condiciones de manejo, agua y nutrientes son las óptimas, la cifra obtenida sería aquella que corresponde a las necesidades brutas de agua, y por tanto sería su evapotranspiración real. En aquellas otras cubiertas, la evapotranspiración real estará por debajo del potencial, indicando el que en muchas fases de su desarrollo, dichas cubiertas se encuentran bajo estrés hídrico. Esto se hará en la última parte de la tesis comparando los datos de ET_c^* con las precipitaciones de la zona a lo largo del año.

Estructura de la memoria.

El objetivo general, desarrollado a partir de los objetivos parciales indicados en el apartado anterior marca el diseño global de la memoria. En ciertos casos, los experimentos, la necesidad de razonamientos teóricos o la interpretación de resultados es posible que altere el orden de los objetivos. Por este motivo donde sea necesario en el documento, por ser más explícito en los razonamientos, se hará referencia al objetivo parcial perseguido.

Factores ambientales como el clima, las condiciones del suelo, su uso, y las características de la cubierta vegetal condicionan el ritmo de evapotranspiración. Con este objetivo, se dedica el capítulo II a la descripción y caracterización de la zona de estudio. La zona de trabajo es el acuífero 08.29 conocido como «Mancha Oriental» situado al sudeste de la meseta manchega, al interior de la Península Ibérica, en la cuenca del río Júcar. En esta zona se ha producido en los últimos treinta años un continuo incremento en la explotación de los recursos hídricos del acuífero llegando a la situación de no sostenibilidad, lo que ha planteado la necesidad de nuevas herramientas en la gestión de los recursos hídricos.

En el capítulo III se hace una revisión de los métodos de medida y estimación de la evapotranspiración en campo así como de las técnicas utilizadas en teledetección. La estructura de la memoria viene reflejada en la figura I.2. En la zona de estudio, la existencia de una estación lisimétrica permitirá la medida en campo de la evapotranspiración y, por tanto del coeficiente de cultivo. El seguimiento radiométrico de estas cubiertas permite simultanear ambas magnitudes en campo: el coeficiente de cultivo y el índice de vegetación. Con este propósito se han seleccionado dos cultivos representativos en la zona de estudio, trigo y maíz a los que se ha hecho un seguimiento de la reflectividad, coeficiente de cultivo, fracción de cobertura, índice de área foliar, biomasa y altura del cultivo durante su ciclo de crecimiento. En el capítulo IV se hace una descripción del material y del desarrollo de los experimentos de campo. Ambos experimentos de campo han exigido la dedicación y coordinación de ambas campañas durante el ciclo de crecimiento los años 2001 y 2003, puesta a

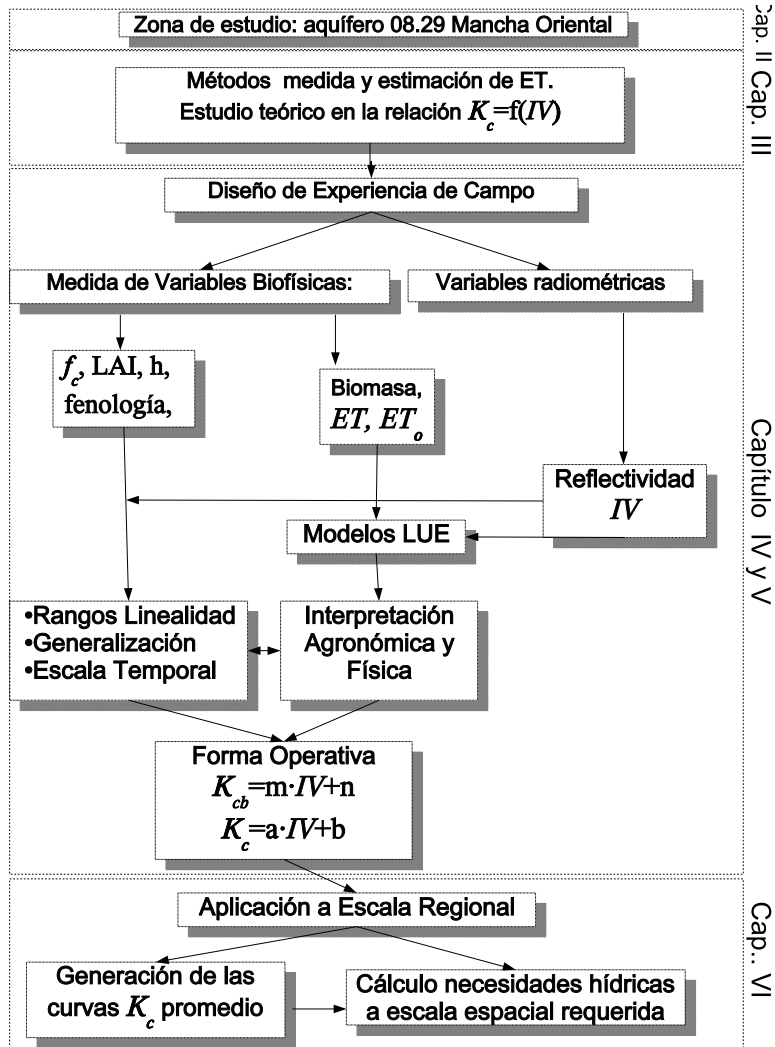


Figura I.2: Esquema resumen de la tesis doctoral.

punto y mantenimiento de los equipos, además del análisis de un volumen de varios GigaBytes de datos generados. Este capítulo se complementa con el capítulo V donde se hace un análisis de los datos obtenidos en campo y se hace una discusión de los límites de aplicación en la relación entre transpiración, evapotranspiración e índices de vegetación.

Finalmente en el capítulo VI se presenta un ejercicio de aplicación sobre el acuífero 08.29. Para dicha aplicación, se utiliza el mapa de usos de suelo, la ecuación obtenida a nivel de campo entre el coeficiente de cultivo y los índices de vegetación así como

los datos de las estaciones meteorológicas de la zona. La recopilación de resultados, discusión final y conclusiones así como algunas indicaciones futuras están recogidas en el capítulo VII.

Introduction

Water is the basis of life on earth; it is the main component of the environment and an essential element for human life. Water is also fundamental for sustaining a high quality of life and for economic and social development. Polluted water or water shortage may cause diseases, disaster and damage to the environment. Recent studies during the last decades and the improvement in the knowledge of the environment have made evident that the natural resources, especially the water, are limited. Only with a sustainable development the water resources required now and in the future can be guaranteed.

The continuous population growth and its associated increasing demand of energy, food, primary materials and water resources have led to overexploitation of resources in some regions of the planet. Water is probably the most exploited of all natural resources. Thus, human activity alters the environment and is also considered as one of the main factors that causes the Global Change (IGBP, 2001). In recent years, the society has become sensitive to deforestation, desertification, changing precipitation cycles, and other phenomena that are mainly due to human activity in combination with climate change. As some authors believe, it is not the desert that spreads out but it is our activities that make it grow when we overexploit the water resources and eliminate the vegetation cover that protects the soil from erosion.

The following five general lines of action have been proposed in order to reduce the impact of human activity and climate change on the water cycle:

1. The development and application of national programs to monitor climate and water resources that would guarantee the sustainable use of resources and prevent irreversible changes in sensitive areas.
2. A better efficiency in the end-use of water and a rational water management.

3. The systematic revision of engineering design, operation standards, contingency plans and politics of water storage adapted to a wider range of climatic conditions than before.
4. A clear understanding of the role of markets and prices in balancing the supply and demand.
5. The continuous improvement of legal frameworks for water resources allocation and management.

These action lines can be supported by the important research activities of hydrologists, engineers, water managers, and other scientists at universities. Currently, there is not much information available on the impact of climate change on subterranean aquifers, aquifer water quality, recharge rate and flux dynamics. Therefore, it is necessary to continue the research and development of models that provide the information about on the availability and exploitation of water resources, which is needed to assess the hydrological impact at regional scale.

At the end of the Twentieth century the global total water withdrawal was about 3790 km³/year (Shiklomanov, 2000). These withdrawals are forecast to increase with a rate of 10-12 % over each ten years period, thus reaching a value of 5240 km³/year in 2025. Total agricultural extraction is 70 % of this volume with an average use efficiency of 37 % (Shiklomanov, 2000; Postel, 1993). Even though the projections indicate a decrease in the relative importance of agriculture, due to increases in the emerging sector of industry and general use, there is no doubt about the key role of agriculture in the economy and the water cycle (especially in developing countries where the economy is mainly based on agriculture). The agricultural use of water has been due mainly to the higher average crop yields obtained in irrigated rather than non-irrigated crops (Veneman *et al.*, 2004; Bruinsma, 2003). In combination with the increasing demand of food and the low cost of water this has led to a continuous increase of the total irrigated area. At the beginning of the last century, the total world irrigated area was 253 million of hectares, and the estimation for 2025 is of 330 million hectares.

The percentage of water withdrawals respect to the total world freshwater resources is 8 %. This percentage does not a priori put at risk the sustainability of the global water resources. However, it shows the differences in the water use among different areas in the world. In Europe, which holds 9 % of the world's irrigated area (Siebert, Döll, Hoogeveen, Faures, Frenken and Feick, 2005), this quantity is the 15 %, with most of it concentrated in the Mediterranean basin (Shiklomanov, 2000) (see Figure I.1). In Spain the surface runoff is estimated at 110 000 hm³/year (89 000 hm³/year available) of which 29 000 hm³/year correspond to aquifer recharge (Ministerio Medio Ambiente, 2000b). An estimated 5500 hm³/year are extracted from underground water resources, less than the total aquifer recharge in Spain, but in river basins like the Júcar or Segura the water withdrawals exceed the recharge (Ministerio Medio

Ambiente, 2000b). In most of these areas, the pressure and the growing sensibilization of administration, users and the society has led to major advances in the modernization of supply systems and water management tools. Due to the importance of the irrigated areas in the water cycle it is necessary to develop management tools that contribute to increase the efficiency in the use of water.

From the agronomic, hydrological and environmental point of view, the evapotranspiration is of vital importance in estimating the water requirements of crops. Evapotranspiration is the physical process in which the water and energy is transferred from the system «canopy and soil» to the atmosphere as the result of the evaporation from the soil and transpiration of plants. Evapotranspiration has been intensively studied during the last century. The different methods for its measurement and estimation vary in terms of accuracy and calculation cost and some are particularly suitable for given space and time scales (Rana and Katerji, 2000). In agronomic practices, the estimation of crop water requirements is fundamental for increasing the irrigation water use efficiency. Overirrigation reduces the efficiency because beyond the optimum water supply the crop yield does not increase any further. On the other hand, a deficit in water supply limits the crop yield and can trigger premature senescence of the plants. Due to the importance of an adequate water supply, the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) has published a series of reference manuals to calculate crop evapotranspiration based on the methodology that is known as " $K_c \cdot ET_o$ " and used world-wide. There, the atmospheric demand is estimated using the reference evapotranspiration ET_o calculated from meteorological data and the crop component is introduced by the crop coefficient K_c (Allen *et al.*, 1998; Doorenbos and Pruitt, 1977a). Then, the crop evapotranspiration under optimum water, nutrients and management is estimated, by multiplying the crop coefficient K_c with the reference evapotranspiration ET_o . The crop coefficient can be separated in two components, the basal crop coefficient K_{cb} , which accounts for crop transpiration and the evaporation component K_e (Wright, 1982). The definitions and methodology are described more rigorously in Chapter III.

This work focuses in the determination of the crop coefficient from the spectral response in the crop canopy. Heilman (1982) showed the similarities in the temporal evolution of crop coefficient and vegetation index for the first time. Pursuing the same objective, Choudhury *et al.* (1994) and Neale *et al.* (1989) established a relationship between the transpiration, expressed as the basal crop coefficient and the vegetation index. The crop coefficient derived from the spectral acquisitions, together with reference evapotranspiration obtained from an adjacent meteorological station give crop evapotranspiration values comparable to physical models and field data (Allen, 2000b; Kite and Droogers, 2000). The vegetation indices have been traditionally been considered as consistent and robust tools for crop monitoring. They have been designed to be sensitive to crop amount and are usually normalized to the presence of soil. This robustness, especially in indices such NDVI, SAVI and improved ver-

sions, allows to obtain the temporal evolution curve due to transpiration from these vegetation indices.

Remote sensing plays an important role for the management and evaluation of water resources because it provides instantaneous observations over large areas, periodically, at different spatial resolutions, which is especially useful when information at different scales is needed.

The estimation of actual evapotranspiration from satellite initiates with the use of a simplified energy balance model by Idso *et al.* (1975) and Jackson *et al.* (1977). In this model the evapotranspiration is estimated by an empirical relationship with the temperature. Therefore sensors in the visible and infrared range have been crucial for this purpose. It provides information on water use from local scale to large irrigation areas from remote sensing data. Later improvements show alternatives in calculation procedures depending on wavelength, required input field data, micro-meteorological information or the necessity of numerical model data (Bastiaanssen *et al.*, 2000).

During the last decade, advanced versions of the surface energy balance have been published. Models such SEBAL, (Bastiaanssen *et al.*, 1998), SEBI-SEBS (Menenti *et al.*, 2003; Su, 2002) or the extended SEBAL version under the acronym METRIC (Tasumi *et al.*, 2006) estimate the latent and sensible heat fluxes. These models are the most advanced and provide similar results on the estimation of the energy fluxes from remote sensing. Their use for crop evapotranspiration monitoring is limited by the availability of images due to the presence of clouds, satellite overpass frequency and the lower spatial resolution in the thermal range. These models also allow to obtain the crop coefficient and thus provide an additional way for validation.

Evapotranspiration can be simulated using ecosystems models based on the water transfer between soil-plant-atmosphere (Oliosio *et al.*, 2003) or by hydrological soil water balance models (Engman, 1995). The combination of these models with remote sensing data provides continuous estimations of spatially distributed water and energy balance. Limitations of these models came from their complex set-up and validation in an operational context (Verhoef and Bach, 2003; Oliosio *et al.*, 2003; Kimes *et al.*, 2000; Jacquemoud *et al.*, 2000).

From an operational perspective, the derivation of crop coefficients from satellite allows for continuous monitoring of crop evapotranspiration and thus for estimation of crop water requirements. The monitoring framework or the application conditions determine the methodology to be used to estimate crop evapotranspiration. In the case of irrigated crop monitoring, as discussed above, the methodology most-frequently used for irrigation scheduling recommendations by the irrigation advisory services worldwide is the $K_c \cdot ET_o$. Building on and moving beyond the previous publications on the relationship between the crop coefficient and the vegetation indices, in this work the crop evapotranspiration is obtained (transpiration of vegetation and evaporation from soil) using the vegetation indices. This emphasis is derived from and confirmed by the requirements of the users (irrigation advisory services, water ma-

nagers, hydrological models, environmental managers, ...) who need tools of for operational real-time evapotranspiration monitoring like the one developed by Calera *et al.* (2005).

Objectives.

The **general objective** of the work is to **analyze and improve the methodology to derive the crop coefficient from the canopy spectral response using the vegetation index (VI) to estimate the crop evapotranspiration.**

To achieve the general objective, some partial objectives are going to be specifically covered:

1. **To understand, beyond the empirical relationship, the physical and biological reasons for the K_c -IV relationship.**
2. **To establish the equations to obtain the basal crop coefficient and the crop coefficient from the IV, along with their limitations and applicability ranges.**
3. **To study in depth the physical concept of the crop coefficient obtained from the VI.**

On one hand, the theoretical foundations of the empirical relationship between the basal crop coefficient and the vegetation index are studied in two ways: one, using biophysical parameters such as the Leaf Area Index (LAI), and the fractional green cover, and the other using the *Light Use Efficiency (LUE) Models*. The latter, establish the vegetation index as a good estimator of the fraction of photosynthetic active radiation, f_{APAR} . Combining this with the classical crop yield estimation functions (that relate the biomass rate with the transpiration rate during the whole growth cycle) allow us to understand the relationship between the K_{cb} and the vegetation index. This is discussed in chapter III.

On the other hand, the results obtained in the previous discussion have been applied to experimental data from field campaigns over wheat and maize, covering their entire crop growth cycle. The evapotranspiration was measured with a continuous weighting lysimeter simultaneously with a field radiometry campaign. Lineal equations between the crop coefficient and the vegetation index were established on the basis of these data.

The physical concept of the crop coefficient obtained from the spectral response is studied in depth. The combined use of the models and experimental data show that the product $K_c(IV) \cdot ET_o$ provides an estimation of the maximum evapotranspiration of the crop cover under the atmospheric conditions introduced by the ET_o . For a given crop cover and given atmospheric conditions, the value $K_c(IV) \cdot ET_o$ is the upper limit that the evapotranspiration can reach. Thus, under crop water stress, and other

limiting factors, the crop evapotranspiration can be lower than the one obtained using the $K_c(IV) \cdot ET_o$.

The temporal curve obtained by the $K_c(IV) \cdot ET_o$ provides an envelope for the crop evapotranspiration along its crop growth cycle representing the coupling between the atmospheric evaporative demand and the crop development under optimal water and nutrients supply. The cumulative value of the evapotranspiration over time indicates the maximum value of the water flux that the crop cover can have exchanged with the atmosphere at the given climatic conditions.

The relationship obtained in the study area at field scale can be adapted to the regional scale and remote sensing can provide the crop coefficient curve for all plots in the scene, and to obtain the ET_c^* extended to the study area. This calculation is made in order to carry out two objectives:

4. **To apply the linear relationship obtained at field scale to the regional scale using a temporal sequence of satellite images.**
5. **To estimate the maximum crop evapotranspiration in the aquifer 08-29, located in East La Mancha (Spain), of 10 000 km² in extent, during the year 2003.**

The average crop time-evolution curve has been obtained for different crop covers and the maximum water flux (defined as the maximum that the crops could have exchanged with the atmosphere during a year) has been calculated. For some of these crops, such as the irrigated crops (most of them under optimal water, nutrients and managing conditions), the estimated evapotranspiration corresponds to the crop water requirements and thus is the actual evapotranspiration. In other crops, the actual evapotranspiration is lower than the maximum, showing that during some time in their growth these crops were under water stress. In the last part of the memory the maximum evapotranspiration extended to all covers is compared to the rainfall in order to obtain a first estimate of the water deficit.

Structure of the memory.

The general objective, split into the partial objectives as discussed above, establishes the structure of the thesis (see Figure I.2). In some cases, the design of the experiments, the theoretical discussion or interpretations in the results make it necessary to go beyond the order in the objectives. Whenever this occurs in the document, the partial objective will be explicitly referred to.

Factors such as the climate, the soil, management and the structure of the canopy condition the evapotranspiration rate. Therefore chapter II is dedicated to the description of the study area and its characteristics. This area is known as the 08-29 aquifer also called aquifer Mancha Oriental. It is located in the south-west of La

Mancha, in the interior of the Iberian Peninsula, within the Júcar river basin. During the last thirty years the irrigated areas have increased rapidly leading to overexploitation of the aquifer's water resources. This makes new tools in water management necessary.

Chapter III provides a review of methods to estimate and measure the evapotranspiration in the field and from remote sensing. This is completed with the theoretical study of the $K_c - IV$ relationship.

In chapter IV we describe the material used and the experiments performed. Both experiments were carried out during the years 2001 and 2003, requiring high efforts in set-up and maintenance of the equipments, and the analysis of some GigaBytes of data.

In the study area, the existence of a continuous weighting lysimeter allows the direct measurements of the evapotranspiration and the crop coefficient. The radiometric monitoring of the crops provides the simultaneous measurements of both magnitudes: the crop coefficient and the vegetation index. Two representative crops in the study area, wheat and maize, have been monitored during their growth cycle by measuring the spectral reflectance, evapotranspiration, green cover fraction, leaf area index, crop height and biomass.

Chapter V is dedicated to the analysis of the data, including a discussion of the limits in the relationship between transpiration, evapotranspiration and vegetation indices. It is observed the consistency in the relationship between the basal crop coefficient and the vegetation index for the same crop changing the area of application when compared to models published in other areas.

In chapter VI the application of the new relationships to the whole extension of the aquifer 08-29 is discussed. Here, the land use map, the equation obtained at field scale between the crop coefficient and the vegetation index, and the data from the meteorological stations were used. The results, final discussion, conclusions and future perspective are summarized in chapter VII.

CAPÍTULO II

Zona de Estudio: La Unidad Hidrogeológica Mancha Oriental (08.29).

Un río atraviesa un paisaje, y hay alguien que está viendo en su futuro unas huertas regadas, otro ve el recodo para la derivación de un salto, hay otro que se ve a sí mismo pescando mientras otro repara en los áridos de su lecho y planea su aprovechamiento, también alguien observa la ribera y las especies que la habitan, junto a quien imagina una casa en su orilla, y hay alguien que localiza el punto donde verter y diluir sus residuos, mientras otro contempla sensitivo el paisaje y el río de su infancia. Todos ellos están viendo cosas muy distintas, aunque todos están viendo el mismo paisaje, el mismo río.

(Ministerio Medio Ambiente, 2000a, pág. 2)

El agua constituye un elemento esencial para la vida y para las actividades económicas, . . . , es una frase repetida, de uso tópico, que como en este caso, es muchas veces arranque de libros. A pesar de este tópico ni un ápice de su sentido se ha podido ensombrecer, manteniendo íntegro su sentido y transcendencia. Nadie duda, comenzando el siglo XXI, que en cualquier entorno social, más o menos desarrollado, que las cuestiones relacionadas con la disponibilidad de agua, su acceso, preservación y protección constituyen en nuestro más inmediato futuro un desafío para la humanidad. Ello ha constituido y mantiene latentes conflictos regionales e internacionales. De este forma está justificado cualquier esfuerzo en el desarrollo de herramientas para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

La zona seleccionada para la aplicación de nuestro estudio es el acuífero 08.29 (Mancha Oriental). Situado en el contexto administrativo y político de las comunidades de Castilla-La Mancha, Comunidad Valenciana y Murcia, soportando una intensa extracción de sus recursos hídricos en usos de regadío, hace que se mantenga hoy día una viva discusión sobre su sostenibilidad. Para entender la actualidad del sistema hidrogeológico Mancha Oriental, es conveniente describir brevemente aspectos ambientales como el clima de la zona, a caballo entre la continentalidad y la suavidad de las temperaturas mediterráneas. La orografía del terreno asentado sobre la llanura de la meseta, la definición de los acuíferos o el funcionamiento hidrogeológico, de interacción con los principales ríos de la zona (Júcar y Lezuza), que en los últimos años ha cambiado sustancialmente con motivo de las extracciones para bombeo. La suma de estos factores y un desarrollo histórico marcado por las políticas de aguas a nivel nacional han dado lugar al modelo de explotación actual.

II.1. Marco Geográfico.

Conocido como Unidad Hidrogeológica 08-29 en la numeración del ministerio de Fomento (anteriormente de Obras públicas), denominado también Acuífero de la Mancha Oriental o también llamado Sistema Hidrogeológico de Albacete (IGME, 1980). Se encuentra situado en el extremo oriental de la llanura de la Mancha, en su límite con las Comunidades Autónomas de Valencia y Murcia, y superficialmente en la cuenca vertiente del río Júcar. La extensión total del acuífero es de 8 500 km², distribuidos en un 74 % en Albacete, un 18 % en Cuenca, un 7 % en Valencia y un 1 % en Murcia (fig. II.1). El hecho de que casi las 3/4 partes del Sistema esté dentro de la provincia de Albacete explica la gran identificación del mismo con esta provincia.

Los límites del acuífero se definieron en su momento por el IGME, *siguiendo básicamente criterios hidrogeológicos*, aunque con alguna indefinición en su frontera con la Unidad Hidrogeológica 04-04 de la Mancha Occidental.

La mayor parte del sistema pertenece a la cuenca vertiente del río Júcar, con sus afluentes Cabriel y Valdemembra en la margen izquierdo y Jardín y Lezuza en la margen derecha. De todos ellos sólo el Valdemembra cede sus aguas al Júcar dentro del sistema, el Cabriel lo hace fuera y Jardín y Lezuza se pierden en la llanura por infiltración. El extremo sur del sistema se introduce en la cuenca vertiente del río Segura, dejando entre ambas dos cuencas endorreicas, la de Pozohondo y la de Pétrola, que la vigente Ley de Aguas asignó respectivamente a las Confederaciones del Júcar y del Segura.

El extremo norte del Sistema linda con la cuenca del río Guadiana, dejando entre ambas una zona arreica sin determinación geográfica que es objeto de discusión actualmente a los efectos de la frontera topográfica entre ambas cuencas, debido a las diferencias en los planes de explotación de una zona y otra, al estar declarado sobreexplotado el Sistema de la Mancha Occidental. Por todo lo anterior se puede resumir

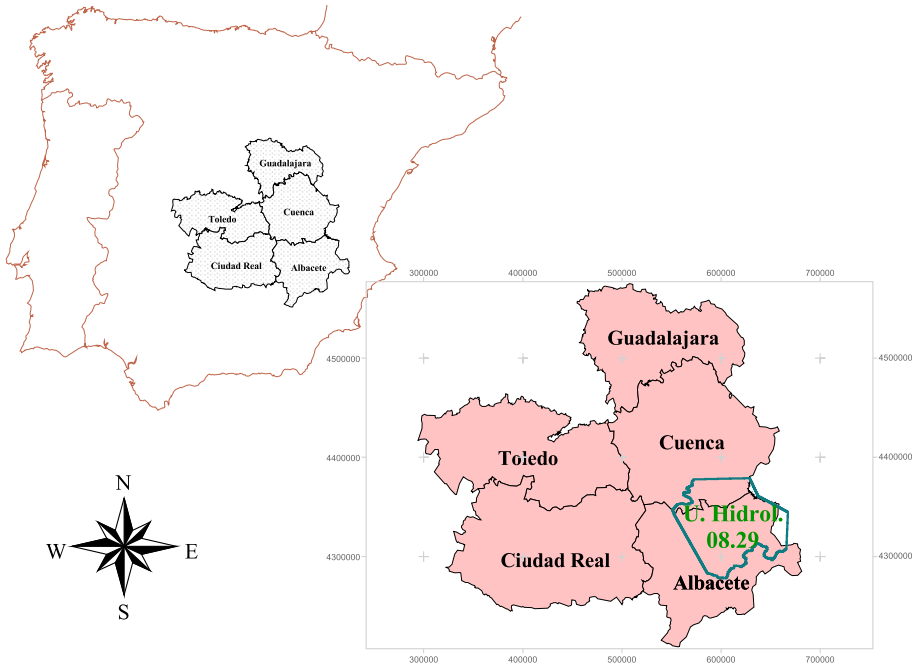


Figura II.1: Localización Geográfica y límite del acuífero Mancha Oriental (Unidad Hidrológica 08.29).

que se trata de un acuífero intercuenas, con absoluta mayoría en la del Júcar y con ramificaciones importantes hacia Segura y Guadiana.

De manera general, los estudios previos establecen un límite N coincidente con el paralelo de las presas de Alarcón y Contreras; el límite NW coincide aproximadamente con la divisoria superficial de los ríos Júcar y Guadiana; el límite O-SO se define a partir de Lías superior margoso (Fm Madroño) y se traza como una línea recta. El límite S-SE está peor definido (Lías margoso, Triásico, divisoria de los ríos Júcar y Segura, ...). Finalmente el límite E se define habitualmente a partir de los afloramientos triásicos. Conviene señalar que la delimitación geográfica en su frontera con el acuífero adyacente 04-04 no está cerrada todavía, esto es debido a la concreción en la separación de las aguas vertientes hacia el Júcar y hacia el Guadiana. Esto ha generado durante los últimos años una discusión entre Confederaciones Hidrográficas debido a que la sobreexplotación de uno afecta al otro y viceversa. La delimitación final tendrá que resolverse en el futuro.

Las razones para explicar esta variedad de nomenclaturas residen en que las áreas escogidas para la realización de los diferentes estudios no corresponden con los límites de ningún acuífero, por lo que a la hora de cuantificar sus parámetros hidrogeológicos se presentan algunas dificultades. Añadido a este hecho, la planitud del terreno, la

inexistencia de cursos fluviales superficiales y la escasa precipitación hacen del todo imposible llegar a definir una divisoria de aguas superficiales que se ajuste a la realidad hidrológica de la zona (Llamas Madurga and García-Rodríguez, 1995).

Actualmente, se acepta el límite administrativo que se utiliza en la gestión de los recursos hídricos y regadíos utilizada por el Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP), la Junta Central de Regantes Mancha Oriental (JCRMO) y la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) representado en la figura II.1. Dicho límite sigue los criterios:

Límite N, divisoria de las subcuencas que vierten al río Júcar aguas debajo de la presa de Alarcón.

Límite NE, divisoria de las subcuencas del río Júcar y el río Cabriel.

Límite SE, divisoria entre las subcuencas del río Júcar y río Requenque.

Límite S, divisoria oficial entre las cuencas del río Júcar y río Segura.

Límite SO, una alineación recta que define los afloramientos del Lías margoso (Fm. Madroño).

Límite NO, línea divisoria oficial entre las cuencas del río Júcar y el río Guadiana.

II.2. Clima.

El clima de la zona se caracteriza por una acusada variación estacional en concordancia con el comportamiento climático de tipo continental-mediterráneo. Las temperaturas medias oscilan entre el mes de Enero (considerado el más frío del año) sobre 4-5 °C y el mes más cálido (Julio) de aproximadamente 24 °C. En los registros climáticos de la zona en el período desde 1988 – 2000 la temperatura media anual ha sido de 13,6 °C, con un grado de insolación de 2 800 horas de sol al año. Las precipitaciones se distribuyen desigualmente pero en término medio es de 350 mm/año, estacionalmente estas se distribuyen en 82 mm/año en invierno, 124 mm/año en primavera, 60 mm/año en verano y 100 mm/año en otoño (de León-Llamazares, 1988). Dicha distribución oscila tanto espacial como temporalmente, pues por ejemplo, la oscilación entre años secos y húmedos varía entre 150 mm y 750 mm al año respectivamente.

En la estación agroclimática de *Los Llanos* (38° 57' N, 01° 50' E), durante el período de 1940-80, la media de las temperaturas absolutas en el mes más frío (Enero) fue de 4,5 °C y en el mes más cálido (Julio) de 23,9 °C. El valor medio de la temperatura mínima mensual en Enero es de -0,4 °C y en Agosto es de 15,5 °C.

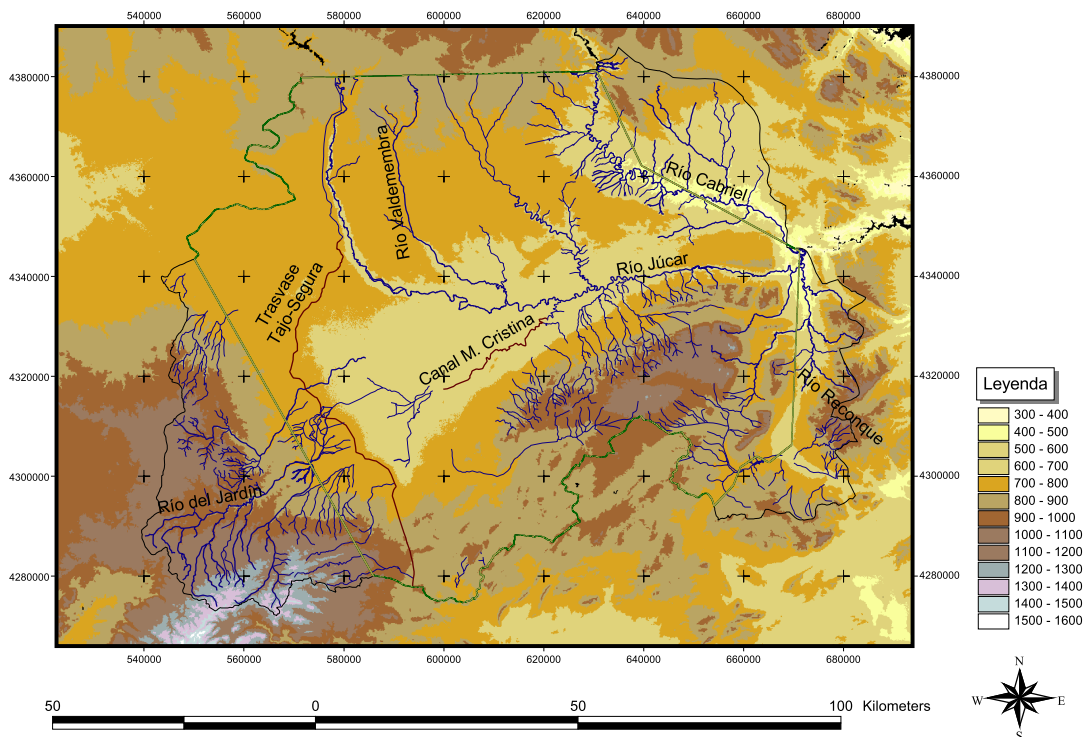


Figura II.2: Principales ríos de drenaje dentro del ámbito del acuífero. Está detallado el modelo digital del terreno a escala 1:1 000 000 procedente del USGS obtenido a partir de radar.

En la figura II.3 se han representado los valores medios de temperatura de invierno y verano para zonificar las variaciones estacionales. En la misma figura se ha representado la pluviometría dentro del ámbito del acuífero.

En la caracterización climática es interesante observar la variación que experimenta la evapotranspiración potencial dentro del límite del acuífero. Calculada según de León-Llamazares (1988) y Castillo and Beltrán (1981) a partir del método de Thornwaite basado en la temperatura media mensual y en la latitud del lugar. El valor medio está en torno a 800 mm/año encontrando un mínimo alrededor de 700 mm/año en la zona sur en la Sierra del Segura, caracterizada por unas precipitaciones bastante más superiores, aunque ya dentro del ámbito del acuífero 08.30.

Atendiendo a la clasificación agroclimática de Papadakis, el clima es Mediterráneo templado (MeTE) con invierno tipo avena fresco (av), verano Maíz (M), con régimen térmico Templado cálido (TE) y de humedad Mediterráneo seco (Me) (de Santa-Olalla, 1994).

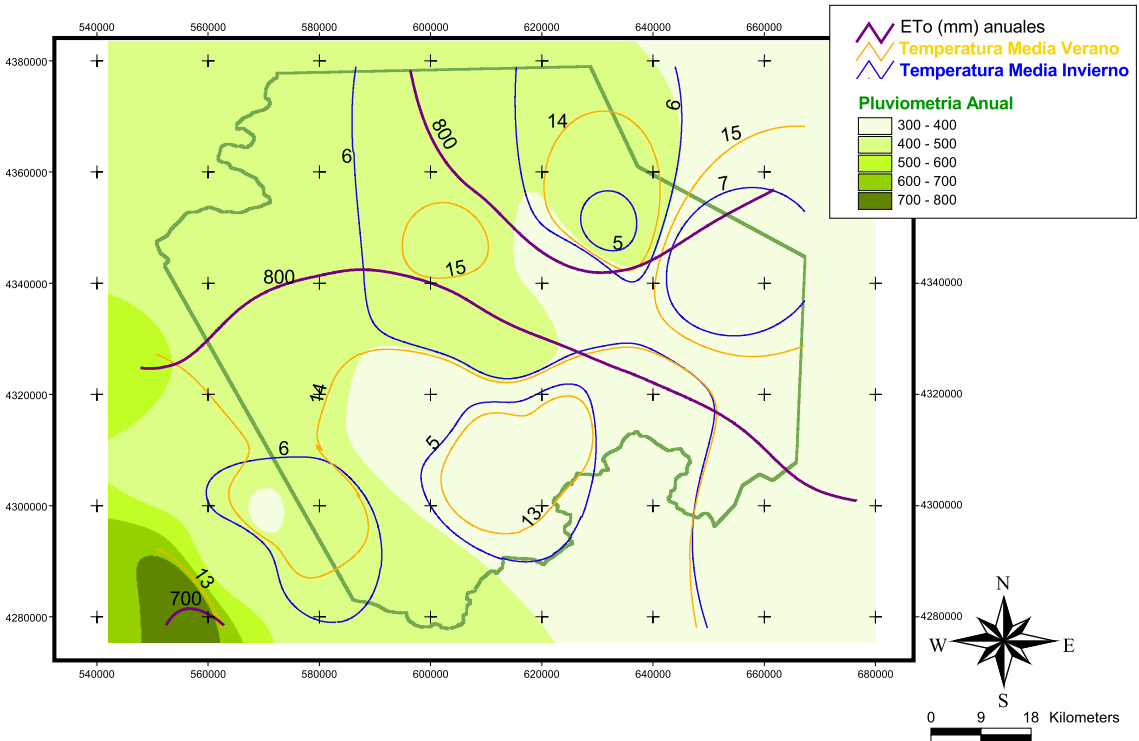


Figura II.3: Distribución de las precipitaciones medias dentro del límite geográfico del Acuífero. Dentro de la misma figura están representadas las isótopos de temperatura media constante dentro de los períodos estacionales de invierno y verano. Datos obtenidos de valores registrados en el intervalo desde el año 1940-1980 dentro de la red de estaciones del INM de León-Llamazares (1988).

Según Thornthwaite, el clima de la zona se caracteriza como semiárido (D), mesotérmico (B'2), con nulo o escaso exceso de humedad (d) y con moderada concentración de necesidades de agua en verano (b'3) (López-Urrea, 2004; Fabeiro, 1995).

II.3. Suelos y funcionamiento hidrogeológico.

El suelo es la fina capa de materia fértil que recubre la superficie de la Tierra. Su papel en el ciclo hidrológico es básico al actuar como distribuidor de las precipitaciones entre escorrentía e infiltración. Desde el punto de vista agronómico, su importancia radica en el papel que juega como reserva de agua en suelo utilizada por la cubierta vegetal. El contenido de agua en suelo en muchos casos, es determinante en el ritmo

de evapotranspiración de la cubierta (Allen *et al.*, 1998). Atendiendo a la clasificación Soil Taxonomy, establecida por el Soil Survey Staff de Estados Unidos (Soil Survey Staff, 1998), de los once órdenes que establece, dentro del ámbito del acuífero se encuentra referencia a cuatro de ellas: Alfisoles, aridisoles, entisoles e inceptisoles.

Los Alfisoles ocupan zonas reducidas al suroeste y noroeste (figura II.4), ocupando menos del 5% del territorio; caracterizados por ser suelos productivos de secano. Situados en terrazas fluviales, debido a la presencia de grava que facilita el drenaje les hace adecuados para regadíos. Los Aridisoles que ocupan entre el 30 y 40 por ciento del territorio en la zona central del acuífero localizados en la zona del Cerro de Chinchilla y la bajada hacia Hellín, se extienden en áreas donde la evapotranspiración supera la transpiración casi todo el año, y limita la producción agrícola salvo que se rieguen, en cuyo caso se consiguen altas productividades. Los suelos de tipo Inceptisol ocupan algo más del 50 por ciento y distribuido de forma general en todo el territorio, se desarrolla en ellos una agricultura productiva salvo que les falte humedad. En las zonas con inclinación, la carencia de vegetación da lugar a problemas de erosión. Finalmente, los Entisoles son los menos presentes en la zona (noreste del acuífero, fig. II.4). Se asientan en cotas altas (de uso principal recreativo o forestal), en zonas planas de la costa mediterránea donde se desarrolla una agricultura productiva con frecuencia en el regadío y en valles de ríos donde se han desarrollado regadíos tradicionales.

Su funcionamiento hidrogeológico presenta una interacción relevante con el río Júcar. El territorio de la cuenca hidrográfica del río Júcar ocupa una extensión total de 21 600 km², de los cuales el 71 % (15 300 km²) pertenecen a Castilla-La Mancha lo que nos da una idea de su peso administrativo en esta cuenca vertiente. En su extensión, referidos al Sistema de la Mancha Oriental, ocupa el 40 % del territorio total de la cuenca, lo que incide en la importancia recíproca de la cuenca sobre el acuífero y viceversa. Está constatado que el aporte de agua por parte del acuífero al río Júcar es evidente aguas debajo de la presa del Pantano, en los tramos Alarcón-Molinár y Molinár-Cofrentes. En estas zonas el Júcar constituye el dren natural de la Mancha Oriental. En el resto del trazado, hasta el Puente del Carrasco, no se aprecia relación entre ambos, lo que implica que el lecho del río deba estar impermeabilizado por depósitos de arcillas (Sanz, 2005; IGME, 1984).

Los estudios encaminados al conocimiento del funcionamiento hidrogeológico de la UH 08.29 parten de la existencia de una comunicación hidráulica en la totalidad del sistema compuesto por varios sistemas acuíferos (Sanz, 2005; IGME, 1979). La zona de la Llanura de Albacete puede definirse como un sistema multicapa en su mayor parte. En él se encuentran superpuestos, con conexiones laterales o sin ellas, los acuíferos Jurásico, Cretácico y Pontiense-Plio-Cuaternario, que pueden permitir la comunicación en sentido vertical (Sanz, 2005; IGME, 1979).

La recarga de la unidad se produce por:

- Infiltración de las precipitaciones.

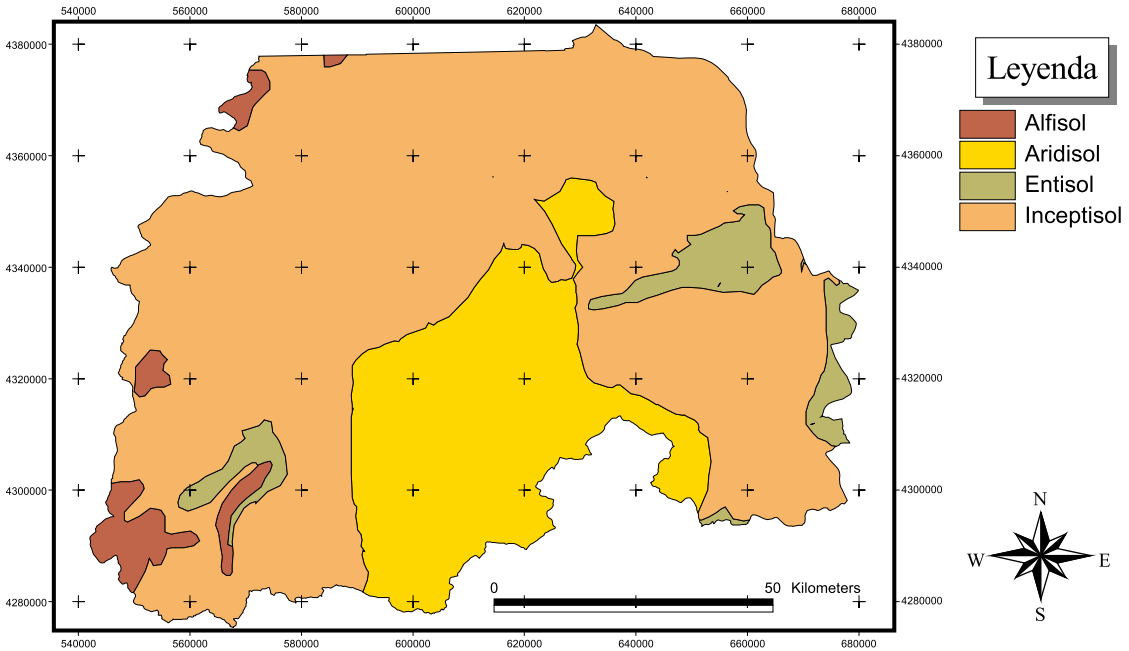


Figura II.4: Mapa de suelos obtenido a partir del mapa 1 : 1 000 000 del Atlas Nacional de España publicado por el IGN (1992) en el entorno de la Unidad hidrológica 08.29. Clasificación según el Soil Taxonomy (USDA, 1987) en la categoría de asociación. Publicado por CSIC/IRNAS, Sevilla (C.S.I.C., 2004).

- Aportes del río Jardín y Lezuza. Deben ser considerados en menor medida los aportes del Quéjola y Cañada del Quintanar. Todos pierden sus caudales por infiltración en la llanura albaceteña sin llegar a confluir en el Júcar.
- Aportes subterráneos del Cretácico por el límite N (frente más reducido) y del Jurásico por el N y O.
- Zona Tectónica *Teclas de Piano* y macizo Cretácico de Carcelén.
- Retorno de riegos.
- Canal de Maria Cristina.

De los citados anteriormente los aportes de mayor importancia se producen por infiltración de precipitaciones y los aportes de los ríos Jardín y Lezuza. De menor importancia son los aportes subterráneos y el retorno de riegos. No se dispone de datos de infiltración a partir del Canal de Maria Cristina.

Por orden de importancia, la salidas del sistema se producen por:

- El río Júcar.
- El río Cabriel.
- Diversos manantiales en la zona de Alpera-Ayora.
- Bombeos.
- Canal del Salobral.

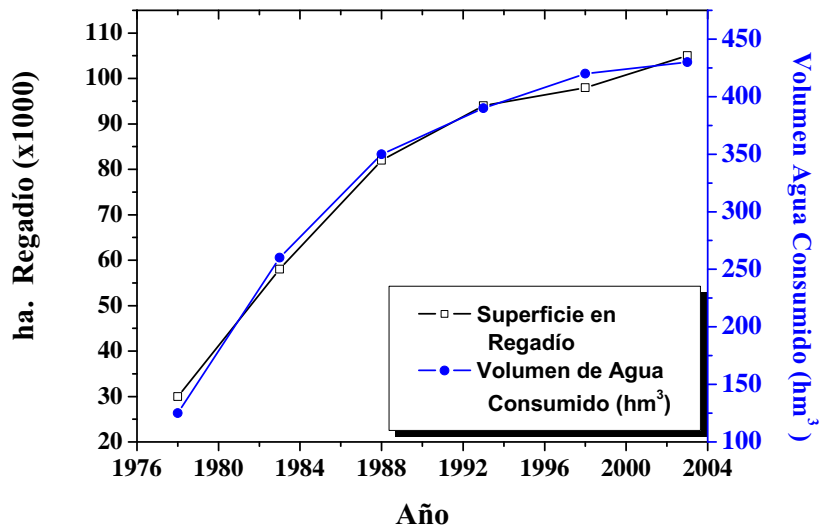


Figura II.5: Evolución de las extracciones así como de la extensión de los regadíos en el período 1978-2003 (López-Urrea, 2004; Fuster, 2000).

II.4. Evolución y estado actual de su explotación.

Dentro del Sistema Mancha Oriental 08.29, sobre una superficie total de 850 km², se han estimado por diversas fuentes los recursos hídricos renovables siendo la reciente y más aceptada cifra de 323 hm³/año (Estrela *et al.*, 2004), que tiene en cuenta criterios medioambientales evaluados sobre un balance de 50 años (Ministerio Medio Ambiente, 2000a). Con una extensión de regadíos en la actualidad de más de 100 000 Ha (fig. II.5 y tabla II.1), en el período 1978-2003 se ha producido un descenso total de 26 m (fig. II.6). Así, sobre el total de recursos hídricos renovables de 323 hm³/año se está disminuyendo progresivamente en un total de 82 hm³/año. Ello se traduce en una sobreexplotación de los recursos hídricos del acuífero 08.29.

Tabla II.1: Distribución de cultivos y del consumo de agua para riego en el Sistema Mancha Oriental (López-Urrea, 2004; Fuster, 2000).

Tipo de Cultivo	Sup. Cultivada (Ha)	Consumo (m ³ Ha ⁻¹)	Agua Consumida (Hm ³)
Cebada	16 201	2 230	36
Trigo	16 046	3 060	49
Avena y otros	1 734	2 300	4
Colza	124	2 390	0
Adormidera	3 141	2 050	6
Guisante y otros	1 213	1 940	2
Ajo	5 332	2 590	14
Guisante verdeo	1 160	1 910	2
Veza	572	1 200	1
Retirada	9 202	0	0
Total Cultivos Invierno	54 725		115
Remolacha	3 050	7 050	22
Girasol	1 650	3 880	6
Alfalfa	11 021	7 410	82
Maíz	19 855	6 080	121
Cebolla	6 168	5 050	31
Maíz Dulce	1 805	5 010	9
Patata	949	6 500	6
Kenaf	95	4 790	0
Olivo, Vid y Almendro	3 748	1 400	5
Judía	441	2 780	1
Otros	2 035	3 100	6
Total Cultivos Verano	50 817		290
Total Cultivos	105 542		405

Los cultivos de regadío han sufrido una interesante evolución en los últimos años, mientras que a finales de la década de los 80 se cultivaban alrededor de 50 000 Ha de maíz, coincidiendo con los precios más elevados de este cereal, actualmente hay una diversificación importante de cultivos. Esta diversificación se ha producido con un doble sentido: Existe una importante variedad de cultivos que reciben subvención de la Política Agraria Común (PAC), lo que ha provocado una disminución de los cultivos de verano y un aumento de los de invierno; en el conjunto de los cultivos, ha

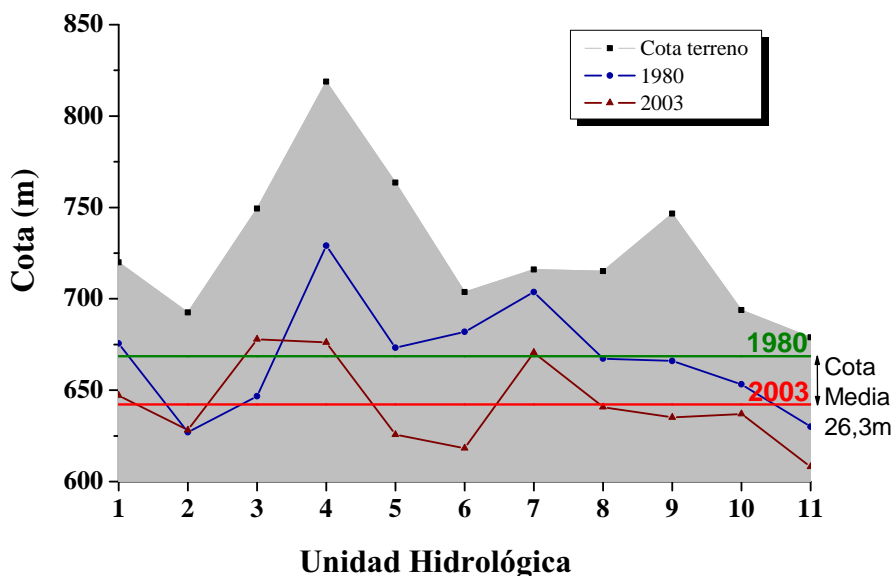


Figura II.6: Figuras con la evolución de los regadíos y consumo de agua en el Sistema Mancha Oriental. También aparecen reflejados los descensos en las once unidades de explotación en las que se divide el acuífero: Villalgordo-Motilla (1), Madrigueras-Cabriel (2), Carcelén (3), Pétrola-Hellín (4), Pozo Cañada (5), El Salobral (6), Balazote (7), La Herrera (8), Santa Marta (9), La Gineta-Minaya (10), Tinajeros (11).

habido una disminución de aquellos que reciben subvención PAC y un aumento de los que no la reciben, destacando el crecimiento de los cultivos hortícolas y leñosos.

Los datos de la administración nos dicen que en el año 2003, se superaron las 100 000 Ha de superficie cultivada en alrededor de 15 cultivos distintos. El maíz ocupa el primer lugar con casi 20 000 Ha, seguido de la cebada y el trigo con más de 16 000 Ha cada uno. Como medida de acercamiento a la sostenibilidad del acuífero se ha incluido la retirada de tierras obligatoria y voluntaria con una extensión actual de 9 000 Ha suponiendo el quinto *cultivo* en superficie. No obstante, los estudios de Teledetección (Calera, 2003), teniendo en cuenta las roturaciones de cultivos exigidas por la Junta Central de Regantes y la Confederación Hidrográfica del Júcar, muestran que los regadíos activos no superan las 80 000 Ha. (Tabla II.2) de las cuales 26 000 Ha pertenecen a cultivos de regadío verano (maíz, remolacha, cebollas ...), 31 000 Ha a cultivos de regadío de primavera (trigo, cebada, ...), y en torno a 20 000 Ha a las conocidas como doble cosecha (alfalfa y zonas cultivadas en regadío tanto en primavera como en verano). La evolución de estas tres grandes agrupaciones (regadíos verano, primavera y doble cosecha) de cultivos que presentan un patrón de consumo

Tabla II.2: Distribución de regadíos y año según el proyecto ERMOT (Evolución de superficies en Regadío en la Mancha Oriental mediante Teledetección) (Calera, 2003)

Año	Regadío Verano	Regadío Primavera	Doble Cosecha	Total
	Ha	Ha	Ha	Ha
1982	14 212	2 050	3 149	19 411
1984	27 865	3 551	1 221	32 636
1985	35 325	4 889	3 363	43 577
1986	38 440	7 948	2 319	48 707
1989	41 020	12 953	6 003	59 976
1993	38 299	15 484	4 278	58 061
1996	35 573	18 989	8 200	62 762
1998	39 165	21 047	11 801	72 013
1999	31 337	24 220	18 792	74 349
2000	29 642	23 055	25 273	77 970
2001	35 195	27 169	15 951	78 315
2002	30 766	30 678	16 908	78 352
2003	26 004	31 239	20 818	78 061

hídrico semejante representada en la figura II.7 muestra que durante los años 80 el uso predominante fueron los cultivos de verano debido a la bonanza en los precios del cereal (especialmente maíz por encima de los 0,19 €/kg, actualmente no supera 0,15 €/kg). Se observa asimismo un aumento de los regadíos en temporada de primavera pues reducen costes al presentar un menor consumo hídrico, durante la década de los noventa, ha proliferado el cultivo de alfalfa y la intensificación de algunas parcelas al cultivar la misma superficie tanto en primavera como en verano.

Tanto desde el punto de vista económico (diversificación del riesgo y menor dependencia de la subvenciones de la Unión Europea), como desde el punto de vista de la sostenibilidad del Acuífero esta diversificación ha resultado muy positiva (de Santa-Olalla, 2001).

A grandes rasgos esta es la situación actual de la explotación del Acuífero, en el que a pesar del éxito de algunas medidas tomadas en los últimos años, gracias principalmente a las políticas desarrolladas por la JCRMO (Junta Central de Regantes Mancha Oriental), su sostenibilidad sigue estando seriamente comprometida. Conseguir equilibrar el sistema es el desafío más importante al que se enfrentan en los próximos años tanto la administración hidráulica como los propios regantes.

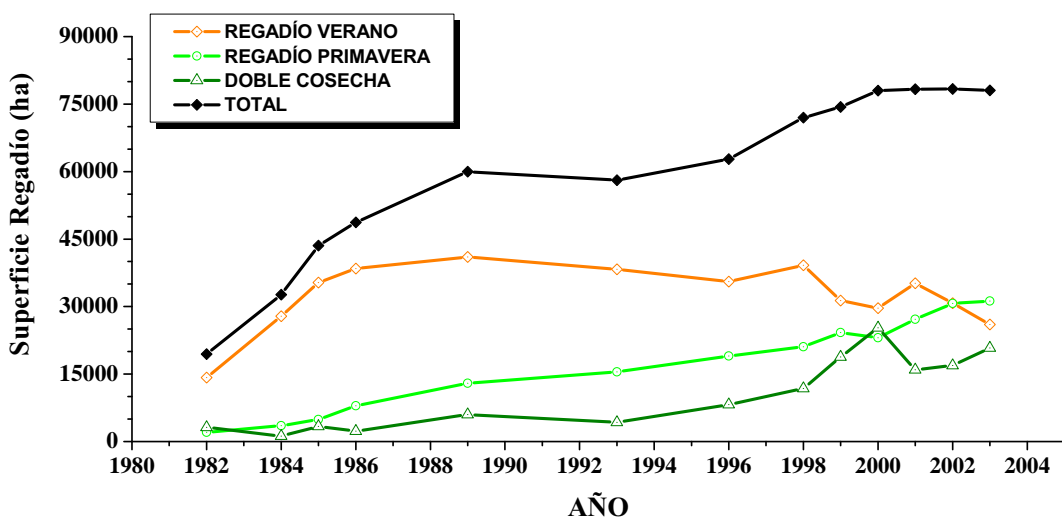


Figura II.7: Representación de la evolución de los regadíos distinguiendo entre regadíos de verano, primavera y doble cosecha desde el año 1982 hasta el año 2003 (Adaptado de Calera (2003)).

CAPÍTULO III

Evapotranspiración, Coeficientes de Cultivo e índices de Vegetación.

The evaporation of water from soil and plant surfaces is of vital environmental interest. The importance of this process becomes apparent when one considers that the scales involved range from water loss from leaf stomata to the circulation of the planetary atmosphere. Since the launch of the first earth observing satellite in 1972, the idea of using remotely sensed data to evaluate the spatial distribution of evaporation has moved from the conceptual to the developmental phase.

La evaporación de agua desde la superficie del suelo y las plantas es de vital interés medioambiental. La importancia de este proceso llega a ser evidente cuando se considera que la escala de trabajo varía desde la pérdida de agua del estoma de la hoja hasta la circulación de la atmósfera planetaria. Desde el lanzamiento del primer satélite de observación terrestre en 1972, la idea del uso de datos en teledetección para evaluar la distribución espacial de la evaporación ha pasado de la fase conceptual a la fase de desarrollo.
(Moran and Jackson, 1991)

Desde que Briggs and Shantz (1914) plantean la relación entre la evapotranspiración y el estado fenológico de la planta, se empieza a configurar una metodología en la estimación de los flujos de agua hacia la atmósfera a través del *patrón de comportamiento* sobre cultivos estacionales. A mediados del siglo XX comienza a configurarse la idea de estimar la evapotranspiración a través de un producto de dos factores, uno relativo a una superficie de referencia y otro factor reductor que representaría

a la planta considerada (van Wijk and de Vries, 1954). Este último factor indicaría el estado de un cultivo en relación con una superficie *patrón* desde el punto de vista de la *ET*. A dicha metodología se le conocerá, ya durante los años setenta con el nombre de *Coeficientes de Cultivo* (K_c), método en dos pasos o metodología $K_c \cdot ET_0$. Dicho coeficiente caracteriza la capacidad de evaporación del cultivo en condiciones óptimas en relación con la de una superficie de referencia, controlada por diferentes factores de tipo meteorológico, del suelo y del propio cultivo. Esta metodología se configura bajo la ventaja de estimar las necesidades hídricas de un cultivo conocida su fenología y la evapotranspiración de una cubierta de referencia. Posteriormente y en estudios más avanzados este coeficiente de cultivo se divide en dos contribuciones diferenciadas, la transpiración de vegetación (*T*) y la evaporación de suelo (*E*), constituyendo los conocidos como *Método de Coeficiente de Cultivo Dual* (Wright, 1982). De forma simultánea Heilman (1982) y Tucker (1979) observan la similitud de las curvas de coeficiente de cultivo y de índice de vegetación (IV) obtenidas mediante radiometría de campo. El comportamiento paralelo de ambas magnitudes sugiere una nueva herramienta en la programación de necesidades hídricas en cultivos de regadío reforzando su carácter no destructivo y de bajo coste.

Esta metodología, conocida como FAO56 (Allen *et al.*, 1998) y aceptada mundialmente, es aplicada para el cálculo de necesidades hídricas de los cultivos. De esta forma, recientemente se han hecho importantes esfuerzos desde el mundo de la Teledetección para extender la estimación tanto de la evapotranspiración de referencia (ET_0) como del coeficiente de cultivo desde la escala de parcela a escala regional.

Desde esta perspectiva histórica, a lo largo del tiempo han ido apareciendo otros métodos para la medida y estimación de la *ET*. En el presente capítulo se revisarán los conceptos básicos, así como aspectos generales de los métodos más utilizados en el seguimiento, medida y cálculo de la evapotranspiración. La obtención de los datos experimentales de evapotranspiración se hará en este trabajo mediante los lisímetros de pesada continua por ser el método de referencia en su medida directa además de ser una instrumentación accesible al grupo de Teledetección y S.I.G. del Instituto de Desarrollo Regional, tal y como se expondrá en el apartado III.2.

Se han seleccionado varios índices de vegetación entre los más utilizados en la bibliografía que se aplicarán en el seguimiento de los cultivos experimentales. Se hace una revisión de las aportaciones que otros autores han hecho en la comparación temporal entre la transpiración de la cubierta y varios de estos IVs. Esta comparación sugiere una relación lineal entre el coeficiente de transpiración de la cubierta y el índice de vegetación NDVI. Dicha linealidad se discute a través de relaciones conocidas del coeficiente de transpiración con otras variables biofísicas vinculadas al estado de crecimiento de la cubierta como fracción de cobertura vegetal verde o índice de área foliar, y otras relacionadas con el ritmo de crecimiento como la biomasa. Finalmente y estableciendo los límites teóricos de esta relación lineal así como la influencia

que la evaporación de suelo tiene sobre ella, se discuten las formas operativas entre transpiración e IVs utilizadas en la bibliografía en otras zonas del planeta.

III.1. El Concepto de Evapotranspiración.

En general, la *evaporación* -vaporización- es el fenómeno por el cual una sustancia pasa del estado líquido a vapor. La evaporación a través de los estomas de las plantas vivas se denomina *transpiración*. En el caso de cubiertas vegetales, la transpiración de la vegetación y la evaporación directa del suelo y pequeñas áreas de agua es complicado considerarlas por separado, normalmente estos dos términos se combinan en el término *evapotranspiración*.

Desde el punto de vista termodinámico la evapotranspiración es el proceso físico por el cual se transfiere agua y energía asociada desde el sistema «cubierta vegetal y suelo» a la atmósfera como resultado de la evaporación y de la transpiración de las plantas. Es común en la bibliografía encontrar la definición de evapotranspiración (*ET*) no como proceso sino como la cantidad de agua transferida a la atmósfera (ASCE, 2002; Doorenbos and Pruitt, 1977b).¹ Normalmente y por sentido práctico, sobre todo en trabajos de agronomía que trabajan con la evapotranspiración se refieren al mismo en términos de consumo o necesidades hídricas.

El proceso de evapotranspiración es un proceso complejo, fruto del acoplamiento de los parámetros que afectan al suelo, a la planta, su agrupamiento y a las condiciones atmosféricas. El paso de la planta individual a la cubierta supone un proceso de agregación complejo pues hay que considerar el dosel que conforma la cubierta vegetal, y que interacciona como conjunto con el suelo y la atmósfera, conjunto que no es una suma de plantas individuales (Shuttleworth, 1991). Un modelo conceptual simplificado que permite sintetizar el proceso de evapotranspiración de una cubierta es el conocido como *modelo de resistencias*. Bajo este modelo la evapotranspiración se produce en dos etapas (Calera, 2005):

1. La primera etapa es la de cambio de fase líquida a fase vapor que ocurre en el interior del suelo y de las plantas. A continuación se produce un primer transporte, esencialmente por difusión molecular, desde el suelo y desde el interior

¹ La *ET* refleja la masa de agua transferida a la atmósfera. El flujo másico de vapor de agua se define como

$$Flujo = \frac{[Masa]}{[Tiempo]} = \frac{[M]}{[T]} = \frac{kg}{s}$$

es habitual expresar el flujo másico de agua definido como *ET* se expresa normalmente en términos de volumen convertido a través de la densidad y referido a la unidad de área,

$$ET = \frac{[Flujo \cdot Densidad]}{[Area]} = \frac{L^3}{T \cdot L^2}$$

expresada normalmente en mm hora⁻¹ o mm día⁻¹

de las plantas principalmente por los estomas a la atmósfera circundante a la epidermis de las hojas y a la superficie del suelo. La región a la que fluye el vapor de agua en esta primera etapa, que no es afectada por el viento, que se encuentra en el interior de la cubierta es lo que se denomina superficie evaporante. Dichos procesos de transporte de cuasi-difusión molecular se integran en la denominada *resistencia total de superficie*, r_s , que será consecuencia de la combinación compleja de la resistencia estomática, de la cutícula y del suelo en toda la superficie de la cubierta. La resistencia total de superficie describe la resistencia del flujo de vapor de agua a través de los estomas y de la cutícula en la totalidad de la superficie vegetal y en la superficie del suelo.

2. La segunda etapa es el proceso de transporte del vapor de agua desde la superficie evaporante a la atmósfera exterior. Dicho proceso se debe al reemplazamiento del aire húmedo en la superficie evaporante (interior de la cubierta) por aire más seco procedente de la atmósfera exterior y ocurre esencialmente por el flujo turbulento del aire asociado a la fricción entre el viento y la arquitectura de la cubierta vegetal. Los procesos asociados a este transporte turbulento se agrupan en la denominada *resistencia aerodinámica*, r_a , que describe la resistencia al flujo de vapor de agua desde la superficie evaporante de la cubierta a la atmósfera libre encima de ella. Los conceptos de resistencia de superficie y resistencia aerodinámica tienen un papel esencial en la deducción de la ecuación de Penman-Monteith, que es la ecuación que gobierna el intercambio de energía y a la que más adelante se hará referencia.

La energía necesaria para el proceso de evaporación se obtiene principalmente de la radiación solar directa y en menor medida de la demanda atmosférica a través de su temperatura ambiente y el arrastre del viento. El mecanismo que controla este paso de vapor de agua desde la superficie evaporativa hacia la atmósfera es la diferencia en la presión de vapor de la propia atmósfera en dicha superficie y en sus alrededores. Según el aire se va saturando el proceso de transmisión de vapor de agua se hace más lento. La masa de aire saturada sobre la superficie se reemplaza con aire más seco a través de la velocidad del viento. Por ello, la temperatura del aire, la radiación solar, la humedad del aire, y la velocidad del viento son parámetros climatológicos que se consideran en el cálculo de la evapotranspiración.

Factores que afectan la evapotranspiración

Los factores que de un modo u otro influyen en la evapotranspiración son diversos y están relacionados con los medios que intervienen en el proceso: la estructura de la cubierta, el suelo, las condiciones atmosféricas y las prácticas de cultivo. La influencia de la cubierta vegetal se hace a dos niveles, el control estomático a nivel de hoja y a nivel de cubierta. El ejercicio de los estomas mediante su apertura y cierre supone uno de los principales controladores en la transpiración de las plantas. A nivel de cubierta, la estructura del dosel vegetal afecta tanto a la transpiración de las plantas

como a la evaporación de suelo. Cuando el contenido de agua en suelo es adecuado para el desarrollo de la planta, la evapotranspiración ocurrirá al máximo ritmo posible para un determinado estado de la cubierta vegetal. Cuando, en otras circunstancias, la disponibilidad de agua en suelo no cubre las necesidades de la planta, la evapotranspiración ocurrirá a un ritmo más bajo. El suelo juega un factor importante en la evapotranspiración de la cubierta. Los principales factores atmosféricos que intervienen en el proceso de evapotranspiración se parametrizan bajo las variables, temperatura del aire, humedad relativa, radiación incidente y velocidad del viento. El manejo de la cubierta en lo que respecta al estado de fertilización, la distribución del suelo con horizontes no penetrables, o las técnicas de irrigación afectan a su estado hídrico y a su desarrollo.

Terminología y conceptos básicos.

La evapotranspiración de una cubierta vegetal bajo condiciones estándar es decir en condiciones óptimas de suministro de agua, con un adecuado suministro de nutrientes, libre de enfermedades, en extensas superficies, con el objeto de obtener la máxima producción bajo unas condiciones climáticas dadas, se denominará en lo sucesivo como ET_c .

La última condición exige que a lo largo del ciclo entero de crecimiento las condiciones de manejo (densidad de siembra, suelo, enfermedades,...) y suministro de agua y nutrientes sean las mismas. Corresponde a unas condiciones óptimas tanto del momento en que estemos observando la cubierta como de las condiciones del cultivo a lo largo de la parte del ciclo de crecimiento anterior al instante de observación. Como se verá más adelante en la sección III.2.2 el cociente entre ET_c y la evapotranspiración de una cubierta de referencia define el denominado *coeficiente de cultivo*, K_c .

La ET_c supone una pérdida de agua en el sistema cubierta vegetal-suelo; para mantener el ritmo de crecimiento habrá que aportar el volumen de agua perdido en el mismo intervalo de tiempo. Este volumen de agua se conoce como necesidades hídricas, que dependen tanto del estado de desarrollo de la cubierta, como del estado hídrico del suelo y de la atmósfera. Normalmente este concepto tiende a confundirse con las necesidades de aporte hídrico (que pueden ser por riego y lluvia) que van orientadas a compensar no sólo las necesidades marcadas por la evapotranspiración sino también a compensar la no uniformidad de la aplicación del agua en el aporte hídrico y el lavado de sales.

Si se considera una cubierta que ha sufrido en algún momento de su ciclo de desarrollo alguna limitación, pero que en el instante de observación tiene un óptimo suministro de agua y nutrientes el concepto de ET_c de cultivo ideal (en ese instante y en todo el ciclo) no sería estrictamente aplicable. Sin embargo, es de especial interés conocer cuál es el ritmo de evapotranspiración de la cubierta para que, en las condiciones actuales, se desarrolle al máximo ritmo posible.

Un ejemplo puede ayudar a entender esta diferencia. Supongamos una cubierta por ejemplo de maíz, en condiciones óptimas (condiciones estándar de FAO) en el

momento de su máximo desarrollo. Si en ese instante se eliminaran la mitad de las plantas ¿Se podría definir la ET_c de la nueva cubierta de acuerdo a la definición anterior? Sin embargo habría que responder a la pregunta, ¿Cuáles son las necesidades hídricas de la nueva cubierta, es decir, su ET en las nuevas condiciones que garantizaran su máximo desarrollo? A este concepto se le llamará evapotranspiración máxima de dicha cubierta en ese instante y le llamaremos ET_c^* , y se puede definir como *el ritmo máximo de evapotranspiración de una cubierta en un momento y condiciones de la cubierta dadas, con un óptimo suministro de agua y nutrientes, que garanticen en ese instante un óptimo desarrollo.*

Esto mismo podría aplicarse a una cubierta de vegetación natural; la cuestión sería cuál es el ritmo de evapotranspiración máximo que podría tener esa cubierta, si tuviera un adecuado suministro de agua, por ejemplo tras unas condiciones de precipitación suficiente para que no hubiera estrés hídrico. Este es el valor que denominaremos ET_c^* y es el que correspondería a esa cubierta en ese instante, en condiciones de suministro de agua óptimo.

En caso de que la cubierta sufriera estrés hídrico el valor de la ET real sería inferior al valor de ET_c^* , por lo que la ET_c^* sería el techo del ritmo de evapotranspiración de una cubierta en un instante dado.

El cociente entre la ET_c^* y la evapotranspiración de una cubierta de referencia (ET_o), daría lugar a un coeficiente de cubierta K_c^* que estrictamente sería distinto al coeficiente de cultivo y que permitiría generalizar el concepto de coeficiente de cultivo a cualquier cubierta vegetal, incluyendo cubiertas naturales y suelo desnudo. El uso y aplicaciones de este *coeficiente de cubierta* sería el mismo que el del *coeficiente de cultivo* (Allen, 1996).

III.2. Medida y Estimación.

Existe una amplia variedad de métodos en la estimación de la ET . El uso de un método u otro, depende de la precisión exigida, el coste de las medidas o están especialmente diseñadas para una aplicación a determinadas escalas de tiempo o espacio. Los métodos se pueden clasificar según sean de medida directa o por estimación. En general, la *medida* de un parámetro físico se considera como la cuantificación de un atributo del material bajo investigación, orientado a la respuesta de un problema bajo estudio (Kempthorne and Allmarras, 1986). Se entiende que cuando el parámetro es obtenido a través de un instrumento, es medido de forma *directa*, de otra forma cuando se obtiene a través de una relación entre parámetros se considera *indirecta*.

Para esquematizar los diferentes métodos de medida o estimación de la ET , diferentes autores clasifican los métodos según categorías, así sean de medida o estimación (Maidment, 1992). Otras revisiones pueden encontrarse en Jensen *et al.* (1990), Martín de Santa Olalla and de Juan (1993) o la clasificación propuesta por Rosenberg *et al.* (1983) según estén basados en el balance hídrico, en parámetros climatológicos

o micrometeorológicos. El objeto del presente trabajo no es establecer una categorización de los métodos existentes en la bibliografía sino mostrar un resumen de los más utilizados. Por este motivo, basados en la clasificación recogida en Rana and Katerji (2000) y propuesta por Rose and Sharma (1984), teniendo en cuenta clasificaciones previas, se puede establecer una recopilación de las diferentes metodologías teniendo en cuenta los objetivos perseguidos. Según este criterio se pueden clasificar como hidrológicos, micrometeorológicos, basados en la fisiología de la planta, climatológicos o de tipo empírico. Sin entrar en los detalles de la clasificación de los métodos de determinación de la evapotranspiración, pues no es el objetivo del presente trabajo, su clasificación básica nos lleva a la siguiente relación:

- Medida.
 - (1) Balance en suelo.
 - (2) Lisímetros de pesada continua.
- Estimación.
 - (3) Balance de energía y razón de Bowen.
 - (4) Método aerodinámico.
 - (5) Covarianza del torbellino.
 - (6) Método del flujo de savia.
 - (7) Método de cámaras.
 - (8) Basados en la temperatura.
 - (9) Basados en la radiación.
 - (10) Basados en la combinación de radiación solar y terrestre.
 - (11) Modelo de Penmann-Monteith.
 - (12) Método Coeficiente de Cultivo-Evapotranspiración de Referencia: $K_c \cdot ET_o$
 - (13) Modelización del balance de agua en suelo.
 - (14) Teledetección.

Tanto si el método está orientado a la estimación o a la medida directa de la evapotranspiración, se debe medir los siguientes parámetros:

- El contenido en agua del suelo y las características de la cubierta bajo estudio: altura, rugosidad, densidad de plantas y albedo.
- Variables climáticas: velocidad del viento, radiación solar y las características termodinámicas de la atmósfera en contacto con la cubierta.

La estimación de la evapotranspiración desde teledetección como se verá en el apartado III.2.3 ofrece varios caminos, en ciertos casos se parte del balance de energía, en otros a partir de la temperatura o en la estimación del coeficiente de cultivo. Por ello, y aunque ciertamente es una vía más en la estimación de la evapotranspiración, queda incluida de forma explícita en la recopilación anterior pero no es un método único sino que en cada caso depende del algoritmo de cálculo.

Balance de Agua en Suelo.

El balance de agua en suelo es un método indirecto en la estimación de la *ET*. El término de evapotranspiración se obtiene como parte residual de la ecuación unidimensional de conservación de masa aplicada al flujo de agua en suelo. Dicho balance, considerando despreciable la escorrentía en suelos con poca pendiente así como el flujo de agua ascensional queda de la forma (Jensen *et al.*, 1990; Holmes, 1984):

$$P + R - ET - D = \pm[\Delta w]_o^r \quad (\text{III.1})$$

Donde, *P* es la precipitación, *R* es el riego, *D* es la percolación a capas profundas y Δw es la variación de humedad en suelo en el perfil de penetración de las raíces (*r* en m). Todos los términos están en mm y el término correspondiente al balance de agua en suelo se determina entre dos intervalos temporales, por ejemplo, entre dos días se calcula como:

$$[\Delta w]_o^r = [w_i - w_{i-1}]_o^r \quad (\text{III.2})$$

Donde w_i es el contenido en agua del suelo.

Midiendo la variación del contenido en agua del suelo mediante sondas de humedad tipo TDR (Time Domain Reflectometer) o mediante la sonda de neutrones, midiendo la lluvia o riego con un pluviómetro se determina la *ET*. Añadido a la incertidumbre en la medida de la humedad de suelo, está el término de drenaje que ha generado discusión y que en general se desprecia pues la mayor parte del tiempo el suelo en zonas semiáridas está por debajo de la capacidad de campo. En la figura III.1 se compara la determinación de la *ET* midiendo la humedad de suelo a través de dos métodos, el método gravimétrico y la sonda TDR, mostrando resultados comparables.

Lisímetros de Pesada.

El lisímetro es un dispositivo tradicionalmente desarrollado para obtener de forma directa el término *ET* de la ecuación III.1. Históricamente se ha presentado, junto a los platos de evaporación (Bailey, 1990) como el único método en la medida directa de la *ET* (Aboukhaled *et al.*, 1986). Por ello se ha seleccionado este método para utilizarlo en la determinación de la *ET* en la campaña de datos experimental que se presentará en el capítulo IV. Añadido a esto, los lisímetros existentes en las instalaciones del Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP) (cuyo esquema está representado en la figura III.2), son accesibles al grupo de Teledetección y S.I.G. del IDR. Se trata de un dispositivo, tanque o contenedor que permite el seguimiento del agua en un volumen delimitado (Rana and Katerji, 2000); actualmente sólo los

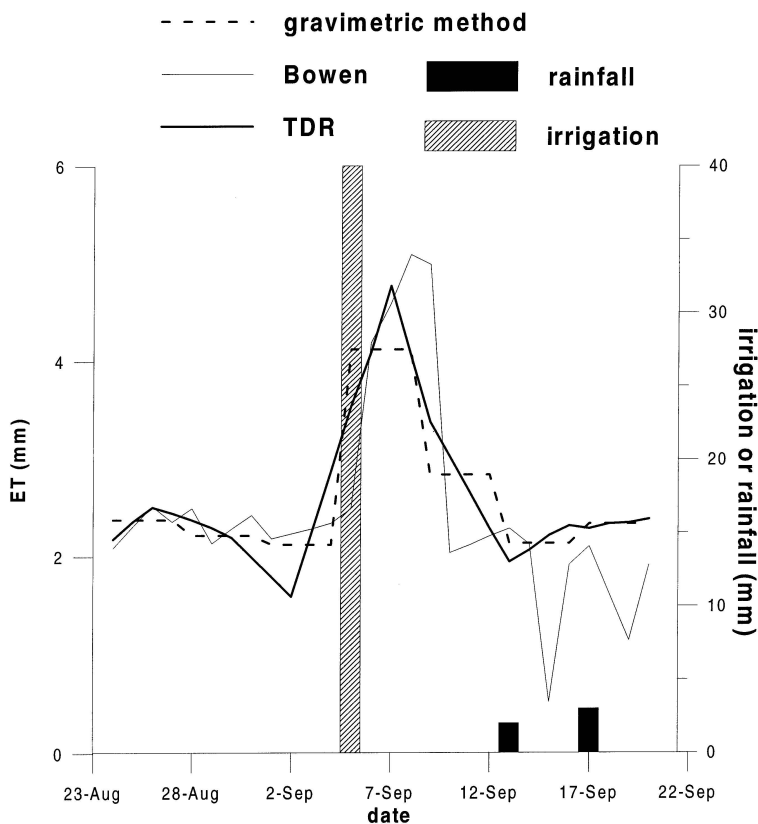


Figura III.1: Comparación de la ET medida por el método razón de Bowen, mediante el balance de agua en suelo utilizando el TDR y por el método gravimétrico a escala diaria aplicado a maíz en la zona del Sur de Italia (Mastrorilli *et al.*, 1998).

lisímetros de pesada permiten la obtención directa de la ET a través del balance de masa de agua, al contrario que los lisímetros que no son de pesada que determinan ET a través del balance volumétrico dentro del lisímetro.

En el cajón del lisímetro (fig. III.2) se encuentra alojado un bloque de suelo con características similares al terreno circundante. Este cajón está ubicado sobre un sistema de balanza conectada a unas células de carga (indicadas en la figura). Estas células de carga transmiten una señal eléctrica a un datalogger que registra de forma continua el peso del lisímetro.

De gran uso y difusión a lo largo de todo el globo, los lisímetros muestran resultados similares. En ambientes templados, permiten la medida de la ET a escala diaria con una precisión en torno al 10 % (Klocke *et al.*, 1985; Perrier *et al.*, 1974), y a escala horaria en el rango de 10 a 20 % (Allen *et al.*, 1991b).

A pesar de las indicaciones hechas por estos autores, la evapotranspiración obtenida por el lisímetro no siempre es representativa de la zona o parcela donde se ubica, en ciertos casos sólo es representativo de un punto de dicha parcela.

Las diferencias entre altura de la cubierta, las condiciones del suelo y la densidad de plantas pueden afectar de forma importante al valor de ET dentro y fuera del lisímetro.

Dado que este método será el utilizado en la obtención de los valores de ET , en el capítulo IV se hará una descripción más detallada de los efectos que perturban la medida de la evapotranspiración.

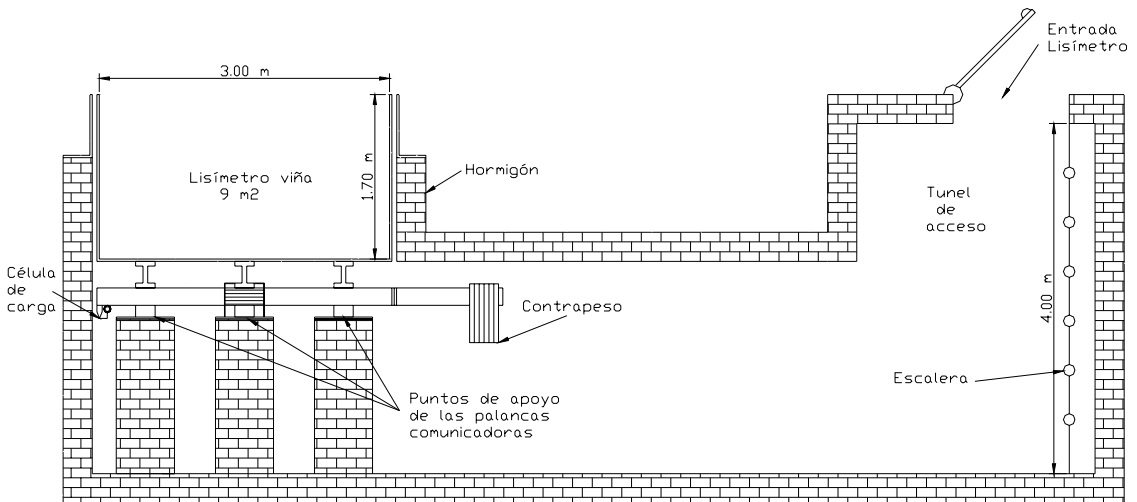


Figura III.2: Plano del Lisímetro (Ruíz *et al.*, 2003).

Balance de energía y razón de Bowen.

Desde el punto de vista energético, la evapotranspiración se considera como el flujo de energía asociado al flujo de vapor de agua desde el sistema «cubierta y suelo» a la atmósfera. En este caso se denomina *calor latente* (λET , donde λ , es calor latente de vaporización) y se mide como densidad de flujo de energía ($W \cdot m^{-2}$).

Los métodos más utilizados en la bibliografía catalogados como micrometeorológicos por estar basados en métodos físicos o meteorológicos son básicamente tres: el método de balance de energía y razón de Bowen, el método aerodinámico y el método de covarianza del torbellino. En general estos métodos requieren una medida precisa de las variables meteorológicas a escalas temporales bajas (por debajo de 1 hora). Debido a la hipótesis de conservación del flujo de energía sobre la cubierta, estos métodos son aplicables sobre parcelas de gran extensión, homogéneas y sin importantes desniveles.

Partiendo de la ecuación del balance de energía sobre la superficie de un cultivo en crecimiento activo y teniendo en cuenta que el término λET representa la mayor parte de la energía en el balance de radiación, éste se puede expresar de la forma,

$$\lambda ET = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (\text{III.3})$$

siendo R_n la radiación neta, G el calor en suelo y H el calor sensible, todos ellos expresados en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. El factor $\beta = H/\lambda ET$ que a su vez se puede obtener a partir de la diferencia de temperatura a dos alturas (ΔT) y la diferencia en la presión de vapor (Δe , expresado e en kPa y medido a esos mismos niveles) como $\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}$.

La razón de Bowen es un método indirecto, cuya precisión ha sido analizada por diferentes autores, encontrando que permite estimar la evapotranspiración real con una precisión del 10 % (Fuchs and c. B. Tanner, 1970; Sinclair *et al.*, 1975). La aplicación de esta metodología en ambientes semiáridos como es el caso de la zona mediterránea ha dado buenos resultados tanto en cultivos de baja altura (Dugas *et al.*, 1991) como en cubiertas altas (Rana and Katerji, 1996)(figura III.1).

El método aerodinámico.

El término λET se puede calcular o bien directamente a partir del perfil de velocidades del viento y humedad específica, o como término residual al obtener H a partir del perfil de velocidades del viento y temperatura del aire. Este segundo camino resulta más conveniente a nivel práctico por ser más fácil la medida del perfil de temperaturas que el de humedad específica. La precisión depende del número de medidas disponibles del perfil de velocidades del viento y de temperaturas. Para obtener resultados representativos es necesario que al menos haya tres medidas en el perfil, aunque a mayor número de medidas, mayor será esta precisión (Wieringa, 1993). Versiones simplificadas de este método han sido utilizadas para calcular la ET a partir de dos medidas en el perfil de velocidad del viento y temperaturas con éxito en cultivos del sur italiano (Rana *et al.*, 1990). El método aerodinámico no funciona correctamente en cubiertas altas bajo ninguna de las formas indicadas anteriormente (Rana and Katerji, 1996) por lo que una propuesta para aplicar esta metodología a cultivos altos viene recogida en Cellier and Brunet (1992).

La covarianza del torbellino.

El transporte de magnitudes escalares (vapor de agua, calor CO_2) y cantidades vectoriales (p. e., momento) en la parte baja de la atmósfera en contacto con las cubiertas vegetales se debe principalmente a la turbulencia (Hicks, 1970; Dyer, 1961). Bajo ciertas suposiciones, la teoría predice que los flujos desde la superficie se pueden estimar correlacionando las fluctuaciones verticales del viento respecto a la media (w') con la fluctuación de la concentración media de la mezcla transportada. En el caso del calor latente, se puede escribir la relación con la covarianza de la velocidad del viento vertical ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) y la densidad de vapor (q' en $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$):

$$\lambda ET = \lambda \overline{w' q'} \quad (\text{III.4})$$

Realizando medidas de la fluctuación instantánea de la velocidad del viento vertical w' y de la humedad q' con la suficiente frecuencia para estimar el tamaño significativo de los torbellinos, sumando su producto a escalas temporales mayores (15 min. o 1 hora), la ecuación III.4 nos da directamente el valor de ET .

Para medir directamente la ET por este método, las fluctuaciones de la velocidad del viento vertical, han de ser simultáneas a la densidad de vapor. El primero se debe medir con un anemómetro sónico, el segundo con un higrómetro de respuesta rápida y ambos deben hacer los registros con una frecuencia entre 10-20 Hz. Existen exigencias de tipo teórico y técnico en la medida de la densidad de vapor, por ejemplo, la alineación de los higrómetros puede provocar una pérdida de correlación entre las fluctuaciones de la velocidad de viento y velocidad del aire.

Con el objeto de evitar los problemas expuestos asociados a la medida de la fluctuación de la humedad del aire, se ha desarrollado una alternativa de tal forma que λET se puede obtener de forma indirecta a través de la ecuación de balance de energía si el calor sensible se puede expresar de la forma:

$$H = \rho C_p \overline{w' T'} \quad (III.5)$$

Donde C_p es el calor específico del aire a presión constante ($J Kg^{-1} °C^{-1}$). La velocidad del viento y la temperatura se miden con un anemómetro sónico y un termómetro de respuesta rápida respectivamente. Añadido a la correcta utilización de la instrumentación, este método ha mostrado un adecuado funcionamiento en ambientes semi-áridos, en la figura III.3 se muestra la comparación entre uno de los métodos más utilizado como es la razón de Bowen y el método eddy covariance en un ambiente semi-árido del sur de Italia (Rana and Katerji, 2000; 1996), observando un alto nivel de acuerdo entre ambos.

Actualmente, el uso de la covarianza de torbellino, en su forma de calor latente o de calor sensible, es una herramienta utilizada esencialmente en los trabajos de investigación, aunque de forma paralela se esta desarrollando instrumentación más robusta para su uso continuado en campo.

Método basado en la fisiología de la planta.

Los métodos basados en la fisiología de la planta, miden la pérdida de agua de una planta individual o de un grupo de plantas. Destacan dos técnicas, la técnica de flujo de savia y la metodología del sistema de cámaras.

En el método del flujo de savia la transpiración de la planta se estima a través del flujo de masa de savia, esto se hace a través de sondas adosadas o insertadas en el tallo de la planta. Unos termopares de contacto se encargan de medir el calor transmitido en sentido ascendente, descendente y radial desde el calentador. La diferencia entre el valor de entrada y las pérdidas se asume que son disipadas por convección con el flujo de savia en dirección ascendente por el tallo por lo que está relacionado con el flujo de agua (Kjelgaard *et al.*, 1997). Con la instrumentación comercial, el flujo de agua se puede medir a escala horaria.

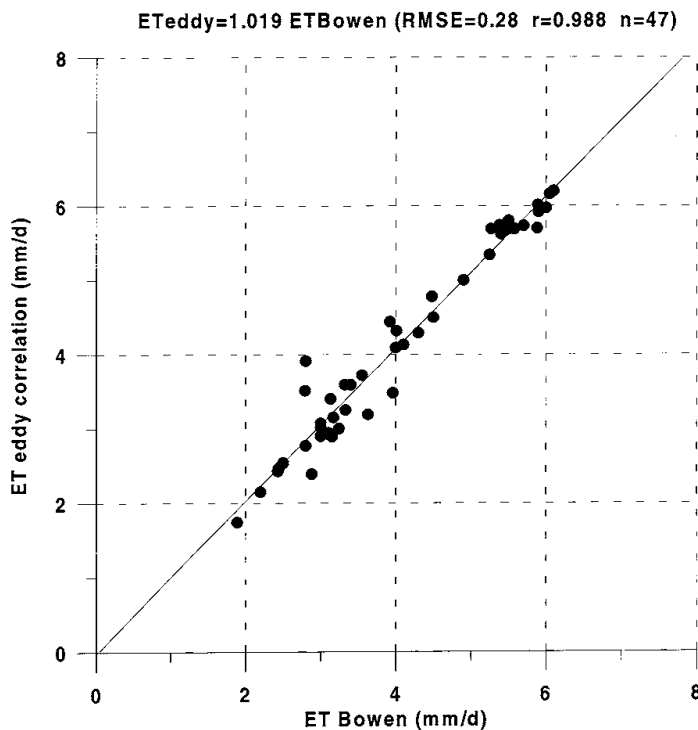


Figura III.3: Comparación entre los valores de *ET* medida mediante una torre covarianza de torbellino para el flujo de calor sensible y la *ET* medida por el método razón de Bowen, a escala diaria sobre una cubierta de sorgo dulce en el sur de Italia (adaptado de (Rana and Katerji, 1996)).

Esta técnica no altera el medio de la planta, pero resulta complicado la extrapolación de los valores de una planta a la cubierta. Esta extrapolación sólo es posible cuando las características de las plantas (altura, densidad, LAI) son bien conocidas.

Otros problemas relacionados con la metodología es que estima sólo la transpiración de la planta pero no la evaporación del suelo, que en ambientes semi-áridos es una fracción importante (hasta el 20 % de la evapotranspiración) del balance suelo-planta-atmósfera (Brutsaert, 1982).

El sistema de cámaras consiste en una conducción recubierta de un material o película de un derivado plástico; el aire se mezcla dentro de la cámara con ayuda de unos ventiladores estratégicamente situados. El sistema de cámaras ha sido tradicionalmente utilizado por Reicosky (1985) para medir la *ET* a escala diaria. La extrapolación de las medidas a una escala temporal y espacial mayor incorpora importantes errores.

En climas semi-áridos se ha demostrado que el sistema de cámaras que incorporan analizador infrarrojos para medir la densidad del vapor no son representativos de la parcela bajo estudio. Esta configuración en el equipamiento hace excesivamente caro el sistema (analizadores de infrarrojos y sistema de adquisición) que además requiere de un complejo sistema de ingeniería. Versiones posteriores de este sistema incorporan medidores de CO₂, pero como se comentó anteriormente el elevado coste así como su complejidad limitan su uso a trabajos de investigación y a cálculos a pequeña escala.

El problema más serio es que modifican el microclima en torno a la cubierta durante el período de medida. En segundo lugar, la modificación de la temperatura dentro de la cámara puede alterar el ritmo biológico del control de la transpiración por las hojas. Añadido a estos factores, la reducción de la velocidad del viento puede alterar el valor final de la *ET* de la cubierta.

III.2.1. Ecuación de Penman-Monteith.

Estos modelos estiman la *ET* mediante ecuaciones unidimensionales basadas en la teoría aerodinámica combinada con el balance de energía en la dirección vertical, por eso denominados métodos combinados (Monteith and Unsworth, 1990; Penman *et al.*, 1967; Penman, 1948). En 1948, Penman combinó la ecuación de balance de energía con la ecuación de transporte de masas para derivar una ecuación que calcula la evapotranspiración desde medidas climatológicas como radiación solar, temperatura, humedad y velocidad del viento. Este procedimiento, ha sido posteriormente desarrollado por numerosos autores, introduciendo el modelo de resistencias (Monteith, 1965; Rijtema, 1965). Está aceptado que el mecanismo biofísico de la evapotranspiración viene descrito adecuadamente mediante la conocida como *ecuación de Penman-Monteith* (Allen *et al.*, 1998):

$$\lambda ET = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \frac{C_p \cdot \rho \cdot (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (\text{III.6})$$

Donde cada término:

λET , es la densidad de flujo de energía en el proceso de vaporización ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Δ , pendiente de la curva de la presión de saturación del vapor de agua con la temperatura ($\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$), calculada a la temperatura del aire.

R_n es la densidad de flujo neto de radiación ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

G es la densidad de flujo en suelo ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

C_p es el calor específico del aire ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

ρ es la densidad del aire ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

$(e_s - e_a)$ es el déficit de vapor de presión, dado por la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la actual (kPa) a la temperatura del aire dada T_a .

r_a es la resistencia aerodinámica para la transferencia de calor y vapor ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$), que depende de la velocidad del viento y de las propiedades aerodinámicas de la superficie.

λ es el calor latente de vaporización ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$).

γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa}\cdot\text{K}^{-1}$).

r_s es la resistencia de superficie de la cubierta ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$), que depende de la fisiología de la propia cubierta.

Cada uno de estos términos aparecen discutidos y desarrollados en el apéndice B.

La ecuación de Penman-Monteith incluye los parámetros que influyen en el intercambio de energía y vapor de agua entre la cubierta y la atmósfera. Estos factores dependen de las características de la vegetación y de su respuesta a la transpiración a las condiciones ambientales. Esta ecuación sólo requiere la medida de datos meteorológicos a una única altura (Stewart, 1989). El primer término del numerador se suele denominar *término radiativo* mientras que el segundo término suele recibir el nombre de *término aerodinámico*.

De la ecuación de Penman-Monteith se deduce que la evapotranspiración aumenta linealmente con el incremento de radiación neta y con el incremento en el déficit de presión de saturación ($e_s - e_a$); del mismo modo, la evapotranspiración aumenta con el aumento en la velocidad del viento al ser esta inversamente proporcional a la resistencia aerodinámica (ap. B) (Calera, 2005). El comportamiento del propio cultivo y suelo se refleja en la resistencia de superficie, y de forma acoplada con la velocidad del viento la arquitectura de la cubierta se refleja con la resistencia aerodinámica. La deducción de la ecuación III.6 se hace en base a principios físicos; en este contexto Monteith and Unsworth (1990) realizan una detallada deducción apoyándose en los fundamentos termodinámicos del proceso de evaporación del agua. La ecuación III.6 puede ser utilizada para calcular la evapotranspiración de cualquier cultivo y la restricciones para su aplicación vienen derivadas por las simplificaciones en su deducción.

La aplicación directa de la ecuación de Penman-Monteith se suele denominar como metodología *en un sólo paso*; exige la determinación de parámetros meteorológicos y de la propia cubierta que están a su vez acoplados a las condiciones ambientales, como son la resistencia de superficie y aerodinámica. Estas resistencias dependen de parámetros ambientales como es el contenido de agua en suelo, que afecta al control estomático de las plantas, que a su vez depende del cultivo y de su estado fenológico. Por todo ello, aunque la aplicación de la ecuación III.6 resulta de gran interés, exige del desarrollo de submodelos que representen adecuadamente el ritmo

de evapotranspiración de la cubierta a través de las resistencias aerodinámica y de superficie (Calera, 2005).

La dependencia con la resistencia de superficie ha sido comprobada por diversos autores, de hecho Rana and Katerji (1998) muestran que la resistencia de la cubierta juega un papel esencial en la ecuación Penman-Monteith para estimar la ET real en la zona Mediterránea. Estos autores muestran que esta sensibilidad se puede distinguir bajo las situaciones en que la cubierta vegetal no sufra necesidades hídricas y por otro lado esté afectado por estrés hídrico. En el primer caso la modelización de r_s es sensible a la magnitud R_n para cultivos bajos (gramíneas de bajo porte), y sensible al déficit de vapor de agua en cubiertas de mayor altura. Cuando se produce el estrés el valor de r_s es dependiente del estado hídrico.

III.2.2. Cálculo Operativo de la ET_c . El método $K_c \cdot ET_o$.

La idea del patrón de comportamiento de la evapotranspiración a lo largo de un ciclo de crecimiento del cultivo (Briggs and Shantz, 1914), unida a la idea de separar la evapotranspiración en dos factores, por un lado uno relativo al cultivo y por otro a las condiciones atmosféricas (van Wijk and de Vries, 1954) ha dado lugar a la metodología conocida como de coeficientes de cultivo, o metodología en dos pasos, o $K_c \cdot ET_o$ (Allen *et al.*, 1998; Doorenbos and Pruitt, 1977a; Gates and Hanks, 1976; Tanner and Jury, 1976; Jensen, 1973). Dicho cálculo establece la determinación la evapotranspiración del cultivo por la relación:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (III.7)$$

Donde K_c es el coeficiente de cultivo y se deriva experimentalmente. Como se observa en la ecuación III.7 el coeficiente de cultivo (K_c) relaciona la demanda evaporativa potencial del cultivo con una superficie de referencia. El coeficiente de cultivo representa el efecto combinado de la resistencia de la propia planta al movimiento de agua desde el suelo a las superficies evaporativas y las resistencias de la difusión de vapor de agua desde estas superficies evaporativas en el cultivo y el cultivo de referencia hacia la atmósfera (Jensen *et al.*, 1970). Actualmente estos coeficientes de cultivo se formulan en términos de factores ambientales (principalmente la temperatura) que afectan a la fenología del cultivo o en función del estado de desarrollo de la cubierta durante el ciclo de crecimiento. La principal característica de esta metodología que ha potenciado su uso es su bajo coste de aplicación. Por ello se ha convertido en la metodología más utilizada en el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos. La determinación del coeficiente de cultivo se puede hacer a partir de la fenología y valores tabulados, temperaturas medias diarias,... como se discutirá más adelante, pero en todos los casos el elemento común es la observación de la cubierta y una instrumentación de bajo coste comparado con los métodos que calculan la ET citados anteriormente. El presente trabajo se centrará en la determinación del coeficiente de cultivo a través de la observación espectral de la cubierta.

El otro factor importante en la estimación de la ET mediante esta metodología es el cálculo de la ET_o y que tradicionalmente viene haciéndose por dos métodos: (i) los denominados platos de evaporación y (ii) la elección de una cubierta vegetal de referencia, normalmente gramíneas (festuca) o alfalfa. La precisión en la estimación de la ET por este método va a depender básicamente de tres componentes:

1. La superficie de referencia elegida.
2. El método de determinación de la ET_o , medida o a través de modelos.
3. El método de determinación del coeficiente de cultivo.

Las diferentes consideraciones hechas para el cultivo de referencia han ido orientadas a definir una superficie consistente en cualquier parte del mundo. Para el uso de gramíneas debe tener una altura entre 8-16 cm en crecimiento activo y en condiciones de buen estado hídrico, bajo las condiciones ambientales similares a las del cultivo del que se quiere medir la ET . Así, La ET_o se puede medir, por ejemplo a través de los lisímetros, o se puede estimar a partir de modelos. Estos modelos están basados en las consideraciones hechas hasta ahora para estimar la ET , sin más que considerar las características propias de la cubierta seleccionada. La principal diferencia de los diversos modelos utilizados radica en la manera de introducir las resistencias que caracterizan la cubierta de referencia. Así, podemos encontrar los métodos que introducen un valor de las resistencias de la cubierta en función de su estado de desarrollo (Rana and Katerji, 2000; Rana *et al.*, 1994) o el modelo FAO56 (Allen *et al.*, 1998) que establece un valor constante para la altura de la cubierta y la resistencia de superficie.

Para evitar las ambigüedades introducidas en los diferentes criterios seguidos por los diferentes autores, en 1990, el comité de expertos de FAO definió la superficie de referencia como la correspondiente a:

una cubierta de referencia ideal, con una altura de 0,12 m, una resistencia de $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ y un albedo de 0,23.

La superficie de referencia se asemejaría a la de una superficie extensa de gramínea, verde, con una altura uniforme de alrededor de 0,12 m, que sombreara completamente el suelo, con un adecuado suministro de agua y con un crecimiento óptimo (Doorenbos and Pruitt, 1977a). Los requerimientos de una superficie extensa y uniforme se deben a la condición impuesta de que todos los flujos de energía han de ser verticales.

La precisa definición de la superficie de referencia permite calcular la evapotranspiración de la superficie de referencia, ET_o , por el método FAO Penman-Monteith sin ambigüedad, y proporciona valores coherentes en todas las regiones y climas (Allen *et al.*, 1998). Por ello, en lo sucesivo se considerará que la ET_o será la referida a

una superficie de festuca con las condiciones establecidas por FAO, en caso contrario de utilizar una superficie de referencia diferente (por ejemplo alfalfa) habrá que considerar las transformaciones indicadas por Allen *et al.* (1998).

Con la ecuación III.6 e insertando los valores de resistencia de superficie y aerodinámica deducidas de la definición dada para la superficie de referencia, la ecuación FAO-Penman-Monteith para calcular la ET_o en el intervalo diario queda de la forma,

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (III.8)$$

ET_o , evapotranspiración de referencia ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$).

Δ , pendiente de la curva de la presión de saturación del vapor de agua con la temperatura ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), calculada a la temperatura del aire.

R_n es la radiación neta ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$).

G es el flujo de calor en suelo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$).

γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).

u_2 es la velocidad del viento promedio diario medida a 2 m de altura ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

T es la temperatura media del aire diaria medida en en rango 1,5-2,5 m de altura ($^\circ\text{C}$).

e_s es la presión de saturación promedio diario del vapor de agua.

e_a es la presión promedio diario del vapor de agua (kPa).

$(e_s - e_a)$ es el deficit de vapor de presión diario (kPa), medida en el rango de 1,5-2,5 m de altura.

En el apéndice B vienen recogidos los pasos necesarios así como la medida de los parámetros meteorológicos que intervienen en la ecuación III.8. En este apéndice se indica la conversión de unidades tanto para el cálculo diario como horario de ET_o .

Con objeto de automatizar el cálculo de la ET_o existen paquetes informáticos que hacen el cálculo en función de parámetros meteorológicos (*inputs*) disponibles. Actualmente en la bibliografía se citan básicamente dos de ellos, el paquete CROPWAT desarrollado por Smith (1992), y de más reciente aparición el programa desarrollado por Allen (2000a) y conocido como REF-ET.

Método del Coeficiente Único.

La definición del coeficiente de cultivo a partir de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y referencia (ET_o) obtenidas de las ecuaciones de Penman-Monteith y FAO-56, se establece como (D'Urso, 2001):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} = \frac{\frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \frac{C_p \cdot \rho \cdot (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s \cdot \text{min}}{r_a}\right)}}{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 \cdot (e_s - e_a)} \quad (III.9)$$

El K_c según se muestra en la ecuación III.9 presenta una variación con respecto a la fenología del cultivo que es característica. El numerador de la ecuación anterior hace referencia a la evapotranspiración del cultivo, la parte inferior a la cubierta de referencia. En este caso la evapotranspiración del cultivo corresponde a una situación óptima en manejo, sin limitación de suministro hídrico y de nutrientes y la resistencia de superficie adopta un valor mínimo, $r_{s \text{ min}}$ (Jensen *et al.*, 1990).

A la vista de la ecuación III.9 el coeficiente de cultivo integra los siguientes aspectos:

- La altura del cultivo modifica la resistencia aerodinámica.
- El albedo depende de la fracción de cobertura por la vegetación y de la humedad; diferencias en el valor de albedo producen cambios en la radiación absorbida.
- La dependencia con la resistencia de superficie es resultado de la combinación de la resistencia estomática (dependiente de la edad del cultivo y estado de crecimiento) y la resistencia del suelo.
- Del estado de humedad del suelo. En caso de la superficie del suelo de fondo mojado el K_c puede alcanzar valores de 1. Esta influencia cobra especial relevancia en situaciones de baja cobertura vegetal.
- En menor grado recoge la influencia climática. En el documento elaborado por FAO los valores recomendados para el coeficiente de cultivo son bajo condiciones de humedad relativa y velocidad del viento estándar. Estas condiciones son para un clima subhúmedo con una humedad relativa promedio diaria mínima del 45 % junto a promedios diarios de la velocidad del viento medida a 2 m de altura de 2 m/s.

La evolución teórica del coeficiente de cultivo a lo largo de un ciclo de crecimiento de la cubierta se muestra en la figura III.4 (Doorenbos and Pruitt, 1977b). El comportamiento del coeficiente de cultivo a lo largo del ciclo de crecimiento del cultivo refleja la optimización de los recursos disponibles, radiación, agua en suelo y nutrientes a través de la modificación de parámetros como altura de cultivo, ritmo de crecimiento o LAI . En esta curva se suelen distinguir cuatro estadios: fase inicial, fase de crecimiento, desarrollo completo y maduración o senescencia cuya longitud viene representada en la figura a través de los intervalos temporales (D_i). Valores recomendados del coeficiente de cultivo para cada una de las fases vienen recogidos en las recomendaciones de FAO (Allen *et al.*, 1998).

La fase inicial ocurre desde la siembra hasta que la cobertura vegetal verde alcanza un valor en torno al 10 %. La duración de esta fase depende del tipo de cultivo. Durante esta fase, al ser la cobertura vegetal baja, predomina la evaporación de suelo. En este caso, la ET depende fuertemente de la evaporación de suelo y del tiempo que éste permanece mojado. Por tanto, el valor del coeficiente en esta fase inicial dependerá de la frecuencia de mojado del suelo (precipitación y riego) y de su duración, algunos valores típicos de $K_{c \text{ INI}}$ recomendados están en torno a 0,2.

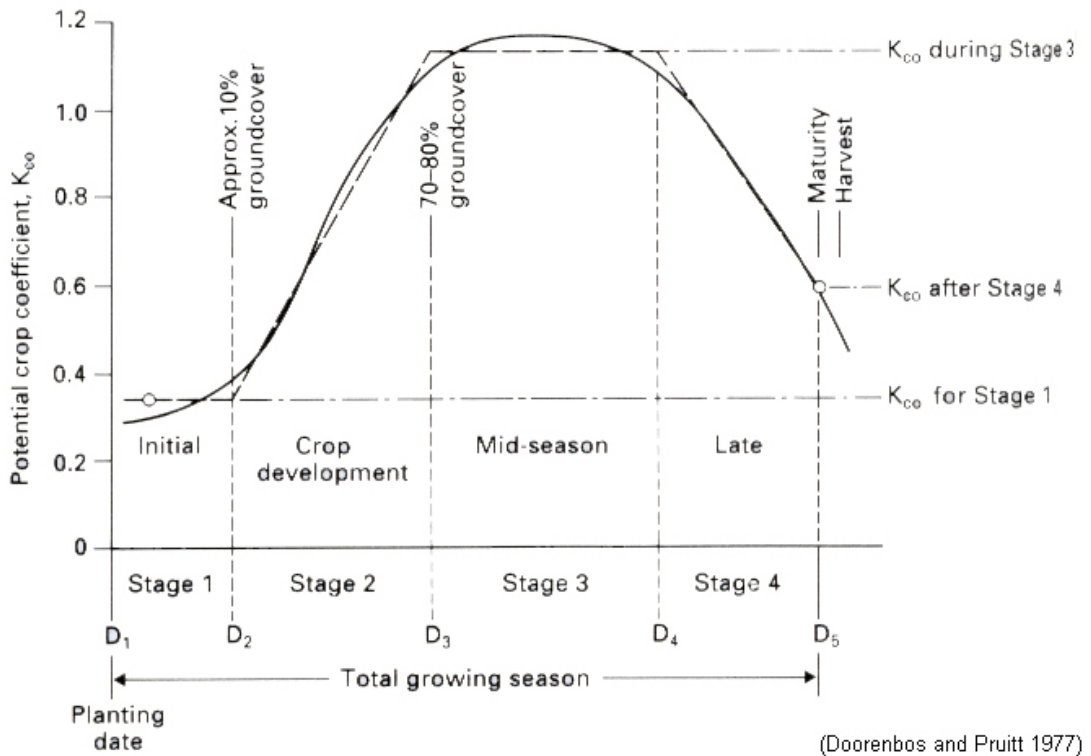


Figura III.4: Diagrama esquemático de la evolución estacional del K_c para un cultivo de regadío estacional (Maidment, 1992; Doorenbos and Pruitt, 1977b). Se representan cuatro estados de crecimiento (inicial, desarrollo, medio y final) cuya longitud viene indicada por la duración de cada estado (D_i , $i = 1, 2, 3, 4$) desde el día de plantación (D_1).

Esta influencia en la frecuencia de precipitación o riego ha sido contemplada bajo diferentes modelos con el objeto de reflejar su influencia en el coeficiente de cultivo. Algunas ecuaciones que parametrizan esta influencia han sido propuestas por (Cuenca, 1987).

1. Para intervalos temporales de mojado (lluvia o riego), I_w por debajo de 4 días:

$$K_{c\ INI} = [1,286 - 0,27 \cdot \ln(I_w)] \cdot e^{-(0,01+0,042\ln(I_w)) \cdot ET_o\ INI}$$

2. Para valores de $I_w \geq 4$ días,

$$K_{c\ INI} = 2 I_w^{-0,49} e^{-(0,02+0,04 \cdot \ln(I_w)) \cdot ET_o\ INI}$$

Esta última ecuación ha sido modificada por Villalobos *et al.* (2002) donde recomienda un valor de I_w corregido: $I_{wc} = 1/[0,75 \cdot v_w \cdot (1 - v_w)]$ donde $v_w = 1/I_w$.

La **fase de desarrollo** que cubre el período desde que se alcanza el 10% de cobertura hasta la cubierta efectiva completa (EFC, *Effective full cover*). La EFC se define como el período en el cual la relación entre la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar y la del cultivo de referencia es máxima, que tiene lugar cuando el coeficiente de cultivo alcanza su valor máximo. Según la aproximación de FAO, la variación desde el valor K_c INI hasta alcanzar el valor K_c MED es lineal con el tiempo, así como los cambios de fase son cambios suavizados en el tiempo como los observados en la figura esquemática III.4.

El valor de EFC en cultivos como maíz, trigo, remolacha azucarera, . . . corresponde a una fracción de cobertura vegetal verde en torno a 0,7- 0,8 aunque no es posible generalizar a todos los cultivos. Tradicionalmente se ha insistido en el valor umbral según ciertos parámetros agronómicos como LAI, así Rosenberg *et al.* (1983) establece que para valores de LAI > 3, en cubiertas homogéneas se alcanza EFC, justificando la observación de que la evapotranspiración aumenta al aumentar la cubierta hasta un valor de LAI en torno a 3, por encima del cual no se produce un aumento significativo de la *ET* tal y como se observa en la figura III.5 (Choudhury *et al.*, 1994).

La determinación en campo del período es a veces complejo, el seguimiento de ciertos parámetros agronómicos como LAI exige de cierto equipamiento tecnológico. Como alternativa se ha impuesto la determinación de los estados a partir de la fracción de cobertura vegetal calculada con fotografía digital (Calera, Martínez and Meliá, 2001). No obstante, sobre cubiertas altas, resulta complicado determinar ésta. En último término, el seguimiento del estado fenológico resulta la alternativa a los inconvenientes presentados anteriormente, aunque introduce un nivel mayor de incertidumbre en la estimación de la *ET_c*.

La **fase media** o en meseta, que va desde que el cultivo alcanza la cubierta efectiva completa hasta el inicio de la maduración. Es una etapa durante la cual el coeficiente de cultivo mantiene su valor, en promedio, constante K_c MED, y aparece en la curva de evolución temporal como una meseta o *plateau*. La fase media finaliza con el inicio de la maduración que se suele manifestar por medio del amarilleamiento, envejecimiento o senescencia de las hojas. Los valores de K_c MED recomendados por FAO es recomendable ajustarlos a la climatología por medio del modelo:

$$K_c \text{ MED} = K_c \text{ MED Tab} + (0,1 + 0,04 \cdot u_2 - 0,004 \cdot HR_{Min}) \cdot \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (\text{III.10})$$

Donde,

- K_c MED es el valor medio del coeficiente de cultivo.
- K_c MED Tab es el valor medio del coeficiente de cultivo tabulado y recomendado por FAO.

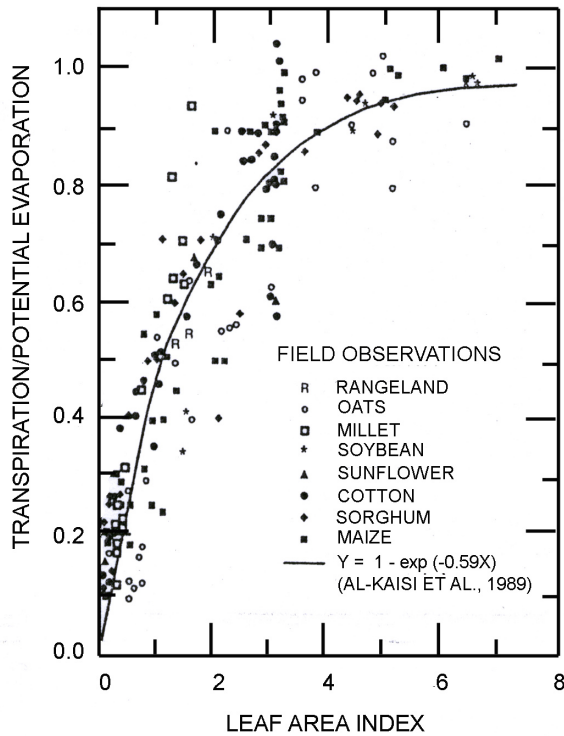


Figura III.5: Variación del coeficiente de transpiración con el índice de área foliar para varios cultivos. Los datos corresponden a una colección bibliográfica hecha por Choudhury *et al.* (1994).

- u_2 es la velocidad del viento promedio diaria medida a 2 m de altura ($m \cdot s^{-1}$).
- HR_{Min} es la humedad relativa promedio mínima en la fase media (%).
- h es la altura del cultivo.

El estado denominado **fase final** se desarrolla desde el inicio de la madurez hasta la cosecha o la senescencia. En el caso de algunos cultivos que se cosechan en verde, el final de esta etapa viene marcado necesariamente por este momento. El ajuste de los valores de FAO a las condiciones climáticas y de desarrollo de la cubierta vienen dadas por la relación (Allen *et al.*, 1998):

$$\begin{cases} K_{c\ FIN} = K_{c\ FIN\ Tab} + 0,001 \cdot (HR_{Min} - 45) & \text{rango } K_{c\ FIN} < 0,4 \\ K_{c\ FIN} = K_{c\ FIN\ Tab} + (0,1 + 0,04 \cdot u_2 - 0,004 \cdot HR_{Min}) \cdot \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} & \text{rango } K_{c\ FIN} \geq 0,4 \end{cases} \quad (III.11)$$

Con las indicaciones seguidas anteriormente, para la construcción de la curva de evolución de un cultivo es recomendable seguir los siguientes pasos:

1. Identificar cada uno de los períodos del crecimiento del cultivo: etapa inicial, desarrollo, media y final. Calcular la longitud de cada una de las etapas mediante las recomendaciones de FAO o a partir de información local.
2. Identificar los valores de K_c en cada una de las etapas a través de los valores estándar (Allen *et al.*, 1998). Corregir estos valores a las circunstancias climáticas (eq. III.11), frecuencia de mojado de suelo o de las características de manejo.
3. Construir mediante el trazado de líneas los diferentes puntos que definen cada uno de los estados.

Cabe resaltar en la secuencia de toda la metodología, que los valores recomendados por FAO son valores promedio estadísticos y pueden alejarse de los valores representativos en la zona de estudio. Estos deben ser cuidadosamente cotejados y revisados por observaciones en la zona de estudio.

Por tanto, a partir de la fenología del cultivo se establecen los valores de K_c y con el valor de ET_0 en una estación agrometeorológica adyacente se calcula la evapotranspiración del cultivo. La principal ventaja de esta metodología es su bajo coste en la estimación de ET_c y por tanto de las necesidades hídricas del cultivo.

Método de Coeficiente Dual.

Los valores de K_c recomendados por FAO suponen un valor promedio del cociente $\frac{ET}{ET_0}$, en cada etapa del cultivo incluyendo días regados, no regados, etc. . . Teniendo en cuenta la frecuencia en el aporte hídrico, Wright (1982) plantea la distinción dentro del coeficiente de cultivo en una componente de evaporación E y otra de transpiración T .

$$ET_c = E + T \Rightarrow K_c = \frac{ET}{ET_0} = \frac{E}{ET_0} + \frac{T}{ET_0} \Rightarrow K_c = K_e + K_{cb} \quad (\text{III.12})$$

A raíz de este tratamiento se definen dos coeficientes, el coeficiente de evaporación K_e y el coeficiente basal K_{cb} que corresponde a la transpiración de la cubierta. Con esto se define el coeficiente de cultivo basal K_{cb} como el cociente entre la evapotranspiración del cultivo sobre la evapotranspiración de referencia cuando la superficie del suelo está seca pero la reserva de agua en suelo no limita la transpiración. En la figura III.6 viene reflejado la evolución de la evapotranspiración antes y después del riego. Como se puede apreciar, sobre un seguimiento diario los días de aporte hídrico y posteriores sufren un cambio importante.

Evaporación de Suelo Desnudo. La evaporación de suelo desnudo es un proceso que va a depender esencialmente del contenido de agua en superficie. Es decir, una primera fase donde el factor limitante va a ser la energía disponible en la evaporación debido a que existe volumen de agua en superficie fácilmente evaporable, y una segunda fase en la cual ese agua de superficie desaparece y es necesario un término de extracción del agua retenida en suelo donde el limitante es el propio suelo (Calera, Cuesta, Domínguez, González-Piqueras and Fabeiro, 2001; Idso *et al.*, 1979; Jackson *et al.*, 1976).

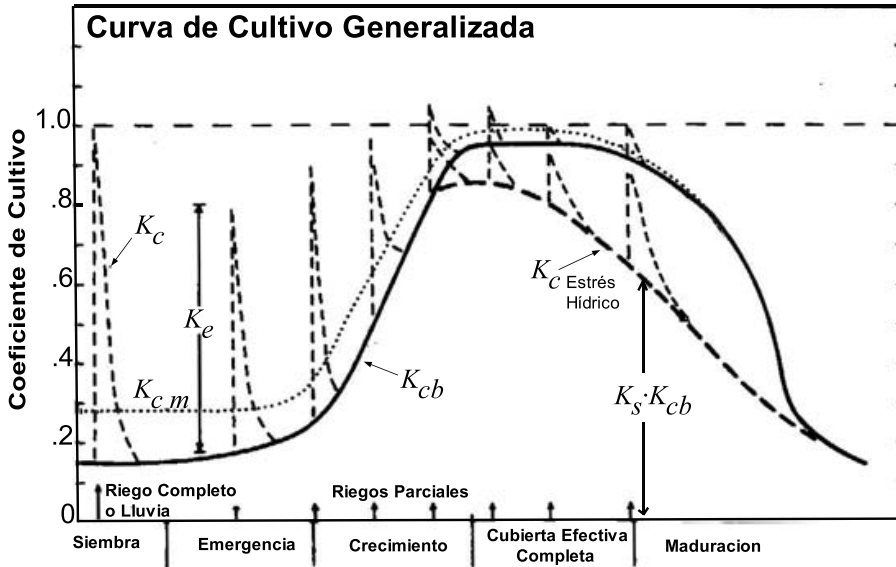


Figura III.6: Valor de la curva de coeficiente de cultivo basal, K_{cb} , coeficiente de cultivo, K_c , coeficiente de cultivo medio K_{cm} , utilizados para obtener el coeficiente de cultivo único referido a alfalfa (adaptado de Wright (1982)).

Así se establece que el proceso de evaporación de suelo desnudo tiene lugar principalmente en dos fases (figura III.7) :

Primera fase, donde el grado de evaporación depende fundamentalmente del balance energético y de la demanda evaporativa de la atmósfera. Este ritmo de evaporación se mantiene hasta que se consume el agua considerada como fácilmente evaporable (REW). Esta fase tiene una duración que depende de la demanda atmosférica y en la figura III.7 aparece indicada como t_1 .

Segunda fase, durante la cual el proceso de evaporación está controlado tanto por las condiciones atmosféricas como por las propiedades del suelo. Una vez que se ha consumido el volumen de agua fácilmente evaporable, el suelo limita la evaporación pues el agua en reserva debe ser conducida hasta la superficie. A medida que la reserva hídrica en suelo disminuye este ritmo de evaporación disminuye hasta consumir el total de agua evaporable (TEW, fig. III.7).

Utilizando el coeficiente de cultivo K_e como indicador de la evaporación, se observa que a continuación de un aporte de agua (después de lluvia o riego) éste debe ser máximo y cercano a cero cuando la reserva de agua en superficie es también baja (superficie seca) tal y como se observa en la figura III.6.

El efecto que tendrá este comportamiento sobre el valor de K_c dependerá de forma importante de la frecuencia de riego. Cuando el período entre aporte hídrico (riegos

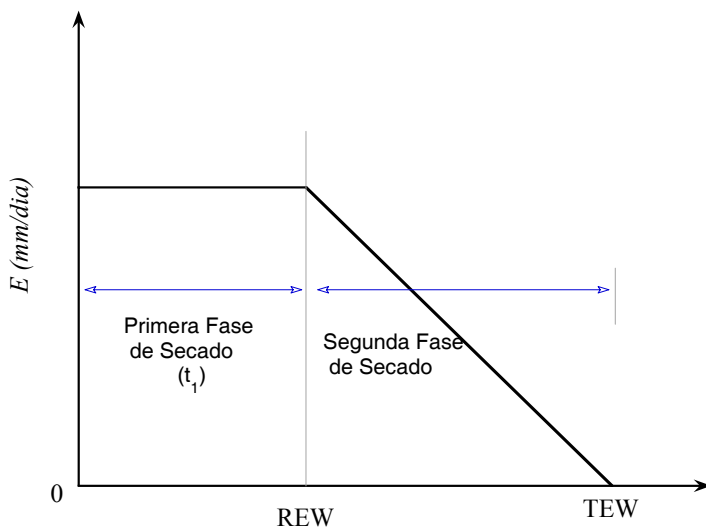


Figura III.7: Evolución de la evaporación de suelo antes de consumir el agua fácilmente evaporable (REW) y hasta el consumo del agua totalmente evaporable (TEW) (Allen *et al.*, 1998).

o lluvia) sea menor que la duración de la primera fase de evaporación ($t_w < t_1$), se puede calcular la evaporación a partir de ET_0 como $E = 1,15 \cdot ET_0$. En caso de que el intervalo temporal de aporte hídrico supere la duración de la primera fase se hace necesario hacer un balance hídrico en suelo (Allen *et al.*, 1998).

Para establecer el paso entre estas fases de evaporación se utiliza la metodología que introduce un coeficiente reductor K_s que varía entre 0 y 1 de tal forma que adopta el valor 1 en caso de evaporación en la primera fase evaporativa y 0 en caso de encontrarse en la segunda fase evaporativa. Este coeficiente reductor se estima a partir del balance hídrico en suelo. En la parte de suelo mojada y expuesta a la radiación directa es donde se produce principalmente la evaporación. El rango máximo del coeficiente de evaporación K_e se calcula a través de la fracción de suelo expuesta a radiación bajo aporte hídrico f_{ew} ,

$$K_e \leq f_{ew} \cdot K_{C \text{ Max}} \quad (\text{III.13})$$

El valor de dicho coeficiente vendrá dado por $f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w)$, donde f_c es la fracción de cobertura y f_w , es la fracción de suelo bajo aporte hídrico. En la figura III.8 se puede apreciar el rango de valores de cada uno de estos factores bajo diferentes condiciones de aporte hídrico (todos ellos aplicados en la región de estudio) teniendo en cuenta la etapa del desarrollo de la cubierta.

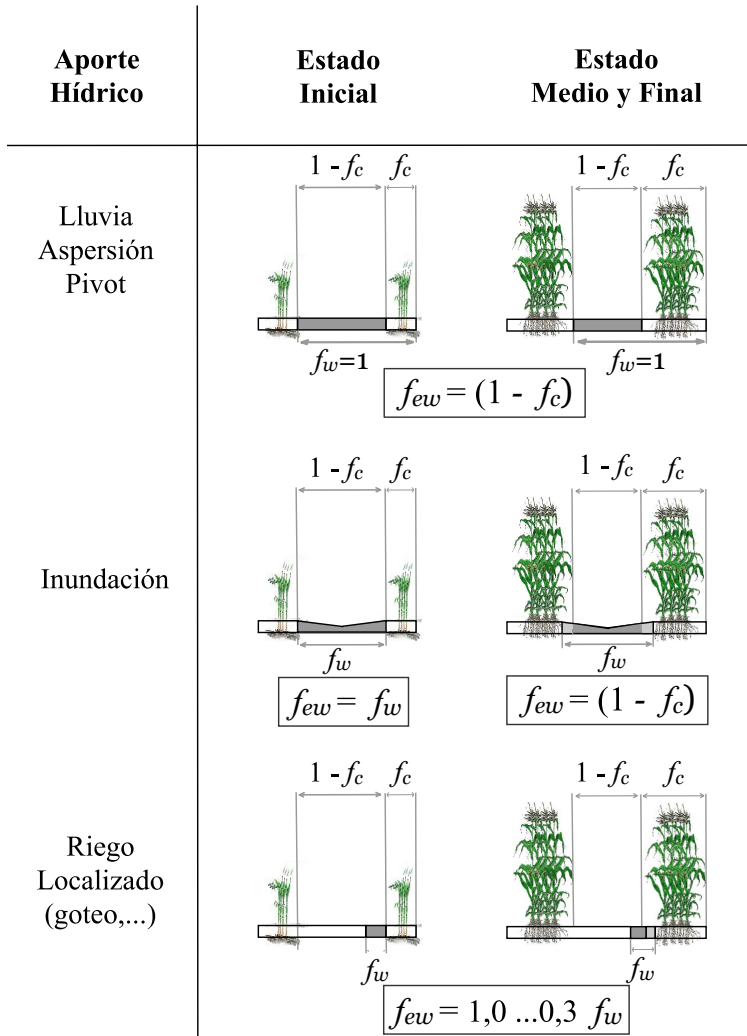


Figura III.8: Valor del coeficiente f_{ew} en diferentes situaciones de aporte hídrico y en varias etapas del desarrollo del cultivo.

Transpiración de Vegetación. Según establece FAO (Allen *et al.*, 1998), el proceso de transpiración de vegetación consiste en la evaporación de agua líquida contenida en los tejidos de las plantas y el vapor aportado a la atmósfera. El principal proceso de regulación es debido al cierre y apertura estomático, teniendo en cuenta que la mayor parte del agua extraída del suelo por la planta es eliminada por transpiración y una pequeña componente asimilada. De forma análoga a como se han estudiado anteriormente las variables que afectan a la evaporación se estudia el proceso de transpiración. Los términos correspondientes a la energía disponible, el gradiente de

presión de vapor y el comportamiento del viento, se estiman a partir de las variables radiación, temperatura del aire, humedad del aire y velocidad del viento. No obstante, la disponibilidad de agua en suelo así como la conductividad hídrica y la salinidad son parámetros determinantes en la transpiración.

Recordemos la definición hecha del coeficiente de cultivo basal K_{cb} , como el cociente entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración correspondiente al cultivo de referencia ($\frac{ET_c}{ET_0}$) bajo condiciones de suelo seco pero no limitando la evapotranspiración potencial del cultivo considerado, no estando incluida en ésta la componente de difusión debida al suelo cubierto por vegetación. En la figura III.9 se detalla en un caso teórico y calculado para maíz grano estándar el comportamiento típico de la curva K_{cb} en relación con K_e y K_c . Si comparamos el comportamiento en el tiempo de las tres curvas, se observa que la curva correspondiente a la transpiración del cultivo toma de forma sistemática valores menores que el coeficiente único durante todo el rango de evolución. En la etapa inicial la diferencia entre ambos coeficientes es mayor que en la etapa intermedia, debido en gran medida al efecto de evaporación de suelo de fondo al estar expuesto una fracción menor cuando existe un máximo de cobertura de vegetación.

La determinación del coeficiente de cultivo basal se puede hacer siguiendo las recomendaciones en la metodología FAO56 a partir de datos tabulados promedio y adaptados a las condiciones climáticas (velocidad del viento, humedad relativa) y de cultivo de la zona. El modelo tiene en cuenta la velocidad del viento, la humedad relativa y la altura de la cubierta, que permiten ajustar los valores tabulados en condiciones atmosféricas estándar de ($K_{cb Tab}$) con velocidad del viento a 2 m de altura y $2 \frac{m}{s}$ de promedio y una humedad relativa de 45 % a los valores en la zona de aplicación. Así se hace necesario reajustar estos coeficientes cuando las condiciones se alejen del caso estándar, al igual que se hacían en el cálculo del coeficiente único (eq: III.11 (Allen *et al.*, 1998)):

$$K_{cb} = K_{cb Tab} + \left[0,04 \cdot (u_2 - 2) - 0,004 \cdot (RH_{Min} - 45) \cdot \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \right] \quad (III.14)$$

Donde u_2 es el valor de velocidad del viento media diaria a 2 m sobre la superficie de referencia (festuca) en el período medio o final del crecimiento dentro del rango $1 m \cdot s^{-1} < u_2 < 6 m \cdot s^{-1}$. RH_{Min} es la humedad relativa mínima diaria dentro del período de crecimiento, maduración y senescencia dentro del rango de valores $20 \% \leq RH_{Min} \leq 80 \%$, y h es la altura media del cultivo durante las etapas de crecimiento y maduración en condiciones estándar según los rangos anteriores de RH_{Min} y velocidad del viento.

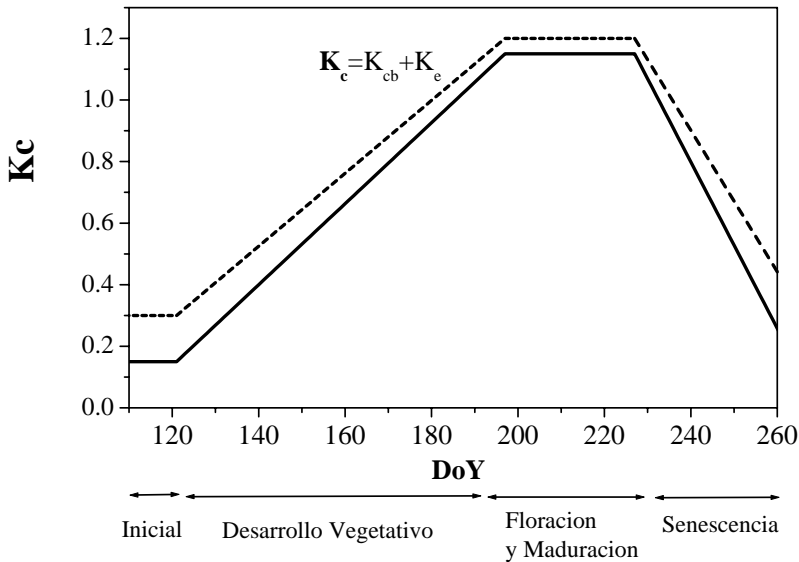


Figura III.9: Evolución de K_c (línea punteada) y K_{cb} (línea continua) durante cada una de las fases de desarrollo del cultivo. Los datos correspondientes a cada fase han sido extraídos de los valores promedio para el cultivo propuestos por FAO para maíz grano (Allen et al.,1998; Tabla 12, Tabla 17, Anexo 7).

III.2.3. Estimación de la evapotranspiración desde teledetección.

Las imágenes proporcionadas en teledetección en el rango del visible e infrarrojo térmico han sido una herramienta clave para la estimación de la evapotranspiración real (Duchemin *et al.*, 2006; Schmugge *et al.*, 2002). Muchos de estos modelos han sido desarrollados para la estimación de los flujos instantáneos de calor latente y calor sensible a la hora de paso del satélite utilizando datos de teledetección y datos climáticos (Bastiaanssen *et al.*, 1998; Moran *et al.*, 1994; Carlson *et al.*, 1995; Choudhury, 1987). La mayoría de estos modelos de estimación de ET usan algoritmos físicos con diferentes grados de dificultad discutidos por autores como Choudhury (1989), Bailey (1990), Humes *et al.* (1994), Moran and Jackson (1991), Jackson *et al.* (1977), etc.

Con la publicación del balance de energía simplificado en los trabajos de Idso *et al.* (1975) y Jackson *et al.* (1977) se abre una línea en la estimación de la ET , los métodos desarrollados posteriormente y basados en éstos ofrecen alternativas de cálculo pero difieren básicamente en el tipo de información de campo requerida, de la longitud de onda, de la información micro-meteorológica auxiliar y en la necesidad de modelos

numéricos (Bastiaanssen, 1998). Muchos de estos algoritmos han sido desarrollados sobre cuencas y zonas determinadas lo que limita su uso a otras zonas del planeta. Con objeto de generalizar los resultados, autores como Seguin *et al.* (1994; 1989) y Hurtado *et al.* (1995) desarrollan el modelo simplificado de balance de energía y lo aplican a zonas diversas de EEUU, España, Francia y Marruecos.

Durante la última década se han planteado versiones más avanzadas y más complejas del balance de energía en superficie que han sido validadas por Kustas *et al.* (1994), por Bastiaanssen *et al.* (2000) validando el algoritmo SEBAL en amplias zonas a lo largo del planeta (Egipto, España, Italia, Niger, EEUU, Pakistan,...), Tasumi *et al.* (2003) que aplica una versión extendida de SEBAL bajo el acrónimo METRIC en EEUU y España o Menenti *et al.* (2003) que valida el algoritmo SEBI-SEBS en zonas similares. Todos ellos son herramientas útiles y de resultados similares en la estimación de los flujos de calor latente y calor sensible. Presentan una limitación importante en el seguimiento temporal de la *ET* debido a la disponibilidad de imágenes de satélite como resultado de la presencia de nubes o de la programación de pasadas (Duchemin *et al.*, 2006).

Con el objeto de obtener simulaciones continuas de la evapotranspiración se utilizan los modelos de seguimiento de procesos en ecosistemas o modelos SVAT que incluyen el proceso de transferencia de agua entre suelo-planta-atmósfera (Olioso *et al.*, 2003; 1999; Seen *et al.*, 1995). Una vez combinados con los datos de teledetección estos modelos proporcionan estimaciones continuas del balance de agua y energía distribuidas espacialmente (Courault *et al.*, 2003). Estos métodos están basados en técnicas de inversión, calibración y asimilación que son complicadas de poner a punto y validar en un contexto operacional (Verhoef and Bach, 2003; Kimes *et al.*, 2000; Jacquemoud *et al.*, 2000; Olioso *et al.*, 1999). Es importante señalar además que una exigencia general de todos los modelos anteriormente propuestos es la parametrización local de éstos para obtener valores precisos de *ET*.

El uso de la metodología $K_c \cdot ET_0$ es el método recomendado para estimar las necesidades hídricas del cultivo desde el punto de vista operacional. Recomendada debido a que sólo necesita datos fenológicos del cultivo y variables meteorológicas estándar mientras devuelve valores de evapotranspiración del cultivo aceptables comparados con modelos físicos y datos de campo (Allen, 2000b; Kite and Droogers, 2000). Esta característica ha hecho que desde el mundo de la teledetección se haya propuesto la estimación de los coeficientes de cultivo vinculados a los índices de vegetación (Gonzalez-Piqueras *et al.*, 2003; Bausch, 1995; Neale *et al.*, 1989) o a partir de parámetros biofísicos intermedios como el índice de área foliar (D'Urso, 2001). **Por lo expuesto anteriormente, manteniendo el punto de vista operacional, en este trabajo se va a profundizar en la obtención del coeficiente de cultivo a partir de los índices de vegetación con objeto de:**

1. **Analizar la dinámica de evolución del coeficiente de cultivo en relación a la fenología, disponibilidad de agua y desarrollo de la cubierta en términos de parámetros biofísicos.**
2. **Discutir el potencial de los índices de vegetación en el seguimiento de la evapotranspiración máxima de la cubierta.**
3. **Dado el empirismo de la metodología $K_c \cdot ET_o$, obtener una relación entre coeficiente de cultivo e índices de vegetación aplicable en la zona de estudio.**

III.3. Índices de Vegetación.

Como magnitud física primaria se ha utilizado tradicionalmente la reflectividad espectral que permite identificar rasgos de absorción atribuidos a la superficie bajo estudio. En el caso de vegetación, estos rasgos son debidos principalmente a la presencia de clorofila, que presentan una baja reflectividad del espectro electromagnético en la región espectral del rojo (0,62-0,70 μm) y una reflectividad alta en la región del infrarrojo cercano (0,7-1,1 μm). Es precisamente este contraste presente en la reflectividad entre ambas regiones espectrales el utilizado en la definición de la mayoría de los índices de vegetación. Dado el tradicional uso de los índices de vegetación (IV) en la identificación y seguimiento de las cubiertas vegetales, se plantea un repaso de los más utilizados en la bibliografía. Aunque actualmente las tecnologías en Teledetección encaminadas a estimar la cubierta vegetal van más allá de sencillas relaciones entre bandas, no hay que olvidar que los índices de vegetación han ofrecido una herramienta valiosa y consistente en el seguimiento de vegetación a diferentes escalas. Desde los años setenta múltiples definiciones de índices se han formulado a partir de diversas combinaciones entre bandas, orientadas a minimizar el efecto del suelo, de la atmósfera o de la configuración angular de observación y medida. Precisamente la sencillez en el cálculo y robustez de estos índices de vegetación trasciende el mundo de la física y la teledetección, y ha hecho que se convierta en un parámetro básico e interpretado ya en agronomía, hidrología, ecología o medio ambiente.

Si atendemos a la definición de índice de vegetación ideal (Jackson, 1983) se define como: *aquel particularmente sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color de suelo y poco afectado por la perturbación atmosférica, los factores medioambientales y las geometrías de iluminación y observación*. En las últimas décadas se han definido un número importante de índices de vegetación cuyo diseño está en función del efecto a minimizar (brillo, color de suelo, presencia de la atmósfera, ...), pudiendo, a su vez, distinguir entre diferentes categorías. Se pueden clasificar según estén basados en razones aritméticas, en distancias en el espacio de reflectividades o en parámetros de optimización. En la primera de las categorías se pueden citar, entre otros, el conocido como Simple Ratio (RVI), y el Normalized Difference Vegetation

Index (NDVI). En el segundo caso se hace la definición del índice a partir de la distancia de las isolíneas de vegetación a la línea de suelo en el espacio de reflectividades del rojo (ρ_R) e infrarrojo cercano (ρ_{IRC}), en este grupo se pueden citar entre otros, Difference Vegetation Index (DVI), Perpendicular Vegetation Index (PVI) y el Weighted Difference Vegetation Index (WDVI) (Clevers and Verhoef, 1993). Finalmente se puede establecer el grupo de los denominados Índices Optimizados (Rondeaux *et al.*, 1996) que incluyen parámetros de normalización específicamente para suelo desnudo (Huete, 1988; Qi *et al.*, 1994; Gilabert *et al.*, 2002): Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) (Huete, 1988), Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI), Generalized Adjusted Vegetation Index (GESAVI). El uso y aplicación de estos IV va a depender básicamente del efecto a normalizar y de su sensibilidad frente a las diferentes variables agronómicas. Sus características principales en términos de recomendaciones e inconvenientes en su aplicación se encuentran recogidas la tabla III.2. **Se ha recogido un resumen de los más relevantes con objeto de establecer las indicaciones en su determinación del coeficiente de cultivo.**

III.3.1. Índices Basados en Razones Aritméticas.

Como se ha citado anteriormente, estos índices se caracterizan por representar un contraste entre las reflectividades, de la banda del infrarrojo cercano y la banda del rojo. El conocido como *Ratio Vegetation Index* (Pearson and Miller, 1972) supone el cociente entre ambas reflectividades, según se aprecia en la tabla III.1. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada conocido como NDVI (Rouse *et al.*, 1974), definido según la tabla III.1 ha sido, tradicionalmente el más utilizado en los trabajos de Teledetección. El NDVI está definido a partir de un re-escalado de RVI, quedando por tanto, normalizado entre los valores -1 y 1, indicando que los valores cercanos al máximo corresponderán a una mayor proporción de vegetación mientras que los valores cercanos a cero corresponden a la ausencia de cubierta vegetal. Los valores por debajo de la unidad dependen en cada caso de la configuración atmosférica y de la propia superficie, pues es común obtener valores negativos sobre áreas con agua en superficie, sobre una cobertura nubosa, en algún determinado tipo de suelo o superficies artificiales. Dado que, la propia definición de la razón aritmética presenta la característica de reducir ruidos provenientes de diferentes causas (diferencias en condiciones de iluminación y observación, presencia de sombras, atenuación atmosférica, presencia del relieve en la superficie bajo estudio), la presencia de la atmósfera ha orientado el desarrollo de los índices de vegetación a reducir este efecto. Dada la gran ventaja presente en su facilidad de cálculo en estos IVs la aplicación, especialmente de NDVI, está contrastada. Destacable es su uso como indicador de variables biofísicas a escala global y regional a la hora de desarrollar modelos de comportamiento y gestión de recursos naturales. No hay que olvidar que su uso durante el último cuarto de siglo ha generado una base de datos ingente pues ha sido aplicado a la mayoría de las plataformas espaciales operativas. A pesar de las ventajas señaladas anteriormente, cabe

Tabla III.1: Relación de Índices basados en cocientes, donde ρ_{IR} y ρ_R representan la reflectividad en infrarrojo cercano y rojo respectivamente.

Nombre	Definición	Autor
Ratio Vegetation Index (RVI)	$\frac{\rho_{IR}}{\rho_R}$	Pearson and Miller (1972)
Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{\rho_{IR}-\rho_R}{\rho_{IR}+\rho_R}$	Rouse <i>et al.</i> (1974)

tener en cuenta ciertas limitaciones de estos índices, pues presentan una no linealidad con variables biofísicas características como el LAI o Biomasa, además de que para valores altos de estos parámetros se da la saturación del índice (González-Piqueras, 1999). Además, estos índices presentan una sensibilidad a la variabilidad en el suelo de fondo de la cubierta ofreciendo diferentes valores de NDVI sobre el mismo nivel de vegetación cambiando el brillo y color de suelo (González-Piqueras, 1999).

III.3.2. Índices Basados en la Línea de Suelo.

Si se representan dentro del espacio de reflectividad los puntos correspondientes a los mismos niveles de vegetación, se observa que éstos se van ajustando a líneas bien definidas, denominadas por ello, isolíneas de vegetación relacionadas con el LAI (fig. III.10). Dentro de esta representación se puede apreciar el triángulo de reflectividad cuya base corresponde a los puntos de suelo desnudo, esta línea se denomina por este mismo motivo *línea de suelo* (Baret *et al.*, 1993). Si se unen los puntos que representan igual cantidad de vegetación (igual LAI) cambiando el color o brillo del suelo de fondo se generan las conocidas como isolíneas de vegetación, que en primera aproximación se puede suponer que estas isolíneas generadas son paralelas a la línea de suelo. Sobre esta base Richardson and Wiegand (1977) han definido el PVI (*Perpendicular Vegetation Index*) detallado en la ecuación III.15 que representa la distancia perpendicular de las isolíneas de vegetación a la línea de suelo, conocida ésta y caracterizada por su pendiente y corte en ordenadas a y b respectivamente. La línea de suelo calculada para la zona de estudio aparece reflejada en la figura III.10. Con los valores de esta línea de suelo, la definición de *PVI* queda de la forma:

$$PVI = \frac{\rho_{IRC} - a \cdot \rho_R - b}{\sqrt{a^2 + 1}} \Rightarrow PVI = 0,646 \cdot \rho_{IRC} - 0,763 \cdot \rho_R - 0,118 \quad (\text{III.15})$$

Los principales factores que provocan la variación en la reflectividad correspondiente a suelo desnudo dentro del rango espectral considerado son debidos a cambios en humedad, color de suelo, brillo y textura o rugosidad. Dichas variaciones provocan dentro del triángulo de reflectividad descrito anteriormente que los puntos se dispongan a lo largo de la base, aumentando su valor cuando el suelo es mas brillante, con menor humedad y menos rugoso y viceversa para suelos mas húmedos, oscuros o mas rugosos. En la figura III.10 se puede apreciar la disposición dentro del triángulo

de reflectividad de los puntos considerados sobre suelo característico de la zona de estudio, así como el valor de la recta correspondiente a la línea de suelo calculada por regresión lineal. Todos los puntos han sido tomados sobre el mismo tipo de suelo variando básicamente la humedad y rugosidad. En figura III.10 aparece la definición geométrica de *PVI* sobre datos experimentales tanto de suelo desnudo como de una cubierta de maíz.

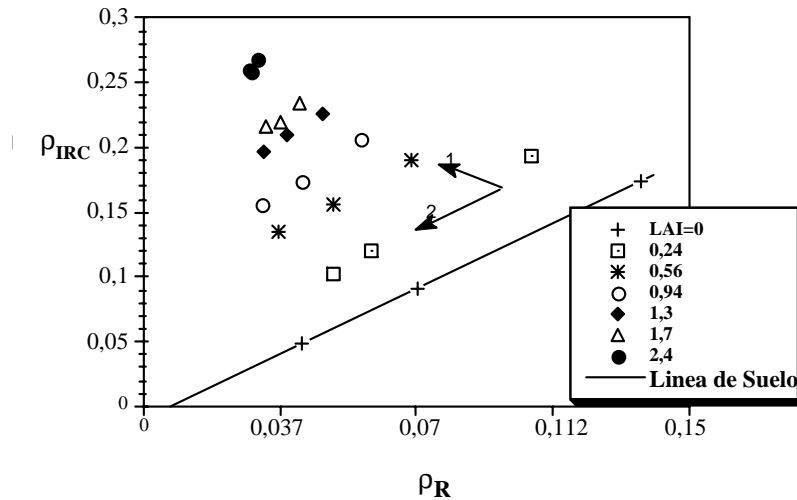


Figura III.10: Representación de la reflectividad en la banda del rojo (ρ_R) e infrarrojo cercano (ρ_{IRC}) para los puntos de suelo desnudo (+), que definen la línea de suelo (indicada en la figura). Dentro de la misma figura se encuentran representados los puntos con el mismo valor de LAI. La flecha 1 indica la orientación de los puntos al variar el LAI, la flecha 2 indica la disposición de los puntos al variar el color de suelo (González-Piqueras, 1999)

Sobre un mismo suelo, al variar humedad y rugosidad, se define con bastante precisión la línea de suelo. Al incluir diferentes tipos de suelo, se pierde precisión en la definición de esta línea, y es por ello que algunos autores han justificado la no universalidad de la línea de suelo (Baret *et al.*, 1993), siendo recomendable definir una por tipo de suelo (González-Piqueras, 1999; Baret *et al.*, 1993).

Dentro de este grupo, otro índice utilizado en modelos de estimación de cubierta, está definido a partir de los valores de la reflectividad en suelo es el conocido como *WDVI* (*Weighted Difference Vegetation Index*), de la forma:

$$WDVI = \rho_{IRC} - \rho_R \cdot \frac{\rho_{IRCsuelo}}{\rho_{Rsuelo}} \quad (III.16)$$

Dicho índice ha sido utilizado en su relación con el *LAI* por diferentes autores y su insensibilidad a la variación en el color y brillo de suelo de fondo (D'Urso, 2001; Clevers and Verhoef, 1996; Clevers, 1989).

La ventaja que presentan estos índices es básicamente una mayor linealidad con las variables biofísicas, así como menos problemas de saturación para valores de *LAI* por encima de 3 (Gilabert *et al.*, 1996).

III.3.3. Índices Basados en Parámetros de Optimización.

Los conocidos como índices basados en parámetros de optimización, incluyen en su relación (a partir de cocientes entre bandas o bien utilizando la línea de suelo) un parámetro para minimizar la componente de radiación dispersada en la interacción cubierta suelo en el espacio de reflectividades del rojo e infrarrojo cercano.

Definido por Huete (1988) para normalizar el efecto de suelo de fondo es conocido como *SAVI* que incluye un parámetro de optimización $L = 0,5$.

$$SAVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + L} \cdot (1 + L) \quad (III.17)$$

A partir de éste se produce un auge en la definición de nuevos índices de vegetación, que suponen una modificación del propio *SAVI*. De esta serie se puede citar el *TSAVI* (Baret and Guyot, 1991) que introduce el parámetro conocido como X y cuyo valor asignado es 0,8.

$$TSAVI = \frac{a \cdot (\rho_{IRC} - a \cdot \rho_R - b)}{\rho_R + a \cdot \rho_R - a \cdot b + X \cdot (1 - a^2)} \quad (III.18)$$

Indicando que el *SAVI* introduce un parámetro de optimización (L) no constante con el aumento de *LAI*, Qi *et al.* (1994) definen, a partir de éste y teniendo en cuenta esta variación el conocido como *MSAVI*:

$$MSAVI = \frac{2 \cdot \rho_{IRC} + 1 - \sqrt{(2 \cdot \rho_{IRC} + 1)^2 - 8 \cdot (\rho_{IRC} - \rho_R)}}{2} \quad (III.19)$$

Siguiendo la filosofía introducida por Huete (1988), autores como Rondeaux *et al.* (1996) define el *OSAVI*, cuyo parámetro de optimización $Y = 0,16$.

$$OSAVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R + Y} \quad (III.20)$$

De más reciente aparición es el conocido como *GESAVI* (Gilabert *et al.*, 2002). Este índice, definido a partir de un modelo sencillo de reflectividad de la cubierta vegetal depende de la pendiente y de la ordenada en el origen de la línea de suelo, y de un factor corrector del suelo de fondo, denominado Z . Este parámetro viene determinado por la intersección de cada isolínea de vegetación con la línea de suelo y depende por tanto, de la cantidad de vegetación. En una primera valoración (González-Piqueras,

1999) adoptó un valor constante e igual a 0,35. En estudios posteriores (Martínez, 2002) se parametrizó un valor en función del NDVI, de forma que $Z = 0,75$ en el rango $0 \leq NDVI \leq 0,2$ y $Z = 0,35$ en el rango $0 < NDVI \leq 1$.

$$GESAVI = \frac{\rho_{IRC} - a \cdot \rho_R - b}{\rho_R + Z} \quad (III.21)$$

Rondeaux *et al.* (1996), González-Piqueras (1999) y Gilabert *et al.* (2002) han estudiado con precisión la relación comparativa de estos índices con variables agronómicas estableciendo una serie de indicaciones en su uso.

En la tabla III.2 aparece una relación de los índices de vegetación más utilizados indicando sus principales características y los aspectos destacables.

Tabla III.2: Tabla resumen de los índices propuestos en el trabajo junto con las características más destacables.

Nombre	Indicación	Autor
<i>RVI</i>	Presencia de Vegetación.	Pearson and Miller (1972)
<i>NDVI</i>	Presencia Vegetación -Índice de Referencia.	Rouse <i>et al.</i> (1974)
<i>PVI</i>	Presencia de Vegetación - Poco sensible a suelo de fondo.	Richardson and Wiegand (1977)
<i>WDVI</i>	Insensible a suelo de fondo - Definido en su relación con <i>LAI</i> .	Clevers and Verhoef (1993)
<i>SAVI</i>	Insensible a suelo de fondo.	Huete (1988)
<i>TSAVI</i>	Insensible a suelo de fondo - Definido en su relación con <i>LAI</i> .	Baret and Guyot (1991)
<i>MSAVI</i>	Poco sensible a cambio de geometría de iluminación, observación y geometría de cubierta.	Qi <i>et al.</i> (1994)
<i>OSAVI</i>	Poco sensible a la variación de suelo de fondo.	Rondeaux <i>et al.</i> (1996)
<i>GESAVI</i>	Normalizado al efecto de suelo de fondo, sensible al aumento de <i>LAI</i> > 3.	Gilabert <i>et al.</i> (2002)

III.4. Relación de Índices de Vegetación con el coeficiente de cultivo.

La determinación del coeficiente de cultivo, se puede hacer como se citó en la sección III.2.2 a partir de datos tabulados según la longitud de cada etapa en el desarrollo fenológico. Una alternativa a éste es la determinación de estos coeficientes a partir de los índices de vegetación, cubriendo varios objetivos: (1) La observación periódica de la cubierta a través de los índices de vegetación permite describir la evolución temporal del coeficiente de cubierta, (2) El índice de vegetación es sensible a los cambios en la cubierta prolongados en el tiempo, por enfermedades, falta de nutrientes o disponibilidad hídrica, (3) La estimación de necesidades hídricas se puede hacer a nivel de campo y a escala regional a través de un método no destructivo y de bajo coste.

No obstante, conviene aclarar que, ajustándonos a la definición de conceptos dada en la sección III.1 el índice de vegetación proporcionará información sobre la cubierta vegetal en el momento de la observación y esta puede no coincidir con las condiciones estándar sobre desarrollo óptimo de la cubierta establecidas por FAO. El IV permite describir la cubierta en el instante de observación. Por ello, el parámetro que derivamos del IV en todo momento será el **coeficiente de cubierta**, K_c^* , y por tanto el producto $K_c^*ET_o$ representará **una estimación del techo de evapotranspiración de dicha cubierta en el instante de observación**.

En general, tal y como se citó en la sección III.1 interesará conocer la estimación de los requerimientos hídricos de la cubierta calculados a partir de K_c^* , pues la cubierta no siempre se encuentra en condiciones óptimas de manejo, suministro hídrico y de nutrientes (condiciones FAO). Una estimación de las necesidades hídricas según el valor de ET_c cuando el cultivo presente alguna deficiencia supondría un suministro de agua en exceso. Por lo que la estimación más realista sería el valor de ET_c^* , basado en el índice de vegetación.

III.4.1. IV y Coeficiente de Cultivo Basal.

Durante final de los setenta y principios de los ochenta, Heilman (1982) y Tucker *et al.* (1979) observan la evolución temporal similar entre las curvas de coeficiente de cultivo, la evolución de dos de los índices definidos hasta el momento *PVI* y *NDVI*, y la fracción de cobertura vegetal verde para Alfalfa (*Medicago Sativa* L.) y maíz, bajo aportes hídricos localizados en el tiempo. Dicha similitud radica en un paralelismo entre fases, suelo desnudo, crecimiento, meseta y senescencia. Heilman (1982) sugiere que dada la correlación del *PVI* con la fracción de cobertura ($r^2 = 0,911$) y del coeficiente de cultivo con dicha fracción de cobertura ($r^2 = 0,815$) sugiere una relación directa entre los índices de vegetación y el coeficiente de cultivo dejando abierta la discusión debido a la incertidumbre que introduce la variabilidad en el tiempo de la evaporación de suelo de fondo en el coeficiente de cultivo.

Una vez definidos los coeficientes de cultivo basal y de evaporación por Wright (1982), autores como Bausch and Neale (1987) encuentran la similitud en la evolución temporal de los IV y del coeficiente de cultivo basal con el objeto de establecer una correlación entre ellos eliminando así la variabilidad introducida por la evaporación de suelo de fondo (por definición, éstos son poco sensibles a factores ambientales y de suelo). Esta primera relación se establece comparando los rangos de máximo y mínimo de la cubierta vegetal para ambas magnitudes, coeficiente de cultivo basal e índices de vegetación. Esta relación para maíz, establece que cuando se alcanza el valor máximo de K_{cb} , que se da para valores de LAI y fracción de cobertura de 3,2 y 77,6 % respectivamente, el índice de vegetación alcanza su valor máximo. Para minimizar el efecto de la evaporación de suelo, en la evolución del K_c se eliminan los valores obtenidos uno o dos días después del riego. La relación planteada por Bausch and Neale (1987) se hace a partir de la transformación lineal entre el máximo de $NDVI$ para un registro de tres años de datos y el valor de $NDVI$ para suelo desnudo entre los rangos de máximo y mínimo de coeficiente de cultivo $0,15 \leq K_{cb} \leq 0,95$ referidos a alfalfa. La relación que se obtiene es:

$$K_{cb}^*_{alf} = 1,181 \cdot NDVI - 0,026 \quad (III.22)$$

Que introduce la nomenclatura K_c^* para indicar que es el coeficiente de cubierta máximo obtenido a partir de magnitudes espectrales. Esta relación permite además, detectar anomalías en la cubierta como pérdida de hojas por tormentas o situaciones de enfermedad, que combinados con variables ambientales como bajadas o subidas en la temperatura ambiental modifican los estados en el ciclo de crecimiento, que tienen consecuencias directas sobre la transpiración de la cubierta.

Una de los principales inconvenientes de la relación K_{cb}^* es la influencia del NDVI al brillo y color de suelo de fondo (Huete *et al.*, 1985). Es decir, la misma cantidad de vegetación al cambiar el suelo de fondo devuelve valores de índice diferente, lo que se traduce en un valor de coeficiente de cubierta diferente. Esta influencia la estudia Neale *et al.* (1989) al hacer la programación de riegos para una cubierta sobre suelo oscuro encontrando una sobreestimación de las necesidades hídricas hasta en un 25 % respecto a un suelo claro.

Con el objeto de establecer relaciones para diferentes tipos de suelo Neale *et al.* (1989) presenta dos ecuaciones obtenidas de datos empíricos de K_c calculadas desde un lisímetro para dos suelos de fondo diferentes referidos estos coeficientes a alfalfa:

$$\begin{cases} K_{cb}^*_{alf} = 1,092 \cdot NDVI - 0,053 & \text{Suelo Claro} \\ K_{cb}^*_{alf} = 1,181 \cdot NDVI - 0,026 & \text{Suelo Oscuro} \end{cases} \quad (III.23)$$

La exploración de índices que presenten una corrección al ruido de suelo de fondo hace que Bausch (1993) proponga esta relación sobre el índice de vegetación $SAVI$ diseñado por Huete (1988) con este propósito. En el caso de maíz, $SAVI$ alcanza el

valor de 0,7 cuando la vegetación alcanza la cubierta efectiva completa. Dicha relación tomando como superficie de referencia alfalfa queda de la forma

$$K_{cb\ alf}^* = 1,416 \cdot SAVI - 0,017 \quad (\text{III.24})$$

Dicha relación suaviza la curva cuando se producen cambios en la humedad de suelo, detecta anomalías en el normal desarrollo de la planta y no es necesario conocer previamente el valor de variables agronómicas como fracción de cobertura o *LAI* para determinar los estados de desarrollo. Es importante señalar que el *SAVI* es sensible a la velocidad de crecimiento pues los puntos críticos en la curva que describe el coeficiente de cultivo son *EFC* y el principio de la senescencia detectados de manera simultánea a la medida radiométrica (tiempo real). La aplicación de la ecuación III.24 a una escala temporal semanal (Bausch, 1995) para calcular las necesidades hídricas de maíz frente a métodos tradicionales que determinan el coeficiente de cultivo (p. e. en términos de días desde siembra, *DAS*) muestra una mejora en la gestión del consumo hídrico estimada en un 15 %.

De forma similar, Choudhury *et al.* (1994) selecciona el *SAVI* para determinar el valor del coeficiente de transpiración a partir del índice de vegetación. La relación obtenida con datos modelizados es:

$$K_{cb\ alf}^* = 1,69 \cdot SAVI - 0,16 \quad (\text{III.25})$$

Recientemente, en la zona central de Marruecos, Duchemin *et al.* (2006) han proporcionado una relación empírica entre el coeficiente de cultivo basal y el *NDVI* para trigo. Dicha relación está hecha sobre la superficie de referencia indicada en FAO56 (gramíneas):

$$K_{cb\ gr}^* = 1,64 \cdot NDVI - 0,23 \quad (\text{III.26})$$

La comparación en las relaciones III.22-III.26 debido a que están referidas a diferentes superficies de referencia (gramíneas o alfalfa) y en menor medida al cambio en las condiciones climáticas de la zona no permite establecer una generalización en su aplicación.

III.4.2. Fundamentos Teóricos de la relación del coeficiente de cultivo basal con los índices de vegetación.

Modelos detallados de la interacción radiación-cubierta vegetal permiten establecer las relaciones entre coeficiente de cultivo basal y fracción de cobertura con *LAI*:

$$K_{cb}^* = 1 - e^{-\kappa \cdot LAI} \quad (\text{Choudhury } et al., 1994) \quad (\text{III.27})$$

$$f_{cv} = 1 - e^{-\Theta \cdot LAI} \quad (\text{Choudhury, 1987}) \quad (\text{III.28})$$

así como de los índices de vegetación con el LAI (Gilabert *et al.*, 1996; Kustas *et al.*, 1993; Baret and Guyot, 1991; Asrar *et al.*, 1984),

$$IV = IV_{Max} - (IV_{Max} - IV_{Min})e^{-\kappa' \cdot LAI} \quad (III.29)$$

siendo κ y κ' los coeficientes de extinción y Θ la función de distribución del ángulo de orientación foliar. A partir de estas tres ecuaciones se pueden obtener las relaciones teóricas entre K_{cb}^* e IV , mostrando además coherencia en su relación con f_c .

Si se combinan las ecuaciones III.27 con III.28 se obtiene la relación teórica entre coeficiente de cultivo basal y la fracción de cobertura:

$$K_{cb}^* = 1 - [1 - f_{cv}]^{\kappa'/\Theta} \quad (III.30)$$

Consultando los datos existentes en la bibliografía, los valores de κ oscilan entre 0,5-0,7 y los valores de Θ entre 0,4-0,8 y por tanto el cociente del exponente oscilará entre valores de 1,25-0,88. Ecuación que está en consonancia con la experiencia de otros autores en cultivo como alfalfa (Heilman, 1982). No hay que olvidar que la relación III.30 está referido a alfalfa y por tanto su conversión a la superficie de referencia indicada por FAO implica un re-escalado de los valores. Este hecho, en principio, no afecta a la cuasi-linealidad de la ecuación III.30 pues una transformación al cambiar la superficie de referencia adoptaría la forma $K_{cb \text{ grass}} = K_{conversion}[1 - [1 - f_{cv}]^{\kappa'/\Theta}]$, estando $K_{conversion}$ entre 1 y 1,3 dependiendo de la zona climática (Allen *et al.*, 1998).

Con las ecuaciones III.29 y III.28 se obtiene la relación teórica entre el IV y f_c ,

$$\frac{IV_{Max} - IV}{IV_{Max} - IV_{Min}} = [1 - f_{cv}]^{\kappa'/\Theta} \quad (III.31)$$

que revisando los valores de κ' se encuentra una alta dependencia con la configuración de observación/iluminación, bandas espectrales, índice de vegetación, tipo de cubierta (erectófila/planófila), factores atmosféricos y el suelo de fondo. Como referencia los valores de este coeficiente de amortiguamiento para NDVI está en el rango de 0,8-1,3 (Gilabert *et al.*, 1996; Kustas *et al.*, 1993; Baret and Guyot, 1991), y para SAVI en el rango 0,5-0,7 (Choudhury *et al.*, 1994). Así, para NDVI el rango de valores oscila en torno al valor 1,5 y para SAVI está entre 0,8-1,4. Con estos valores del exponente, salvo para los valores más altos de fracción de cobertura, ambos índices mostrarán una relación cuasi-lineal. La diferencia teórica entre ambos será una saturación del NDVI a valores cercanos a la unidad en la fracción de cobertura vegetal.

Finalmente, a partir de las ecuaciones III.29 y III.27 se obtiene la relación,

$$K_{cb}^* = 1 - \left[\frac{IV_{Max} - IV}{IV_{Max} - IV_{Min}} \right]^{\frac{\kappa}{\kappa'}} \quad (III.32)$$

Observando el rango de variación del cociente $\frac{\kappa}{\kappa'}$ entre 0,7-1,4 para SAVI y 0,4-1 para NDVI. El rango de valores del exponente en torno a la unidad ha hecho que autores

como Choudhury *et al.* (1994) se haya decantado por el SAVI para la estimación del K_{cb}^* obteniendo la relación III.25. Esta desviación de la linealidad en los rangos del exponente para NDVI y SAVI se puede observar en la figura III.11, y a la vista de los resultados teóricos nos permite hablar de una relación cuasi-lineal del coeficiente de cultivo basal con SAVI y NDVI.

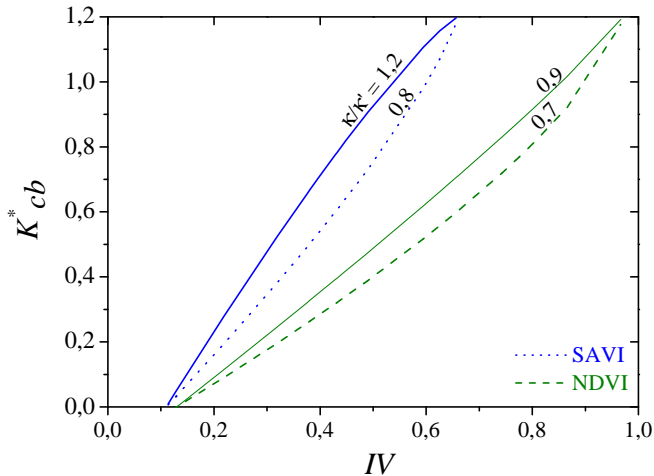


Figura III.11: Representación del coeficiente de cultivo basal frente a dos índices de vegetación NDVI y SAVI variando el cociente de las variables κ/κ' .

La deducción expuesta anteriormente (eq. III.32) sirve tanto para una superficie de referencia de alfalfa como gramínea pues la conversión de los valores de K_{cb}^* a una u otra supone un re-escalado a través de un factor que varía desde 1-1,30 según sea ambiente árido-húmedo.

III.4.3. Ritmos de crecimiento y transpiración de la cubierta e IV.

Se ha visto en el apartado anterior que la orientación y distribución de las hojas en la cubierta tiene un papel clave en la intercepción de la radiación y por tanto en la transpiración (Villalobos and Fereres, 1990; Richtig and Burnett, 1971). Esta radiación absorbida por la cubierta es un factor determinante en el proceso de transpiración cuando el cultivo no está limitado en su crecimiento por la disponibilidad de agua en suelo (Tanner and Jury, 1976). Los IV describen mejor ritmos, ya sea de crecimiento, de fotosíntesis o de transpiración que valores absolutos de parámetros biofísicos (Sellers, 1987). Desde un punto de vista simplificado, el ritmo con que una

cubierta vegetal asimila la radiación incidente está en relación con la fracción de radiación absorbida fotosintéticamente activa (f_{APAR}) también relacionada con el ritmo de evapotranspiración.

Sin querer entrar en el análisis pormenorizado de los elementos que intervienen en la vinculación de la evapotranspiración con ritmos de producción, para dar luz a la asociación de los índices de vegetación con los ritmos biofísicos en la cubierta vegetal se describe el uso de los modelos LUE o *Light Use Efficiency models* (Kumar and Monteith, 1981). Estos modelos asocian el valor integrado en el tiempo de la radiación absorbida por la cubierta con la producción de materia. Un proceso en su evolución temporal comparable al valor integrado en el tiempo de la evapotranspiración que es la evapotranspiración acumulada.

Los modelos LUE establecen que la producción primaria de biomasa seca en una cubierta ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) está relacionada con la fracción de radiación absorbida por la relación Gower *et al.* (1999); Asrar *et al.* (1989):

$$B = \int \varepsilon \cdot f_{APAR} \cdot PAR \cdot w \cdot dt \quad (\text{III.33})$$

donde ε es la eficiencia en la conversión de radiación en biomasa seca, PAR es la radiación fotosintéticamente activa, y w es un factor de estrés hídrico que relaciona la evapotranspiración de la cubierta en su estado real respecto a las condiciones que tendría en condiciones óptimas. Diferentes estudios muestran una relación cuasi-lineal entre la f_{APAR} y estos índices de vegetación (Asrar *et al.*, 1984). La introducción del índice de vegetación se hará en su relación con f_{APAR} según Sellers *et al.* (1997); Asrar *et al.* (1984),

$$f_{APAR} = a \cdot NDVI + b \quad (\text{III.34})$$

La combinación de esta relación en la ecuación III.33 devuelve,

$$B = \int \varepsilon \cdot [a \cdot IV + b] \cdot PAR \cdot w \cdot dt \quad (\text{III.35})$$

Siguiendo las indicaciones de Wiegand *et al.* (1991) utilizando valores constantes de w , ε y PAR para cada uno de los estados de desarrollo, la expresión III.35 permite introducir el concepto de valor integrado en el tiempo de IV (*Integrated in Time of VI, IntIV*) (Yang *et al.*, 1998). Con esta nomenclatura la producción primaria se puede expresar como,

$$B = m \cdot IntVI + n \quad (\text{III.36})$$

Que como se observa a partir de la ecuación III.33 el ritmo de generación de biomasa es decir, la variación de la biomasa con el tiempo conocido como $CGR = \frac{dB}{dt}$ esta relacionada con el índice de vegetación según,

$$CGR = (a \cdot VI + b) \cdot w \cdot PAR \cdot \varepsilon \quad (\text{III.37})$$

Ecuación que para cultivos en óptimas condiciones de suministro hídrico ($w = 1$) dependerá básicamente en cada periodo de desarrollo del cultivo de la eficiencia en la conversión de radiación a biomasa (ϵ).

La linealidad en la relación de la biomasa y la ET acumulada en el mismo periodo de tiempo ha sido constatada experimentalmente por diversos autores en el último siglo. Dicha relación sobre datos de diferentes cultivos como trigo, maíz, sorgo o avena se manifiesta lineal (Hanks and Rasmussen, 1983). Esta linealidad se muestra evidente en la relación con la transpiración del cultivo, donde autores como Hanks and Rasmussen (1983) establecen una relación de proporcionalidad entre ambos:

$$B = K \cdot T \quad (\text{III.38})$$

Donde K es la constante de proporcionalidad o la eficiencia de la transpiración. La relación de la biomasa con la evapotranspiración acumulada en el mismo periodo de tiempo introduce un corte en ordenadas distinto de cero en la representación B versus ET .

$$B = a + b \cdot ET \quad (\text{III.39})$$

Para cultivos anuales con producción de grano esta función no pasa por el origen, mientras que en cultivos perennes establecidos (alfalfa) pasa por el origen o muy cerca de éste (Stewart and Hagan, 1969). La pendiente en la relación B vs ET depende del potencial de producción del material vegetal (genotipo) y del medio pedoclimático, por ello su aplicación depende del cultivo y de su situación geográfica (De Juan and de Santa-Olalla, 1992).

La relación lineal se ha discutido pues para valores altos de ET presenta una ligera curvatura, por lo que algunos autores han propuesto modelos cuadráticos en cultivos como algodón (Grimes *et al.*, 1969). Esta relación se acerca a la linealidad si se eliminan los valores altos de ET al aparecer la percolación de agua a capas más profundas o escorrentía superficial (Stewart and Hagan, 1973). Este efecto de pérdida de linealidad se produce cuando se aumenta la frecuencia de riego, o aparecen factores como ataques de plagas, deficiencia de aireación en la rizosfera, el encamado o deficiencias heliotérmicas (De Juan and de Santa-Olalla, 1992; Hillel and Guron, 1973). Por tanto en condiciones óptimas de crecimiento y suministro de agua y nutrientes, se mantiene esta linealidad en la relación de la biomasa tanto con la transpiración como con la evapotranspiración acumuladas.

Dado que los coeficientes de la relación lineal son dependientes de la cubierta vegetal y las condiciones climáticas, referir estos valores a cubiertas de referencia medidos simultáneamente, permite normalizar en gran medida esta dependencia. El coeficiente de cultivo refiere la transpiración de la cubierta a una cubierta de referencia, si recordamos su definición, y se tiene en cuenta la relación III.38, se cumple que la proporción entre los ritmos de transpiración y crecimiento respecto a la superficie

de referencia son proporcionales en cada una de las fases de desarrollo del cultivo:

$$K_{cb}^* = \frac{T_c^*}{ET_o} \propto \frac{[\frac{dB}{dt}]_c}{[\frac{dB}{dt}]_{ref}} \quad (III.40)$$

Si en la ecuación III.40 se introduce la relación III.37 se obtiene el cociente:

$$K_{cb}^* \propto \frac{[a \cdot IV + b] \cdot w \cdot \epsilon}{[a' \cdot IV_{ref} + b'] \cdot w_{ref} \cdot \epsilon_{ref}} \quad (III.41)$$

Que para cultivos en óptimo estado de suministro hídrico, en ambos casos se puede hacer $w = 1$, y por definición, la superficie de referencia cumplirá en todo momento que $w_{ref} = 1$. Por otro lado, la cubierta de referencia (tanto alfalfa como gramínea) marcará un valor de IV aproximadamente constante en el tiempo, al ser mantenida en condiciones óptimas de crecimiento tal y como indica FAO, esto nos lleva a un valor cuasi constante a lo largo del ciclo del factor $a' \cdot IV_{ref} + b'$. No obstante, el valor de eficiencia cambia en los diferentes estados de desarrollo de la cubierta (Wiegand and Richardson, 1990), y ϵ_{ref} puede cambiar con el tiempo. Esto último puede introducir un factor de variabilidad en la relación K_{cb}^* con IV.

III.4.4. Influencia de la Humedad de Suelo en la relación K_c^* - IV.

Dentro de la complejidad que supone el proceso de evapotranspiración, como se ha visto anteriormente la relación entre la transpiración de la planta y su actividad fotosintética subyace en la correlación K_{cb}^* con los IV. Un factor de influencia en la relación K_c^* - IV es el estado de humedad del suelo. Cuando el suelo está seco, la transpiración de la planta es mayor que en el caso de suelo mojado debido a la diferente interacción suelo-vegetación en condiciones de suelo mojado y seco (Villalobos and Fereres, 1990; Ritchie, 1983). En situación de suelo de fondo seco en superficie el déficit de presión de vapor en la masa de aire circundante a la cubierta es mayor provocando un aumento en la transpiración, por tanto la misma cubierta sobre suelo seco presentará un valor de K_{cb}^* mayor. Cuando el suelo de fondo está mojado al contrario que K_{cb}^* , los valores de K_c^* son mayores que sobre suelo seco debido a la contribución de la evaporación de suelo. El resultado de la interacción entre la evaporación de suelo y la transpiración de la cubierta es tal que una disminución en la evaporación de suelo queda parcialmente compensado por un aumento en la transpiración de la cubierta. Este comportamiento es menos acusado cuando los estomas de las hojas son sensibles a la humedad (Choudhury and Monteith, 1988).

El efecto bien conocido ya introducido por la variación en el brillo y color de suelo de fondo sobre los IV al correlacionar estos con otros parámetros agronómicos como LAI o f_c , se manifiesta en su relación con el K_{cb}^* . Esta influencia de los eventos de riego o lluvia en una cubierta se acentúa al relacionar los valores de K_c^* diarios con los IV. Diseñar una experiencia donde se pueda estudiar esta influencia sobre

datos experimentales es complicado, por lo que existen estudios de algunos autores a partir de modelos. Es bastante ilustrativo el estudio presentado por Choudhury *et al.* (1994) donde se muestra la comparativa sobre NDVI, SAVI y TSAVI a la normalización del suelo de fondo en su relación con K_{cb}^* , donde SAVI ofrece menos dependencia a la variación del estado de humedad del suelo (figura III.12). Aunque el índice de vegetación está definido para detectar cambios en el nivel de vegetación normalizando otros efectos de suelo de fondo, existe una divergencia en la relación K_{cb}^* con NDVI al variar la humedad en el suelo de fondo, que es debida a que sobre suelo mojado el albedo es menor pero los valores de NDVI presentan una ligera variación con la humedad.

Cuando se tienen en cuenta las variables medioambientales, el principal efecto sobre la relación K_c^* vs IV son los eventos de lluvia o riego localizados en el tiempo, donde la duración de las etapas de evaporación de suelo desnudo están gobernadas por la conductividad hidráulica del suelo, clima y frecuencia del aporte hídrico. La modelización hecha por Choudhury *et al.* (1994) incluyendo diferentes frecuencias de riego muestra la influencia de este efecto sobre dos de los índices propuestos, NDVI y SAVI. Estos datos están representados en la figura III.13 donde se observa una menor dispersión de los valores para SAVI que para NDVI. Hay que añadir en ambos casos que para los valores altos de índice de vegetación se observa una saturación que es reflejo de la saturación que ofrecen los índices de vegetación para valores de LAI altos (Gilbert *et al.*, 1996).

Si consideramos la evolución del coeficiente de cultivo a lo largo del ciclo de crecimiento del cultivo cada etapa viene caracterizada por un nivel de cobertura, variando LAI y f_c . Durante la etapa inicial, cuando la cobertura es baja la evaporación de suelo después de un evento de riego provoca un aumento en la evapotranspiración aumentando por tanto los valores de K_c^* . A medida que la cubierta va alcanzando el nivel de cobertura efectiva completa predomina la componente de transpiración existiendo mayor acuerdo con el IV. En la figura III.14 se muestra la representación del coeficiente de cultivo frente a NDVI para una cubierta de patata a escala de satélite en diferentes momentos del desarrollo fenológico. La figura está adaptada de Tasumi *et al.* (2006) los valores están obtenidos a partir del modelo SEBAL y el NDVI a escala de satélite siendo el rango de valores de éste último sensiblemente menor que a nivel de campo. Al inicio del crecimiento del cultivo, en la fecha del 2 de Mayo en la figura III.14 la cobertura es baja existiendo zonas de suelo mojado y seco en superficie simultáneamente para los mismos valores de NDVI, la consecuencia de ello son todos los valores de K_c agrupados en un estrecho rango de valores de NDVI. A medida que la cubierta entra en la etapa de desarrollo (19 Junio) la nube de puntos se alinea mostrando una relación lineal mejor definida. Durante la época de máximo en la cobertura (5 Julio), los valores de K_c en la parcela son máximos debido al máximo valor de transpiración que de forma análoga ocurre con los valores de NDVI máximos al ser máxima la actividad fotosintética. Este comportamiento

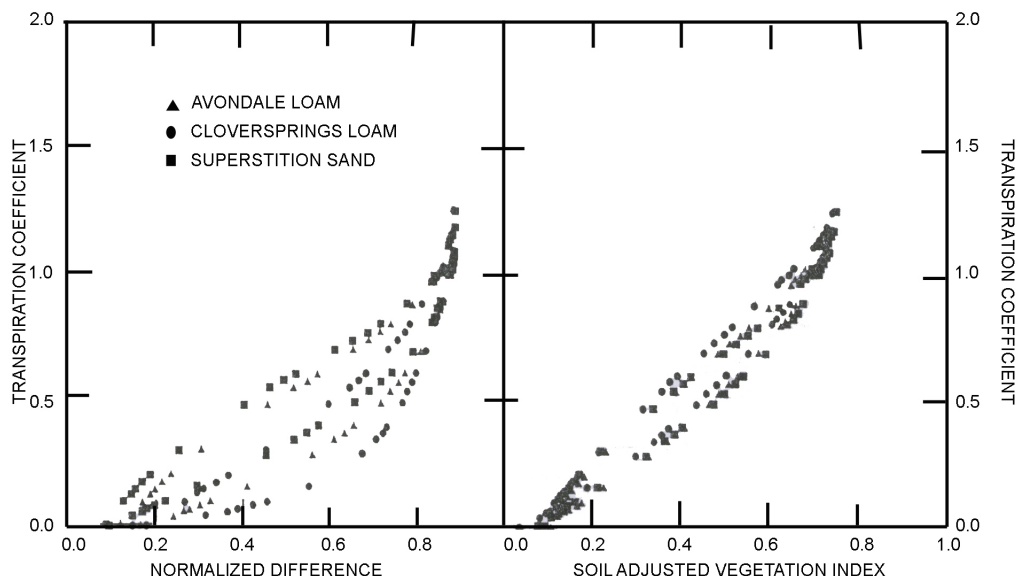


Figura III.12: Relación entre el coeficiente de transpiración y dos índices de vegetación NDVI y SAVI. Se representan seis tipos de suelo, para cada valor de IV se ha representado los valores de K_{cb} para los tres suelos propuestos (seco y mojado). Se han utilizado tres símbolos diferentes para los diferente suelos siendo idénticos para el mismo suelo mojado y seco (adaptado de Choudhury *et al.* (1994)).

según avanza la etapa de plateau (22 Agosto) e inicio de la senescencia (7 Sept.) vuelven a mostrar esa relación lineal. Durante la senescencia cuando el cultivo pierde la clorofila y por tanto disminuye la actividad fotosintética los valores de NDVI son bajos, pero debido a la presencia de lluvias existen regiones de las parcelas con suelo en diferentes regímenes de evaporación encontrando una distribución continua en los valores de K_c . Por tanto, en las etapas inicial y final será donde el IV se muestra más insensible a los cambios en la evapotranspiración.

Como se ha expuesto anteriormente, y a pesar de la robustez de los IV, debido a la influencia que introduce la variabilidad en la humedad de suelo en la relación K_c^* -IV hace que la implementación en los sistemas de gestión hídrica de cultivos no es inmediata. Las exigencias de estos sistemas van encaminadas a la optimización de los recursos hídricos por lo que deben tener en cuenta tanto la componente de evaporación de suelo así como la transpiración de la cubierta.

La primera metodología que tiene en cuenta el estado de humedad de suelo en la relación K_c^* -PVI es propuesta por Heilman (1982) definiendo un parámetro auxiliar para detectar el estado hídrico del suelo. Posteriormente, y consciente de la limitación

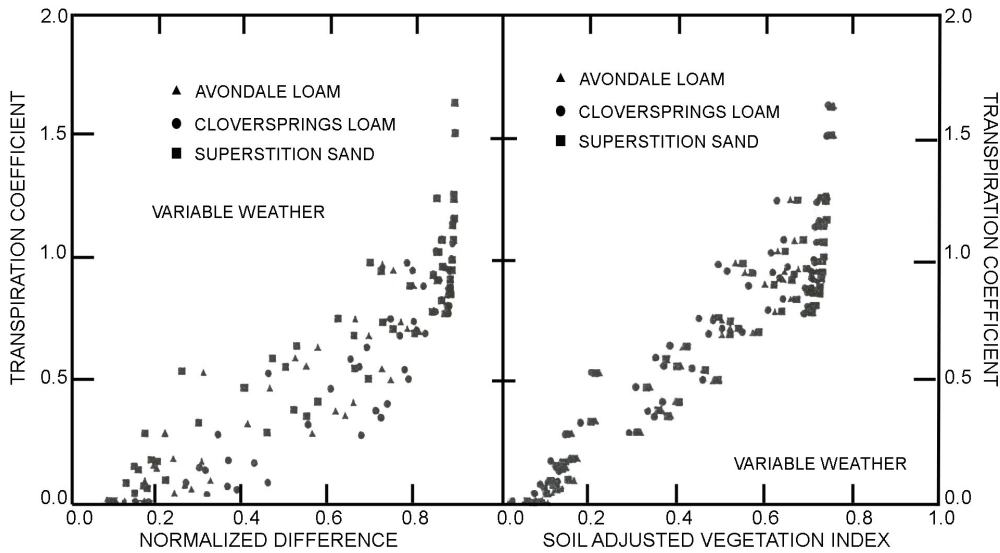


Figura III.13: Representación análoga a la figura III.12 pero introduciendo aportes hídricos localizados en el tiempo, es decir, variando la humedad de suelo. Se muestra la relación del coeficiente de cultivo basal con NDVI y SAVI. Los resultados para los tres tipos de suelo presentados se muestran con tres símbolos diferentes (adaptado de Choudhury *et al.* (1994)).

que introduce la ya comentada evaporación de suelo, Bausch (1995) mantiene la correlación entre la transpiración de la cubierta y el índice de vegetación (SAVI, TSAVI, NDVI) (Bausch, 1993; Bausch and Neale, 1989; 1987) mediante la relación III.24 introducida en el sistema de programación de riego SCHED (Buchleiter *et al.*, 1988) con la superficie de referencia alfalfa. El algoritmo utilizado estima la ET_c^* mediante el balance hídrico en suelo donde uno de los inputs es la transpiración de la cubierta. Para completar la curva de K_{cb}^* en los intervalos de tiempo entre los que no se dispone de medida radiométrica que se hace aproximadamente cada 7 días, se utiliza el método de los días de crecimiento acumulados desde el día de siembra con el umbral de temperatura (10- 30°C). La ventaja de esta metodología radica en la documentación existente sobre el ciclo de crecimiento de determinados cultivos proporcionados por la compañía que selecciona y distribuye la semilla. La curva se genera con un valor de K_{cb} inicial de 0,15 en la siembra, mediante una relación lineal del tipo $K_{cb} = a + b \cdot f_{GDD}$, donde a , b y f_{GDD} son respectivamente el corte en ordenadas, la pendiente y la fracción de los días acumulados frente al total del ciclo. Comenzando con el segundo y sucesivos valores de K_{cb}^* estimados desde SAVI, el K_{cb} calculado mediante la relación con f_{GDD} se compara con el 95 % del límite de confianza de la media de K_{cb}^* , si está dentro de este límite de confianza se mantiene esta pendiente y

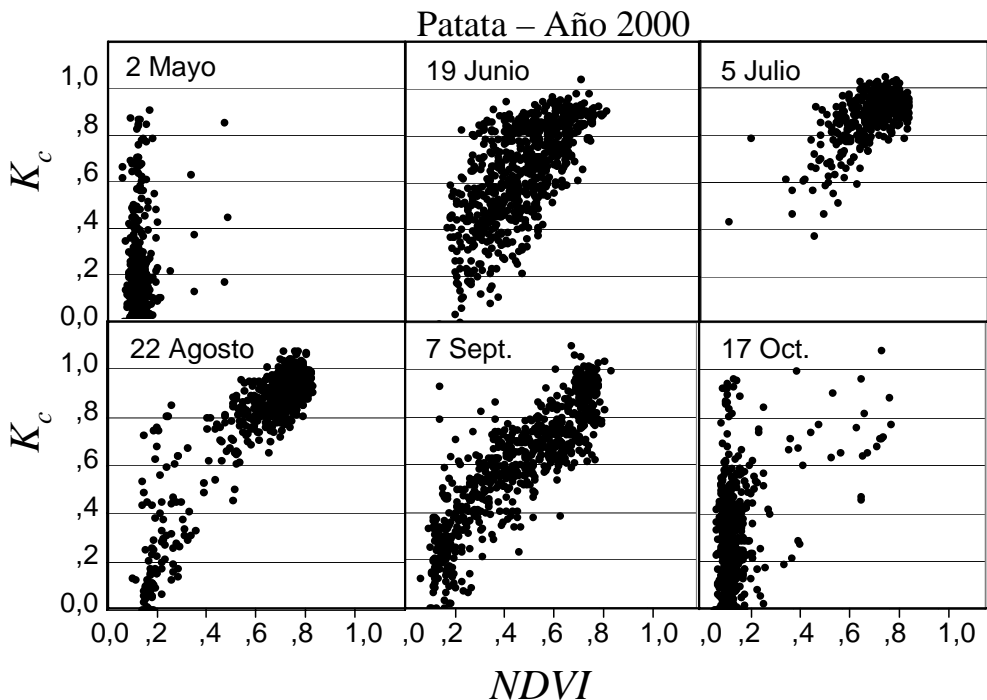


Figura III.14: Representación de K_c frente a $NDVI$ en varios días de su ciclo fenológico para una parcela de patata durante el año 2000 (adaptado de Tasumi *et al.* (2006)).

ordenada. Si el K_{cb} calculado a través de f_{GDD} sale fuera de estos límites se genera una nueva pendiente y ordenada utilizando los dos valores más recientes de K_{cb}^* obtenidos con SAVI. La curva obtenida por este método para un ciclo de maíz durante el año 1991 está representada en la figura III.15 frente a los valores de K_{cb} indicados por Wright (mediante el LAI), la curva directamente obtenida aplicando la relación III.24 y los valores de LAI dentro del mismo ciclo. Esta figura muestra que la curva de K_{cb}^* obtenida desde SAVI no alcanza el máximo hasta el DOY 202. Mostrando además, sensibilidad a una defoliación de las hojas superiores de la cubierta ocurrida el día 220 debido a una fuerte tormenta. Después de este día, la curva obtenida mediante SAVI ofrece una brusca disminución, mostrando la principal capacidad de la metodología, en su respuesta más rápida a modificaciones dentro de la cubierta y por tanto de sus necesidades hídricas para el óptimo desarrollo del cultivo.

Con el objetivo de mejorar los valores de la evapotranspiración mediante la observación y el seguimiento de una cubierta, Hunsaker *et al.* (2003) proponen una metodología mixta en la descripción de la curva de K_{cb}^* a lo largo de todo el ciclo del cultivo. Basada de forma análoga a los anteriores en la relación que experimenta el coeficiente de cultivo basal con el índice de vegetación, pero incluyendo en la última

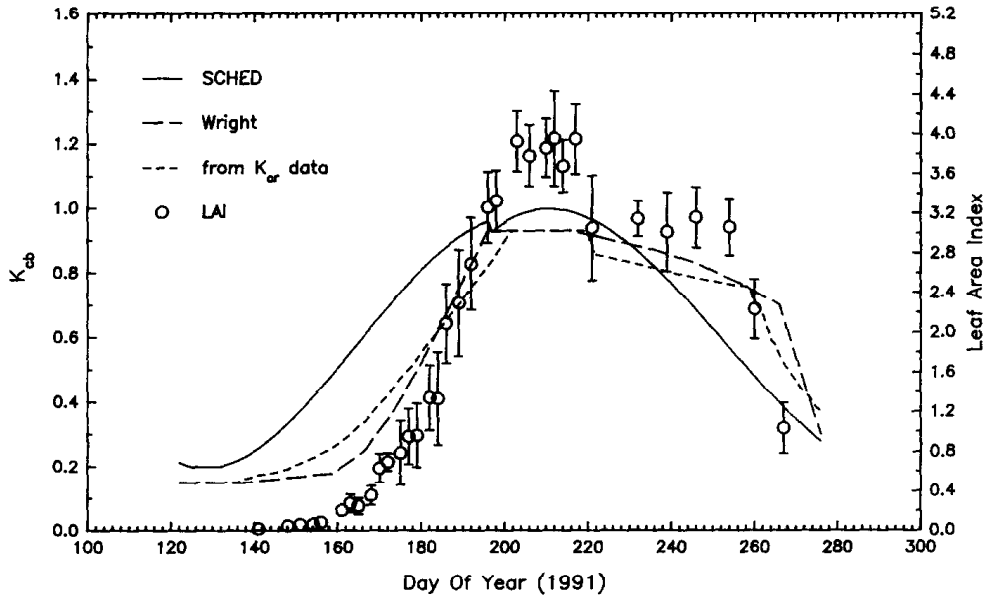


Figura III.15: Curvas del coeficiente de cultivo basal correspondientes a maíz obtenidas según el algoritmo SCHED, según Wright, según la relación III.24 y los valores de LAI en el mismo ciclo del cultivo (adaptado de Bausch (1995)).

parte del ciclo del cultivo una relación con el grado de días de crecimiento (GDD). Este ajuste se hace teniendo en cuenta el hecho de que para el cultivo de algodón desde la siembra hasta que se alcanza la cubierta efectiva completa tanto NDVI como K_{cb}^* presentan una evolución similar, a partir de alcanzar EFC la evolución temporal de NDVI y K_{cb}^* no parece ser comparable (fig. III.16). Para ello establece dos niveles en la determinación del coeficiente de cultivo basal: desde la fase de siembra hasta que el valor del índice de vegetación alcanza un valor de 0,80 donde se puede establecer una relación lineal entre K_{cb}^* y NDVI, por encima del cual se considera el cultivo ha alcanzado la cubierta efectiva completa estableciendo una regresión múltiple entre K_{cb}^* y NDVI introduciendo además el parámetro conocido como grados día de crecimiento acumulados $CumGDD$. La acumulación de GDD comienza cuando $NDVI=0,80$ (\approx cubierta efectiva completa), calculando el GDD por el método de la curva seno utilizando los umbrales de máximo y mínimo de la temperatura de 30 y 12,8 °C respectivamente. Con este criterio, la relación aplicada es:

$$\begin{cases} K_{cb}^* = 1,49 \cdot NDVI - 0,12 & \text{Si } 0,15 \leq NDVI \leq 0,80 \\ K_{cb}^* = 2,80 \cdot NDVI - 5,69 \cdot 10^{-4} \cdot CumGDD - 1,17 & \text{Si } NDVI > 0,80 \end{cases} \quad (III.42)$$

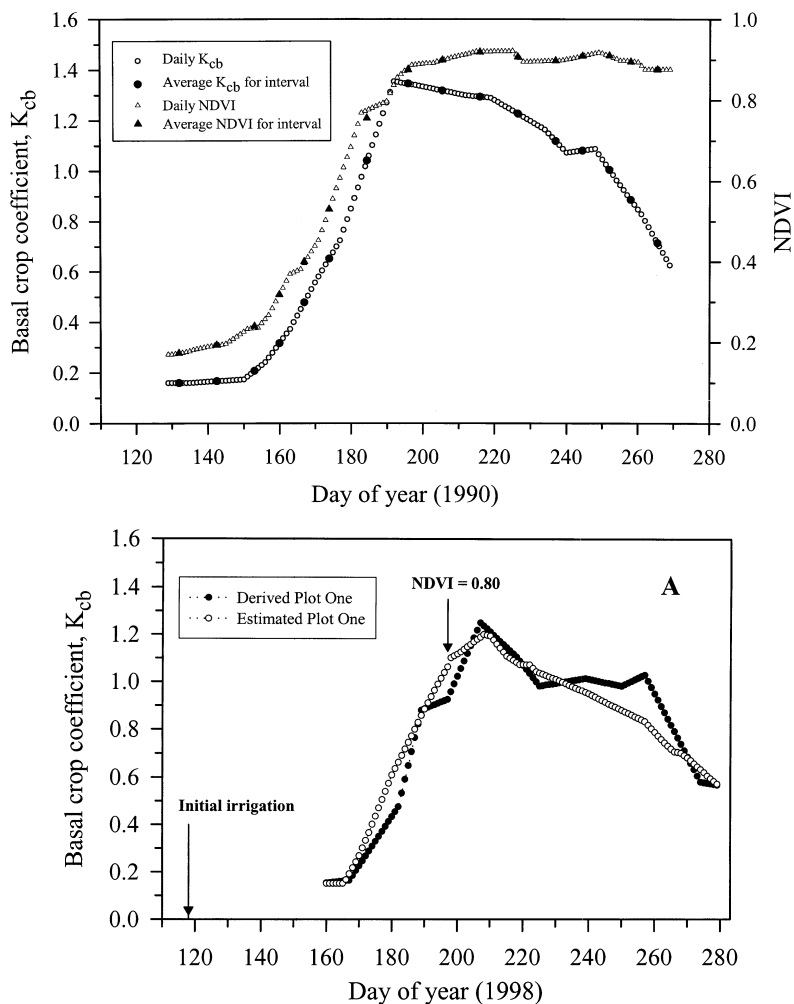


Figura III.16: En la figura superior se han representado K_{cb} y NDVI para el cultivo de algodón durante el año 1990 donde también se indican los valores medios de cada magnitud. En la figura inferior se ha representado la comparación del K_{cb} diario calculado en el balance de agua en suelo con el modelo $K_{cb} - NDVI$ para algodón en el año 1998 (adaptado de Hunsaker *et al.* (2003)).

Los resultados de la metodología aplicada sobre algodón muestran un ajuste a los datos de campo como se puede apreciar en la figura III.16-B, que durante la mayor parte del ciclo reproduce los valores de K_{cb}^* excepto en el periodo de DOY 230-260 donde el coeficiente de cultivo basal basado en NDVI infraestima el valor medido en campo. No obstante, esta metodología proporciona el valor de la componente de

transpiración, siendo necesario obtener la componente de evaporación mediante la medida de humedad en suelo.

Por lo visto anteriormente, las dos metodologías basadas en el IV no permiten la estimación de la evaporación de suelo desnudo. Por tanto, se hace necesario la determinación de la componente de evaporación de suelo a nivel de campo para hacer una estimación completa de la ET_c^* .

III.5. Conclusiones.

En el presente capítulo se ha hecho una breve revisión de los métodos más utilizados en la medida y estimación de la evapotranspiración. Se ha destacado el método conocido como $K_c \cdot ET_o$ por su carácter operacional en la determinación de las necesidades hídricas de las cubiertas. Es por este motivo que el seguimiento del coeficiente de cultivo se plantea desde los índices de vegetación espectrales, haciendo un repaso de los más utilizados en la bibliografía. La relación planteada entre el coeficiente de cultivo basal y los índices de vegetación es lineal aunque la comparación entre los diferentes modelos propuestos por otros investigadores debe hacerse con cautela al ofrecer diferencias al estar referidos unos a alfalfa, otros a festuca, unos están simulados, otros medidos, etc... tal y como vienen recogidos en la tabla III.3.

Tabla III.3: Tabla resumen de las relaciones K_{cb} vs IV más utilizadas en la bibliografía. Aparecen indicado el cultivo de referencia (alfalfa o gramínea) así como el autor.

Ecuación	Sup. Referencia	Autor
$1,181 \cdot NDVI - 0,026$	Alfalfa	Bausch and Neale (1987)
$1,092 \cdot NDVI - 0,053$	Alfalfa	Neale <i>et al.</i> (1989)
$1,416 \cdot SAVI - 0,017$	Alfalfa	Bausch (1993)
$1,69 \cdot SAVI - 0,16$	Alfalfa	Choudhury <i>et al.</i> (1994)
$1,64 \cdot NDVI - 0,23$	Gramíneas	Duchemin <i>et al.</i> (2006)

El estudio desde el punto de vista teórico justifica la linealidad entre K_{cb}^* y los IVs más utilizados teniendo en cuenta la variabilidad introducida por la arquitectura de la cubierta. Coherencia también observada en la linealidad entre los índices de vegetación y la fracción de cobertura utilizando los datos existentes en la bibliografía.

La relación entre los IV y K_{cb}^* muestra la relación de estos índices de vegetación con indicadores de los ritmos biofísicos en la cubierta como es la evapotranspiración, en relación a su vez con el ritmo de producción de biomasa. Haciendo uso de las funciones de producción que relacionan biomasa con la evapotranspiración acumulada y de los modelos de eficiencia que relacionan ritmos de crecimiento y ritmos de absorción de radiación se demuestra la coherencia en la relación lineal K_{cb}^* e IV. Así, la ET_c^* determinada a través de los índices de vegetación representa el valor de la evapotranspiración de una cubierta vegetal en el momento de observación y bajo condiciones óptimas de desarrollo, sin limitaciones en el suministro hídrico y de nutrientes.

Ambos caminos en la deducción de la relación entre K_{cb} e IV nos permiten dar luz a la dependencia de la pendiente y ordenada con factores determinantes como el tipo de cubierta, de suelo y climáticos. Estas limitaciones hacen que sea necesario definir una relación entre el coeficiente de cultivo basal y el índice de vegetación en la zona de estudio.

La evaporación de suelo desnudo hace que la relación K_c^* - IV muestre una linealidad menos definida, especialmente en la etapa de nacimiento cuando la fracción de cobertura es más baja. Por ello, se han planteado estrategias en la aplicación operativa de cara a la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos. Estas estrategias introducen información auxiliar como los días de crecimiento de los cultivos, bien porque el periodo temporal de los datos espectrales es demasiado amplio y en un asesoramiento diario hay que generar una curva de K_c^* continua o bien porque ésta se desvía de los valores de ET_c^* medidos y hay que adaptar la relación aplicada. Así, la principal ventaja de esta metodología como ponen de manifiesto la mayoría de los autores en la bibliografía es su carácter no destructivo y su bajo coste de aplicación, así como su capacidad de detectar anomalías en la cubierta (defoliación, plagas, ...).

Por tanto, a la vista de lo expuesto en el presente capítulo las principales aportaciones que se plantean en el trabajo serán,

- Analizar la dinámica de la evolución de la evapotranspiración y del coeficiente de cultivo sobre datos experimentales en la zona de estudio.
- Discutir sobre datos experimentales el potencial de los IV en la estimación de la curva de K_c^* y por tanto de la ET_c^* . Determinar la escala temporal de trabajo adecuada para minimizar la variabilidad introducida en la evaporación de suelo desnudo sin perder el carácter operacional de la estimación de K_c^* a partir de los índices de vegetación.
- Estudiar la generalidad de la relación empírica entre el coeficiente de cultivo y los índices de vegetación más utilizados.
- Evidenciar la relación de los IV con los ritmos biofísicos en términos de evapotranspiración y biomasa.

CAPÍTULO IV

Datos de Campo.

Many soil water budgets requires estimation of *ET* on a daily basis. Because *ET* is the primary component of the soil water balance, accuracy in *ET* estimation is usually paramount of accuracy in soil water accounting, irrigation system design and management, crop yield simulation and hydrologic studies. A common procedure for estimating *ET* for a well-watered agricultural crop is to first estimate *ET* for a standard surface and to then apply a empirical crop coefficient such as those presented by Doorenbos and Pruitt (1977), and Wright (1981, 1982).

El balance de agua en suelo requiere la estimación de ET a escala diaria. Debido a que la ET es el componente primario en el balance de agua en suelo, es primordial la precisión en la estimación de la ET para obtener precisión en el cálculo del contenido en agua del suelo, en la gestión y diseño de sistema de riego, en la simulación de producción y en estudios hidrológicos. Un método común para cuantificar la ET para un cultivo en buen estado hídrico es primero estimar la ET para una superficie estándar y después aplicar un coeficiente de cultivo empírico como los presentados por Doorenbos y Pruitt (1977), y Wright (1981,1982). (Allen et al., 1989)

Para cubrir los objetivos propuestos en el capítulo III se han planteado dos campañas experimentales sobre cultivos representativos en la zona del acuífero Mancha Oriental. Los cultivos seleccionados han sido maíz durante la primavera-verano del año 2001 y trigo durante el invierno-primavera del año 2003. La colección de datos medidos en campo permite mostrar el seguimiento en el desarrollo de ambas cubiertas a lo largo de su ciclo de crecimiento. Dicho seguimiento se hace en términos de la evolución temporal de parámetros agronómicos como la evapotranspiración, fenología, índice de área foliar, altura del cultivo, fracción de cobertura vegetal, biomasa y reflectividad de la cubierta.

En este capítulo se exponen las técnicas de medida de cada uno de los parámetros así como las exigencias que dicha instrumentación requiere. Para la medida de la evapotranspiración, tal y como se introdujo en el capítulo anterior, se ha utilizado la lisimetría por ser *un método que permite medir de forma directa la evapotranspiración de la cubierta* (Rana and Katerji, 2000). La selección de este método va acompañada del acceso que el grupo de Teledetección y S.I.G. de la UCLM tiene a las instalaciones de lisimetría del Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP) en Albacete. Simultáneamente en el tiempo, se dispone de un registro continuo de medidas de dos estaciones agrometeorológicas dentro de las instalaciones de trabajo, estos datos permiten el cálculo de la evapotranspiración de referencia y por tanto la aplicación de la metodología FAO56.

IV.1. Zona de trabajo: Estación Lisimétrica

La zona de trabajo se encuentra situada en la finca experimental de *Las Tiesas*, propiedad de la Excm. Diputación Provincial de Albacete y gestionada por el Instituto Técnico Agronómico Provincial. La finca se encuentra situada en los términos municipales de Barrax y Albacete (España) cuyas coordenadas medias son $39^{\circ} 14'$ latitud Norte y $2^{\circ} 5'$ latitud Oeste con una altitud de 695 m sobre el nivel del mar.

La estación cuenta con tres lisímetros de pesada continua con lectura electrónica de datos, rodeados cada uno de ellos por una parcela de protección de forma cuadrada y de una hectárea de superficie. La parcela en su conjunto tiene una extensión de 9,68 ha, equipada con una instalación de riego fijo. Además de los lisímetros descritos se experimenta con diferentes ensayos de programación de riegos. Un lisímetro se dedica al cultivo de herbáceos, otro al cultivo de festuca y el tercero se utiliza para cultivos leñosos (fig. IV.1).

La zona de ubicación de la estación lisimétrica está encuadrada en el sector oriental de la llamada *Llanura Manchega* que como se citó en el capítulo II forma parte del amplio contexto de las cuencas internas continentales neógenas de la submeseta meridional. Los materiales que componen el suelo son por lo tanto neógenos (Plioceno Superior) depositados en ambientes lacustres someros, resultando un conjunto heterogéneo de margas y calizas con encostramientos laminares a techo (Fabeiro, 1995). Según la *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1998), el suelo de la estación lisimétrica se cataloga como Petrocalcic Calcixerepts:

Orden.- Inceptisol

Suborden.- Xerepts

Gran Grupo.- Calcixerepts

Subgrupo.- Petrocalcic Calcixerepts

El perfil del lisímetro se ha caracterizado en su momento de construcción e instalación. La fisiografía del terreno es en planicie, con relieve llano de pendiente menor al 1%. El drenaje es bueno.

Las características de los distintos horizontes encontrados son:

Horizonte Ap1, Profundidad de hasta 15 cm, color pardo oscuro, no se observan manchas, de color 7,5 YR 3/4 (h). Textura franco-arcillo-limosa. Estructura débil en bloques subangulares de tamaño grueso. Friable, ligeramente plástico y adherente. Frecuentes poros finos, discontinuos de orientación caótica. Muy pocos elementos gruesos de tamaño grava meteorizados de forma angular y naturaleza caliza. Sin presencia de nódulos ni capas endurecidas. Calcáreo. Muy pocas raíces de tamaño muy fino, mediano y grueso. Transición gradual y ondulada.

Horizonte Ap2, Profundidad 15-38 cm, color pardo a pardo oscuro, 7,5 YR 4/4(h), sin manchas de color. Textura franco-arcillo-limosa. Estructura moderada en bloques subangulares de tamaño muy grueso. Firme, adherente y plástico. Frecuentes poros continuos de tamaño grueso y orientación horizontal. Muy pocos elementos gruesos restos de costra caliza angulares y meteorizados. Muy pocos nódulos de tamaño inferior a 1 cm, duros y esféricos. Calcáreo. Pocas raíces de tamaño fino. Transición brusca y ondulada.

Horizonte B_k, Profundidad 38-63 cm, color rojo amarillento, 5 YR 5/8 (h), sin manchas de color. Franco-arcilloso. Estructura débil en bloques subangulares de tamaño medio. Firme, adherente y plástico. Débilmente cementado. Pocos microporos caóticos. Abundantes piedras calizas fuertemente meteorizadas. Frecuentes nódulos de tamaño inferior a 1 cm, duros irregulares o esféricos. Calcáreo. Sin presencia de raíces. Transición brusca y plana.

Horizonte B_{km}, Profundidad 63-67 cm. Costra caliza laminar dura. Transición brusca y plana.

Horizonte 2C_k, Profundidad 67-98 cm. Color amarillo rojizo, 7,5 YR 6/8 (h), con frecuentes manchas de color pardo blanquecino 10 YR 8/3 (h), de tamaño inferior a 5 cm, bien definidas y de nitidez neta. Franco limoso. Estructura muy débil en bloques angulares de tamaño mediano a grueso, firme, adherente y plástico. Moderadamente cementado. Sin poros. Frecuentes piedras calizas de forma angular o redondeada, fuertemente meteorizada. Frecuentes nódulos calizos de tamaño entre 1 y 5 cm, duros, esféricos o irregulares. Calcáreo. Transición gradual ondulada.

Horizonte 2R, Profundidad 96-120cm. Calizas laminares.

IV.1.1. Lisímetro de Pesada Continua.

El término *lisímetro* deriva de las palabras griegas *lysis* (disolver) y *metron* (medir). Así, este vocablo se puede aplicar a todo dispositivo utilizado para determinar

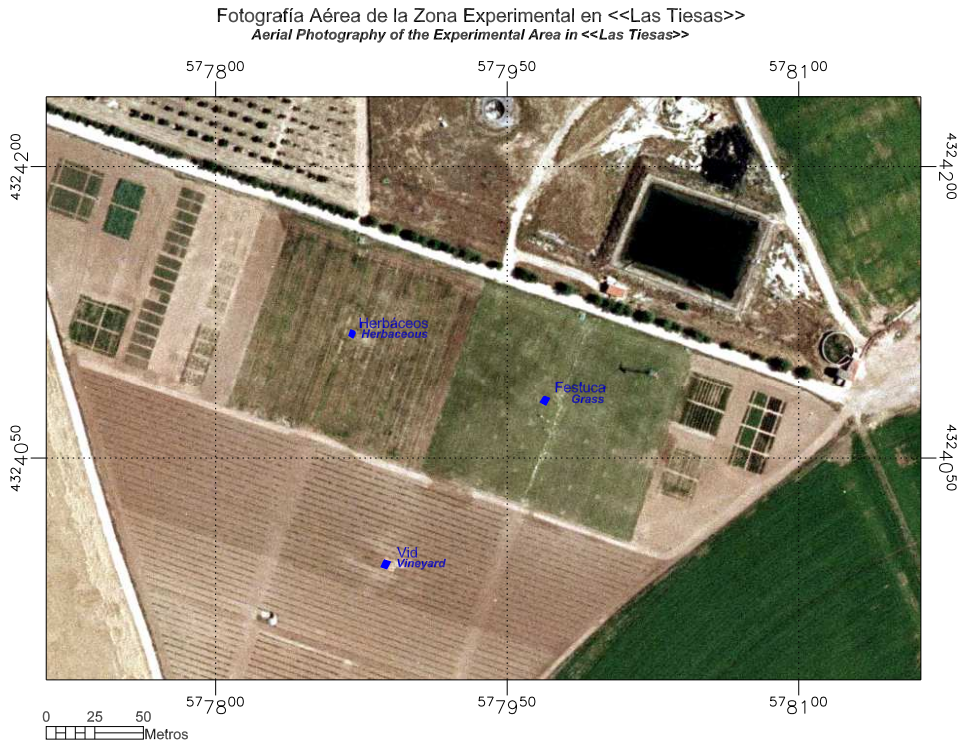


Figura IV.1: Fotografía aérea de la zona experimental de «Las Tiesas». En azul están indicados los tres lisímetros: herbáceos, festuca y vid.

la velocidad, cantidad y composición del agua que percola en un medio poroso. Basados en estas consideraciones existen varias definiciones de lisímetro que se refieren a *instrumentos o dispositivos que contienen suelo y reciben lluvia natural o riego y se encuentran provistos de un sistema para recibir y medir la solución de percolación* (López-Urrea, 2004). La componente de agua percolada se considera una componente importante del ciclo hidrológico, que se produce en la recarga del agua subterránea y en la descarga de agua hacia los cauces naturales (Aboukhaled *et al.*, 1986).

Teniendo en cuenta las recomendaciones de FAO (Allen *et al.*, 1991a), uno de los instrumentos más precisos para medir la ET_0 son los lisímetros de pesada continua con lectura electrónica de datos. La estimación de la evapotranspiración se hace a través de la diferencia de peso en el sistema. Tradicionalmente se han utilizado para evaluar y calibrar los distintos métodos y modelos de estimación de la ET_0 (Allen, 1996). Entre los principales inconvenientes que presentan cabe destacar que proporcionan la medida de la ET_0 de un área reducida, por lo que estos resultados serán representativos de la misma cuando las características del cultivo (altura y densidad

de plantas) dentro del lisímetro sea similar a la del campo que lo rodea. Estas variaciones se pueden deber principalmente a las diferencias en las características edáficas, la disponibilidad de agua, la fertilidad, la temperatura del suelo y el desarrollo radicular (Gavilán, 2002).

Estos equipos exigen una cuidada puesta a punto y mantenimiento de las estaciones (López-Urrea, 2004). En cada uno de los lisímetros, y en sus parcelas de protección, se realizaron las labores de siembra, fertilización y riego de la misma forma, procurando siempre que la densidad, distribución y altura de las plantas fuese similar en ambas zonas. Se validan diariamente los pesos medidos, observando si la diferencia entre ese día y el anterior era coherente. La detección de alguna anomalía hace necesarias las correspondientes comprobaciones de peso, colocando una pesa de 150 kg sobre el lisímetro. En caso de observarse un funcionamiento erróneo, se han realizado calibraciones con pesas de 500 kg o 1000 kg. Es preciso hacer referencia a que el ajuste es imprescindible cuando el peso del lisímetro sobrepasa los 1000 kg o registra valores negativos. Este se realiza dentro del rango de funcionamiento del visor, esto es, entre 0 y 1000 kg aunque se procura mantener en el rango de 350 a 550 kg. Añadido a esto hay que prestar especial atención a la limpieza semanal del hueco que queda entre las paredes del recipiente interno y las paredes externas del lisímetro, para que éste tuviera un movimiento vertical libre, evitando así cualquier roce externo.

Periódicamente se ha hecho una revisión general de la instalación eléctrica, tanto del circuito como de la batería del *datalogger*. También se ha comprobado el correcto funcionamiento de la toma de tierra del sistema. De forma sistemática se han calibrado al final de la campaña en previsión de la siguiente, los sensores de temperatura y humedad del suelo (TDR).

De forma análoga se ha prestado especial atención a la estación agrometeorológica adyacente al lisímetro de festuca. La estructura del pluviómetro se ha limpiado cada 15 días, así como los sensores de humedad relativa y temperatura del aire, velocidad y dirección del viento. Las cúpulas de vidrio de los radiómetros se han limpiado con agua destilada cada dos o tres días, cambiando también el gel de sílice todos los meses. Los radiómetros fueron calibrados en Abril de 2001 por el Departamento de Termodinámica de la Facultat de Física de la Universitat de València.

Añadido a esto existe un sistema de drenaje y bombeo para evacuar el agua drenada fuera de la estación, estando el terreno nivelado adecuadamente para evitar inundaciones en los lisímetros.

Los datos de peso generados por el lisímetro y registrados en el visor, se han ido almacenando en un *datalogger* CR10X. El equipo está programado para efectuar lecturas de peso cada segundo y realizando un registro cada 15 minutos, horarios y diarios. La unidad de adquisición de datos permanece conectada a un ordenador personal situado en la caseta de control de la estación, donde se descargan los datos tres veces por semana. Añadido a la supervisión de los sensores, la base de datos

dispone de un sistema *experto* de depuración (López-Urrea, 2004) desarrollado en la Unidad de Teledetección que junto a la tarea supervisada de un *intérprete* permite depurar errores del tipo *groseros* debidos a caídas de tensión o cortes eléctricos, salidas de *rango*, orden, ...

Con frecuencia se producen datos erróneos por diversas causas, téngase en cuenta que cualquier carga colocada sobre la superficie del lisímetro afecta a su masa. Una de las mayores fuentes de error en las medidas del lisímetro, es la fuerza por presión que el viento ejerce sobre la superficie del mismo. La forma de solucionar este efecto es aumentar la frecuencia de medidas de la masa del lisímetro y promediarlas a intervalos de tiempo que oscilen entre 10 y 30 minutos. Por lo general, se considera que no se pueden medir con cierta fiabilidad las tasas de ET_0 en intervalos menores de 30 minutos (Cob and Yrisarry, 2001; Howell *et al.*, 1995). Es por ello que aunque la base de datos guarda los registros cada 15 minutos, la escala temporal de trabajo en los datos del lisímetro será horaria y diaria.

Añadido a lo anterior, las medidas realizadas en el lisímetro se ven afectadas por el riego, la precipitación y la siega de la pradera (López-Urrea, 2004; Gavilán, 2002). Otras fuentes de error son comprobaciones de peso, calibraciones por rotura de la célula de carga, caídas de tensión en el sistema, rotura de la toma de tierra y averías en los equipos de adquisición de datos. Por este motivo se han eliminado todos los registros afectados por estas incidencias.

No obstante, para evitar una pérdida excesiva de datos, dada la gran cantidad de días en que es necesario regar, se dieron riegos nocturnos de dos horas, prescindiendo únicamente de los datos generados en esas horas en las que la demanda evaporativa es mínima e incluso cero.

Para la programación diaria del riego se ha recurrido al método del balance hídrico del suelo realizado por el personal del Servicio de Asesoramiento de Riegos (SAR-ITAP). Dicho balance se ha hecho utilizando una herramienta informática desarrollada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad de Castilla-La Mancha (Campus de Albacete) (Martin de Santa Olalla and de Juan, 1993) desarrollado a partir de la metodología propuesta por Doorenbos and Pruitt (1977a). Mediante la utilización de los datos proporcionados por la estación agrometeorológica *Anchor Station* y mediante la fórmula semiempírica de Penmann-Monteith (Allen *et al.*, 1998; Smith, 1991) se ha calculado la ET_0 diaria.

Se ha tenido en cuenta el Intervalo de Humedad Disponible (IHD) obtenido a partir de la diferencia entre el agua total retenida a capacidad de Campo (CC) y el punto de Marchitamiento Permanente (PMP). Estos contenidos característicos se calcularon como promedio de diferentes métodos de estimación (Kern, 1995; Rawls *et al.*, 1982; Grupta and Larson, 1979), obteniendo un IHD de $1,06 \text{ mm}\cdot\text{cm}^{-1}$, es decir que el suelo del campo experimental retiene 1,06 mm de agua por cada cm de profundidad del mismo.

El agua útil (AU) se obtiene de la expresión: $AU = IHD \cdot z \cdot NAP$, siendo z la profundidad efectiva del sistema radical, expresado en cm. En el caso de la festuca el valor de z es constante a lo largo de todo el año, e igual a 30 cm. El NAP es el nivel de agotamiento permisible, expresado en tanto por uno. Algunas recomendaciones al respecto establecen para césped cuando $ET_c = 5 \text{ mm-día}^{-1}$ un $NAP = 0,4$, pudiéndose usar para el resto de casos $NAP_{\text{corregido}} = 0,4 + 0,04 \cdot (5 - ET_c)$.

Las necesidades netas de riego, N_n (mm) del cultivo se pueden estimar a través del balance hídrico simplificado:

$$N_n = P_e - ET_c \pm \Delta w$$

donde P_e es la precipitación efectiva, ET_c es la evapotranspiración de cultivo y Δw es la variación de la reserva de agua en el suelo. Se ha evitado la escorrentía superficial y la percolación profunda, manteniendo el terreno bien nivelado, no sobrepasando la capacidad de campo con los riegos y limitando la precipitación efectiva a un 70% del total de la lluvia caída. Por otro lado, no ha existido ascensión capilar, ya que el nivel freático se encuentra lo suficientemente bajo (Martin de Santa Olalla and de Juan, 1993).

El término de balance hídrico más relevante cuantitativamente es la evapotranspiración del cultivo, ET_c (Fabeiro, 1995). Este término se calcula como:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0$$

siendo K_c el coeficiente de cultivo definido en el apartado III.2.2.

Al inicio de la campaña se parte de un suelo a capacidad de campo, por lluvia o riego inicial. La reserva de agua en suelo ha variado dentro de los niveles de agotamiento permisible, es decir, se ha limitado al agua útil. Cuando ésta se agotaba, se ha aportado un riego igual al agua útil, llevando al suelo a la situación inicial. El aporte hídrico por riego se hace por el sistema de aspersión, mediante cobertura total enterrada. Se han registrado los valores mensuales de ET_0 , los volúmenes mensuales de agua de riego, la precipitación efectiva y el número de riegos. Se han tenido en cuenta las evaluaciones de riego hechas anteriormente por técnicos del ITAP, siendo la eficiencia de aplicación del riego del 81% y como precipitación efectiva el 70% del total de lluvia caída (López-Urrea, 2004; Villalobos *et al.*, 2002).

De esta forma, la lisimetría en su forma más sencilla, incluye la medida volumétrica de todas las aguas que entran y salen de un recipiente que contiene una masa aislada de suelo, cuya superficie puede estar desnuda o con diferentes tipos de cubierta vegetal (Aboukhaled *et al.*, 1986). Teniendo esto en cuenta, la ecuación de balance hídrico en suelo representa las entradas y salidas de agua en el lisímetro para cada período de medida:

$$P + R \pm E_s = ET + D \pm \Delta w \quad (\text{IV.1})$$

Donde, P es la precipitación (mm), R es el riego (mm), E_s es la escorrentía hacia dentro o hacia fuera del lisímetro (mm), ET es la evapotranspiración de la cubierta vegetal o la evaporación del suelo desnudo (mm), D es la percolación profunda o agua de drenaje recogida en el fondo del lisímetro (mm), Δw es la variación del contenido de agua en la masa de suelo encerrada en el lisímetro en un determinado período (mm).

Al tratarse de un recipiente con paredes laterales, la escorrentía superficial es nula, y la evapotranspiración se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$ET = P + R - D \pm \Delta w \quad (IV.2)$$

La precipitación (P) y riego (R) son medidos, utilizando pluviómetros y métodos volumétricos convencionales así como por la indicación del propio lisímetro. Para drenar y medir el agua que percola a través de la masa de suelo (D), se utilizan una cámara de drenaje y un recipiente de volumen conocido. Las variaciones en el contenido de agua en la masa de suelo (Δw), representan la cantidad de agua almacenada en el suelo después de una lluvia o riego, o la cantidad de agua extraída del suelo por la evapotranspiración de las plantas en el lisímetro. La medida de este término es más complicada y se hace necesario incluir en el lisímetro dispositivos como sondas de humedad.

En el caso de un lisímetro de pesada, los cambios de peso representan una medida directa del flujo de agua que entra y sale del mismo. El peso total de un lisímetro en un momento dado (M_t) se puede expresar por la relación:

$$M_t = M_0 + P_{cv} - ET - D + R + P \quad (IV.3)$$

Donde, M_0 es el peso inicial del lisímetro, P_{cv} es la acumulación de biomasa de la cubierta vegetal, ET es la pérdida de agua del lisímetro por evapotranspiración, D es el agua de drenaje, R es la cantidad de agua aplicada mediante el riego y P es la precipitación recibida por el lisímetro.

Lisímetro de festuca

Con el objeto de medir por pesada directa la ET_0 , se encuentra un lisímetro instalado en una parcela de protección de 10 000 m² de superficie, cultivada de pradera (*Festuca arundinacea* Schreb., cv. *Asterix*) y mantenida en condiciones de cultivo óptimas (figuras IV.2 y IV.3) con el fin de ajustarse a la definición de FAO (Allen *et al.*, 1998):

*A hypothetical reference crop with an assumed crop height of 0.12 m,
a fixed surface resistance of 70 s·m⁻¹ and an albedo of 0.23.*

La parcela está provista de un sistema automatizado de riego por aspersión mediante cobertura total enterrada (fig. IV.2). Con aspersores de doble boquilla, con 4,8 y 2,4 mm de diámetro, respectivamente. La presión de trabajo en cada sector de



Figura IV.2: Vista panorámica de la estación lisimétrica el día 6 de Julio de 2001 donde se aprecia en el centro la parcela de protección de festuca.

riego es de $3,2 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$, y el caudal instantáneo es de $1618 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$. El marco de riego es de $15 \times 12,5 \text{ m}$, la pluviosidad media del sistema es de $8,6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, y el coeficiente de uniformidad de Christiansen es del 90 %. De esta forma se evita cualquier tipo de restricción hídrica y se mantiene un elevado contenido de agua en suelo, próximo a capacidad de campo, y es posible considerar las estimaciones de ET_0 como referencia.

Las dimensiones del recipiente del lisímetro son $2,3 \times 2,7 \text{ m}^2$ de lado y $1,7 \text{ m}$ de profundidad y una masa total de $14,5 \text{ t}$, aproximadamente (fig. IV.3). Se mantiene el cultivo de festuca con las mismas condiciones que el resto de la parcela con el objeto de asegurar la representatividad de los resultados. El lisímetro dispone del equipamiento necesario para realizar un balance hídrico completo y evaluar con precisión tanto los aportes (lluvia y riego) como las pérdidas (evapotranspiración y drenaje profundo). Con el fin de conocer el estado hídrico del suelo y la uniformidad a lo largo de su perfil, se instalaron en el propio recipiente del lisímetro una batería de tensiómetros a diferentes profundidades (15, 30, 60, 90 y 120 cm). De forma análoga se dispone de dos varillas horizontales de *Time Domain Reflectometer* (TDR) a 30 y 60 cm respectivamente, para la medición continua del contenido hídrico del suelo. Se dispone análogamente de dos sondas de temperatura a 15 y 30 cm, situadas igualmente dentro del lisímetro (fig. IV.3-B y IV.3-G).

El cajón de éste contiene el suelo en su interior, se sitúa sobre un sistema de balanzas y un contrapeso, que contrarrestan la carga constante de suelo y recipiente

(fig. IV.3-F). Al sistema de balanzas se une una célula de carga (modelo FX-2) de acero de 540 g de peso, con una capacidad nominal de 50 kg y un rango de salida de $2 \text{ mV} \cdot \text{V}^{-1}$ de excitación, y una alimentación de 5 V a plena carga. La célula de carga está conectada a un visor electrónico (modelo G-7), con una resolución de 0,25 kg, lo que equivale a 0,04 mm de agua. En la figura IV.4 aparecen representados los pesos del lisímetro de festuca durante el año 2003.

Anexo a este lisímetro se encuentra instalada una estación agroclimática que dispone de la instrumentación necesaria para calcular por el método semiempírico de Penmann-Monteith la ET_0 . Dicha estación registra humedad relativa y temperatura del aire a 2 m, radiación incidente, reflejada y neta de onda corta, radiación descendente, ascendente y neta de onda larga, velocidad y dirección del viento, pluviometría y evaporación en lámina libre de agua.

Lisímetro de herbáceos

Este lisímetro se utiliza para rotación de cultivos estacionales. El objetivo del mismo es poder obtener valores del coeficiente de cultivo (K_c) medidos por comparación con los datos de ET_0 obtenidos en el lisímetro de festuca. Consiste en un lisímetro de pesada continua de las mismas características que el de referencia, dentro de una parcela de protección de $10\,000 \text{ m}^2$, sembrada en su totalidad del mismo cultivo. Este se mantiene en *condiciones óptimas de crecimiento activo sin ningún tipo de restricción hídrica o nutricional*.

Dentro de la rotación de cultivos que comenzó el año 1998 se ha hecho un seguimiento radiométrico de dos ellos,

Maíz, El cultivo durante la primavera - verano del año 2001 es maíz (*Zea Mays* L., variedad Dracma 700). Plantado el 14 de Abril con una densidad de siembra de 8,4 semillas de grano/ m^2 .

Trigo, Durante el invierno - primavera del año 2003 se cultiva trigo (*Triticum aestivum* L., variedad Estero). Plantado el 10 de Febrero con una densidad de siembra de 550 semillas de grano/ m^2 .

En la figura IV.4 se muestran los pesos del lisímetro de herbáceos durante dos períodos (máximo desarrollo del cultivo y senescencia) durante el desarrollo del trigo. En la misma figura aparecen representados los pesos del lisímetro de referencia durante los mismos períodos. Se observa la disminución de peso que coincide con la pérdida de agua por evapotranspiración pues la componente de percolación está incluida en el peso del lisímetro (ver tanque anexo al recipiente en la figura IV.3-F). Aplicando la expresión IV.3, y teniendo en cuenta que la componente de drenaje D está incluida en el peso del lisímetro (M) se obtiene la ET en ambos casos. Por el contrario, cuando se produce un incremento en el peso, aplicando esta misma ecuación IV.3, se registra la componente de precipitación y riego ($P+R$). Estos aportes en la mayoría de los casos durante verano se producen en intervalos de tiempo reducidos (una o dos horas). Estos valores registrados por el lisímetro coinciden con los valores registrados por

los pluviómetros además de coincidir con la descripción técnica de la instalación de suministro hídrico (a presión nominal suministra entre 8 y 9 L·m⁻² por hora).

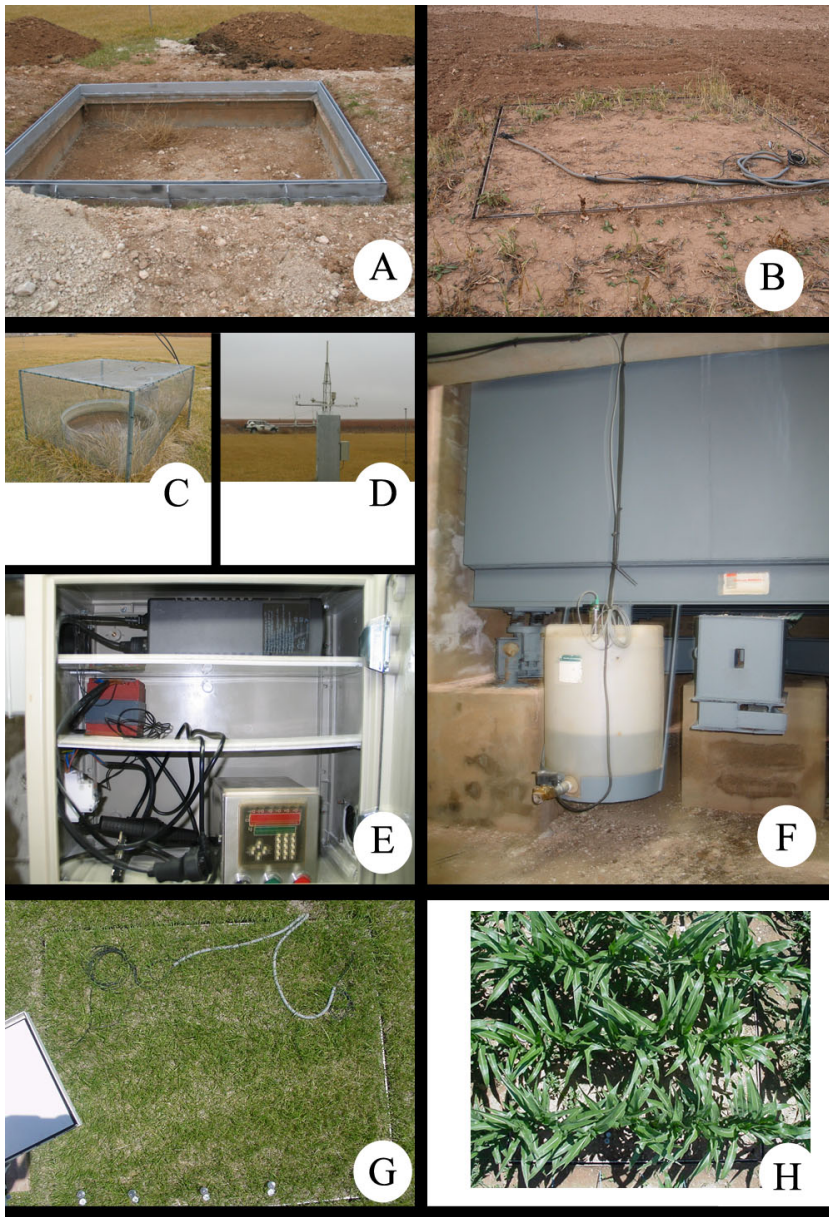


Figura IV.3: Vista de diferentes componentes y situaciones de los lisímetros: (A) El lisímetro de festuca en plena operación de replantación (Noviembre 2004), (B) Lisímetro de herbáceos en invierno (Noviembre 2004), (C) Panel de evaporación anexo al lisímetro de festuca, (D) Estación agrometeorológica Campbell anexo al lisímetro de festuca, (E) Cabina interior con los dataloggers, (F) Vista interior del tanque continente del suelo, (G) Vista sobre la vertical del lisímetro de festuca (Agosto 2001), (H) Vista sobre la vertical del lisímetro de herbáceos (Julio 2001).

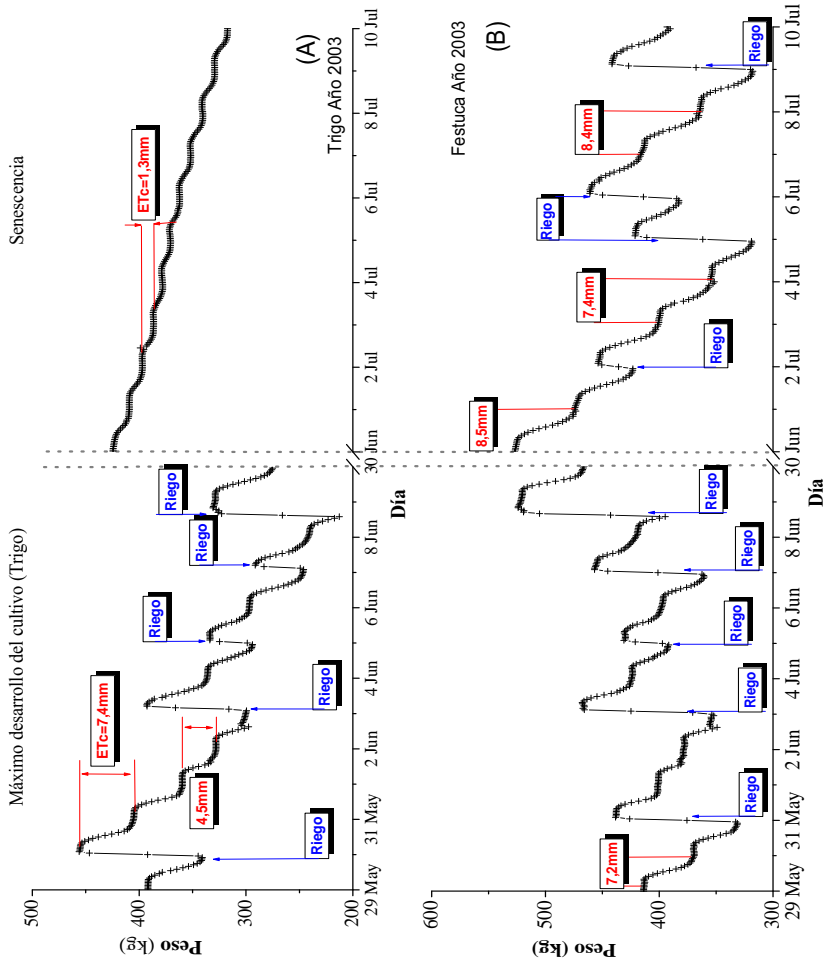


Figura IV.4: En la figura (A) se representan los valores de medida directa en el lisímetro dentro de dos periodos en el desarrollo del trigo, máximo desarrollo y senescencia. El mismo periodo está representado en la figura (B) con la pesada del lisímetro de festuca durante el año 2003.

IV.1.2. Datos Meteorológicos Medidos.

Próxima a las instalaciones de lisimetría se encuentra instalada otra estación agrometeorológica, tradicionalmente denominada *Anchor Station* (López-Urrea, 2004). Esta estación es la utilizada por el Servicio de Asesoramiento de Riegos de Albacete (SAR) para el cálculo diario de la ET_0 por el método semiempírico de Penmann-Monteith (Allen *et al.*, 1998). En dicha estación se registran las medidas de los siguientes datos climáticos (ver tabla IV.1):

1. Temperatura del aire a 0.5, 2 y 10 m, y del suelo a 10, 25, 35 y 50 cm. Para medir la temperatura ambiente a 0.5 m se instaló una sonda STA-212-PVC, que utiliza como sensor un termistor de tres elementos. El elemento sensor se aloja en una vaina de PVC que se puede acoplar fácilmente en un protector de radiación solar modelo PRS. Las especificaciones del sensor son: rango ± 50 °C con precisión $\pm 0,1$ °C.

La medida de la temperatura del aire a 2 y 10 m se realiza con sondas modelo MP-100, en la que se utilizan elementos de medición especialmente dimensionados, basados en un RTD Pt de 100 Ω . Las especificaciones del sensor son: rango de -40 °C a 60 °C, con precisión $\pm 0,5$ °C.

Para medir la temperatura del suelo se utilizan sondas modelo STS-212-PVC, que cuentan con un termistor de tres elementos. Los termistores son semiconductores que presentan un rápido y significativo cambio de su resistencia óhmica para pequeños incrementos de temperatura. El elemento sensor se aloja en una vaina de PVC de longitud variable para la medida a distintas profundidades. Las especificaciones del sensor son rango ± 50 °C y precisión $\pm 0,1$ °C.

2. Humedad relativa del aire a 2 y 10 m, y del suelo a 30, 60 y 90 cm. Para medir la humedad relativa del aire se instalaron sondas modelo MP-100, cuyas características eléctricas cambian incluso con variaciones de humedad extremadamente pequeñas. Estos cambios se detectan, linealizan, amplifican y se aplican como señales analógicas utilizando circuitos electrónicos de tecnología SMD. Las especificaciones del sensor son rango 0-100 % con precisión 2 %. En la medida de la humedad de suelo se utilizan tres tensiómetros modelo 2725.
3. Radiación incidente, reflejada, difusa y neta de onda corta. La medida de los flujos de energía por radiación se hace utilizando dos piranómetros modelos CM11 y CM14. El primero está provisto de un detector térmico. La energía es absorbida por un disco de color negro. El calor generado fluye a través de una resistencia térmica hacia el cuerpo del piranómetro. La diferencia de temperatura a través de la resistencia térmica del disco es convertida a voltaje. El rango espectral del piranómetro está limitado por la transmisión de la cúpula de vidrio que protege al sensor. Estas mismas características se aplican al CM14 al tratarse de dos sensores CM11. Las especificaciones del sensor CM11 son: Rango espectral 0,35-2,8 μm , Irradiación de 0-1400 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

4. Radiación descendente, ascendente y neta de onda larga. Para medir estas radiaciones se instaló un pirgeómetro modelo CG2, que está constituido por dos sensores modelo CG1. Un pirgeómetro CG1 esencialmente es una ventanilla de silicona con un filtro depositado en ésta, un detector térmico, un sensor de temperatura (termopila) y un resistor de calor. Las especificaciones del sensor CG1 son: rango espectral de 5-25 μm , con rango de irradiación -250 a +250 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.
5. Pluviometría: Se utiliza un pluviómetro de la serie PCP, que dispone de un colector cilíndrico de 200 cm^2 de área que se encarga de recoger la precipitación. Las especificaciones del sensor son: sensibilidad 0,2 mm con precisión de 1.5 % a 30 $\text{l}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.
6. Velocidad del viento a 2 y 10 m. Se mide con un anemómetro de cazoletas modelo VV-2000, con capacidad para medir vientos a partir de 0,3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ con un rango de 0-50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ y precisión $\pm 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
7. Dirección del viento a 10 m. Se mide con una veleta potenciométrica, modelo DV-2000. Se trata de una veleta de microrespuesta altamente fiable y de muy bajo umbral (0,3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Las especificaciones son: rango de 0-360° con resolución de 1° y precisión $\pm 2^\circ$.
8. Flujo térmico del suelo a diferentes profundidades (5, 10, 20 y 30 cm). Se utiliza una placa modelo RIMCO HP3, que está formada por la unión de 250 terminales de cobre formando una termopila herméticamente sellada entre dos placas de acero inoxidable.
9. Presión atmosférica. Se utiliza un sensor modelo SPA-900. Se trata de un transductor de presión atmosférica cuyo elemento sensible es una membrana de silicio monocristalino. El sensor va encapsulado en un cuerpo de acero inoxidable. Las especificaciones del mismo son: rango de 600 a 1100 mb; precisión $\pm 0,1\%$ de la medida dentro del rango de temperaturas 0-50 °C (López-Urrea, 2004).

Todos estos sensores están conectados a dos equipos de adquisición de datos (*data-logger*), generando registros cada diez minutos, diarios y horarios. Estos se descargan diariamente en las instalaciones del ITAP.

Los datos de Temperatura del aire, Humedad Relativa, Velocidad del Viento, a 10 m y 2 m de altura para el año 2001 aparecen representados en la figura IV.5. De manera análoga, en la figura IV.6 se recogen los datos registrados por la estación meteorológica Anchor Station de Radiación de Onda Larga, Radiación de Onda Corta y Pluviometría para el mismo año en coincidencia con el cultivo de maíz.

Tabla IV.1: Variables adquiridas por la estación meteorológica Anchor Station ubicada en la finca experimental de Las Tiesas (Barrax).

Parámetro	Descripción	Unidades
u_{10}	Velocidad del viento a 10 m	m/s
u_{10MAX}	Velocidad del viento máxima a 10 m	m/s
T_{10}	Temperatura del aire a 10 m.	°C
T_{10MAX}	Temperatura del aire máxima 10 m.	°C
T_{10MIN}	Temperatura del aire mínima a 10 m.	°C
H_{10}	Humedad relativa a 10 m.	%
u_2	Velocidad del viento a 2 m.	m/s
u_{2MAX}	Velocidad del viento máxima a 2m.	m/s
T_2	Temperatura del aire a 2 m.	°C
T_{2MAX}	Temperatura del aire máxima a 2m.	°C
T_{2MIN}	Temperatura del aire mínima a 2m.	°C
H_2	Humedad relativa a 2m.	%
R_{is}	Radiación Global.	W·m ⁻²
R_{rs}	Radiación reflejada de onda corta.	W·m ⁻²
R_{ns}	Radiación neta onda corta.	W·m ⁻²
R_{nMAX}	Radiación neta máxima.	W·m ⁻²
R_{DIF}	Radiación difusa.	W·m ⁻²
R_{iL}	Radiación incidente onda larga.	W·m ⁻²
R_{rL}	Radiación reflejada onda larga.	W·m ⁻²
R_{nL}	Radiación neta onda larga.	W·m ⁻²
T_{si}	Temperatura del suelo (profundidades $i=1, \dots, 4$)	°C
T_{siMAX}	Temperatura máxima del suelo (profundidades $i=1, \dots, 4$)	°C
T_{siMIN}	Temperatura mínima del suelo (profundidades $i=1, \dots, 4$)	°C
G_i	Flujo térmico (profundidades $i=1, \dots, 4$)	W·m ⁻²
H_{si}	Humedad del suelo (profundidades $i=1, \dots, 3$)	cb
H_{siMAX}	Humedad del máxima suelo (profundidades $i=1, \dots, 3$)	cb
H_{siMIN}	Humedad del mínima suelo (profundidades $i=1, \dots, 3$)	cb
P	Presión atmosférica.	cb
E	Evaporación	mm
PL	Lluvia	mm

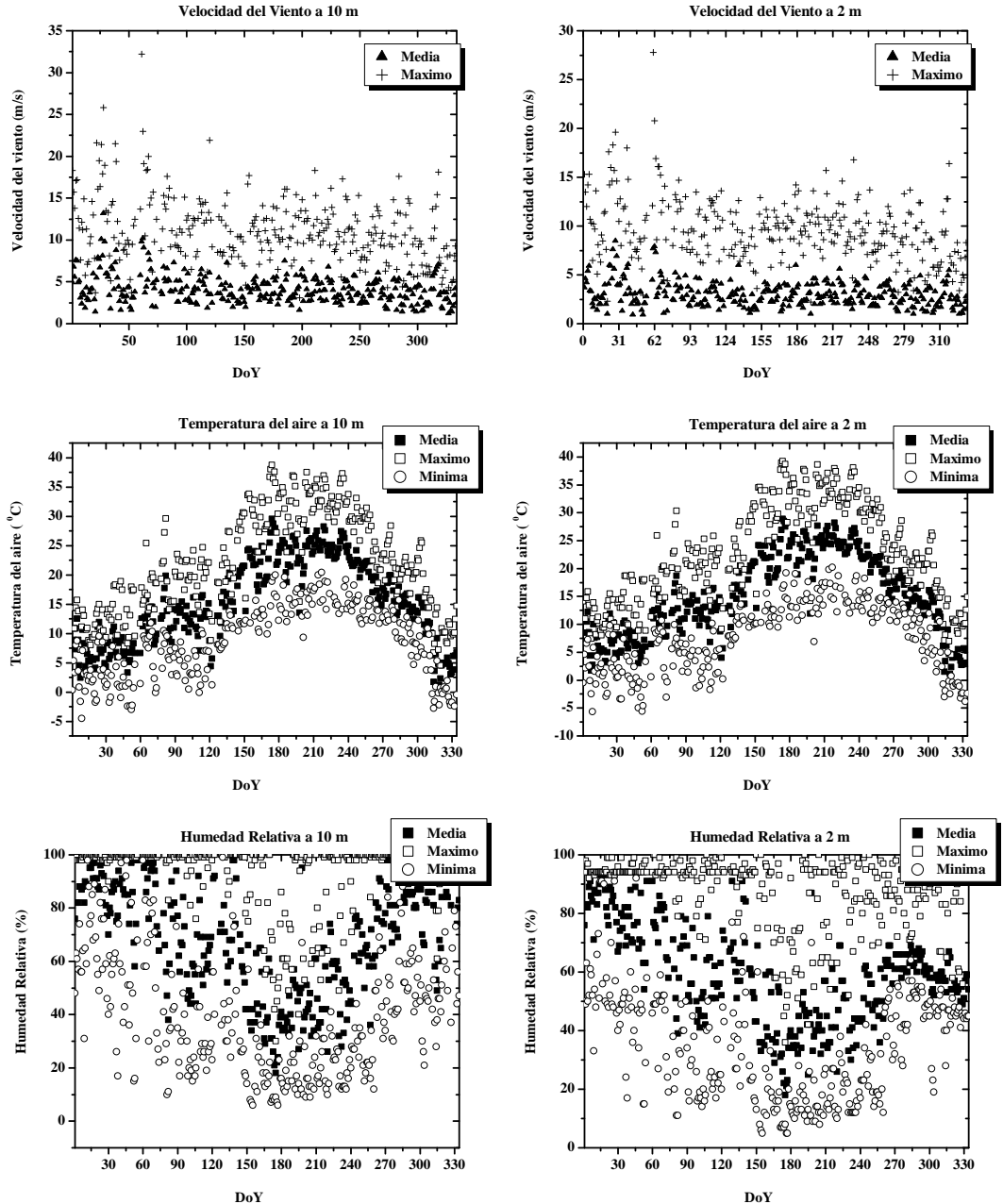


Figura IV.5: Valores de Velocidad de viento, Temperatura del aire y Humedad Relativa tanto a 10 m como a 2 m de altura. Datos correspondientes a la estación Anchor Station situada en la finca experimental de Las Tiesas para la campaña del año 2001.

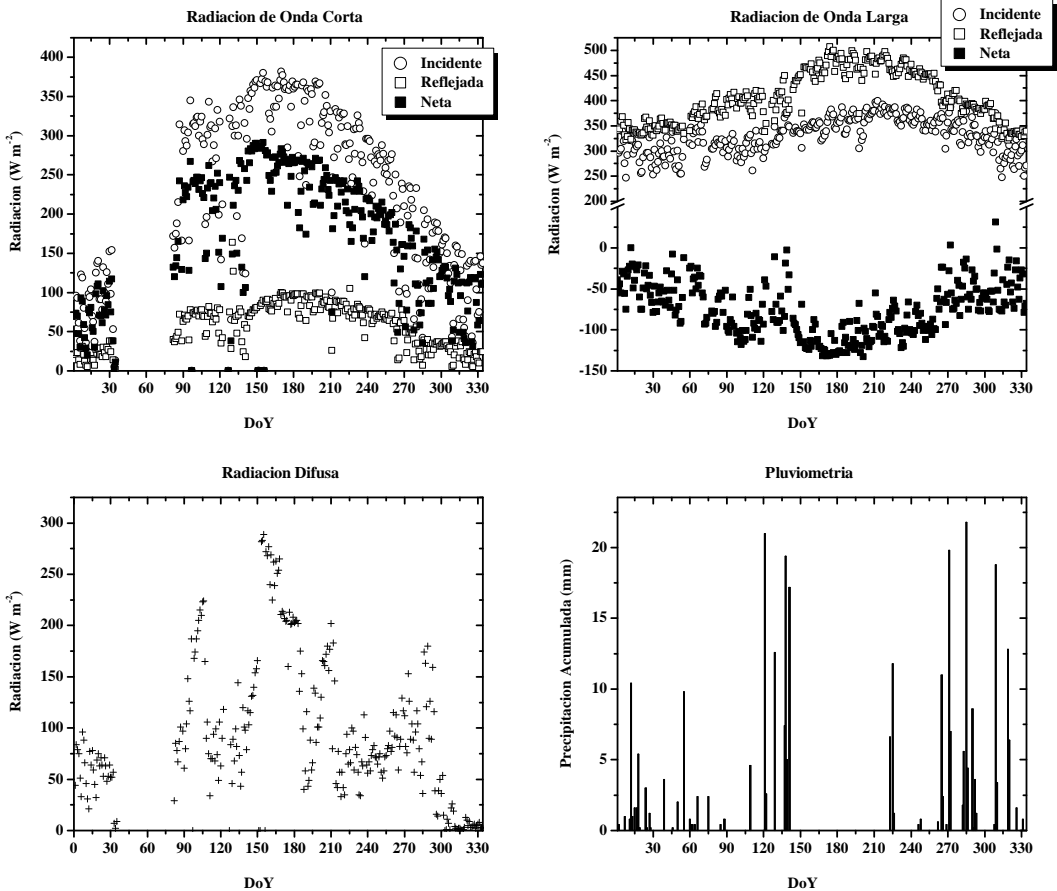


Figura IV.6: Valores de Radiación de Onda Corta, Radiación de Onda Larga, Radiación Difusa y Pluviometría registrados durante el año 2001 por la estación Anchor Station situada en la finca experimental de Las Tiesas.

IV.1.3. Cálculo de ET_0 .

La ET_0 se ha calculado a través del método FAO-Penmann-Monteith (Allen, 1986). El cálculo se ha extendido a los ciclos de crecimiento de ambos cultivos a diferentes resoluciones temporales: horaria y diaria. Dicha metodología establece el valor de la resistencia de la cubierta en $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y su altura en 0,12 m. En el apéndice B aparece reflejada la metodología para obtener a escala horaria la evapotranspiración de referencia. Es importante tener en cuenta ciertas recomendaciones a la hora de realizar estos cálculos, sobre todo en lo referente a la calidad de los datos medidos. La primera comprobación que se debe tener en cuenta si es posible es su medición por duplicado. Este hecho está garantizado al tener varios sensores trabajando simultáneamente en *Anchor Station* y *Campbell* que es la estación agrometeorológica ubicada en la estación lisimétrica.

Estas estaciones presentan problemas de lo más diverso, como pueden ser desconexiones o períodos de *no medida* que se desestiman previamente. Donde cobra especial importancia la duplicidad de sensores es en la calibración, pues bien es sabido la degradación que estos presentan al estar expuestos a las inclemencias meteorológicas. La base de datos principal se genera a través de registros cada 10 minutos en una y 15 minutos en otra estación. Esta frecuencia temporal en el registro, así como el cálculo de máximos, mínimos y valor medio en dicho intervalo temporal se ha programado en el *datalogger*. En el análisis de calidad de datos, cabe destacar que el cálculo horario aporta una mejora en la estimación de la evapotranspiración de referencia respecto a valores cada treinta minutos o diarios, particularmente en casos en los que una determinada variable (velocidad del viento, humedad relativa, temperatura) experimente importantes cambios durante el día (Allen, 2000a).

Cálculo Horario

Es recomendación de la Sociedad Americana de Ingeniería Civil (ASCE, 2002), hacer un análisis de calidad de los datos. En el caso horario, como se ha dicho anteriormente una garantía de que los sensores están midiendo correctamente es comparar dos estaciones adyacentes. Es por este motivo, que se muestran en las figuras IV.7 y IV.8 los datos horarios de los parámetros velocidad del viento (u), humedad relativa (H_r), temperatura del aire (T_a), radiación neta (R_n) y evapotranspiración de referencia (ET_0), correspondientes a cuatro días en los cuales existen medidas simultáneas de ambas estaciones. Dicha comparación se ha extendido al ciclo de crecimiento de ambos cultivos bajo estudio. El cálculo horario ofrece la evolución diaria de las variables utilizadas en el cálculo de ET_0 . En las figuras IV.7 y IV.8 están representadas ambas evoluciones.

Hacia el centro del día en las 12 h solares, la ET_0 aumenta, coincidiendo con el aumento en R_n y por tanto en la temperatura del aire. El máximo en T_a se alcanza aproximadamente 2 horas después del máximo en R_n . Debido a la vecindad de otras parcelas cultivadas, ambas estaciones presentan una influencia apreciable de

pendiendo de la dirección del viento. Por ello, se observan fenómenos de advección que pueden afectar principalmente a la velocidad del viento y a la humedad relativa. Normalmente, el aumento en la velocidad del viento lleva asociado una disminución en la humedades relativas (Allen, 2000a). Esto se observa al comparar durante los años 2001 y 2003 los datos de ambas estaciones donde se invierten los comportamientos durante los días presentados, en el año 2001 corresponde al otoño y en 2003 corresponde a primavera.

Cálculo Diario

A escala diaria se mantiene la recomendación de ASCE (2002) de comparar la calidad de los datos con valores de referencia. Para este análisis se ha estimado la radiación incidente por el método indicado en Allen (2000a), estimando la radiación neta de onda corta incidente extraterrestre y promediando sobre la superficie terrestre^{1 2}. Estos valores están representados en la figura IV.9. Se observa que durante ambos ciclos, la estimación de las radiaciones por tres métodos diferentes (*Rso75*, *Rso56a*, *Rso56c*) envuelve el máximo de los valores medidos. Este cálculo garantiza que no existen salidas de rango en los valores medidos. La curva superior representa la radiación extraterrestre reflejando el máximo de radiación en ausencia de atmósfera. Los tres métodos propuestos ofrecen resultados similares, se observa que a medida que se tienen en cuenta los factores de composición atmosférica, la curva correspondiente al método *Rso56c* que incluye el valor de la presión y humedad relativa respecto al resto, se acerca a la variabilidad de los máximos diarios medidos. Esta variabilidad diaria se produce principalmente debido a la presencia de nubes.

¹ Se calcula $R_{so56a} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot elevacion)R_a$, donde la *elevacion* se expresa en m.

² Se calcula $R_{so56c} = (K_B + K_D)R_a$, donde $K_B = 0,98 \cdot e^{\frac{-0,00146 \cdot P}{K_i \cdot \sin\phi} - 0,075 \cdot (\frac{A_{guaenAtmosfera}}{\sin\phi})^{0,4}}$ con $K_t = 1$, siendo $K_D = 0,35 + 0,36K_B$ para $K_B > 0,15$, siendo P=presión atmosférica y ϕ =elevación solar.

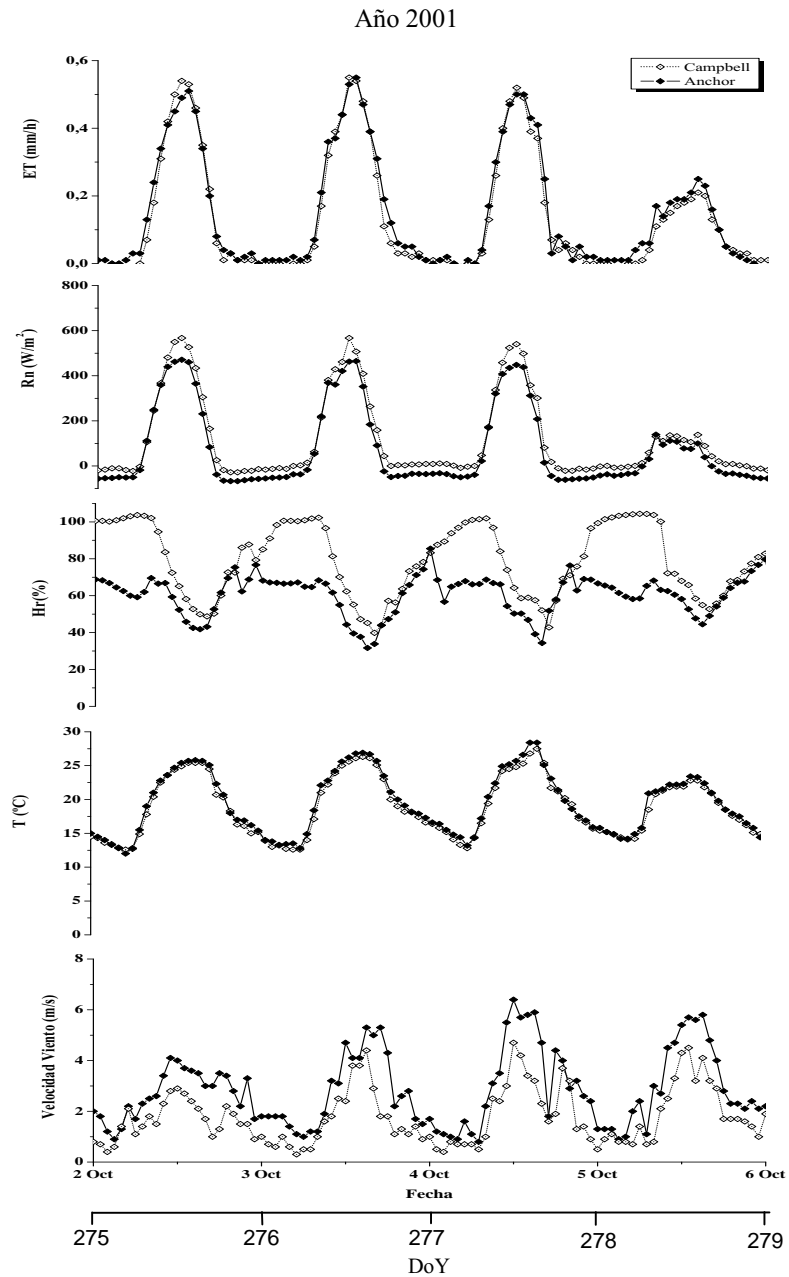


Figura IV.7: Comparación de datos obtenidos a partir de los sensores montados en *Anchor Station* (—◆—) y *Campbell* (—◇—) para algunos días dentro del ciclo del cultivo de maíz (Año 2001).

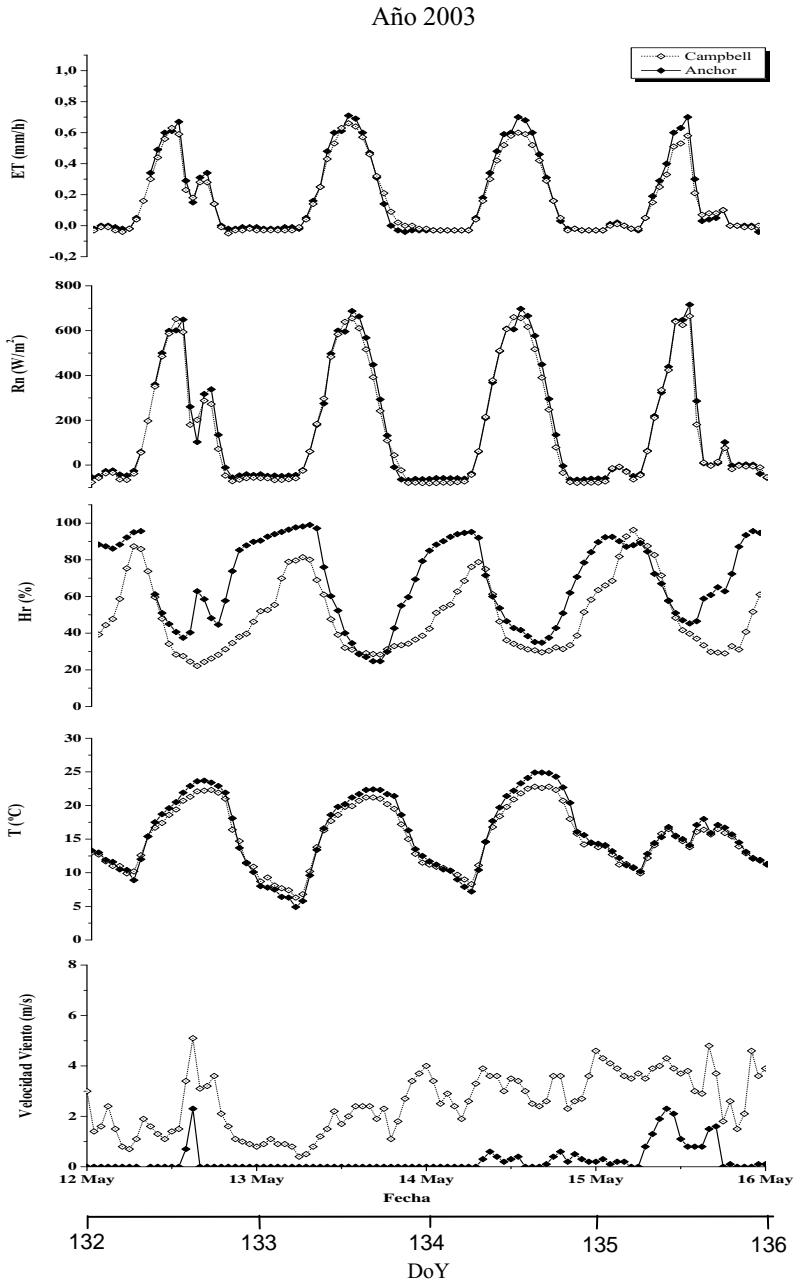


Figura IV.8: Comparación de datos obtenidos a partir de los sensores montados en *Anchor Station* (—◆—) y *Campbell* (—◇—) para algunos días dentro del ciclo del cultivo de maíz (Año 2003).

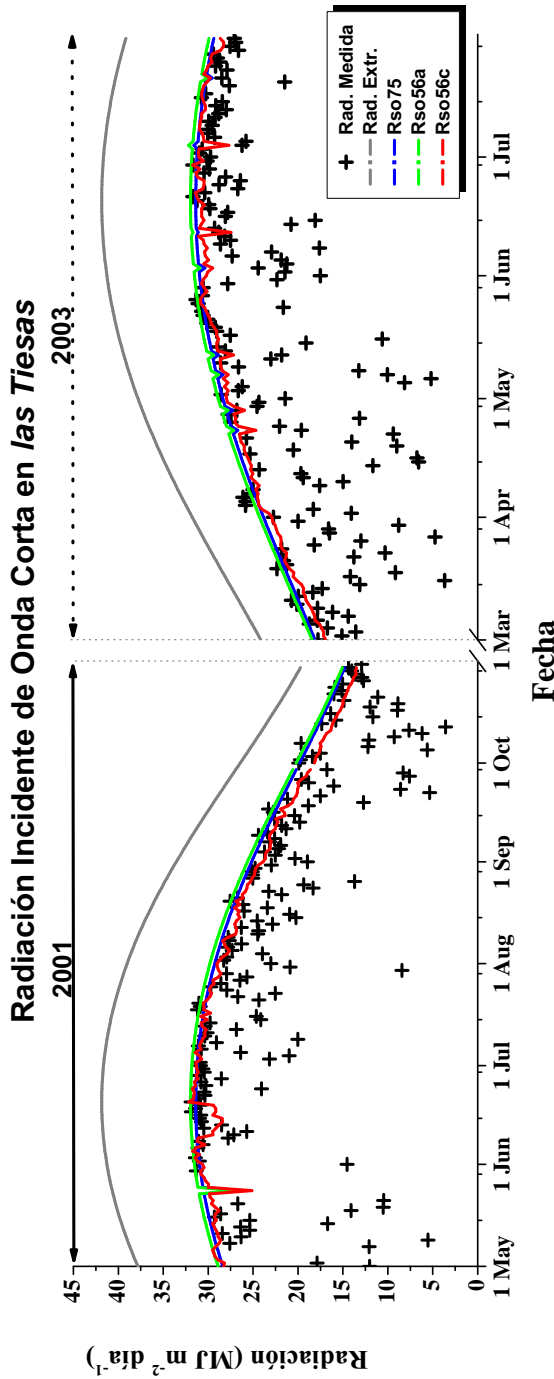


Figura IV-9: Figura correspondiente a la radiación incidente de onda corta (Rso) en la estación *Anchor Station*. Aparecen representados la radiación medida en la estación (+), radiación extraterrestre (—Ra), radiación incidente en la superficie (—Rso75) calculada como $0,75 \cdot Ra$, radiación incidente calculada según las dos metodologías FAO56 (Allen *et al.*, 1998): —Rso56a (ver nota pie 1) y —Rso56c (ver nota pie 2).

De forma análoga a como se ha hecho en el apartado IV.1.3 se ha calculado la evapotranspiración de referencia desde tres fuentes: los datos calculados por el Servicio de Asesoramiento de Riegos que proporciona los valores de ET_0 a escala diaria, los datos horarios calculados en el apartado IV.1.3 sumados en intervalos diarios y los valores de ET_0 medida por el lisímetro de festuca. En las figuras IV.10 y IV.11 aparecen representados los valores de ET_0 diarios calculados anteriormente. Dentro de la misma figura aparecen representados los valores de precipitación y riego registrados por el lisímetro. La figura superior corresponde a la campaña de 2001 sobre maíz y la inferior a la campaña de 2003 sobre trigo. Esta comparación, garantiza que los tres caminos utilizados para calcular la ET_0 reproducen de forma similar esta medida. Como se observa en estas figuras, existe un acuerdo general entre los tres métodos. Hay que tener en cuenta que la estación agroclimática registra valores de forma continua, y por ello se dispone en la mayoría de los días del ciclo del cultivo el valor de ET_0 , al contrario que en el caso del lisímetro que aunque la mayoría de los riegos son nocturnos, por diversos problemas no se dispone de valores todos los días del ciclo. Salvo períodos en los cuales los valores teóricos sobreestiman ligeramente los valores medidos por el lisímetro, la metodología FAO se ajusta a los valores locales de ET_0 . Los valores dentro del ciclo de 2001 ofrecen un máximo entre los DoY 150 y 200, justo en los meses más cálidos del verano Junio, Julio y Agosto, en los que ET_0 alcanza valores en torno a 8 mm/día. De forma análoga en la secuencia correspondiente al año 2003 se dan los mismos valores, coincidiendo con el final del ciclo de trigo (mes de Julio). Si se comparan directamente las medidas del lisímetro con los métodos FAO56 y el recomendado por ASCE a partir de datos horarios (figs. IV.12-a y IV.12-b), se observa que durante el año 2001 existe un mayor acuerdo que en el año 2003. Esto es debido en gran parte a la calidad de la superficie de referencia, pues la gramínea en el año 2003 ha envejecido y se hace recomendable su replantación, y en menor medida al ciclo de crecimiento pues en el año 2003 se incluyen datos de primavera con mayor inestabilidad atmosférica. Los valores comparados de ambos métodos de estimación (figs. IV.12-c y IV.12-d) indican un evidente acuerdo a lo largo del ciclo del cultivo.

El acuerdo mostrado por los tres métodos implica que en ausencia de uno de ellos, los otros dos pueden ser utilizados para la estimación de ET_0 . Los datos utilizados para la ET_0 en lo sucesivo en este trabajo serán los datos diarios, debido a que ofrecen una continuidad diaria, son los usados por el SAR y reflejan el uso combinado de ambas estaciones. Añadido a esto, nuestros resultados pueden, en el futuro ser implementados por sus servicios de asesoramiento. Este último motivo, implicará que las variables utilizadas deberán ser en la medida de lo posible coincidentes. En la tabla IV.2 aparecen los valores numéricos en ambos años (2001 y 2003) de ET_0 integrados a escala semanal.

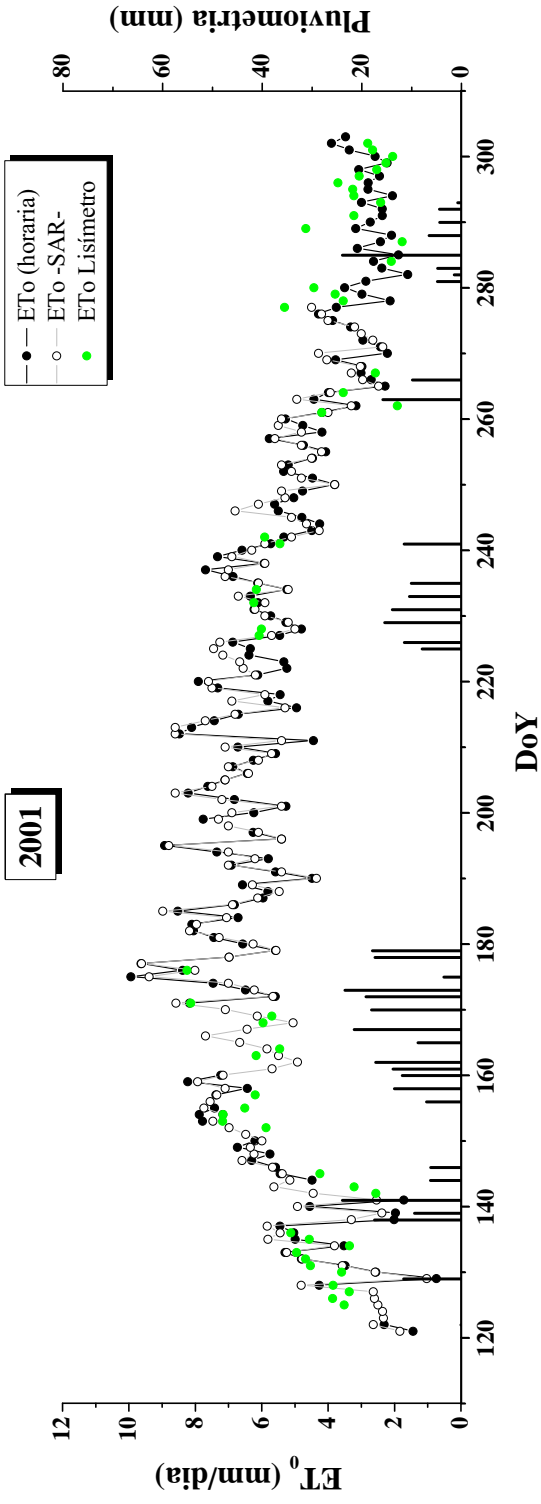


Figura IV.10: ET_0 ($mm \cdot dia^{-1}$) durante el ciclo del cultivo de maíz (año 2001). En la figura se representa el valor de evapotranspiración de referencia obtenido a partir de tres fuentes: Lisímetro de festuca (●), SAR (-○-) y calculados desde Anchor Station (-●-).

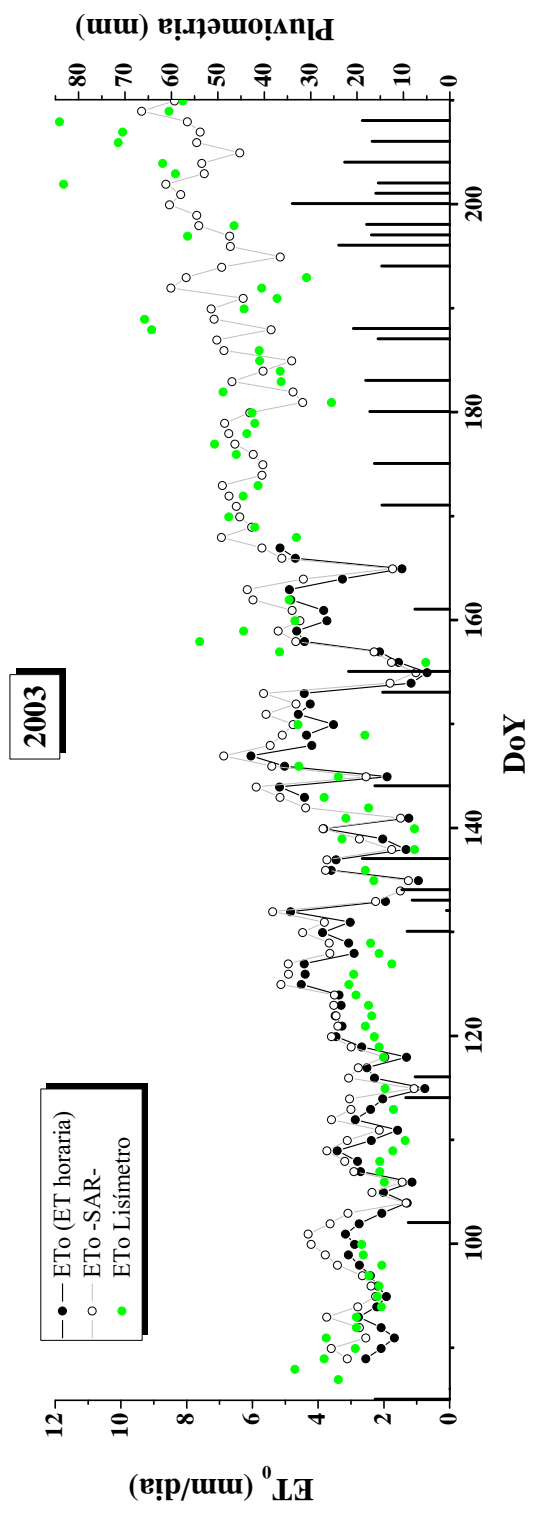


Figura IV.11: ET_0 ($mm \cdot dia^{-1}$) durante el ciclo del cultivo de trigo (año 2003). En la figura se representa el valor de evapotranspiración de referencia obtenido a partir de tres fuentes: Lisímetro de festuca (●), SAR (-○-) y calculados desde Anchor Station (-●-).

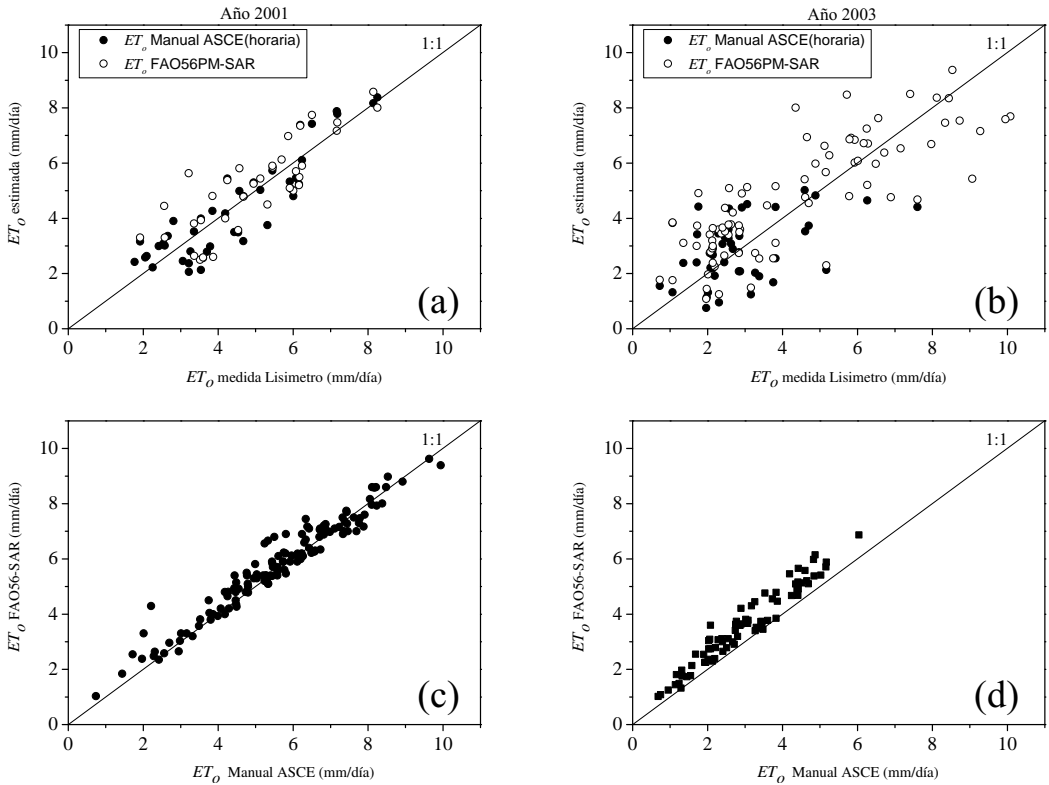


Figura IV.12: Representación de los valores de ET_0 medidos por el lisímetro y estimados por dos métodos, mediante la ecuación FAO56 utilizada por el SAR (FAO56-SAR) y el método ASCE a partir de datos horarios (Manual ASCE). En las figuras (a) y (b) se comparan los valores medidos en el lisímetro con los estimados por ambos métodos para el año 2001 y 2003 respectivamente. En las figuras (c) y (d) se comparan el método utilizado por el SAR para datos diarios y el recomendado por ASCE a partir de datos horarios para los años 2001 y 2003.

Tabla IV.2: Valores semanales de ET_0 (mm-semana⁻¹) facilitados por el SAR del ITAP.

mes	Maíz Año 2001/ Trigo Año 2003			
	1ª semana	2ª semana	3ª semana	4ª semana
Marzo	21 / 18	18 / 30	25 / 30	38 / 27
Abril	29 / 26	32 / 30	28 / 28	41 / 41
Mayo	18 / 27	25 / 32	31 / 36	56 / 63
Junio	51 / 40	44 / 49	47 / 50	65 / 71
Julio	52 / 55	43 / 59	46 / 61	69 / 80
Agosto	50 / 60	49 / 50	40 / 44	61 / 80
Septiembre	37 / 37	34 / 39	33 / 35	28 / 40
Octubre	25 / 22	18 / 25	19 / 14	29 / 15

IV.2. Seguimiento de Cultivos.

IV.2.1. Las Medidas de Radiometría.

La radiometría (McCluney, 1995) se ha utilizado tradicionalmente en Teledetección en el diseño y calibrado de sensores (ESA, 2001), para establecer relaciones empíricas entre reflectividad y parámetros agronómicos de interés (Gilabert *et al.*, 1996; Choudhury *et al.*, 1994; Neale *et al.*, 1989; Choudhury, 1987; Bausch and Neale, 1987), para el diseño de magnitudes secundarias como los índices de vegetación (Gilabert *et al.*, 2002) así como en la validación y ajuste de modelos físicos (Camacho-de Coca, 2004). Por ello que la radiometría resulta de especial interés en el seguimiento de cultivos en campo. La implementación de estas medidas con las medidas de satélite ha hecho que se incluyan dentro de la campaña de seguimiento y establezca el desarrollo de una metodología en su medida. Las medidas han sido realizadas por el grupo de teledetección de la Universidad de Castilla-La Mancha con amplia experiencia en medidas de radiometría (González-Piqueras, 1999; Calera, 2000). Así, antes de detallar la campaña de medidas, conviene aclarar algunos de los aspectos más importantes a tener en cuenta en las medidas de radiometría.

La Medida.

En radiometría se pretende *la caracterización de una superficie utilizando un sensor electro-óptico como detector remoto del flujo radiante proveniente de la misma* (Wyatt, 1978). La magnitud que describe el flujo radiante es la radiancia, L_λ , que es el flujo radiante que sale de una fuente extensa en una determinada dirección, por unidad de ángulo sólido y por unidad de área de la fuente proyectada en dicha dirección. Las unidades de medida son, $W m^{-2} sr^{-1} nm^{-1}$, en el caso de que consideremos la radiancia en una determinada longitud de onda, o bien $W m^{-2} sr^{-1}$, en el caso de que se considere integrada sobre una banda espectral. La relación entre el flujo incidente sobre una superficie y el flujo reflejado por ella se describe mediante la magnitud

adimensional reflectividad. De dicha magnitud se pueden derivar propiedades de la superficie. Aquí se va a considerar la medida de la reflectividad en la parte del espectro electromagnético que corresponde a la radiación solar (0,3-2,4 μm).

La magnitud radiométrica que caracteriza, para todas las configuraciones geométricas, las propiedades reflectantes de una superficie es la función de distribución de reflectividad bidireccional, BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) (Nicodemus *et al.*, 1977), definida como el cociente entre la radiancia reflejada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección y la irradiancia incidente por unidad de ángulo sólido desde una dirección en particular tal y como se muestra en la figura IV.13. Su medida es prácticamente imposible dado que se tendrían que medir simultáneamente radiancia reflejada e incidente, sobre ángulos sólidos infinitesimales.

La alternativa consiste en calcular el cociente de la radiancia reflejada en una dirección determinada y la radiancia reflejada por un panel cuya superficie sea lo más similar posible a una superficie lambertiana ideal perfectamente reflectante, en ambos casos bajo las mismas condiciones de iluminación. Esta configuración de medida se denomina hemisférica-cónica (Schaepman-Strub *et al.*, 2006) y da lugar al factor de reflectividad bidireccional, BRF (*Bidirectional Reflectance Factor*), mostrado en la ecuación IV.4, donde se ha promediado la radiancia sobre el ángulo de visión del sensor.

$$\rho_{\lambda}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_t(\theta_r, \phi_r, \lambda)}{dL_p(\theta_r, \phi_r, \lambda)} k(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \quad (\text{IV.4})$$

Donde L es la radiancia ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}$), θ es ángulo cenital y ϕ el acimutal según se ve en la figura IV.13. Los subíndices i, r indican que la radiancia es incidente y reflejada respectivamente. Los subíndices t y p se refieren a la radiancia proveniente de la superficie bajo estudio (*target*) y el panel respectivamente. El factor $k(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ tiene en cuenta la desviación del panel de referencia respecto al comportamiento de un panel ideal, perfectamente reflectante y difusor perfecto o lambertiano. El subíndice λ indica que el BRF es una variable espectral, dependiente de la longitud de onda.

Algunos autores establecen una serie de consideraciones sobre las configuraciones y procedimientos adecuados a la hora de adquirir medidas espectrales, a este respecto nos remitimos a los trabajos de Schaepman-Strub *et al.* (2006), Milton (1987) y Silva (1978). En la medida de la irradiancia en campo, existe una componente difusa importante, y por tanto, la ecuación IV.4 nos estará dando el factor de reflectividad hemisférica direccional, HDRF (*Hemispherical Conical Reflectance Factor*), esto exige que para calcular ρ_{λ} habrá que corregir esta componente difusa (Strub *et al.*, 2003). No obstante, cuando la medida se realice con la atmósfera libre de nubes, con cielo despejado y transparente, la razón entre radiación directa y difusa es 10 a 1 y por tanto, aproximar la ρ_{λ} a HDRF es aceptable. Este efecto se ve corregido además por la medida del panel de reflectividad dado que ésta también contiene la componente de radiación difusa.

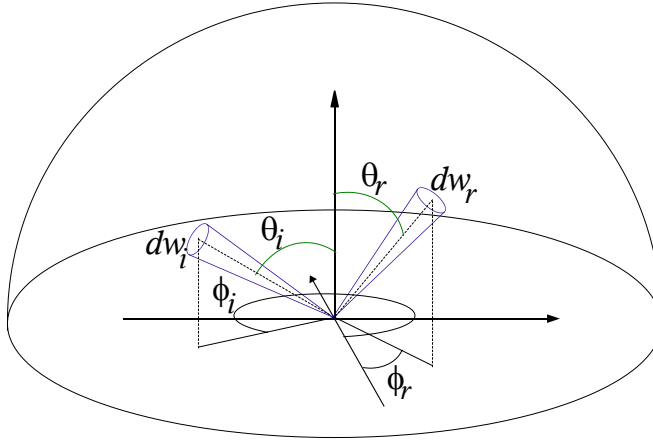


Figura IV.13: Configuración geométrica usada en la definición y medida del BRF (Snyder, 1998). En dicha figura se indican los ángulos cenital y acimutal de incidencia (θ_i, ϕ_i) y de reflexión (θ_r, ϕ_r). También están indicados los ángulos sólidos de incidencia (dw_i) y reflexión (dw_r) (Schaepman-Strub *et al.*, 2006; Martonchik *et al.*, 2000).

Así pues el montaje experimental usual en el que el sensor se sitúa en la vertical, de tal forma que permite la observación cenital, y se mide alternativamente la radiancia procedente de la superficie objeto de estudio y de una superficie *ideal* (Spectralon® de Labsphere³) permite, en rigor, calcular el valor del HDRF haciendo el cociente entre dichas radiancias. Dicho valor del HDRF es pues el correspondiente a dicha geometría de visión y dependerá de la geometría de iluminación, esto es de la posición del sol y de la distribución hemisférica de la radiación difusa incidente. El cociente entre el flujo radiante que abandona la superficie integrado sobre todo el hemisferio y el flujo radiante que llega a la superficie, también procedente de todo el hemisferio, es lo que se denomina reflectividad hemisférica total, en una determinada longitud de onda. Si integramos sobre todas las longitudes de onda en el espectro solar, la reflectividad de una superficie se denomina albedo. En el caso de que la superficie observada fuera lambertiana, el valor del HDRF medido mediante el cociente entre la radiancia reflejada por la superficie y la radiancia reflejada por una superficie ideal, como se ha descrito anteriormente, coincide con el valor del BRF, y se utiliza la palabra reflectividad. Esto es así porque, al ser perfectamente difusora, la radiancia medida por el sensor es la misma en todas direcciones, y la aplicación de la Ley de Lambert permite estimar la energía que sale de la superficie y la energía que llega a ella, sin más que multiplicar por el número π las radiancias medidas cuando se observa la superficie y cuando se observa la superficie ideal perfectamente reflectante.

³ www.labsphere.com

En medidas de campo donde las superficies presentan una variabilidad en la reflectividad a lo largo del tiempo, para que éstas sean comparables es necesario mantener constantes a lo largo de la secuencia de medidas la configuración de iluminación y observación. Por este motivo, y como se indicará a continuación las medidas se realizarán en las horas centrales del día y observando en la vertical de la muestra.

Fuentes de Error.

Con el objeto de garantizar la calidad de los datos obtenidos en campo, es recomendable conocer las principales fuentes de error presentes en cualquier trabajo de radiometría. El conocimiento y su cuantificación permitirá reducir su influencia. Los errores serán de tipo sistemáticos y aleatorios: Los errores aleatorios se pueden reducir aumentando el número de medidas, los errores sistemáticos se reducirán en muchos casos al considerar cocientes en las medidas. A continuación se enumeran las principales fuentes de error introducidas, (Camacho-de Coca, 2000; González-Piqueras, 1999):

1. Errores Instrumentales

Son los errores asociados al detector, entre ellos podemos destacar: (1) El ruido que producen pequeñas variaciones aleatorias en el detector. Al aumentar el número de medidas se reduce considerablemente este error. (2) La corriente oscura que registra el detector cuando tiene cerrado el diafragma. Los dos sensores utilizados en el presente trabajo (se utilizan dos equipos iguales uno del grupo de teledetección de la Universitat de València y otro de la Universidad de Castilla-La Mancha) corrigen este efecto. (3) La no-linealidad del detector, que se manifiesta como una saturación del detector en los procesos fotoelectrónicos para niveles elevados de irradiación. (4) Los errores espectrales, asociados al desplazamiento de los filtros monocromáticos que se corrigen midiendo materiales que presentan rasgos de absorción localizados. (5) La dependencia que presentan los detectores con la temperatura. Jackson and Robinson (1985) muestran que los detectores de Si son muy estables a los cambios de temperatura, mientras que los detectores de PbS presentan una disminución del voltaje de salida con el aumento de temperatura. Este efecto provoca un cambio en la reflectividad del 1 % por 1 °C. En la medidas de campo, la temperatura ha llegado a 38 °C. Este hecho obliga a considerar con especial cautela las medidas espectrales realizadas con los detectores de PbS, pues los errores pueden superar un 20 % de error.

Otros errores que no se deben obviar son los relacionados con la desviación del comportamiento lambertiano de las superficies observadas. Para evitar este efecto, lo más aconsejable es realizar las observaciones en el nadir, sobre todo cuando se hace el seguimiento temporal de ciertas superficies donde es necesario mantener una sistemática en las medidas. También es recomendable realizar una medida del panel de referencia previa a cada medida espectral. Algunos autores han cuantificado el error cometido al asumir esta hipótesis hasta en un

27% sobre la reflectividad con ángulos de iluminación de hasta 75° (Kimes and Kirchner, 1982).

2. Errores debidos a la técnica de medida.

En estos errores interviene directamente el usuario de medida, por ello se tendrá una posibilidad mayor de corrección sobre ellos. Las fuentes de error que se dan son, (1) Radiación dispersa proveniente de cuerpos adyacentes y difundida por la atmósfera, así la irradiancia adquiere un carácter hemisférico frente a su carácter direccional. (2) La variabilidad en la configuración de iluminación entre medidas de la superficie y panel de referencia, este efecto se mitigará cuanto más rápido se realice la serie de medidas (Milton *et al.*, 1995). En el campo pueden introducir errores que van desde el 1% hasta invalidar la medida. (3) El intervalo temporal entre medidas provoca el cambio en la superficie bajo estudio, especialmente cuando se trata de cubiertas vegetales, que están en permanente evolución fisiológica (Gilbert and Meliá, 1993). En nuestro experimento, este será uno de los objetivos, caracterizar radiométricamente la evolución temporal de las cubiertas vegetales. (4) La variabilidad espacial de las medidas, debido al tamaño limitado del campo de visión del sensor. Esto puede provocar que la medida no sea representativa de la superficie. Para caracterizar las superficies observadas habrá que tomar una serie de medidas mayor cuanto menor sea el FOV. En el experimento de campo, se hará un transecto de seis medidas que garantizará la representatividad de la cubierta.

Diseño del experimento.

Objetivos

1. Caracterizar radiométricamente la evolución temporal de dos cubiertas vegetales representativas de la zona de estudio como son maíz y trigo.
2. Reproducir las relaciones entre variables espectrales y variables agronómicas medidas simultáneamente. Las variables agronómicas seleccionadas son: Fracción de cobertura vegetal verde (f_{cv}), índice de área foliar (LAI, *Leaf Area Index*), altura de cultivo (h), biomasa, evapotranspiración (a través del coeficiente de cultivo, K_c), y fenología.

Instrumentación. Para las medidas radiométricas se ha utilizado el radiómetro GER 3700⁴, mostrado en la figura IV.14. Sus principales características son:

- Intervalo espectral de 300 - 2500 nm en 704 canales.
- Ancho de banda:
 - 1,5 nm: de 300 - 1050 nm.
 - 6,5 nm: de 1050 - 1900 nm.

⁴ Más información disponible en <http://www.ger.com>

- 9,5 nm: de 1 900 - 2500 nm.
- Líneas de semiconductores: 1 con 512 de Si, 1 con 128 de PbS, y 1 con 64 de PbS.
- Tiempo de adquisición: 50 ms.
- Campo de visión: 6,6° estándar y 10° elíptico.
- Exactitud radiométrica: $\pm 5\%$ (400 nm), $\pm 5\%$ (1100 nm), $\pm 7\%$ (2500 nm),
- Ruido equivalente a radiancia,
 - 400 nm: $6,2 \cdot 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}^{-1}$.
 - 700 nm: $3,1 \cdot 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}^{-1}$.
 - 900 nm: $9,3 \cdot 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}^{-1}$.
 - 2 200 nm: $1,1 \cdot 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}^{-1}$.
- Corrección automática de la *corriente oscura*

Conviene señalar en este punto que el radiómetro lleva incorporado un sistema que promedia un número determinado de medidas espectrales dentro de su intervalo corto de medida. Las diferentes líneas de semiconductores cambian a 1050 y 1900 nm, regiones donde la respuesta del detector puede presentar alguna variación. El radiómetro presenta un intervalo óptimo de medida que va desde 400 a 1050 nm, con un ancho de banda de 1,5 nm, con un total de 449 canales en la misma línea de semiconductores. Por debajo de 400 nm el ruido es tan elevado que no es posible considerar estas medidas.

El área observada en función de la altura cuando utilizando el campo de visión de 6,6°, varía desde un diámetro de 0,24 m a 2 m de altura hasta 0,81 m de diámetro a 7 m de altura. El tipo de cubierta va a condicionar la altura de observación. En el caso de la cubierta de maíz, debido a la separación de las hileras se han hecho dos barridos de seis medidas a 5 y 7 m de altura, observando resultados análogos. En el caso del trigo, la altura de medida no ha superado los dos metros de altura, con un barrido de cinco medidas.

Diseño. Sobre las estaciones lisimétricas descritas anteriormente, se han cultivado maíz durante el año 2001 y trigo durante el año 2003. Siguiendo la metodología propuesta por Milton (1987) para medidas de campo se ha hecho sobre cada uno de los cultivos un seguimiento periódico de entre 7 y 10 días. En el caso de maíz, se ha hecho un barrido de seis medidas tanto a 5 como a 7 m dentro y fuera del lisímetro, con el objeto de estudiar la representatividad del lisímetro respecto a la parcela.

Para tener en cuenta la dependencia de la función de reflectividad con el ángulo de observación, la adquisición espectral se ha hecho manteniendo la observación sobre la vertical de la superficie de estudio a las alturas citadas y bajo iluminación solar en las horas centrales del día (máximo de elevación solar). En la tabla IV.3 aparecen

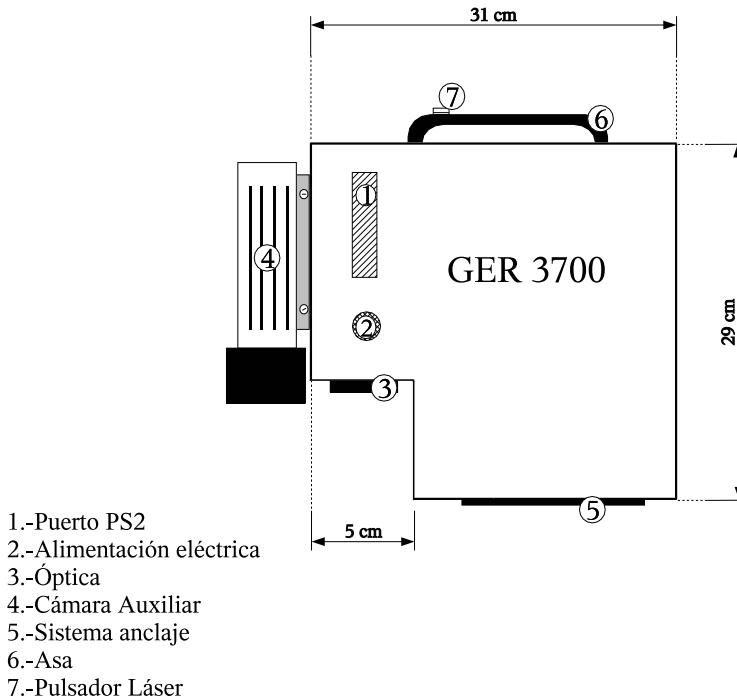


Figura IV.14: Diagrama del espectrorradiómetro GER3700 indicando (1) el puerto de transmisión de datos PS2, (2) la conexión de alimentación eléctrica, (3) la disposición de la óptica, (4) la cámara fotográfica auxiliar -que no viene suministrada por el fabricante y es una adaptación hecha en la Universidad de Castilla-La Mancha-, (5) el sistema de anclaje, (6) asa portadora, (7) el pulsador del láser para localizar el campo de visión.

recogidos cada una de las medidas espectrales incluyendo la hora de adquisición del primer y último espectro sobre el lisímetro.

Hay que tener en cuenta que en cubiertas consideradas cerradas, la función de distribución bidireccional es más suave o isotrópica a ángulos cenitales de iluminación moderados⁵ Kimes (1983); Jackson *et al.* (1980), menores de 55° . En cubiertas abiertas, el suelo puede interceptar y dispersar radiación en mayor medida para ángulos de elevación solar alto.

En el seguimiento de un único cultivo y bajo las suposiciones expuestas anteriormente, es esperable que esta influencia debida a la anisotropía en la reflectividad espectral sea mayor en los valores intermedios de cobertura vegetal, teniendo en cuen-

⁵ Por consideraciones geométricas, en la tabla IV.3 se indica el ángulo de elevación solar, complementario del ángulo cenital de iluminación.

ta la mayor inhomogeneidad de éstas.

Tabla IV.3: Día, hora (GMT) y ángulo de elevación solar (grados) al inicio y final de cada adquisición en las campañas respectivas durante los años 2001 y 2003.

Año 2001 - Maíz		
DÍA	HORA (Inicio-Fin)	ÁNGULO (Inicio-Fin)
13 Junio	12:07-13:00	70-74
18 Junio	12:01-12:45	69-74
26 Junio	11:55-12:37	68-73
11 Julio	12:39-13:22	71-73
18 Julio	13:08-14:10	72-69
24 Julio	12:36-14:49	69-62
8 Agosto	12:51-13:23	66-67
13 Agosto	12:24-12:48	63-65
20 Agosto	12:17-12:46	61-63
28 Agosto	12:41-13:00	60-61
3 Sept.	12:32-12:41	57-58
2 Oct.	12:25-12:36	47-47
16 Oct.	12:22-12:33	41-42

Año 2003 - Trigo		
DÍA	HORA (Inicio-Fin)	ÁNGULO (Inicio-Fin)
10 Marzo	13:58-14:35	46-43
21 Marzo	13:07-13:42	51-51
1 Abril	13:39-14:13	55-53
4 Abril	12:51-13:04	56-57
8 Abril	13:20-14:12	58-55
21 Abril	13:50-14:47	61-55
28 Abril	13:27-13:41	65-64
2 Mayo	13:33-13:56	66-64
14 Mayo	12:15-12:31	67-68
29 Mayo	13:49-14:11	70-68
3 Junio	13:23-13:45	73-71
6 Junio	12:45-13:57	67-70
12 Junio	12:39-12:57	67-69
19 Junio	13:22-13:59	72-74
27 Junio	13:15-13:22	72-72
3 Julio	12:59-14:24	69-73
10 Julio	12:05-12:57	60-69

Medidas espectrales.

A continuación se presenta un resumen de las medidas realizadas a lo largo de ambas campañas:

- 14 medidas espectrales en barridos de 6 adquisiciones a dos alturas diferentes sobre el interior y exterior del lisímetro durante el ciclo de maíz (año 2001).
- 17 medidas espectrales en barridos de 5 medidas sobre el lisímetro durante el ciclo de trigo.

En total se han recogido 421 espectros sobre ambas cubiertas, que supone un número elevado de muestras para caracterizar temporalmente la evolución de ambos cultivos.

En las figuras IV.16 y IV.17 aparecen representados la reflectividad espectral de cada uno de los cultivos durante varios días a lo largo de todo su ciclo fenológico. En un caso cubre desde Abril hasta Octubre del año 2001 y en caso de trigo cubre desde Marzo hasta Julio de 2003. Asimismo, en la tabla IV.3 se indican el total de las fechas en las que se hizo adquisición radiométrica así como la hora y ángulo entre la primera y la última medida.

Al inicio de campaña el comportamiento espectral corresponde a suelo desnudo por no existir cubierta vegetal o ser ésta es muy escasa. A medida que va apareciendo, debido a la presencia de una actividad fotosintética aparecen los rasgos de absorción característicos de clorofila en la zona del visible. También se observa un aumento de la reflectividad en la zona del infrarrojo cercano (IRC) debido a la dispersión de radiación dentro de la estructura vegetal. Asimismo se aprecian los rasgos característicos de absorción de la molécula de agua (1,4 y 1,9 μm). En la zona espectral del visible, la reflectividad va disminuyendo progresivamente según se desarrolla la planta. Este decrecimiento es más pronunciado en la zona del rojo y del verde (550-710 nm) y menos acusado en la zona del azul (400-500 nm). Por encima de 0,75 μm la reflectividad presentan mayor rango de variación, en el caso de maíz, se observa una variación en la reflectividad que disminuye debido a lo que algunos autores denominan *booting*, cuando las hojas de la parte inferior de la planta comienzan a perder su clorofila y por tanto existe una actividad reflectante menor y tienden a una tonalidad marrón oscuro. La reflectividad en el infrarrojo cercano disminuye en torno a un 15% tanto en ambos casos (principio de Julio para maíz y Junio para trigo), en sintonía con lo observado por Tucker *et al.* (1981). Esta evolución en la reflectividad se produce cuando la cubierta sobrepasa una fracción de cobertura en torno al 60% (Gitelson *et al.*, 2002). En el rango por encima de 1 μm la arquitectura de la cubierta provoca reflexiones múltiples en el seno de ésta dispersando la radiación. A medida que la altura de la cubierta aumenta se produce una caída de la reflectividad en el infrarrojo. En el caso de maíz, se produce una disminución acusada al final del ciclo de crecimiento, esta disminución se debe a la presencia del sombreado de la cubierta sobre el suelo, así como un efecto de humedad de suelo importante. En el caso de trigo, el albedo de la cubierta es más alto, que también se aprecia más brillante visualmente,

así como dada la época del año (verano) el suelo se encuentra seco en superficie con mayor albedo.

Como se ha comentado anteriormente, el sensor PbS es más sensible a la temperatura iniciando su captura a partir de 1 050 nm, en el último día de medida, 10 de Julio de 2003, este rango de medidas no se ha considerado, por ello que no se representa. Durante la campaña de maíz (2001) ha funcionado adecuadamente.



Figura IV.15: Fotografías del montaje del radiómetro junto al sistema de ordenador portátil de adquisición. El montaje se ha realizado sobre festuca, montando el radiómetro 2 m por encima de la cubierta.

Maíz Año 2001

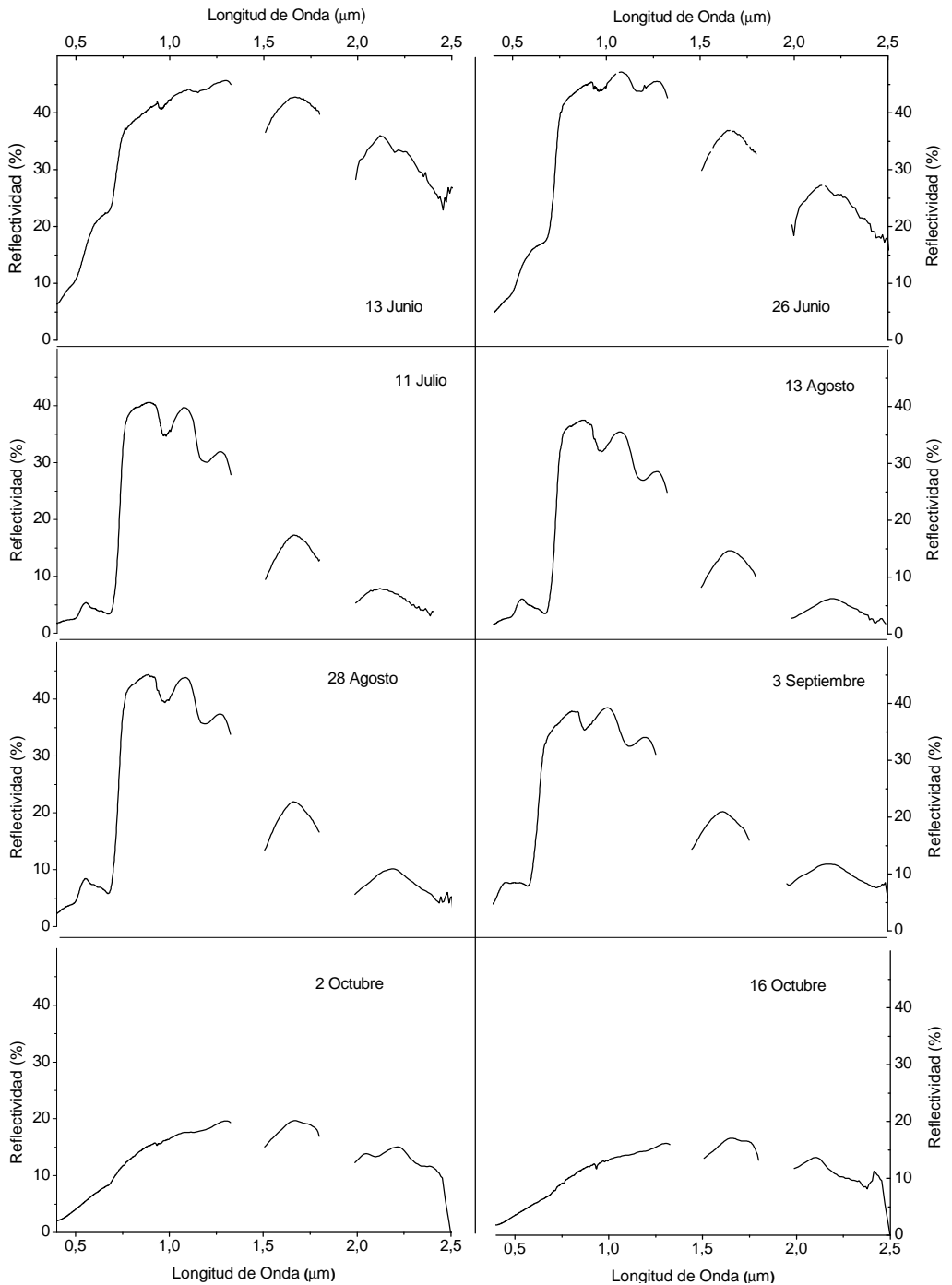


Figura IV.16: Reflectividad espectral (%) de varios días adquirida durante la campaña de maíz.

Trigo Año 2003

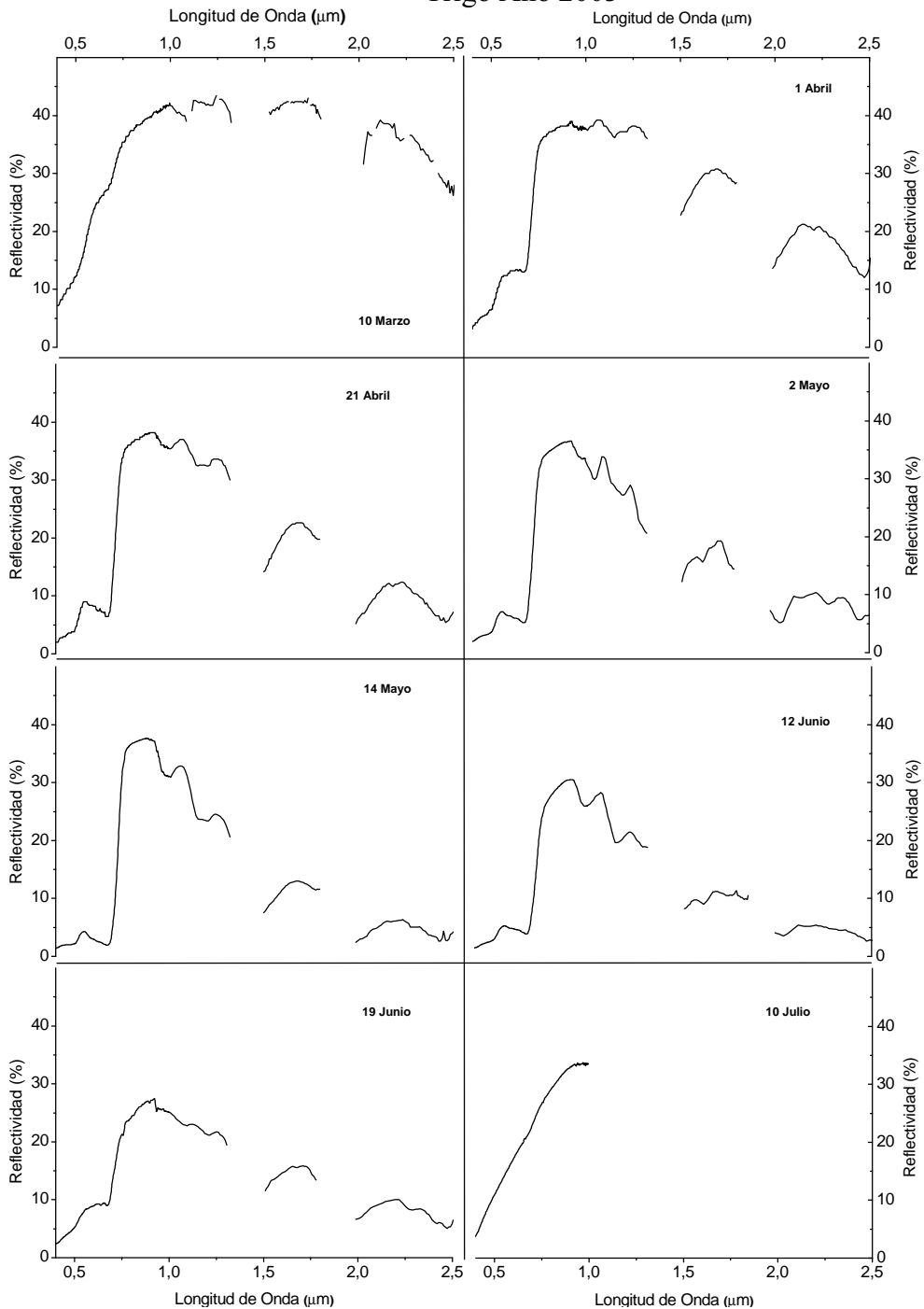


Figura IV.17: Reflectividad espectral (%) de varios días adquirida durante la campaña de trigo.

IV.2.2. Fenología

Dentro del desarrollo de la campaña, se ha recogido la fenología de cada uno de los cultivos (fig. IV.18). En la tabla IV.4 aparecen detalladas cada una de las fases del desarrollo. El ciclo comienza con la siembra de maíz (el 14 de Abril de 2001), el nacimiento se da a principios de Mayo, generando 5 hojas (V5) el 13 de Junio. Durante el mes de Junio se produce el desarrollo de la planta alcanzado la fase de reproducción el 1 de Agosto con el proceso de fecundación masculina cuando emerge el *penacho*. Una semana más tarde, el 7 de Agosto tiene lugar la fecundación, y al final de ésta se da el inicio de la maduración del grano, alcanzando entre 13 al 29 de Agosto la fase de grano lechoso-pastoso. La fase de maduración tiene lugar durante el mes de Septiembre. Se considera la maduración fisiológica el 4 de Octubre realizando la cosecha en el inicio del mes de Noviembre. Durante el mes de Octubre la maduración es paralela a la pérdida de agua en los tejidos.

El trigo se siembra el 10 de Febrero de 2003, iniciando su nacimiento a finales de mes. El seguimiento muestra que del 12 al 18 de Marzo el cultivo pasa de dos a tres hojas, comenzando el ahijamiento. El ahijamiento se va desarrollando durante el mes de Abril, comenzando el encañado a finales de este mes, el primer nudo se observa el 24 del mismo mes y el segundo nudo el 30. La planta de trigo al ser de la variedad *enana* sufre una importante alteración pues el tamaño de la espiga en relación al tamaño de la planta es considerable. El tamaño medio de la espiga está en torno a 8-10 cm. La espiga tiene tonalidad verde, muestra de su actividad fotosintética. La espiga está completamente desarrollada el 21 de Mayo, comenzando entonces su fecundación e inicio de maduración. La última semana de Mayo y primera de Junio se pueden distinguir los procesos de maduración lechosa (28 Mayo) y madurez pastosa (2 de Junio). Durante el mes de Junio tiene lugar la formación final del grano y su sobremaduración, con la consiguiente generación de biomasa en la espiga y la pérdida de agua. El 26 de Junio se detecta la formación de grano duro, estando la primera semana de Julio dispuesta para cosecha.

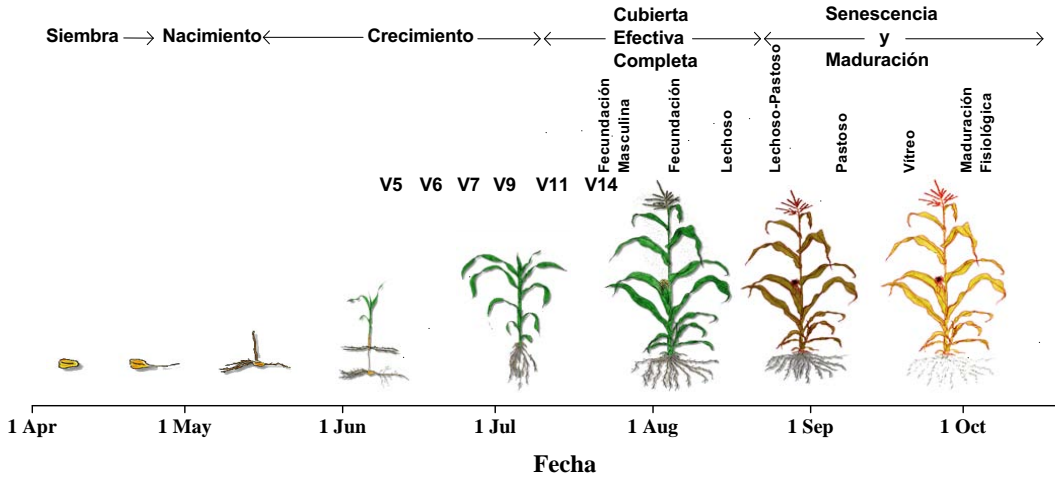


Figura IV.18: Diagrama de la fenología del maíz durante el año 2001.

Tabla IV.4: Estado del desarrollo para ambos cultivos, maíz y trigo respectivamente.

Año 2001 - Maíz

DÍA	Fenología	DÍA	Fenología
13 Junio	V5	7 Agosto	Fecundación
20 Junio	V6	13 Agosto	Lechoso
27 Junio	V7	29 Agosto	Lechoso-Pastoso
4 Julio	V9	6 Sept.	Pastoso
12 Julio	V11	13 Sept.	Vitreo
20 Julio	V14	20 Sept.	Vitreo
26 Julio	F. Masculina	29 Sept.	Vitreo
1 Agosto	Fecundación	4 Oct.	Maduración Fisiológica

Año 2003 - Trigo

DÍA	Fenología	DÍA	Fenología
12 Marzo	Dos Hojas	14 Mayo	Emergencia Espiga
18 Marzo	Tres Hojas	21 Mayo	Espiga Libre
25 Marzo	Inicio Ahijado	28 Mayo	Madurez Lechosa
2 Abril	Ahijamiento	2 Junio	Madurez Pastosa
11 Abril	Ahijamiento	12 Junio	Sobremaduración
24 Abril	Enderezamiento-Un nudo	20 Junio	Grano Duro
30 Abril	Dos Nudos	26 Junio	Grano Duro

IV.2.3. Fracción de Cobertura: f_c .

Objetivos.

En este trabajo, los objetivos que se pretenden con la medición y seguimiento de la fracción de cobertura vegetal verde (f_c) como parámetro agronómico de referencia son:

1. La fracción de cobertura vegetal verde se ha utilizado tradicionalmente como parámetro agronómico de referencia, de fácil medida (utilizando la fotografía digital). Así se utilizará la f_c para definir los estados fenológicos del cultivo. Este hecho permite definir las curvas de evolución teóricas de otros parámetros agronómicos, como es el caso de los coeficientes de cultivo teóricos (Allen *et al.*, 1998).
2. Al estar relacionado con la evolución de la cubierta, se va a utilizar para hacer el estudio de representatividad del lisímetro respecto a la parcela (Allen *et al.*, 1991a;b; Allen and Fisher, 1991).

Metodología.

Según la metodología propuesta por Calera, Martínez and Meliá (2001) se estima la f_c adquiriendo una fotografía sobre la vertical, coincidente sobre los puntos en los que se adquiere la medida espectral y procurando evitar la presencia de sombras marcadas dentro de la cubierta. Estas últimas generan dificultades en el proceso de clasificación al mezclar suelo sombreado con hojas sombreadas. Posteriormente se trata esta fotografía mediante la técnica de clasificación supervisada distinguiendo entre las componentes de vegetación verde y suelo. Según han mostrado otros autores White *et al.* (2000), que han obtenido la fracción de cobertura vegetal verde por varios métodos, recomiendan el método de la cámara fotográfica como el método más fácil y fiable para validar información desde teledetección. La principal ventaja de este método es su carácter no destructivo y por tanto se puede medir la fracción de cubierta, en el mismo punto y simultáneamente al radiómetro. La clasificación explota la respuesta espectral de la vegetación en el visible, el contraste entre el suelo (más brillante en el rojo y verde simultáneamente) y la vegetación (menos brillante en el rojo). El análisis visual de las imágenes nos muestra que:

1. No existen píxeles no clasificados o vegetación verde senescente clasificada como verde.
2. Las zonas de suelo sombreado se clasifican como suelo
3. Algunas zonas de vegetación muy sombreadas se han clasificado como suelo, creando la posibilidad de una infraestimación de esta fracción de cobertura. Este efecto se ha suavizado tomando las fotografías en ausencia en la medida de lo posible de radiación directa.

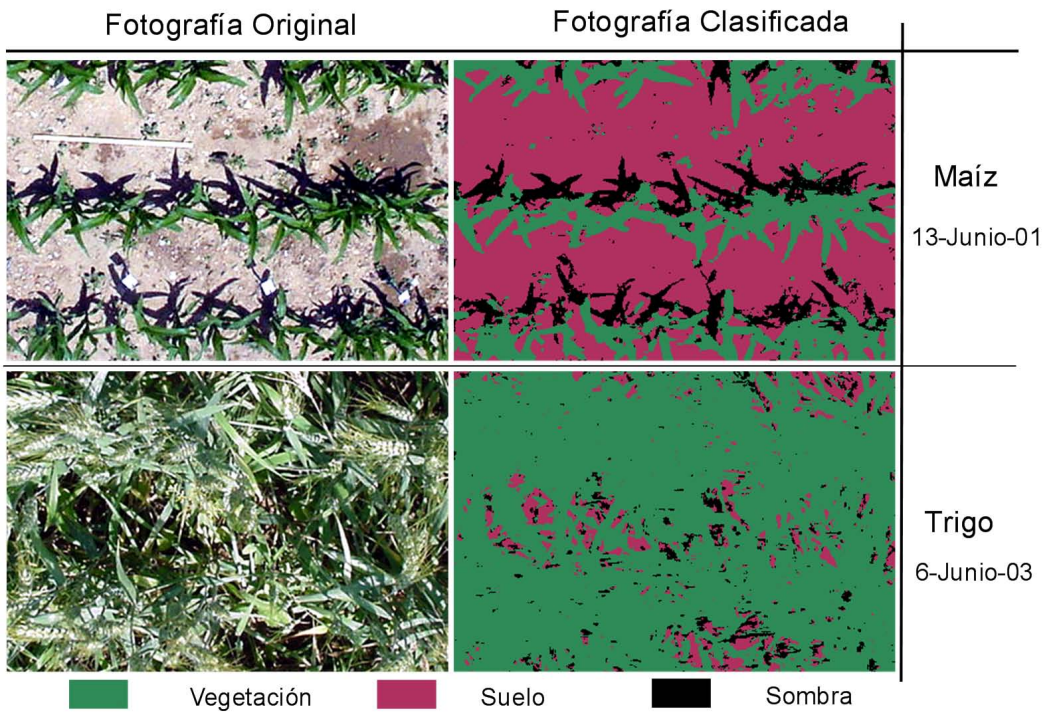


Figura IV.19: Imagen ejemplo de maíz donde observa a la izquierda la fotografía original y a la derecha la misma clasificada, distinguiendo entre componentes de vegetación (en color verde), suelo (marrón) y sombra (negro). En la parte superior se muestra un caso para maíz el día 13 de Junio de 2001 con $f_c = 0,14$; en la parte inferior se muestra el caso de trigo el día 6 de Junio de 2003 con $f_c = 0,89$.

En la figura IV.19 se ha recogido un ejemplo correspondiente a maíz y el resultado de clasificar la misma. Se observa una correspondencia visual clara entre ambas representaciones. Los posibles errores en la mezcla de clases (efecto (3)) se van reduciendo al hacer un barrido de varias imágenes dentro de la misma zona.

En la tabla IV.5 aparecen reflejados los valores de f_c medidos sobre el lisímetro tanto para maíz como para trigo durante su ciclo completo. El error en la estimación se ha hecho a partir del muestreo de las fotos tomadas en el mismo lisímetro. Según la metodología seguida, al ser la fotografía digital no destructiva, las mismas medidas se han repetido fuera del lisímetro.

En la figura IV.21 aparecen representados los datos correspondientes a las cuatro series de medidas, los datos sobre los lisímetros tanto de trigo ($-+-$) como de maíz ($-+-$) y la f_c medida en la parcela de protección en ambas campañas (maíz $\cdots\diamond\cdots$, y

Tabla IV.5: Valores de fracción de cobertura f_c para ambas campañas, maíz y trigo respectivamente.

Año 2001 - Maíz					
DÍA	f_c	Error	DÍA	f_c	Error
13 Junio	0,14	0,01	13 Agosto	0,82	0,02
18 Junio	0,22	0,03	20 Agosto	0,83	0,03
26 Junio	0,37	0,03	28 Agosto	0,75	0,02
11 Julio	0,80	0,02	3 Sept.	0,64	0,05
18 Julio	0,80	0,05	20 Sept.	0,18	0,03
24 Julio	0,80	0,01	2 Oct.	0,14	0,01
8 Agosto	0,80	0,01	16 Oct.	0,18	0,03

Año 2003 - Trigo					
DÍA	f_c	Error	DÍA	f_c	Error
10 Marzo	0,07	0,01	2 Mayo	0,63	0,04
21 Marzo	0,15	0,04	14 Mayo	0,80	0,06
1 Abril	0,43	0,02	21 Mayo	0,84	0,06
4 Abril	0,46	0,03	3 Junio	0,90	0,02
8 Abril	0,60	0,05	6 Junio	0,88	0,02
21 Abril	0,75	0,02	12 Junio	0,74	0,05
28 Abril	0,64	0,02	19 Junio	0,57	0,07

trigo $\cdots\blacklozenge\cdots$). En maíz, el cultivo emerge a principios de Mayo, a mediados de este mes comienza la etapa de crecimiento ($f_c > 10\%$), alcanzando la cubierta efectiva completa (EFC, *Effective Full Coverage*) el día 13 de Julio, que es el máximo de su fracción de cobertura (de $f_c \cong 0,8$ dentro del lisímetro y $f_c \cong 0,9$ en el exterior) . Durante esta etapa la f_c experimenta pequeñas variaciones, observándose un mínimo relativo el día 1 de Agosto debido al inicio de la reproducción cuando emerge el penacho. La cubierta adquiere una coloración amarillenta, al ser una proporción importante de esta parte de la planta afecta sensiblemente al conjunto de la cubierta. Esta bajada en f_c se mantiene durante algún tiempo debido a que durante la fecundación se dispersa el polen que mantiene una cubierta amarillenta un período aproximado de 7 días. La disminución de la f_c comienza la última semana de Agosto, en coincidencia con el inicio de la senescencia. Esta bajada se mantiene hasta el mínimo de 0,2 dentro del lisímetro y 0,35 fuera. Es esperable que el mínimo sea cero pues la cubierta al madurar suspende al final del ciclo su actividad fotosintética. En el experimento se ha estudiado el conjunto de la cubierta vegetal, considerando por tanto el manto de otra cubierta verde emergente de forma simultánea a la caída del maíz, de menor cobertura, al ser la etapa otoñal y por tanto limitada por la caída de temperaturas

estacional. La evolución de la fracción de cobertura, aunque mantiene los cambios de tendencia reproduciendo las etapas de crecimiento del cultivo, dentro del lisímetro es permanentemente un 10 % menor durante todo el ciclo. Esto indica que los datos del lisímetro presentan una limitación en su crecimiento que no se corresponde con el resto de la parcela.

En los datos representados en la figura IV.21 para trigo correspondientes al intervalo del año 2003 no se puede identificar con la claridad anterior un *plateau*. A principios de Marzo se inicia la etapa de crecimiento, superando el valor en f_c de 10 %, manteniéndose este crecimiento hasta la última semana de Marzo, cuando la cubierta alcanza un máximo relativo, estabilizándose en un 60 %, durante el mes de Abril. Durante esta etapa el cultivo crece en altura, pero la fracción de cobertura experimenta un crecimiento pequeño, al no generar hojas nuevas. Hacia el 15 de Mayo la espiga comienza a emerger. Al ser un cultivo de la variedad enana, el tamaño de la espiga en relación al tamaño de la planta es importante, es de tonalidad verde y por tanto presenta una actividad fotosintética. La espiga contribuye de forma importante, aumentando la f_c y por tanto llevando ésta a un valor máximo que alcanza 90 %. A partir de este momento, finaliza la etapa reproductora y comienza la senescencia y la etapa de maduración que se extiende el mes de Junio. Es a finales del mes de Junio cuando el cultivo presenta su estado de madurez alcanzando un mínimo en el valor de la f_c en torno a cero. Se llega a este valor mínimo debido a la aridez de la zona, pues al no registrarse precipitación, no se genera ninguna cubierta alternativa a la senescencia de esta cubierta principal. Las curvas exterior ($\cdots\blacklozenge\cdots$) e interior ($--++$) al lisímetro reproducen los cambios en su tendencia de forma similar. Aunque de forma sistemática, la f_c correspondiente al exterior evoluciona sobre los datos obtenidos en el lisímetro. Las características de la cubierta en el caso del trigo es similar al exterior, a diferencia que en maíz, aunque no está claro el factor de influencia principal, desde la siembra el maíz exigió una replantación dentro del lisímetro debido a un alto porcentaje de pérdidas respecto al exterior, cosa que no ocurrió con el trigo. La influencia en la compactación del suelo en el lisímetro hace que la penetración de las raíces sea menor de una especie a otra y esto se traduzca en una mayor sensibilidad de la cubierta a variaciones de humedad en suelo, el maíz es una planta que presenta una respuesta más rápida al déficit hídrico que el trigo y puede ser otra causa de la diferencia entre interior y exterior.



Figura IV.20: Fotografía vertical de la cubierta de maíz sobre el lisímetro (izquierda) y en el exterior (derecha).

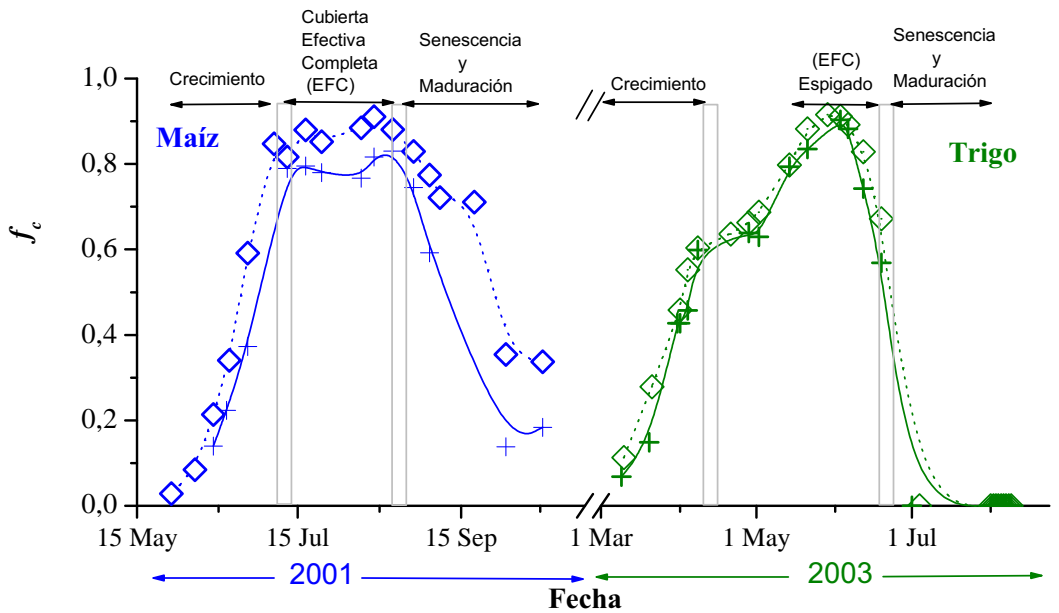


Figura IV.21: Evolución de la fracción de cobertura (f_c) para los cultivos de maíz ($-+-$) y trigo ($-+-$). Con la trama $\cdots\cdots$ se han indicado las observaciones en el exterior del lisímetro para cada cultivo.

IV.2.4. Índice de Área Foliar: (LAI).

Existen diferentes definiciones sobre el concepto de índice de área foliar (LAI; *Leaf Area Index*), en todas ellas se considera el área de las hojas sobre el área de suelo. El concepto cambia significativamente de unos autores a otros, unos consideran el LAI de la planta, otras veces el LAI incluye todas las hojas (verdes y senescentes) o el LAI sólo correspondiente a las hojas verdes. El concepto de LAI que se usará en el trabajo es el área de hojas verdes de la cubierta sobre el área de suelo.

El LAI se ha utilizado tradicionalmente como parámetro que está relacionado con la estructura de la planta. Por ello, en teledetección se ha convertido en un parámetro básico en las técnicas de observación de la Tierra. Usado en los modelos climáticos e hidrológicos a escala regional y global (Fensholt *et al.*, 2004). Existen importantes trabajos donde se ha relacionado los índices de vegetación con esta variable agronómica, mostrando en la mayoría de los casos importantes niveles de acuerdo (Wang *et al.*, 2005; González-Piqueras, 1999; Gilabert *et al.*, 1996; Wiegand *et al.*, 1992). Aunque con ciertas restricciones, pues son relaciones empíricas y que en muchos casos hay que tratar con cuidado si se quieren comparar interanualmente o extrapolar a otras zonas (Wang *et al.*, 2005).

Objetivos.

Dentro del seguimiento de los cultivos del presente trabajo, se ha seleccionado la variable agronómica LAI con los siguientes objetivos:

1. Describir la evolución fenológica de ambos cultivos en términos del índice de área foliar.
2. Simultanear las medidas de LAI con el resto de parámetros para cuantificar su interrelación.
3. Hacer una comparación de diferentes metodologías usados en la zona para la estimación del LAI.

Metodología.

De entre las metodologías utilizadas en la estimación de LAI, en el presente trabajo se ha optado por tres de ellas durante la campaña de maíz:

- Midiendo la transmisividad (τ) de la cubierta con el medidor LI-COR LAI-2000 (LI-COR, Lincoln, NE, USA).
- Tomando muestras de la cubierta y midiendo el área de las hojas verdes con el medidor de área foliar LI-COR 3000 (LI-COR, Lincoln, NE, USA).
- Usando la muestra indicada en el método anterior, proyectando su área y calculando ésta con la cámara fotográfica. De la misma forma que se calcula la fracción de cobertura vegetal verde.

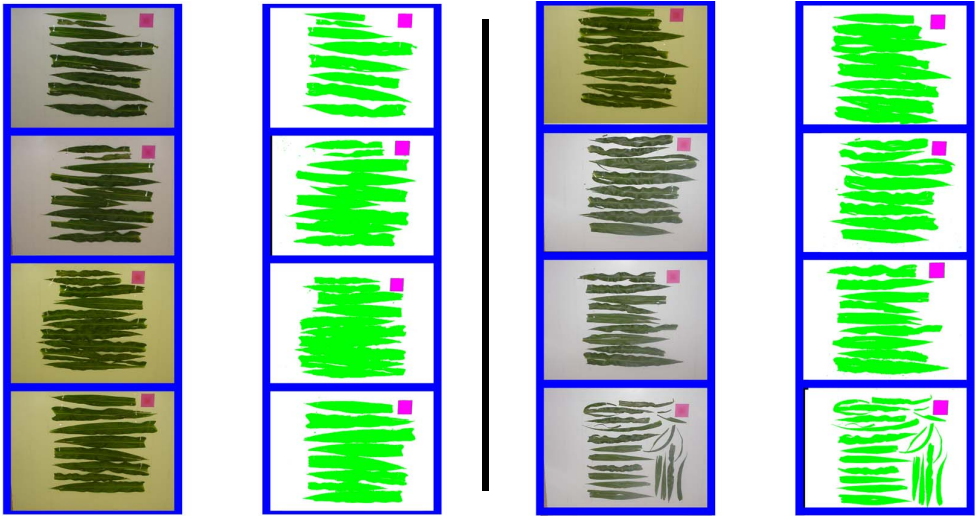


Figura IV.22: Representación de todas las hojas correspondiente a una muestra de maíz. Corresponde al día 1 de Agosto de 2001, con un valor de LAI=4,8.

Medidas destructivas.

En ambas campañas se han hecho las medidas destructivas, recogiendo una muestra de un área de 1 m^2 , representativa de la cubierta, y midiendo el área de una cara de las hojas con el medidor LI-COR LAI-3000 y de forma simultánea, también se mide su área utilizando fotografía digital. La muestra se ha recogido en la zona circundante al lisímetro, pues al ser destructiva altera la cubierta vegetal bajo estudio. Después de recoger la muestra se han distinguido los elementos de la planta, que en la mayor parte del ciclo son hojas fácilmente medibles con el medidor LAI-3000. La misma muestra se ha proyectado sobre un panel para medir por clasificación digital el área de una cara de las hojas, tal y como se muestra en la figura IV.22. En dicha figura aparecen representadas todas las hojas correspondientes a la muestra de maíz el día 1 de Agosto de 2001, obteniendo en este caso un LAI=4,8.

Medidas con LI-COR LAI-2000.

El medidor LI-COR LAI-2000 estima la transmisividad de la cubierta (Welles and Norman, 1991), a través de la integración de la radiación en el rango de $0,32 \mu\text{m}$ a $0,49 \mu\text{m}$, en anillos que cubren cinco ángulos cenitales de observación: $0-7^\circ$, $16-28^\circ$, $32-43^\circ$, $47-58^\circ$, $47-58^\circ$. El medidor de LAI asume las siguientes hipótesis sobre la cubierta: (i) Las hojas no transmiten ni reflejan la radiación, (ii) Las hojas son pequeñas en comparación con el área de observación y (iii) Las hojas están orientadas aleatoriamente en la dirección acimutal, (iv) Las hojas están distribuidas aleatoriamente. Estas hipótesis se pueden asumir como ciertas en cubiertas de cereal, también

reconocidas como homogéneas. Las medidas se adquieren bajo condiciones de luz difusa, lo usual es a primera o última hora del día. Normalmente, en la zona de estudio, estas condiciones prevalecen durante 30 minutos por la mañana y 30 minutos a última hora. Existe la posibilidad de hacer estas medidas en condiciones cobertura nubosa. Para evitar la influencia del personal que hace la medición se cubre la óptica de observación del sensor con un protector de 45°. La secuencia de medidas exige una primera medida sobre la cubierta para estimar la radiación incidente y un transecto de cinco medidas debajo de la misma con el observador en la dirección del transecto. Estas medidas se han realizado durante transectos de 6 muestras, que con cubiertas homogéneas se puede considerar suficiente para obtener la representatividad del LAI de la parcela (White *et al.*, 2000). En cubiertas forestales ofrece una desviación estándar de 0.05, siendo menor en el caso de cubiertas homogéneas.

Datos de LAI.

En la figura IV.23, están representados los datos de LAI durante todo el ciclo de crecimiento para ambas campañas (incluidas las fases del desarrollo), el error introducido en la medida radica esencialmente en el tamaño de muestreo cuyo valor en todo el rango de medidas no supera el 10 % al ser ambos cultivos muy homogéneos. En el caso de maíz, durante la fase de crecimiento, partiendo de un aumento lento de LAI, éste se mantiene hasta la mitad de la fase de cubierta efectiva completa. Una vez se ha alcanzado el máximo en la cubierta vegetal, la planta sigue creciendo en altura, generando nuevas hojas. Es a mitad de la fase de desarrollo cuando se alcanza el máximo de LAI, en coincidencia con la emergencia del penacho e inicio de la fase reproductiva. Este estado que se da la primera semana de Agosto, alcanzo un valor de LAI por encima de 5. Se observa un *plateau* en la evolución de este parámetro agronómico hasta el inicio de la fase de senescencia, la última semana de Agosto, en coincidencia con el inicio del amarilleamiento y de la etapa de senescencia (primera semana de Septiembre).

El ciclo de trigo representado en la figura IV.23 muestra una tendencia de crecimiento lineal durante la etapa de crecimiento del cultivo. Este crecimiento continúa hasta alcanzar el máximo de LAI=4,2 a mitad del espigado. En el caso del trigo, al igual que ocurre con la fracción de cobertura vegetal verde, la espiga contiene clorofila y por tanto contribuye al valor registrado de LAI. Además, la variedad de trigo es enano, el tamaño de la espiga en relación al tallo de la planta es notable y por tanto afecta apreciablemente a las variables agronómicas de la cubierta. La disminución de LAI coincide con la pérdida de clorofila en la hoja y durante la fase de maduración. Los resultados obtenidos en las medidas de LAI vienen recogidos en la tabla IV.6. Aquí se puede observar la diferencia entre los métodos utilizados (durante la campaña de maíz). Los métodos basados en la muestra destructiva, aquí denominados LAI y LICOR3000, muestran un acuerdo significativo durante todo el ciclo. Comparando estos con las medidas no destructivas (LICOR2000), se observa que durante el

crecimiento del cultivo existe una diferencia por debajo del 10 % entre los tres métodos, esto implica que las hipótesis hechas en la estimación de la transmisividad se ajustan adecuadamente a la realidad. A medida que avanza el ciclo hacia la etapa de senescencia, los métodos destructivos divergen respecto al método **LICOR2000**, no llegando este último a reflejar un valor de LAI por debajo de 3 al final del ciclo, donde se aprecia una clara sobreestimación. Durante la senescencia la hipótesis (i) hecha sobre las medidas de LAI (**LICOR2000**) teniendo en cuenta que las hojas no reflejan ni transmiten la radiación prevalece sobre la estimación del área verde, y por tanto continúa midiendo una variable que es el área foliar pero que no se ajusta a la definición dada inicialmente, que debe ser sólo la componente verde de la hoja. Por ello, se recomienda utilizar el método (**LICOR2000**) cuando la cubierta sea homogénea y no presente una componente de materia orgánica seca. En todo caso, cuando sobre la cubierta vegetal se dé esta circunstancia, la transmisividad debe ser corregida con la simultaneidad del método destructivo en momentos puntuales dentro del ciclo (White *et al.*, 2000). Por este motivo, las medidas de LAI que se utilizarán en lo sucesivo serán las obtenidas en el método destructivo.

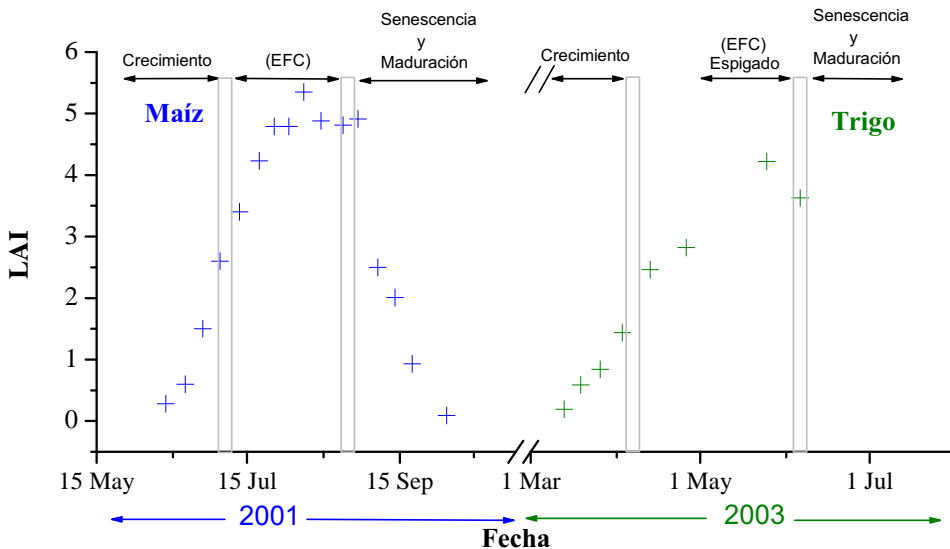


Figura IV.23: Evolución del LAI para trigo y maíz. En la figura aparecen indicados las fases en el desarrollo de ambos cultivos.

Tabla IV.6: Valores de *LAI* para ambas campañas, maíz y trigo respectivamente.

Año 2001 - Maíz

DÍA	LAI	LICOR3000	LICOR2000	DÍA	LAI	LICOR3000	LICOR2000
12 Junio	0,3			7 Agosto	5,4	5,4	
20 Junio	0,6			14 Agosto	4,9	4,9	4,5
27 Junio	1,5			23 Agosto	4,8	4,9	4,3
4 Julio	2,6			29 Agosto	4,9	4,9	4,3
12 Julio	3,4			6 Sept.	2,5	2,7	3,8
20 Julio	4,3	3,7		13 Sept.	2,0	1,9	3,6
26 Julio	4,8	4,7		20 Sept.	0,9	1,0	3,9
1 Agosto	4,8	4,9		3 Oct.	0,1	0,1	3,3

Año 2003 - Trigo

DÍA	LAI	DÍA	LAI
13 Marzo	0,2	13 Abril	2,5
19 Marzo	0,6	26 Abril	2,8
26 Marzo	0,8	25 Mayo	4,2
3 Abril	1,5	6 Junio	3,6

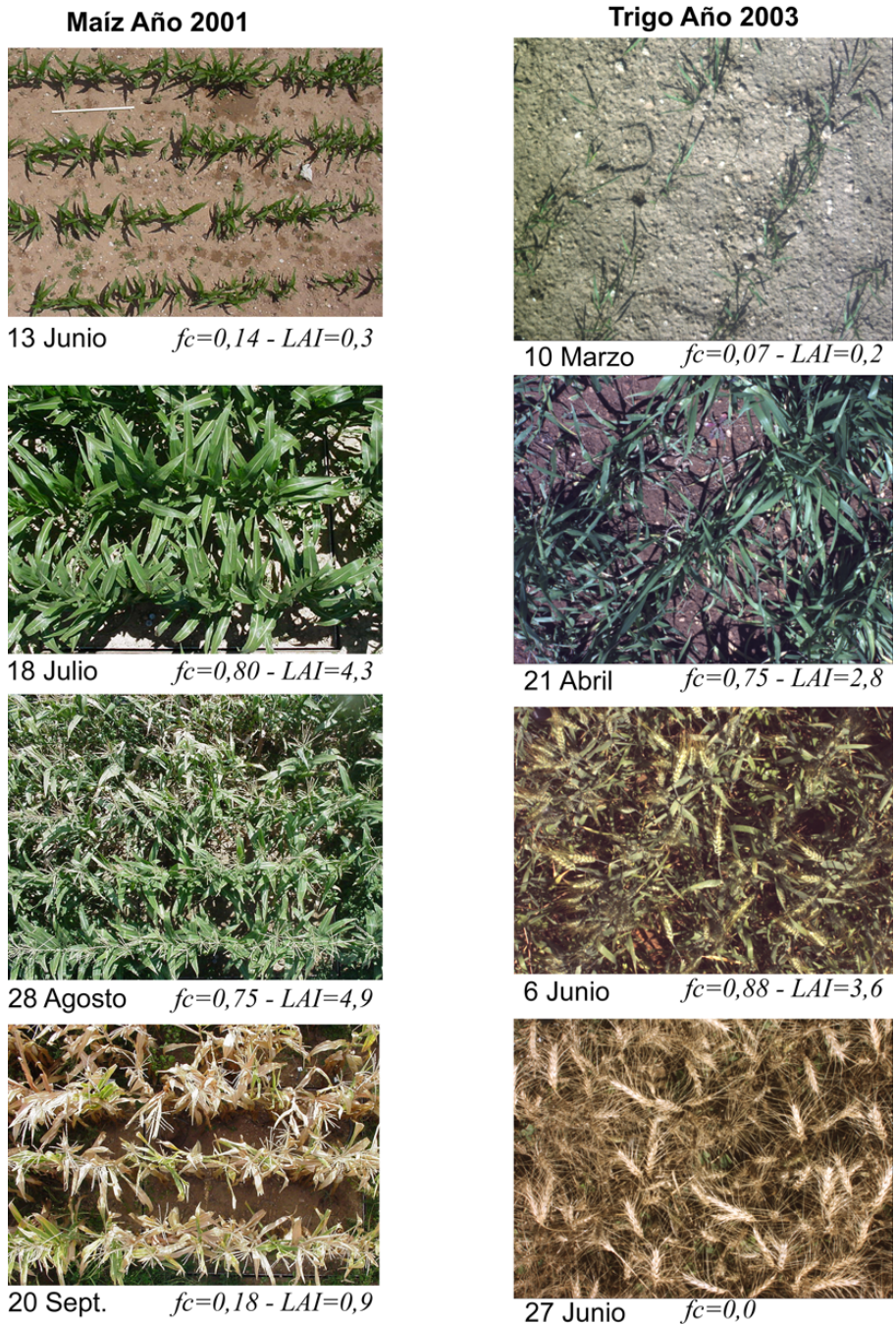


Figura IV.24: Fotografías indicativas de la evolución del LAI y f_c para trigo y maíz.

IV.2.5. Biomasa.

La biomasa es un parámetro agronómico clave utilizado en los modelos de producción, relacionado con la estructura de la cubierta y el estado de crecimiento y fertilización de la misma (Hansen and Schjoerring, 2003; Serrano *et al.*, 2000). Es, considerada tanto a escala de parcela, por la trascendencia económica que tiene en zonas basadas en la actividad agraria y forestal, como a escala global en los modelos climáticos (Sellers *et al.*, 1997; Sellers, 1987), vinculada a los ciclos de agua y carbono. Es evidente que resulta un parámetro que junto a los propuestos anteriormente está vinculado al desarrollo de la cubierta y por tanto, debe ser considerado en el seguimiento de la cubierta vegetal. A partir de los modelos de producción, se ha vinculado la biomasa con las variables espectrales como los índices de vegetación. Algunos autores establecen, sobre ciertos cultivos mejores estimaciones sobre la biomasa que para el LAI (Casanova *et al.*, 1998). Según Moran *et al.* (1997) a partir de los datos en teledetección, se pueden considerar dos aproximaciones a la estimación en el crecimiento de las cubiertas vegetales: a través de relaciones empíricas integrando los valores del índice de vegetación en el tiempo, o a través de la estimación de parámetros intermedios como LAI o la fracción de radiación fotosintéticamente activa a través de los IV e introducidos en modelos de crecimiento y modelos agrometeorológicos (Clevers, 1997; Clevers *et al.*, 1994).

El contenido el agua de la planta, también es un parámetro tenido en cuenta en los ciclos ecológicos de absorción y emisión de carbono, y con este propósito se están utilizando algunos sensores espaciales (Ceccato *et al.*, 2002). Tradicionalmente se ha expresado el contenido en agua en la planta o sus componentes, como el porcentaje de ésta respecto al peso total en fresco. No obstante, algunos autores encuentran relaciones entre los índices de vegetación y el contenido de agua expresado como cantidad de agua por unidad de área y no en porcentajes (Ceccato *et al.*, 2002). Es por este motivo que en el trabajo se expresará en tantos por ciento (por su uso tradicional) aunque expresar este parámetro agronómico de una u otra forma sólo implica un sencillo cambio de unidades.

Objetivos.

1. Caracterizar mediante la evolución de la biomasa las cubiertas vegetales de trigo y maíz en un ciclo de crecimiento.
2. Establecer las relaciones entre las variables espectrales y la biomasa para ambos cultivos.
3. Estudiar *in situ* la evolución de la biomasa en coincidencia con la evolución de la evapotranspiración del cultivo a lo largo de un ciclo de crecimiento.

Metodología.

La misma muestra utilizada en el cálculo de LAI por el método destructivo se ha utilizado para calcular la biomasa. Se ha pesado la muestra en fresco, y posteriormente se ha metido en un horno a 60 °C hasta que su peso se estabiliza, entendiendo que se ha eliminado el contenido en agua (Calera *et al.*, 2004). De esta forma se distingue entre peso fresco, peso seco y contenido en humedad.

Este mismo proceso se ha seguido pero diferenciando los componentes en la planta de trigo: tallo, hojas y espiga.

Datos de biomasa.

En la tabla IV.7 aparecen los datos correspondientes a ambos cultivos, el error introducido al utilizar la misma muestra usada para medir el LAI presenta un valor máximo representativo del 10 %. Se han registrado tres tipos de medidas diferentes, por un lado la biomasa húmeda ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) que corresponde a su peso total en fresco, la biomasa ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) una vez se le ha extraído el agua y la proporción de agua en la muestra (%).

Los datos de la tabla IV.7 se han representado en la figura IV.25, donde se puede apreciar la evolución de biomasa seca (- + -) respecto a biomasa húmeda (peso fresco). La biomasa fresca crece de forma exponencial hasta alcanzar la cubierta efectiva completa, que se completa la primera semana de Julio en caso de maíz y la primera semana de Abril en caso de trigo. Para maíz, durante la fase de cubierta efectiva completa este aumento en la biomasa es lineal, cuando tiene lugar la fase reproductiva esta pendiente es menor, llegando a un máximo justo al inicio de la senescencia en valores de 10 640 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. El inicio de la senescencia provoca un rápido decrecimiento de la biomasa húmeda, llegando a un nivel de estabilización en los 15 días de la etapa senescence, cuyo valor de biomasa es de 4 980 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. En el caso de trigo, el crecimiento durante la etapa de cubierta efectiva completa no se puede considerar lineal al igual que ocurre con el maíz, teniendo en cuenta que en este caso, la cubierta alcanza un *plateau* estacionario en la fracción de cobertura continuando su crecimiento durante el espigado. El máximo al final de la etapa de crecimiento se alcanza con un valor de biomasa húmeda de 5 500 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. Al inicio de la senescencia se produce la rápida caída en la biomasa húmeda alcanzando un valor mínimo de 2 800 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ pasados 15 días de esta etapa, justo antes de la recolección.

La biomasa seca experimenta un período de crecimiento exponencial, durante la etapa de nacimiento y crecimiento, hasta alcanzar la EFC, donde comienza un aumento lineal que se mantiene durante esta parte del ciclo. Durante estas dos etapas, la humedad de la cubierta permanece entre el 85 y el 95 %, mostrando una evolución paralela las curvas de biomasa seca y biomasa húmeda. En el caso de trigo el crecimiento exponencial prevalece hasta llegar al espigado, pues es en este punto donde se alcanza el máximo en la cubierta vegetal, observándose un ligero *plateau* en la biomasa, que continúa creciendo hasta alcanzar su valor asintótico al final del espigado,

Tabla IV.7: Valores de Biomasa para ambas campañas, maíz y trigo respectivamente.

Año 2001 - Maíz

DÍA	Biomasa Húmeda (g/m²)	Biomasa Seca(g/m²)	Humedad (%)
12 Junio	140	20	86
20 Junio	470	50	89
27 Junio	1 280	180	86
4 Julio	2 720	350	87
12 Julio	5 250	700	87
20 Julio	6 380	1 250	81
26 Julio	7 620	1 180	85
1 Agosto	8 560	1 490	83
7 Agosto	9 570	1 710	82
14 Agosto	9 920	2 050	79
23 Agosto	10 440	2 220	79
29 Agosto	10 640	2 350	78
6 Sept.	5 860	2 010	66
13 Sept.	6 160	2 500	59
20 Sept.	5 300	2 280	57
3 Oct.	4 980	2 370	52

Año 2003 - Trigo

DÍA	Biomasa Húmeda (g/m²)	Biomasa Seca (g/m²)	Humedad (%)
12 Marzo	70	10	83
18 Marzo	120	20	84
25 Marzo	170	30	82
2 Abril	380	60	83
11 Abril	670	140	80
24 Abril	1 160	250	79
30 Abril	2 380	570	76
14 Mayo	3 100	650	79
21 Mayo	4 040	760	81
28 Mayo	3 820	940	75
2 Junio	5 500	1 380	75
12 Junio	4 790	1 650	66
20 Junio	3 240	1 670	49
25 Junio	2 800	1 680	40

justo al comienzo de la maduración, donde se mantiene el valor de la biomasa seca en torno a $2\ 800\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. El valor de la humedad del cultivo se mantiene constante entre valores del 80 a 85 % durante las etapas de crecimiento y espigado, y es por ello que las curvas de evolución tanto de biomasa húmeda como seca ofrecen tendencias similares.

En ambos cultivos la evolución de biomasa experimenta un rápido incremento durante la etapa de crecimiento. Durante la etapa de cubierta efectiva completa, los cultivos no son comparables en su evolución temporal, aunque existe un paralelismo en la humedad del cultivo. Ambos cultivos ofrecen durante su ciclo de crecimiento valores diferentes tanto en biomasa como en el ritmo de producción, al tener cada uno de ellos una fisiología diferente. Durante el inicio de la maduración, ambos cultivos decrecen rápidamente la biomasa húmeda, en intervalos de tiempos similares (diez días), que finaliza en valores asintóticos tanto de mínimo relativo para la biomasa húmeda como de máximo absoluto en la biomasa seca.

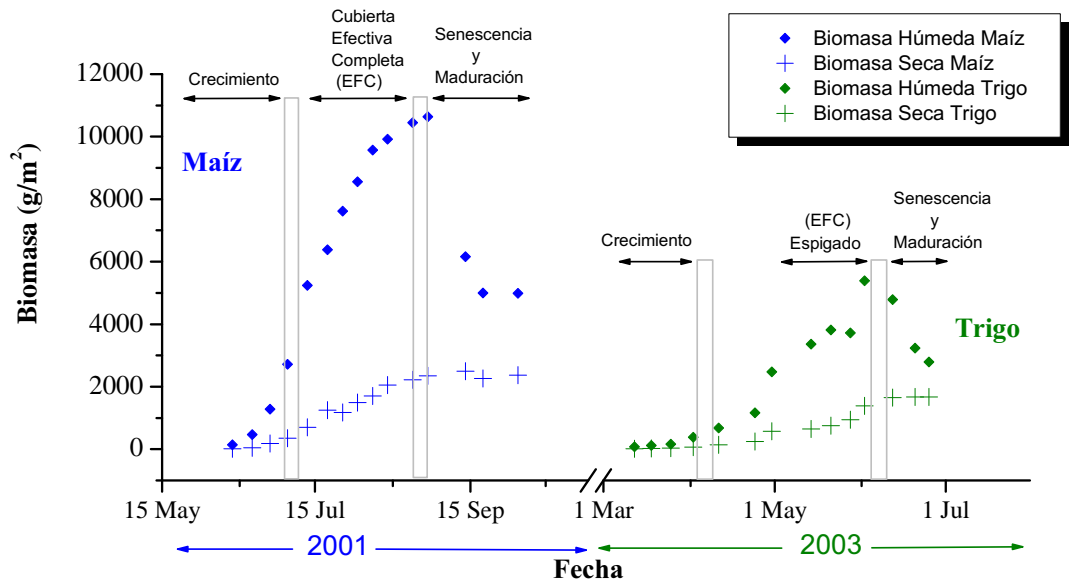


Figura IV.25: Evolución de biomasa (g/m^2) para trigo y maíz. En la figura aparecen indicados las fases en el desarrollo de ambos cultivos.

Durante la campaña de trigo, se han distinguido diferentes componentes de la planta: hojas, tallo y espigas. Como se puede apreciar en la tabla IV.8 cada componente sigue un patrón de desarrollo propio. Durante la etapa de nascencia y crecimiento, la biomasa seca de las hojas (Figura IV.26) coincide con la biomasa total del cultivo, observando el mismo comportamiento comentado en la figura IV.25. A partir

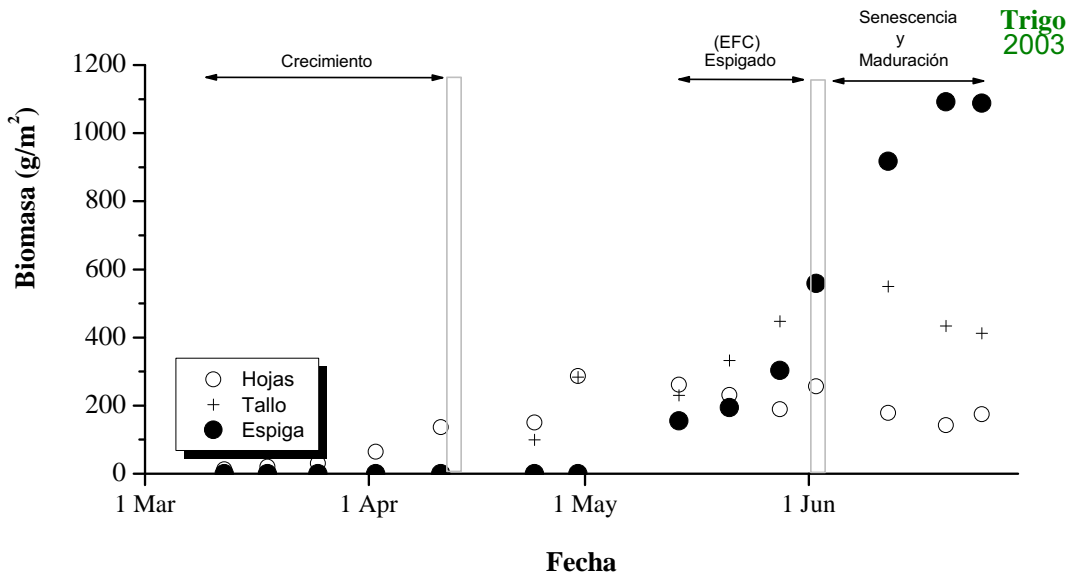


Figura IV.26: Evolución de biomasa (g/m^2) para trigo distinguiendo entre componentes: hojas (○), tallo (+) y espigas (●).

del encañado, en torno al 20 de Abril, comienza a aparecer el tallo, produciéndose un estacionamiento en la creación de hojas, y por tanto es en esta parte del ciclo la biomasa del tallo la que contribuye al crecimiento de la biomasa total. El crecimiento del tallo continúa durante la emergencia de la espiga y durante el propio crecimiento de la misma, llegando al final del espigado a un valor estacionario del crecimiento del tallo. Durante la maduración el principal contribuyente a la biomasa es la espiga observando un valor constante tanto para la biomasa de las hojas como del tallo. El crecimiento en la biomasa de la espiga se mantiene hasta el final del ciclo. Si se observa la figura IV.27 vemos que el contenido en agua hasta el inicio de la senescencia es similar en los tres componentes de la cubierta de trigo, siendo, durante la etapa senescente donde se aprecian las principales diferencias tanto en valor como en evolución temporal. Al inicio de la maduración comienza una caída brusca en el contenido en agua de las hojas de la planta, este descenso no dura más de 5 días alcanzando un mínimo del 20 %. De modo diferente evoluciona el contenido en agua del tallo que ofrece una caída más suave cuyo mínimo es del 58 %. La espiga cubre un rango de valores comparable a las hojas, aunque durante un período de tiempo más amplio y por tanto con una pendiente más suave. Sus valor final justo antes de la recolección alcanzan un mínimo en el contenido hídrico del 30 %.

Tabla IV.8: Valores de Biomasa (B) y contenido en agua (CA) para el cultivo del trigo distinguiendo entre hojas, tallo y espigas.

Año 2003 - Trigo						
DÍA	Hojas		Tallo		Espiga	
	B (g/m^2)	CA (%)	B (g/m^2)	CA (%)	B (g/m^2)	CA (%)
12 Marzo	12	83				
18 Marzo	20	84				
25 Marzo	30	82				
2 Abril	64	83				
11 Abril	140	80				
24 Abril	150	79	100	79		
30 Abril	290	76	280	78		
14 Mayo	130	76	110	88	70	76
21 Mayo	110	79	160	81	90	74
28 Mayo	100	77	230	75	160	70
2 Junio	130	77	285	76	280	68
12 Junio	90	66	280	74	460	57
20 Junio	70	18	220	63	560	41
25 Junio	100	23	230	58	620	30

IV.2.6. Altura.

La altura de la cubierta es un parámetro agronómico, que aunque no resulta tan determinante en el crecimiento y desarrollo de la cubierta, presenta patrones de comportamiento que deben ser tenidos en cuenta en los modelos de crecimiento de cultivo. El desarrollo de las cubiertas vegetales varía de unas zonas a otras, teniendo esto un efecto sobre las variables agronómicas que la caracterizan, estas consecuencias también se dan sobre la evapotranspiración, y por tanto en los coeficientes de cultivo. FAO (Allen *et al.*, 1998) recomienda el uso de la altura de la cubierta para adaptar los coeficientes de cultivo desarrollados en zonas diferentes al lugar donde se aplican. La adaptación de estos coeficientes de cultivo no resulta complicado pues medir la altura de la cubierta resulta sencillo y de bajo coste.

Objetivo.

Teniendo en cuenta las recomendaciones de FAO dadas anteriormente sobre los coeficientes de cultivo, en el seguimiento de trigo y maíz, se mide la altura de la cubierta. La caracterización de la curva de altura de cultivo servirá para adaptar los valores del coeficiente de cultivo a lo largo del ciclo de crecimiento.

Metodología y Datos.

La altura del cultivo corresponde a la altura desde la base hasta el elemento más

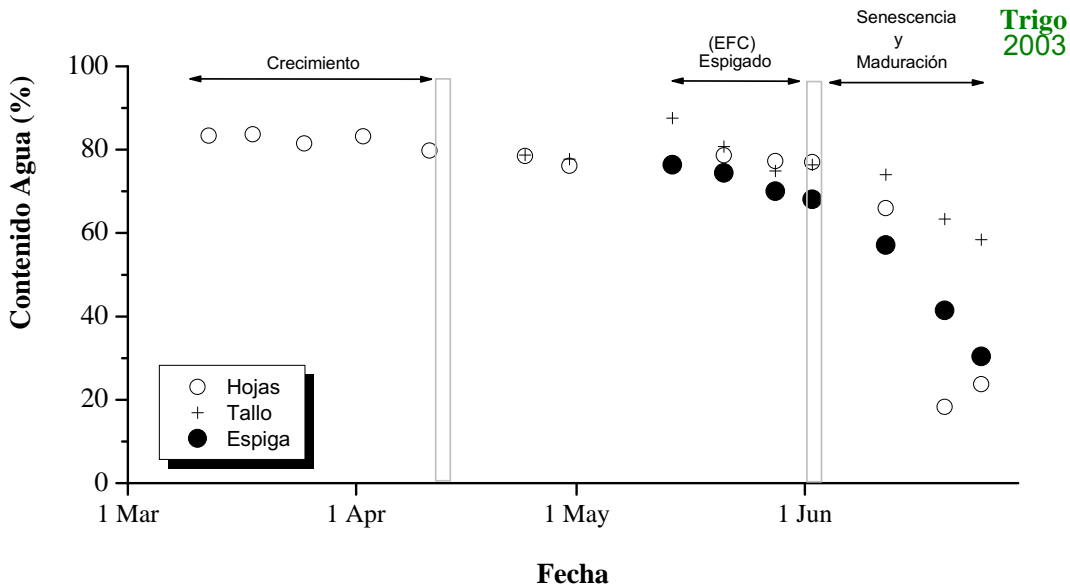


Figura IV.27: Evolución del contenido en agua (%) para trigo distinguiendo entre componentes: hojas (o), tallo (+) y espigas (●).

alto de la planta. Se han escogido de forma aleatoria las plantas dentro de la parcela de protección. Esto permite establecer la representatividad así como la variabilidad espacial en el desarrollo de la cubierta. Los datos obtenidos de ambas campañas están recogidos en la tabla IV.9.

En la figura IV.28 aparece representada la evolución temporal de la altura de cultivo. En el caso de maíz, se observa un crecimiento rápido hasta unos días antes de llegar a la cubierta efectiva completa, observándose entonces un crecimiento lineal. El crecimiento de la altura se mantiene hasta el inicio de la fase reproductiva donde se alcanza el máximo en la altura de 230 cm. En el trigo, se observa una tendencia similar al maíz, pero con ciertos matices, se observa un crecimiento lento hasta alcanzar el inicio de EFC, aumentando a partir de este momento de forma significativa la altura durante la fase de crecimiento y reproducción hasta el inicio de la maduración. Durante la fase de maduración, el cultivo mantiene la altura constante en un máximo de 85 cm.

IV.2.7. Evapotranspiración.

La medida de la evapotranspiración se ha hecho a través de los lisímetros de pesada, utilizando la metodología indicada en la sección IV.1.1 eq. IV.2. Al estar estos equipos registrando permanentemente el peso, permite hacer un seguimiento de for-

Tabla IV.9: Valores de Altura (h) durante todo el ciclo tanto para maíz como trigo.

Año 2001 - Maíz		Año 2003 - Trigo	
DÍA	h (cm)	DÍA	h (cm)
12 Junio	30	12 Marzo	9
20 Junio	44	18 Marzo	11
27 Junio	85	25 Marzo	14
4 Julio	120	2 Abril	18
12 Julio	160	11 Abril	18
20 Julio	190	24 Abril	31
26 Julio	220	30 Abril	42
1 Agosto	230	14 Mayo	60
7 Agosto	230	21 Mayo	67
13 Agosto	230	28 Mayo	82
23 Agosto	230	2 Junio	85
29 Agosto	230	12 Junio	85
		20 Junio	85
		25 Junio	85

ma continuada de la evapotranspiración dentro del lisímetro tanto de maíz (figura IV.29) como de trigo (figura IV.30). En ambas figuras aparece también representada la ET_o durante ambos ciclos de crecimiento. Como se ha citado anteriormente, los datos de pesada se registran cada 15 minutos, de forma que permite trabajar a esta escala temporal de trabajo. No obstante, tal y como se ha comentado en los capítulos precedentes, en la evolución diaria de la ET del cultivo se consideran los datos a escala horaria, y en la evolución de la ET a lo largo de un ciclo de crecimiento del cultivo se hace a escala diaria, semanal y mensual. En el caso de maíz, al inicio del ciclo, se aprecia una alta variabilidad, debido principalmente a la evaporación de suelo desnudo, al ser la fracción de cobertura baja o casi inexistente. Durante esta etapa, son los factores medioambientales, ajenos al lisímetro y a la propia cubierta los que regulan el mecanismo de evaporación, siendo el limitante de esta demanda evaporativa la reserva hídrica del propio suelo (Calera, Cuesta, Domínguez, González-Piqueras and Fabeiro, 2001). Durante el mes de Mayo del año 2001 se produjeron frecuentes lluvias lo que implicaba una alta evaporación durante el/los días siguientes. El máximo de evapotranspiración tiene lugar a finales del mes de Julio (DoY=204), que tiene lugar en la época del año que la ET_o es mayor. En el caso de trigo, aunque el lisímetro ha estado funcionando y registrando datos se detectaban anomalías en estos valores, por ello se hicieron dos calibraciones de la célula de carga durante el mes de Mayo. Estas calibraciones evidenciaron que durante el invierno la célula de carga del lisímetro se había descalibrado, perdiendo su linealidad dentro del rango

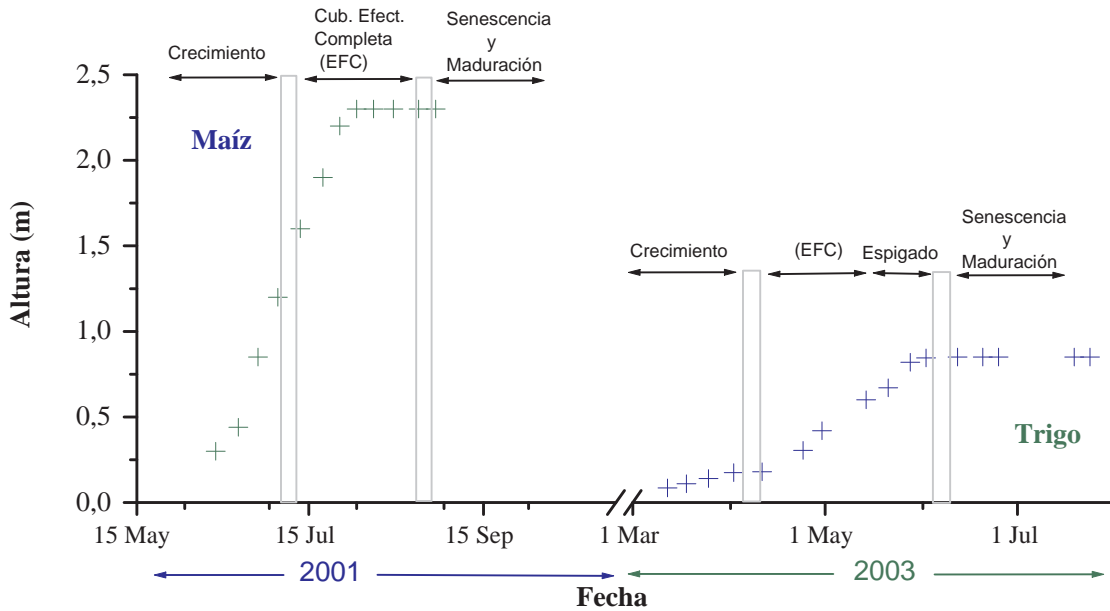


Figura IV.28: Evolución de la altura del cultivo (H) para los cultivos de maíz y trigo.

de valores no siendo posible rehacer las pesadas durante este período con la nueva calibración. Por tanto durante este período se ha seguido la máxima de Allen (2004), *no data are better than bad data* (la ausencia de datos es preferible a malos datos), por lo que ha sido necesario renunciar a ese período de datos dentro del lisímetro. La *ET* de trigo registra su máximo durante el período de cubierta efectiva completa y espigado, llegando a valores por encima de $ET=9$ mm/día en $DoY=170$. Durante la maduración del cultivo la evapotranspiración cae rápidamente, hasta registrar valores en torno a 1 mm/día al final del ciclo. Se observa un aumento repentino el 14 de Julio ($DoY=200$) debido a que el rastrojo se regó con motivo de una campaña de medidas paralela (SPARC) observando la inmediata reacción de la evapotranspiración al riego (en alta demanda evaporativa). Vemos que los días de campaña se mantiene alto este valor, que durante estos días se produce la cosecha (eliminación de biomasa del lisímetro) llegando en un día a evaporarse el agua en superficie del suelo. Los valores mínimos de *ET* durante esta época del año para rastrojo alcanzan mínimos de 0,5 mm/día.

En el caso de maíz, durante el mes de Abril, Mayo y principios de Junio, (hasta $DoY=170$) y el período de maduración durante el mes de Septiembre la evapotranspiración es baja comparando con los meses de Julio y Agosto, en coincidencia con los

períodos de crecimiento y reproducción. El trigo aunque existe una ausencia de datos fiables en el lisímetro hasta el día 20 de Mayo, se observa que la mayor proporción en la evapotranspiración ocurre durante los meses de Mayo y Junio, en las etapas de crecimiento y reproductiva. Estos máximos coinciden en ambos cultivos con sus máximos valores de LAI, además de coincidir en los meses de Junio, Julio y Agosto, donde la radiación incidente de onda corta es mayor. Esta coincidencia hace suponer que existe una mayor intercepción de la radiación por la cubierta vegetal, absorbiendo mayor cantidad de energía (Tyagi *et al.*, 2000).

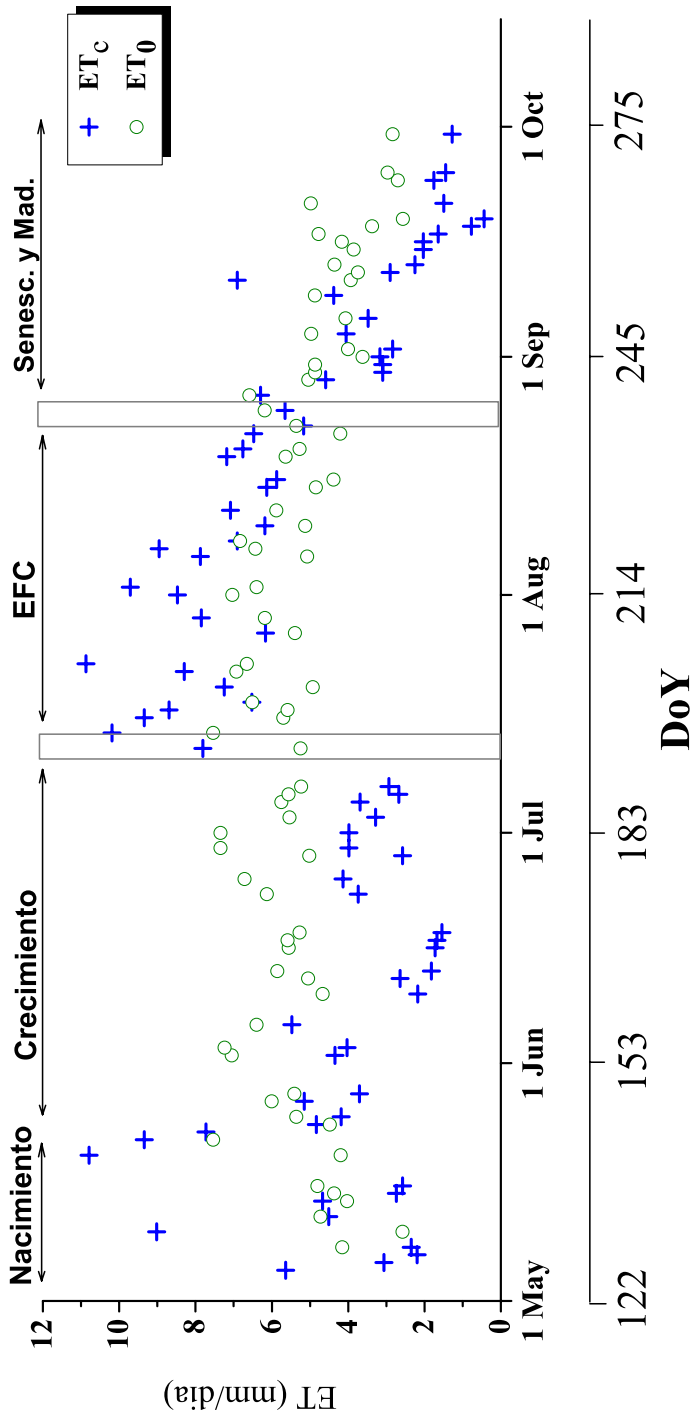


Figura IV.29: Evolución de la evapotranspiración del cultivo de maíz (ET_c in $\frac{mm}{día}$) junto a la evapotranspiración de referencia (ET_0) durante el año 2001.

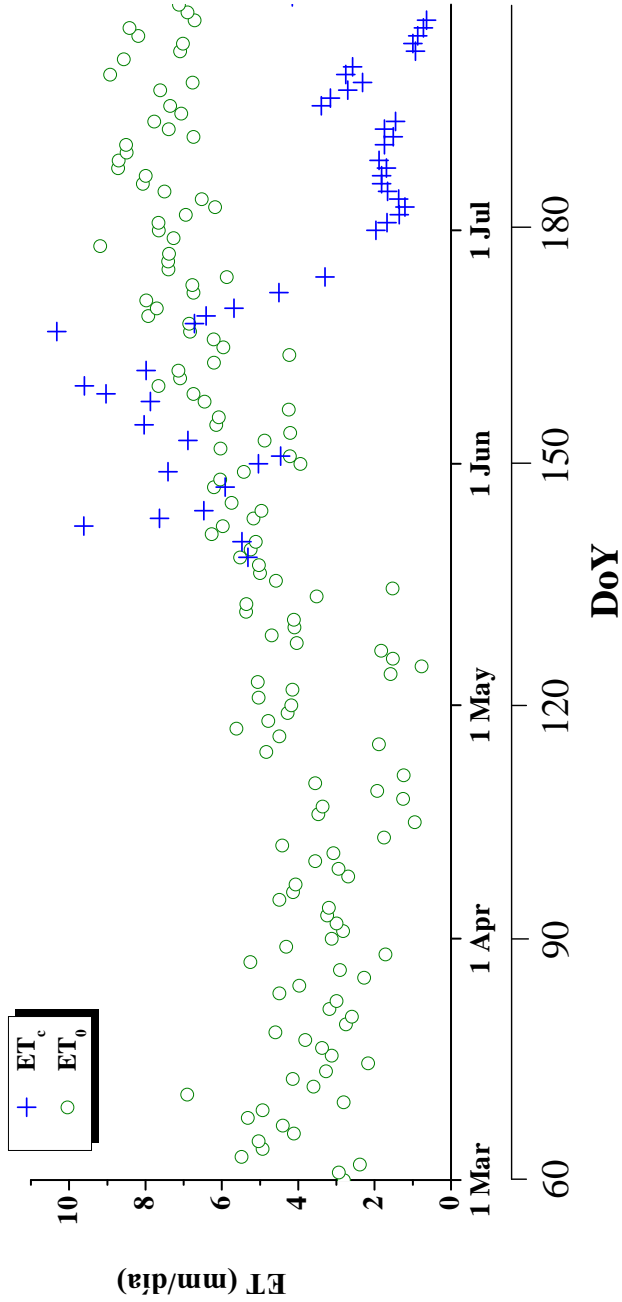


Figura IV.30: Evolución de la evapotranspiración del cultivo de trigo (ET_c in $\frac{mm}{día}$) junto a la evapotranspiración de referencia (ET_0) durante el año 2003.

IV.2.8. Coeficiente de Cultivo.

Con la metodología propuesta en el capítulo III (ec. III.9) y a partir de los datos obtenidos del lisímetro, así como de los datos de ET_0 , se calcula el valor del coeficiente de cultivo (K_c) para los dos casos presentados en este trabajo. La evolución de K_c es similar a la ET , aunque normalizada al cultivo de referencia. En el caso de maíz, debido a la frecuencia de riego, después de la siembra y hasta mediados del mes de Junio el valor medio está en torno a 0,4 alcanzando su máximo durante el mes de Julio y mediados de Agosto, con valores en torno a 1,45. En la etapa final su valor mínimo es de 0,3 pero remontando hacia el mes de Octubre debido a las frecuentes lluvias y un ligero resurgimiento de vegetación debajo de la cubierta de maíz. En los valores de trigo, debido a la descalibración del sensor, no se dispone de datos en la etapa inicial, no obstante, el máximo de K_c se alcanza la primera quincena del mes de Junio, cuando se produce el espigado y el periodo reproductor. Durante esta etapa, el máximo de K_c es de 1,5 observando una caída durante la etapa de maduración a mediados de Junio, llegando a valores mínimos en la etapa final de 0,25. Estos valores coinciden con los obtenidos por otros autores (Zhao *et al.*, 2005; Kang *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2002; Howell *et al.*, 1996). Debido a que la frecuencia de riegos en el caso de trigo al final de la campaña ha sido más baja que en maíz, en la figura IV.32 se aprecian los picos característicos del riego y su evolución los días post-riego. Debido a las características climáticas de la zona, durante el mes de Julio, dentro del mismo día se pasa de la fase evaporativa 1 de suelo a la fase evaporativa 2 (ver figura IV.32 en día 20 de Junio). Al final del ciclo de trigo, con motivo de la campaña de medidas SPARC (ESA, 2005), sobre el barbecho se regó, observando la respuesta de éste a la humedad. En la figura IV.32 se observa cómo ante un pequeño riego (3 mm) aumenta la K_c a valores en torno a 0,3 y ante un riego mayor (15 mm) el coeficiente de cultivo alcanza valores de 0,45.

En la figura IV.31 y IV.32 se aprecia en ambos cultivos una fase inicial, correspondiente al nacimiento, donde prevalece la evaporación de suelo desnudo y aparece una importante variabilidad temporal. Posteriormente, cuando se inicia el desarrollo, aumenta progresivamente hasta alcanzar el máximo que coincide con el máximo en la fracción de cobertura vegetal verde (fig. IV.21).

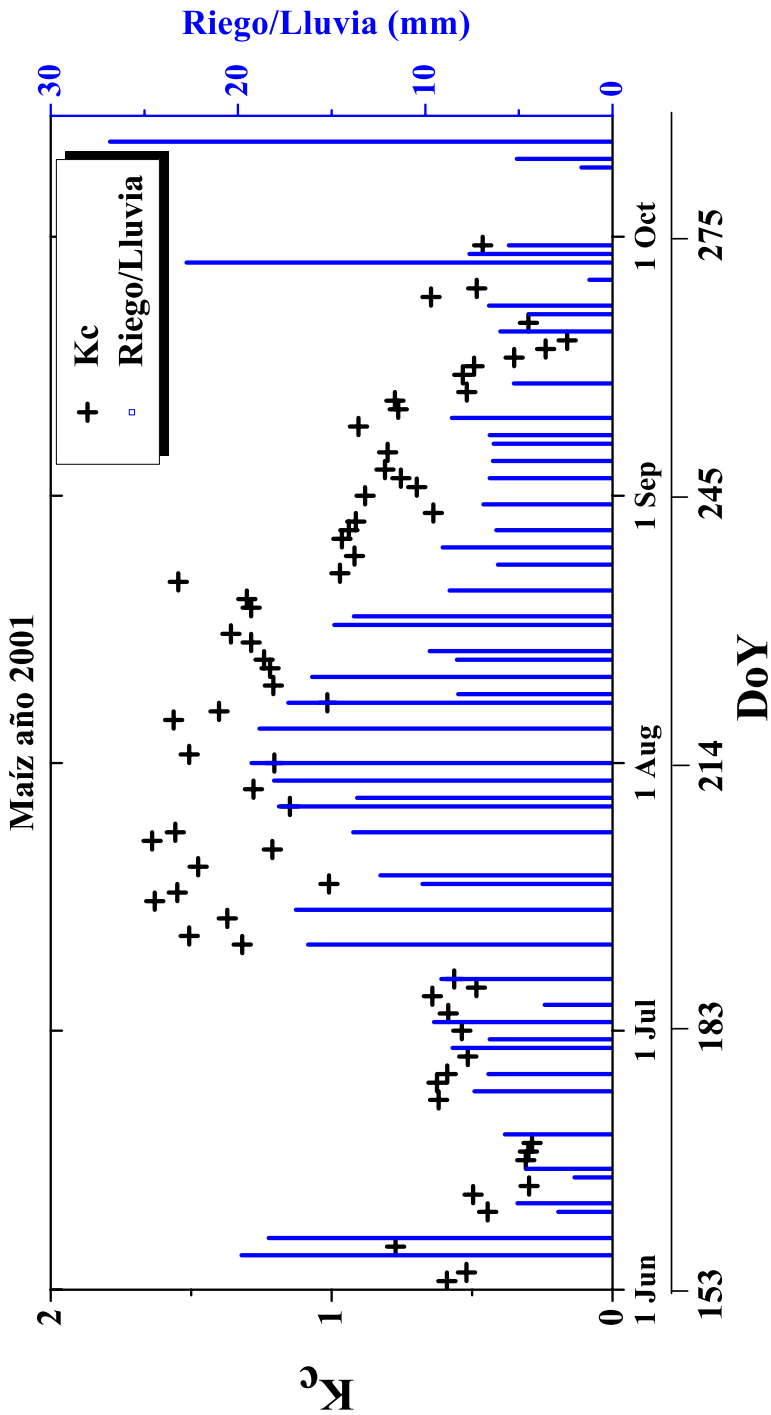


Figura IV.31: Evolución del coeficiente de cultivo de maíz (K_c) junto a los aportes hídricos por lluvia o riego durante el año 2001.

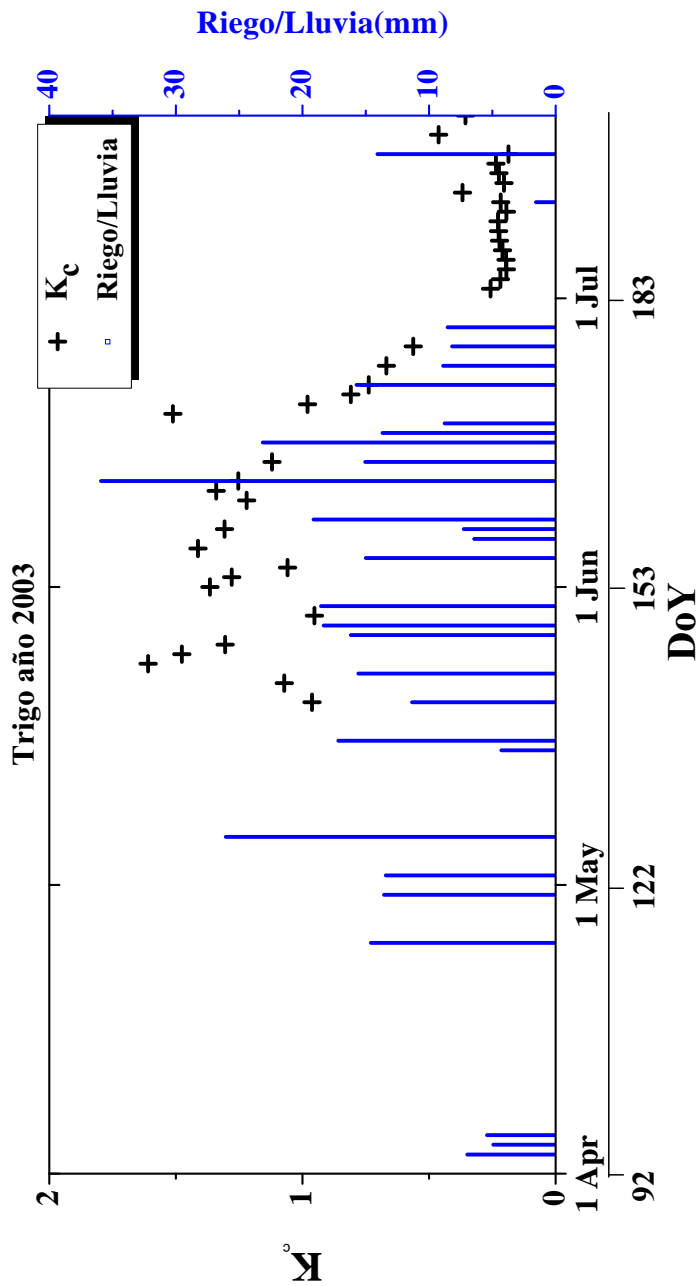


Figura IV .32: Evolución del coeficiente de cultivo de trigo (K_c) junto a los aportes hídricos por lluvia o riego durante el año 2003.

IV.3. Conclusiones.

El seguimiento de dos cultivos (maíz durante el año 2001 y trigo durante el año 2003) en una estación lisimétrica donde la evapotranspiración es medida junto a otros parámetros biofísicos como fenología, f_c , LAI, altura del cultivo y biomasa nos permite caracterizar la curva de evolución de ambos. El método de medida de ET seleccionado ha sido el lisímetro de pesada continua, siendo especialmente destacable las exigencias de su mantenimiento (Allen *et al.*, 1991a;b).

Los datos de evapotranspiración de referencia, presentan un comportamiento similar a lo largo del año en ambas campañas, tanto para el año 2001 como 2003, siendo máximo durante los meses de Julio y Agosto y mínima durante los meses de invierno. Para el cálculo de la ET_o se han usado tres métodos: dos métodos de estimación a partir de datos meteorológicos, el método de FAO56 para datos promedio diarios, y el recomendado de ASCE a partir de datos horarios aplicado a la estación *Anchor Station*, y la evapotranspiración obtenida directamente del lisímetro de referencia. La reproducción de los parámetros meteorológicos por dos estaciones resulta una garantía de calibración entre ambas, y de suplencia mutua en caso de fallo, siguiendo por tanto la recomendación de Allen (2004). Bajo esta misma recomendación se ha seguido el protocolo de calidad de datos para todas las variables medidas, en especial para las radiaciones, humedad, temperatura y velocidad del viento, reforzando la fiabilidad de los sensores. La aplicación de la metodología Penman-Monteith en el cálculo de ET_o tanto a escala horaria como diaria, ofrece resultados similares durante ambas campañas. Destaca el deterioro que sufre la superficie de gramínea durante la campaña del año 2003 al ofrecer un apreciable desacuerdo con los otros dos métodos respecto al año 2001.

El seguimiento radiométrico de ambas cubiertas ha permitido a través de un método no destructivo observar su evolución temporal (figs. IV.16 y IV.17), observando una signatura contrastada entre los máximos de cobertura, el suelo y la cubierta al final de su madurez. En la madurez, se observa una diferencia espectral entre ambas cubiertas, debido principalmente a su arquitectura, de mayor altura y con un suelo de fondo más húmedo el maíz ofrece un albedo menor que el trigo.

La metodología usada para obtener la fracción de cobertura vegetal verde (f_c), al ser la metodología más fácil y fiable para validar información de teledetección (White *et al.*, 2000), combinada con la fenología permite caracterizar la evolución temporal de la cubierta (fig. IV.21). Por otro lado, al ser una metodología no destructiva puede ser utilizada, simultáneamente al resto, para estimar la f_c dentro y fuera del lisímetro con objeto de tener conocimiento de la representatividad de ésta respecto a la parcela de protección. La comparación de la fracción de cobertura dentro y fuera del mismo muestra que las diferencias de la cubierta son más apreciables en caso de maíz, pues en trigo no se puede establecer una clara diferencia. La cubierta dentro del lisímetro ofrece un desarrollo menor, con un retraso en el caso de maíz en torno a 5 días y en

caso de trigo en torno a 1 día respecto al exterior. Añadido a las diferencias en la propia siembra del cultivo dentro del lisímetro respecto al exterior, se dan los efectos combinados de *oasis* y *humedad de suelo* (Allen *et al.*, 1991a). El primero tiene lugar cuando la parcela de protección donde se ubica el lisímetro está rodeada por zonas más áridas o no vegetadas. En estas zonas, la energía aportada por radiación que no es invertida en el proceso de evaporación debido a la ausencia de agua en suelo se convierte en calor sensible que penetra por efecto de advección a la parcela de protección y por tanto en el lisímetro. Este efecto es más acusado en los meses de Julio y Agosto, y por ello es más apreciable en cultivos de verano como maíz que en cultivos de primavera como trigo. El efecto oasis ha sido discutido por Lourence and Moore (1991) donde la evapotranspiración en el lisímetro es superior a la que tendría una parcela con el mismo cultivo (existen ejemplos de comportamiento similar con arroz), llegando a valores incluso de un 26 % más altos. En zonas de mayor tamaño, la presencia continua de una superficie evaporativa enfría y humidifica el aire, disminuyendo la velocidad del viento debido al aumento en la estabilidad de la capa límite. Las distancias consideradas en la ubicación de los lisímetros así como la instalación de sensores deben ser adecuadas para que la medida unidimensional de la evapotranspiración sea representativa de áreas cultivadas. Las recomendaciones existentes con este objetivo están dadas en relación a la longitud de estabilidad en el tamaño de la capa límite. La instrumentación debe reflejar las mismas características concernientes en el balance de energía tanto en la capa límite como en la superficie del cultivo. Asumiendo relaciones recomendadas de ajuste a la capa límite de 1:50 (Jensen *et al.*, 1990; Doorenbos and Pruitt, 1977a), implican un tamaño mínimo de parcela de protección mínimo a 1 ha, ubicando el lisímetro en el centro de la misma. El suelo dentro del lisímetro tiene menor espesor que en el resto de la parcela, esto implica que el lisímetro debe tener un sistema de drenaje que garantice que los perfiles de humedad tanto dentro como fuera del lisímetro sean iguales. Puede ocurrir que aún teniendo esto en cuenta, estos perfiles no coincidan, dándose el caso que el cultivo dentro del lisímetro no desarrolla tanto su sistema radical como el exterior, presentando una limitación a la evapotranspiración. Este efecto es más acusado en el maíz que en trigo, al ser el primero de mayor desarrollo radical. Por los motivos anteriores, algunas de las exigencias técnicas importantes que hacen representativos los datos del lisímetro son:

- Tamaño mínimo de parcela para cultivos como maíz (de alto porte) y cuyo desarrollo se produce en los meses de más demanda atmosférica, superior a 1 ha. (Jensen *et al.*, 1990) para amortiguar el efecto de advección o de oasis.
- Perfil de drenaje dentro del lisímetro similar al exterior.
- Mantenimiento periódico de la calibración en la célula de carga.

La medida de LAI por tres métodos en el caso de maíz, ofrece una vía de comparación observando que la metodología destructiva es la que estima este parámetro

de forma más fiable, siendo el método del medidor LICOR-LAI 2000 recomendable cuando no exista componente de la hoja senescente o seca (White *et al.*, 2000). En ambos cultivos el LAI crece de forma continua durante las etapas de crecimiento y cubierta efectiva completa donde el valor de LAI está en torno a 2,5 en ambas cubiertas. El máximo de LAI se alcanza durante la etapa de reproducción, los valores de LAI máximo en maíz son de 5,5 y en trigo de 4,5. Al inicio de la senescencia el LAI comienza a decrecer hasta el final de la maduración.

La biomasa seca (en lo sucesivo biomasa) en maíz experimenta un incremento exponencial durante la etapa de crecimiento siendo lineal durante la etapa de cubierta efectiva completa, llegando a un valor asintótico en torno a $2000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ durante la maduración (fig. IV.25). En el caso del trigo, este comportamiento es similar aunque durante la etapa de cubierta efectiva completa hay un ligero *plateau* continuando el crecimiento durante el espigado, hasta alcanzar durante la maduración un valor asintótico ligeramente inferior al caso de maíz. La biomasa húmeda en ambos casos experimenta un continuo crecimiento hasta la etapa de maduración donde se produce una brusca caída. El cultivo de maíz cubre un rango de valores más alto para la biomasa húmeda que el trigo, llegando a un máximo justo antes de la senescencia de $10\ 500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.

La *ET* medida al principio del desarrollo del cultivo (que al estar en óptimas condiciones hídricas coincide con la evapotranspiración máxima en ese instante, ET_c^*), como muestran los datos del lisímetro sobre maíz (fig. IV.29), muestra una alta variabilidad debido a la frecuencia del riego y los cambios de fase en la evaporación de suelo por la baja o nula f_c . A medida que el cultivo va incrementado su cobertura la *ET* se sitúa en valores en torno a 2 mm/día (entre DoY=160-180) cuando ya comienza la etapa de crecimiento ésta aumenta hasta alcanzar un *plateau* en la cubierta efectiva completa (*EFC*). El máximo de *ET* durante esta etapa de 11 mm/día, comenzando a descender estos valores durante la etapa de maduración y senescencia (a partir del DoY=235) hasta alcanzar al final del ciclo valores mínimos de 1,5 mm/día. En trigo, se ofrece un comportamiento similar, teniendo en cuenta que el ciclo se desarrolla durante la primavera, principio de verano, con lo cual la demanda atmosférica (ET_o) es sensiblemente menor, siendo el máximo de *ET* en la etapa de *EFC* del cultivo, que coincide con el espigado, de 10 mm/día (DoY=168). La disminución gradual en la etapa de senescencia es más evidente que en el caso de maíz debido a la menor frecuencia de riego. Los valores mínimos, debido a la alta demanda atmosférica durante esta época del año, y el rápido secado del suelo, están en torno a 1,5 mm/día, salvo el día DoY=194 cuando se produce un riego localizado en coincidencia de la campaña de medidas SPARC y se aprecia ese aumento brusco de la evapotranspiración ese día hasta 3 mm/día.

El coeficiente de cultivo ofrece un comportamiento similar, al inicio los valores de K_c reflejan la variabilidad del suelo con baja cobertura vegetal sometido al riego, aumentando hasta valores máximos durante la etapa de *EFC* de 1,5. La etapa final

de maíz, ofrece una alta variabilidad por ser la etapa otoñal, con un aumento de la precipitación y un resurgimiento de una cobertura vegetal de fondo en coincidencia con la senescencia de la cubierta principal. Este efecto no se observa en trigo, debido a la ausencia absoluta de vegetación fotosintéticamente activa al final del ciclo, quedando vegetación senescente o suelo desnudo.

European Section
Sección Europea

CHAPTER V

Field Data Analysis.

... the spectral vegetation-index data as provided by satellite remote-sensing systems should yield near-linear estimates of the area-averaged canopy photosynthetic capacities and minimum resistances, provided other quantities are available or can be estimated. This finding supports the view that the reflectance data provide indications of instantaneous rates associated with the vegetation canopies: gross primary productivity and evapotranspiration, rather than reliable estimates of any state associated with the vegetation, such as leaf area index or biomass... Clearly, however, more experimental work has to be done to determine the quantitative limits to the application of these remote-sensing techniques to the measurement of biophysical processes over large areas.

... los índices de vegetación espectrales obtenidos a partir de datos de satélite en teledetección proporcionan estimaciones cuasi-lineales de la capacidad fotosintética promedio en un área así como las resistencias mínimas, y a partir de ellas se pueden estimar otros parámetros. Este descubrimiento soporta el hecho de que la reflectividad proporciona la indicación sobre ritmos instantáneos asociados a la cubierta vegetal: la producción primaria bruta y la evapotranspiración, frente a la estimación fiable de un estado asociado a la vegetación como el índice de área foliar o la biomasa... Claramente, de otro modo, es necesario hacer más trabajo experimental para determinar los límites cuantitativos para la aplicación de estas técnicas en teledetección en la medida de los procesos biofísicos sobre grandes áreas.

(Allen *et al.*, 1989)

The data showed in the chapter IV over wheat and maize are an exceptional framework to analyze the relationship between the VI¹ with biophysical parameters and rates.

¹ The acronym VI is used to refer to the vegetation index/indices in the text.

The calculation and plot of the VI show their capabilities to distinguish the crop growth stages (initial, mid and late) that determines the slope in the K_c and K_{cb} curve. To facilitate reading, some repeated calculations over all the proposed VI in table III.2 have been moved to the appendix D and only the NDVI and SAVI are presented in this chapter. Conclusions relative to other indices than NDVI or SAVI will be referenced to the appendix D.

The study in the relationship of the VI to biophysical parameters can be done without distinguishing between wheat and maize. The f_c and the VI used are fitted by a linear relationship in accordance to the model described in section III.31 (pag. 71). The relationship between LAI with the VI and f_c is made following the exponential model indicated in equations III.29 and III.28.

The biophysical rates were monitored analyzing the biomass and the cumulative evapotranspiration measured in terms of the integrated value of the VI ($IntVI$). It is based on the linear relationship between the f_{APAR} and the VI used in the light use efficiency models. This analysis is recommended because when the f_c is in the plateau stage the biomass exerts an important variation observed in most of the crops. This is in agreement with the opening chapter cite of Allen *et al.* (1989) and thus the VI are more adequate to describe the biophysical rates such as crop yield production or evapotranspiration.

The joining between both ways exposed above allow to understand the relationship between the K_{cb} and the K_c to the VI. The use and comparison of different vegetation indices show that the optimized family (SAVI and GESAVI) describes better the K_{cb} curve. They are sensitive to high values of K_{cb} and show the best estimation during the growing, crop development and reproduction stage. Nevertheless, when the indices are used to estimate the K_c , they can not estimate the evaporation from soil. The evaporation is highly dependant on the irrigation/water amount and frequency and this makes that the recommended time-scale for the estimation of K_c from the VI is seven days. This is in accordance with the time-scale used by the irrigation advisory service. Under these limitations the NDVI is the index, among the indices used in this work, that best fits to the experimental data of K_c .

Several contributions can be extracted from this chapter in order to estimate the K_{cb} and K_c from the VI:

- To obtain the relationship of K_{cb} to the VI adapted to a semiarid environment in La Mancha.
- The capabilities of other indices such as SAVI and GESAVI to describe the K_{cb} curve during the crop growth cycle.
- The limitations introduced by the soil evaporation in the estimation of K_c , recommending the use of the NDVI at the time-scale of seven days.

V.1. Vegetation Indices.

Using the field measurements presented in IV.2.1, the VI in table III.2 have been calculated and the time evolution of NDVI and SAVI are shown in figure V.1 during the whole maize and wheat cycle . The other selected VI are plotted in appendix D on figures C.1 and C.2. In this figure the VI are plotted comparing the crop inside (hollow diamonds) and outside (solid diamonds) the lysimeter.

In case of maize (Figure V.1), three phases can be distinguished, crop development, mid season and late (maturity and senescence). Measurements started on May 28th and weekly measurements describe the growing period reaching a maximum on the first seven days of July. Both indices, show a *plateau* during the mid stage, comprising from the first week in July to the third week in August. In the beginning of October, senescence period starts when the maturity phase ends. Both magnitudes, NDVI and SAVI (and the other, see also figure C.1) present a similar tendency in each development phase. Improved indices rather than NDVI are more sensitive to changes in cover heterogeneity as can be seen in the data of SAVI (Fig. V.1). These data show two falling peaks corresponding to the hottest and dryer periods on July 24th (DoY=205) and August 13rd (225). The error bars indicate the variability in the radiometric samples used in the experiment. There is an upper curve corresponding to data measured outside the lysimeter and a lower curve for data measured within it. This difference agrees with the behavior observed in f_c in figure IV.21, because of the plants in the exterior of the lysimeter are more developed than within it. This difference is more appreciable locating the point when senescence starts: it can be located at the end of August ($235 < \text{DoY} < 243$) for both crops but the slope for the data corresponding to the lysimeter fall down more rapidly than in the surrounding area. At the end of the cycle both curves in each index converge to near the same point, corresponding to a dry, senescent crop.

The whole crop growth cycle of wheat described by the VI is shown in figure V.1, indicating the phenological phases. No distinction was made between the interior and exterior taking into account that no differences were between vegetation fraction inside and outside the lysimeter (figure IV.21) in case of wheat. The time-evolution pattern is different than for maize due to the dwarf variety of wheat cultured. When ears emerged their size produce another peak in the VI response curve on May 14th (134) maintaining a period of *plateau* during twenty days. The radiometric measurements started on March 10th (69) and they were acquired periodically each five to seven days. This measurement frequency allows to determine the date when the culture reaches each development stage, dating the first point of a relative full effective cover on April 8th (98). This first plateau stage corresponds to the maximum crop height without ears when most of the leaves contribute to photosynthesis and green coverage of soil reaches a value up to 60 %. During the emergence of ears on the first ten days of May (121-127) all of the indices increased the slope along time, this

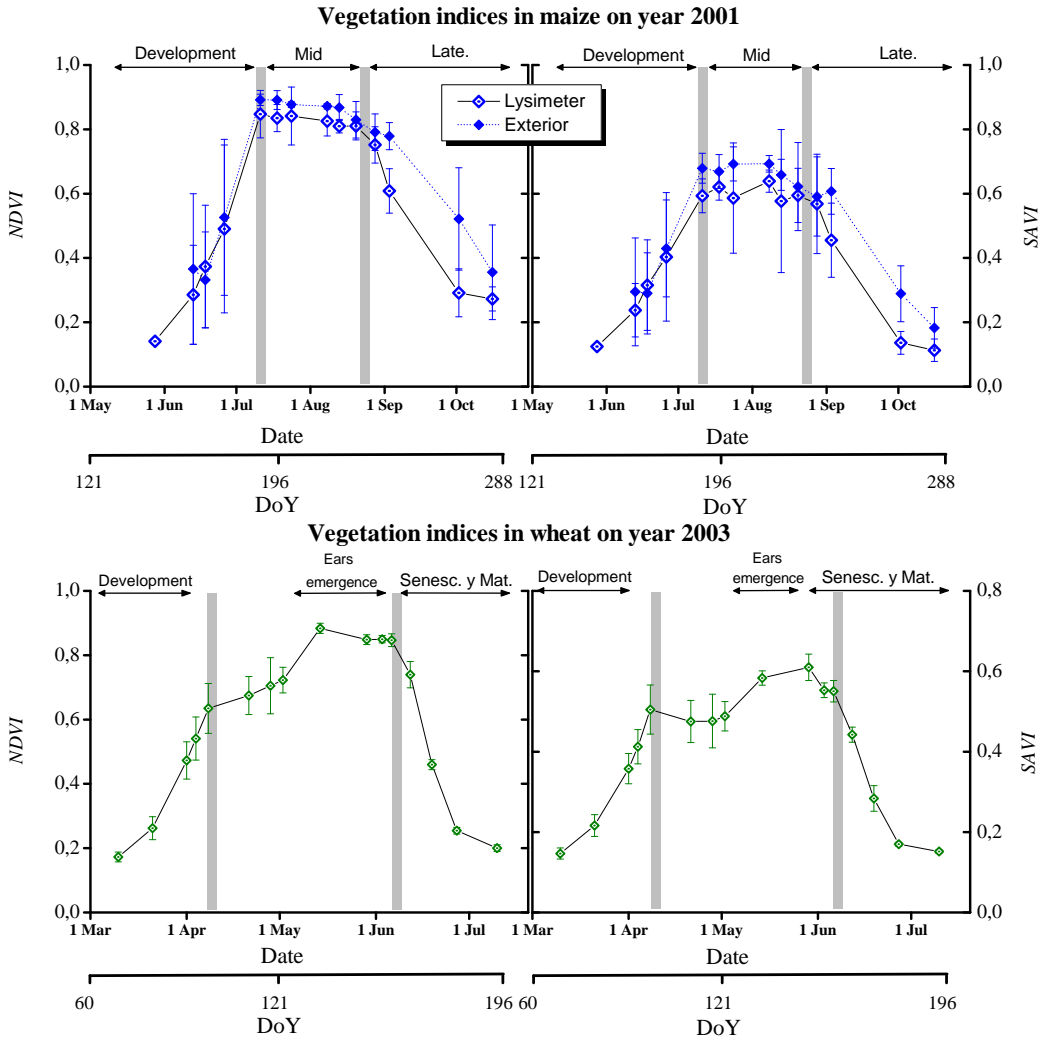


Figure V.1: Time evolution of NDVI and SAVI during year 2001 (maize, on top) and year 2003 (wheat, on bottom).

stage is within May 14th (134) and May 28th (148). This second plateau is due to the photosynthetic activity of ears that contribute to green fraction cover and affects the spectral reflectance.

The vertical bars in figure V.1 for both crops indicate the time when the green fraction cover is in (maize) or near (wheat) its maximum value. The biophysical variables such as f_c , LAI or biomass are plotted versus DoY in coincidence to the VI on figure V.2. The behavior of the LAI, biomass and NDVI when the f_c is in the *plateau* stage is shown in this figure. The values of f_c have the same shape as

NDVI during the whole cycle for both crops. For maize, the EFC is reached on July 13th in coincidence as NDVI. For wheat, the EFC stage can not be defined but the vegetation index is parallel to f_c along time. A difference between NDVI and f_c is observed in the beginning and end of the cycle in both crops because the minimum value of the index for bare soil is around 0,16 and $f_c=0$. At the end of the cycle, in the maize there is a green background cover shaded that contributes slightly to the reflectance. For wheat, when harvesting the culture the difference between NDVI and f_c is the same as the beginning of the cycle.

The LAI has the same slope than the NDVI along time during the growing period but delayed seven days. This time-difference can be observed when reaching the EFC marked with vertical bars, the maximum stage for LAI is shorter than for f_c and it does not coincide in time with NDVI and the other VI (see Figure V.1 and Fig. C.1-C.2). For both crops, the EFC is reached for LAI values between 3,0-3,5 when NDVI=0,85 and the f_c is over 85 % which are the same values obtained for other authors (Clevers and Verhoef, 1996; Choudhury *et al.*, 1994; Rosenberg *et al.*, 1983).

The time evolution of dry biomass reaches a maximum at the end of the cycle, in coincidence to the maturation stage. The rate in generating dry biomass in the culture is near lineal in time during the EFC plateau. For crops such as dwarf wheat it is not possible to determine the stage when the maximum of f_c remains constant in coincidence with the linear change of biomass along time. The wet biomass exerts its main change during the EFC, reaching the maximum value at the beginning of the maturation for both crops. The link between the NDVI and the biomass show apparent differences because the index represents the rate of the intercepted radiation and the biomass corresponds to a cumulated variable as was seen in the section III.4.3.

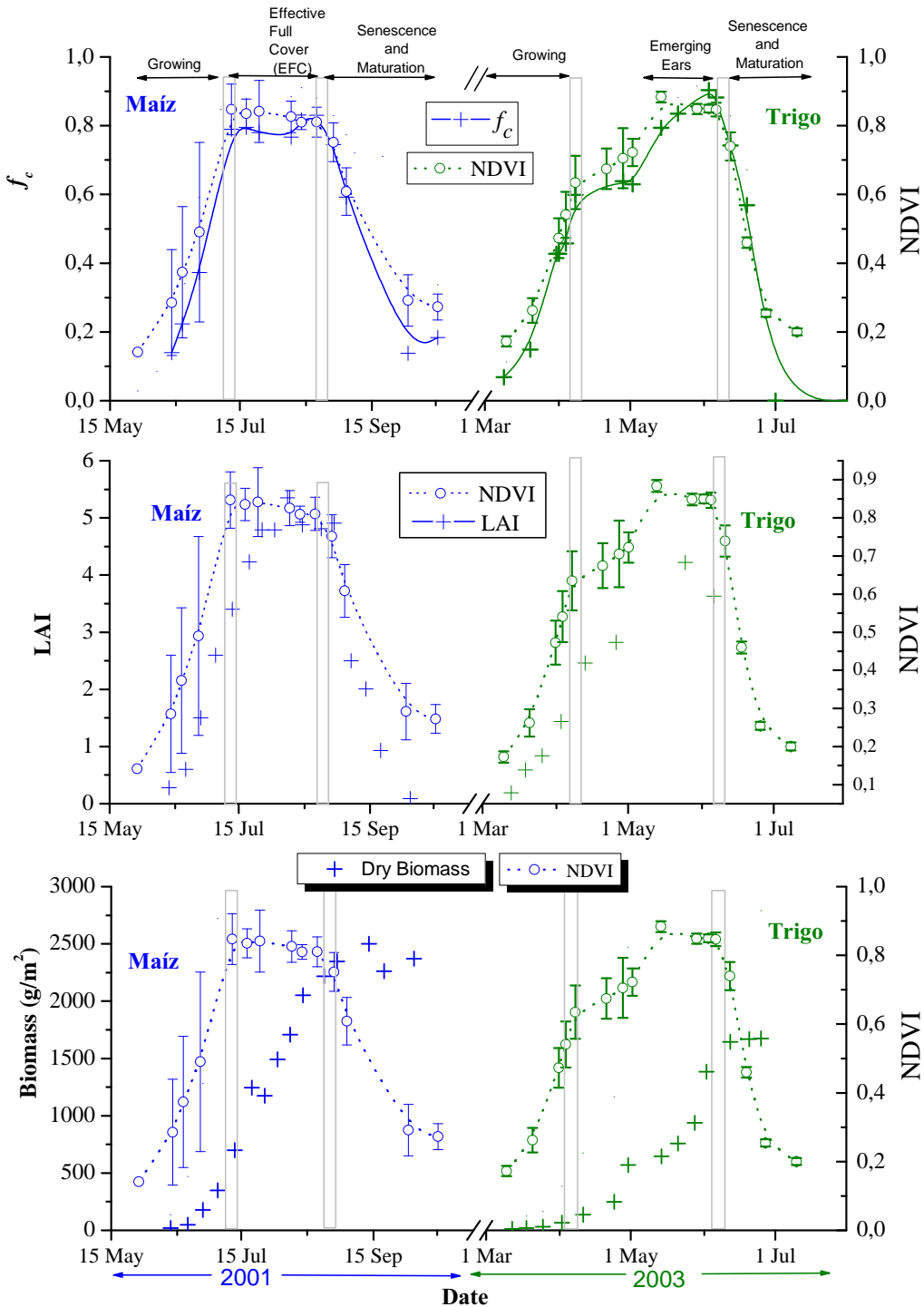


Figure V.2: Time evolution of f_c , LAI, Biomass and NDVI for year 2001 (maize, figure on the left) and year 2003 (wheat, figure on the right).

V.2. Relationship between Vegetation Indices and f_c .

The f_c versus NDVI and SAVI is shown on figure V.3 (for the other indices see Figure C.1-C.2) in order to validate the concept derived in section III.4.2 concerning the relationship between f_c and the VI proposed in table III.2. A linear relationship between all the proposed indices and f_c can be observed.

In this figure data corresponding to maize (+) and wheat (x) are included in the same graph. It is not possible to distinguish between points of maize and wheat indicated in the graph, and a unique linear fit for both crops is defined. In the graph corresponding to NDVI, the f_c does not reach values over 0.9 for both crops, in coincidence to the maximum values of the index appreciating an evident linear relationship. Other experiments made over crops such as alfalfa with maximum values of f_c over 0.9 show a saturation versus NDVI (Calera, 2006). Similar results can be observed for SAVI (and the other proposed indices fig. C.3) with worse fitting results.

According to the equation III.31 defined in section III.4.2 the relationship between the f_c is defined in basis of maximum and minimum values in both magnitudes the vegetation index and the f_c . The maximum and minimum values correspond to wheat and maize and are not generalizable to covers with different crop architecture. Reorganizing this equation is possible to establish,

$$f_c = \frac{f_c \text{ MAX} - f_c \text{ MIN}}{IV_{\text{Max}} - IV_{\text{Min}}} IV - \frac{IV_{\text{Min}}}{IV_{\text{Max}} - IV_{\text{Min}}} \quad (\text{V.1})$$

The regression line for each of the vegetation indices used in the work are shown in table V.1. The slope of the relationship corresponds to the factor $\frac{f_c \text{ MAX} - f_c \text{ MIN}}{IV_{\text{Max}} - IV_{\text{Min}}}$ and the intercept is $\frac{IV_{\text{Min}}}{IV_{\text{Max}} - IV_{\text{Min}}}$ for both crops, maize and wheat. This relationship is not generalizable because the maximum and minimum values of the IV can vary depending on crop architecture and leaf optical properties. Both factors represent the re-scaling values for each VI corresponding to the range of the measured f_c ; for this reason, slopes ranges from 0,41 in case of GESAVI (with the widest range of values: 0-2,5) to 3,34 in case of PVI (within the range of values: 0-0,3). For the intercept is near the same: vegetation indices that are defined taking into account the values of soil line, have a minimum near zero values for bare soil, such as PVI, TSAVI, WDVI and GESAVI, for the other VI the minimum bare soil values are within the range of 0,12-0,16.

For all the indices, the regression coefficients are over 0,97 with experimental field data, that allow to establish and validate the hypothesis of linear relationship.

Table V.1: Slope and intercept in the linear fit between the f_c and the VI.

Vegetation Index.....	Slope (error)....	Intercept (error)....	R ²
<i>NDVI</i>	..... 1,19 (0,05)	.... -0,16 (0,03)	....0,99
<i>SAVI</i>	..... 1,54 (0,07)	.... -0,15 (0,03)	....0,98
<i>PVI</i>	..... 3,34 (0,17)	.... -0,02 (0,02)	....0,97
<i>TSAVI</i>	..... 1,01 (0,04)	.... -0,01 (0,02)	....0,98
<i>MSAVI</i>	..... 1,42 (0,06)	.... -0,12 (0,02)	....0,98
<i>OSAVI</i>	..... 1,53 (0,05)	.... -0,16 (0,02)	....0,99
<i>WDVI</i>	..... 1,99 (0,09)	.... -0,01 (0,01)	....0,98
<i>GESAVI</i>	..... 0,41 (0,02)	.... -0,03 (0,02)	....0,98

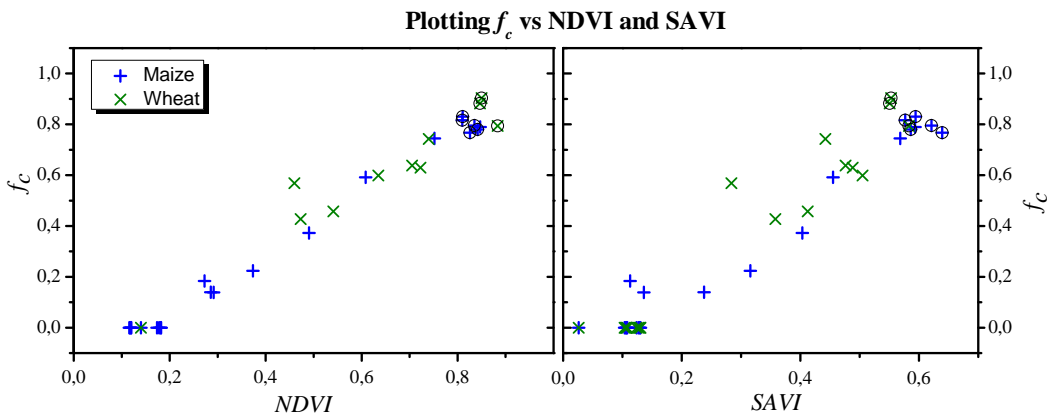


Figure V.3: The green cover fraction (f_c) versus NDVI and SAVI is shown, distinguishing between data from maize (+) and wheat (×). Circled symbols correspond to the f_c at EFC.

V.3. Relationship between Vegetation Indices and LAI.

The relationship between the VI and the LAI as shown before is dependant on crop architecture. For most of the vegetation indices, the general accepted relationship is the exponential exposed in equation III.29 where the asymptotic values depend on the range of values in VI. As it was indicated in section III.4.2 the coefficient κ' is affected by the crop architecture. The data used in the work, such as maize and wheat correspond to an erectophile cover (Clevers and Verhoef, 1996; Choudhury *et al.*, 1994). Unless both crops are different, due the same orientation of leaves, the expected values for the extinction coefficient should be comparable. For this reason, the data for both crops have been plotted in the same graph on figure V.4 observing that no distinction can be made in the alignment of the points. The NDVI shows a saturation tendency at values of LAI over 3, this behavior reflects the increasing value of the damping coefficient κ' with increasing value of crop depth. This is more evident in maize because of taller and deeper cover than wheat whose maximum value of LAI=4. Some authors have developed an approach depending on the phenological stage (Baret *et al.*, 1989) of the crop: 1) a pre maximum LAI data and 2) a post-maximum LAI data (Gilabert *et al.*, 1996; Wiegand *et al.*, 1990). This approach can differentiate both crops whereas the LAI values for maize can fit better to this behavior. Other authors proposed a unique relationship for the revised VI in the case that maximum LAI values are not over 4 (Kimura *et al.*, 2004). It depends on the vegetation index used because most of them are defined to be sensitive at the highest values of canopy amount. Thus, for all indices, the exponential approach fits to the tendency of the points plotted for both crops, especially in the case of NDVI and SAVI. For other indices such as GESAVI (see figure C.4), when mixing data of both crops, by definition (Gilabert *et al.*, 2002), this relationship seem to be near lineal in the ranges of LAI between 0-6. The coefficients corresponding to the exponential fit are presented in table V.2 showing that all of them fit to the exponential model. For the indices that not reach values over 1, the damping factor κ' ranges from 0,45 for NDVI to 0,33 for MSAVI. In case of GESAVI the damping factor is 0,17 that is in agreement to its behavior with the f_c .

Table V.2: Regression of the VI versus LAI for the whole dataset including maize and wheat. The exponential relationship used is the type: $IV = P_1 - P_2 \cdot e^{\kappa' \cdot LAI}$.

Vegetation Index.....	P_1	P_2	κ'	R^2
<i>NDVI</i>	.....0,93.....	0,76.....	0,45.....	0,90
<i>SAVI</i>	.....0,65.....	0,51.....	0,44.....	0,92
<i>PVI</i>	.....0,26.....	0,22.....	0,39.....	0,82
<i>TSAVI</i>	.....0,88.....	0,81.....	0,45.....	0,92
<i>MSAVI</i>	.....0,75.....	0,62.....	0,33.....	0,88
<i>OSAVI</i>	.....0,68.....	0,55.....	0,43.....	0,93
<i>WDVI</i>	.....0,42.....	0,34.....	0,39.....	0,82
<i>GESAVI</i>	.....3,60.....	3,70.....	0,17.....	0,90

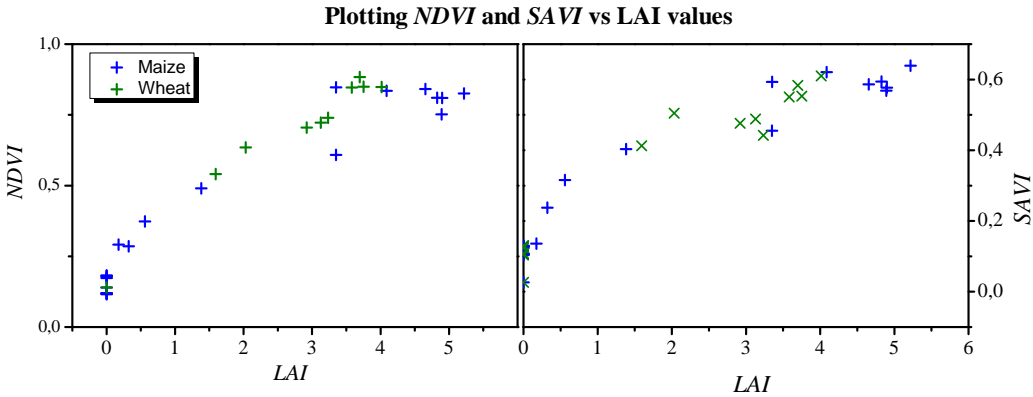


Figure V.4: The NDVI and SAVI versus LAI are shown distinguishing between data from maize (+) and wheat (x).

V.4. Relationship between f_c and LAI.

The data of f_c and LAI for both covers are plotted in the figure V.5 distinguishing between maize (\diamond) and wheat (\blacklozenge).

Following the model proposed by Monteith (1976) and exposed in the equation III.28 the data for both crops were fitted to an exponential function. In this case, taking into account that the maximum value of f_c reaches the value of 0,91 for the crop studied, this factor has been added to adjust the slope of the curve to the data. With these constraints, the distribution function of foliage zenith angle Θ is 0,46 according to the registered values in the bibliography, thus both cultures are erectophile and the values of Θ in this case is under 0,5. For the data showed in the figure V.5 (field measured data for both crops in different years), the coefficient of determination in the regression is $R^2=0,96$. This is in agreement with the theoretical discussion made

in the section III.4.2 where the rate κ'/Θ looking the values of κ' in the table V.2 is for most of the indices around the unity. This supports the linearity observed between the green fraction cover and the VI. An exception can be made for the GESAVI that is designed to be near-linear in ranges of LAI over 3.5. Due to its behavior with LAI the damping coefficient κ' is 0.17, this means that the index is more sensitive to the increasing leaf area according to more scattered radiation (Gilbert *et al.*, 2002; González-Piqueras, 1999).

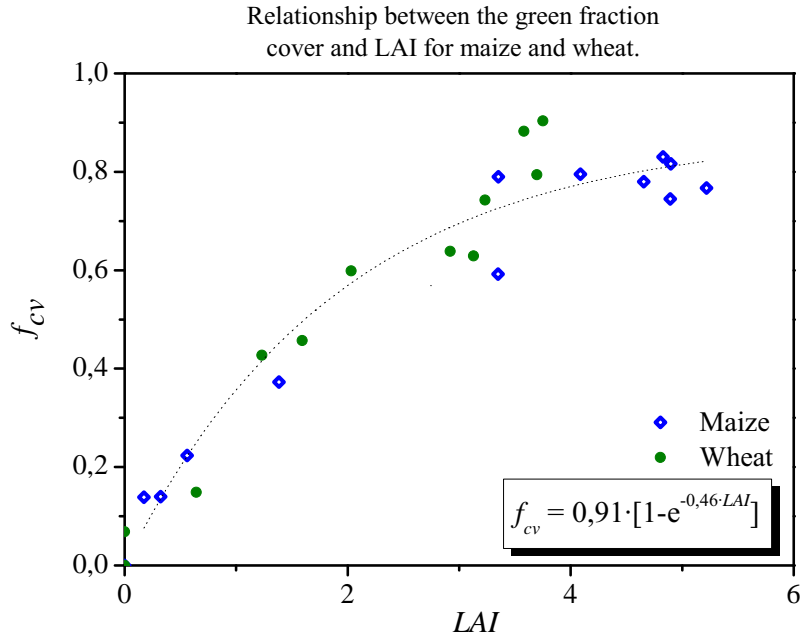


Figure V.5: The f_c versus LAI values are shown, distinguishing between data from maize (+) and wheat (x). In the same figure the exponential fitted curve is shown with $R^2=0,96$.

V.5. Biomass estimation by vegetation indices.

The relationship between the biomass and vegetation indices has been traditionally formulated in two ways. First, by establishing the direct relationship between the vegetation index and dry biomass (Anderson *et al.*, 1993). A second way is by using the Monteith's model (Kumar and Monteith, 1981) based on the fact that the growth rate of many crops is proportional to the rate at which radiance energy is intercepted by the plant foliage. This kind of models based on the positive relationship between the primary production and the Absorbed Photosynthetically Active Radiation (APAR) are known as Light Use Efficiency models (LUE) or ϵ -models (Gower

et al., 1999). The primary production defined in the work as dry biomass per unit surface ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) can be estimated by using the fraction of Photosynthetically Active Radiation f_{APAR} and the incident radiation (PAR) applying the equation III.36. Estimations of *IntVI* are made by linear interpolation of the VI values and by integrating the area under the curve, thus the *IntVI* units are VI·day. The first days considered to calculate *IntVI* were DOY 69 and DOY 148 for wheat and corn, respectively. The data of maize and wheat should be handled separately because of its different light use efficiency evident by observing the biomass during the crop cycle. In the figure V.6 the *IntVI* for NDVI and SAVI versus DoY is plotted in coincidence to biomass for maize (the other indices are plotted in figure C.5 app. D). In the same figure the change in growth stage it is indicated by vertical bars. The first developing phase corresponds to the initial stage followed by the crop development. In both phases, the slope of the biomass curve is slightly greater than the *IntVI* along time. During the maturity stage, the slope of the biomass along time is near zero remaining constant while the *IntVI* curve is greater.

The *IntVI* for NDVI and SAVI versus DoY is shown in the bottom figure V.6 for wheat. The tendency is the same, taking into account that the growth cycle for wheat is different than maize. Because of this, the slope of the biomass curve for maize is lower than the *IntVI* curve during the initial and mid stage but this behavior is inverted during the maturation. At the end of the cycle the conversion of radiation in dry matter increases rapidly for wheat.

Viewing the temporal tendencies in the parameters *IntVI* and biomass, both magnitudes can be compared during the initial and mid stage, but important differences are observed during the maturity period. By this reason, some authors recommend to apply the model in the eq. III.36 only in the initial and mid season where a linear relationship can be observed. This relationship depends on the type of crop and the climatic and environmental conditions. The efficiency of the crop to convert radiation into dry biomass depends on the cover type. By other side, the factor w concerning to the water status of plants is related to the water supply and properties of soil.

Considering the parallel behavior of *IntVI* and the biomass shown in figures V.6, a relationship between both variables can be established during the growing and reproductive stages. Selecting the data for the two growing phases, the value of the linear relationship parameters are showed in table V.3. The equation III.36 where $B = m \cdot \text{IntVI} + n$ can be transformed (assuming average values of PAR , w and ϵ) into:

$$B = B_o + \epsilon_{average} \cdot \text{IntVI}$$

where the parameter $\epsilon_{average}$ is the average value of $\epsilon \cdot PAR \cdot w$. The values of $\epsilon_{average}$ for maize are greater than for wheat during the whole cycle, due to the major conversion of radiation into dry matter. According to Wiegand *et al.* (1991) bias and gain in equation III.36 depend on crop. Other authors (Calera *et al.*, 2004) showed that the water status of the crop affects the slope, lower when the crop is under non

Biomass and IntVI

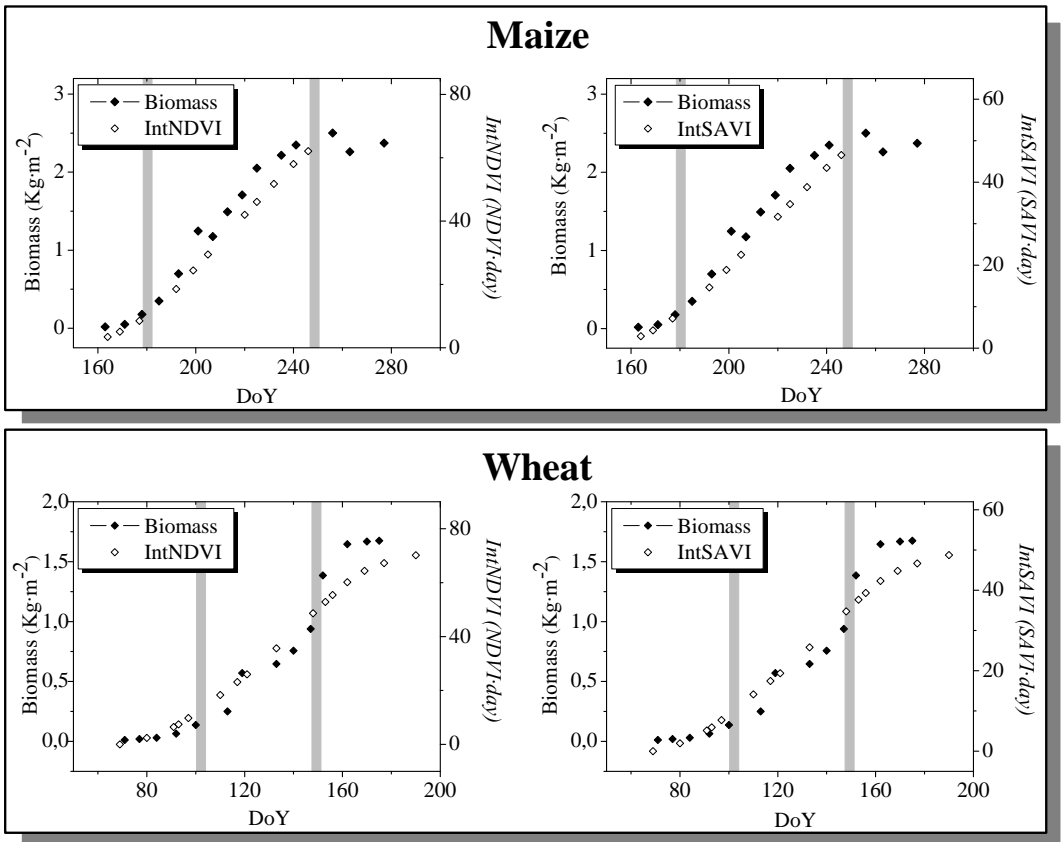


Figure V.6: The biomass ($-\blacklozenge-$) and the VI values integrated on time (IntVI - \diamond) for NDVI and SAVI) versus DoY for maize are shown.

optimal water supply, and thus the crop biomass production is limited. As is seen in the table V.3 the correlation index is 0,99 so all of them support the linearity during the initial and reproductive period.

V.6. Vegetation Indices vs. K_{cb} .

In order to study the behavior of transpiration in both crops from field data it is necessary to account the evaporation from soil. Due a systematic problem of humidity probes this part of the evapotranspiration was not measured. Because of this problem the alternative is to follow the recommendations in FAO methodology

Table V.3: Coeficientes in the linear regression between biomass ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) and *IntVI* (VI-day) for each of the vegetation indices.

Veg. Index	Maize			Wheat		
	Intercept (err) $\times 10^{-2}$	slope (err) $\times 10^{-2}$	R^2	Intercept (err) $\times 10^{-2}$	slope (err) $\times 10^{-2}$	R^2
<i>IntNDVI</i>	7 (7)	3,6 (0,2)	0,99	16 (5)	3,0 (0,1)	0,99
<i>IntSAVI</i>	14 (7)	5,8 (0,2)	0,99	20 (5)	4,0 (0,2)	0,99
<i>IntTSAVI</i>	2 (7)	4,5 (0,2)	0,99	12 (5)	3,0 (0,1)	0,99
<i>IntOSAVI</i>	11 (7)	5,7 (0,1)	0,99	18 (5)	4,0 (0,1)	0,99
<i>IntMSAVI</i>	10 (7)	9,0 (0,1)	0,99	18 (5)	4,0 (0,1)	0,99
<i>IntPVI</i>	7 (7)	15,0 (0,6)	0,99	17 (5)	11,0 (1,0)	0,99
<i>IntWDVI</i>	10 (7)	9,0 (0,4)	0,99	19 (6)	7,0 (0,3)	0,99
<i>IntGESAVI</i>	12 (8)	2,0 (0,1)	0,99	3 (4)	2,5 (0,1)	0,99

to estimate the transpiration of the crop based on phenology and f_c , crop height and adapted to the meteorological parameters of relative humidity and wind speed.

V.6.1. FAO56 K_{cb} curve.

A transpiration curve was constructed following the indications in Allen *et al.* (1998) to develop the basal crop coefficient for wheat and maize indicated in equation III.14. Both curves are plotted in the figure V.7 where the green line (—) corresponds to wheat and the blue dotted line (- - -) corresponds to maize. The values of the single crop coefficient measured in the lysimeter are indicated by the points \blacklozenge and \bullet for wheat and maize. The curve for evaporation crop coefficient calculated from FAO methodology as $K_e = K_c - K_{cb}$ under the hypothesis of no water stress for both crops during the whole cycle is shown as the green diamond symbol for wheat (\diamond) and the blue circle for maize (\circ). The transpiration coefficient represents the evolving curve at the minimum for the K_c points as was proposed by Wright (1982) and following the indications of FAO. For wheat it is not possible to establish a plateau for the basal crop coefficient due to the architecture of the crop, reaching the effective full cover when finishes the ears emergence. A few points of measured K_c in both crops fall under the values of K_{cb} tabulated, this can be understood as some kind of water stress detected at daily values. In case of wheat this effect occurs two days in the mid-stage and a period of time ending the senescence because the shortage of water reduces the length at the end of the growth cycle. For maize, in the growing period between DoY 175 to 185 the curve of K_{cb} suggest more supply of water for the crop during these days. To maintain the assumption of no water stress the days where the K_c drops under the K_{cb} curve was not plotted in figure V.7. In case of wheat, evaporation values maintain an average value of 0,25 during the mid season (DoY=140-160) falling during the senescence period due to less frequency irrigation.

The same effect can be shown for maize where the senescent period is longer. At the end of the maize cycle some higher K_e values can be observed due to some rain in September.

For winter wheat, both transpiration and evaporation are equally important during the winter season, then K_e plays a major role during the initial period, and when crop increases the LAI the transpiration exceeds evaporation (Liu *et al.*, 2002). Values of wheat evaporation during the whole cycle for other authors are 30 % of total evapotranspiration. However, evaporation varies appreciably in the different stages as can be seen in figure V.8 starting the cumulated values from EFC stage. The evaporation, compared to total evapotranspiration varies in the different stages. At the initial period, during winter the proportion is near 44 % and before April reaches a maximum value at 70 % (Liu *et al.*, 2002). During the developing stage is near the 30 % and remains constant until the grain filling stage (fig. V.8) . In the maturity stage the evaporation reaches a value of 20 % until the end.

In relative terms the same tendency can be seen for maize, during the initial period, the evaporation is more than 70 % of total evapotranspiration. The evaporation grows slightly while the transpiration increases rapidly during the effective full cover (EFC). At the end of the cycle the evaporation represents the 17 % of total evapotranspiration.

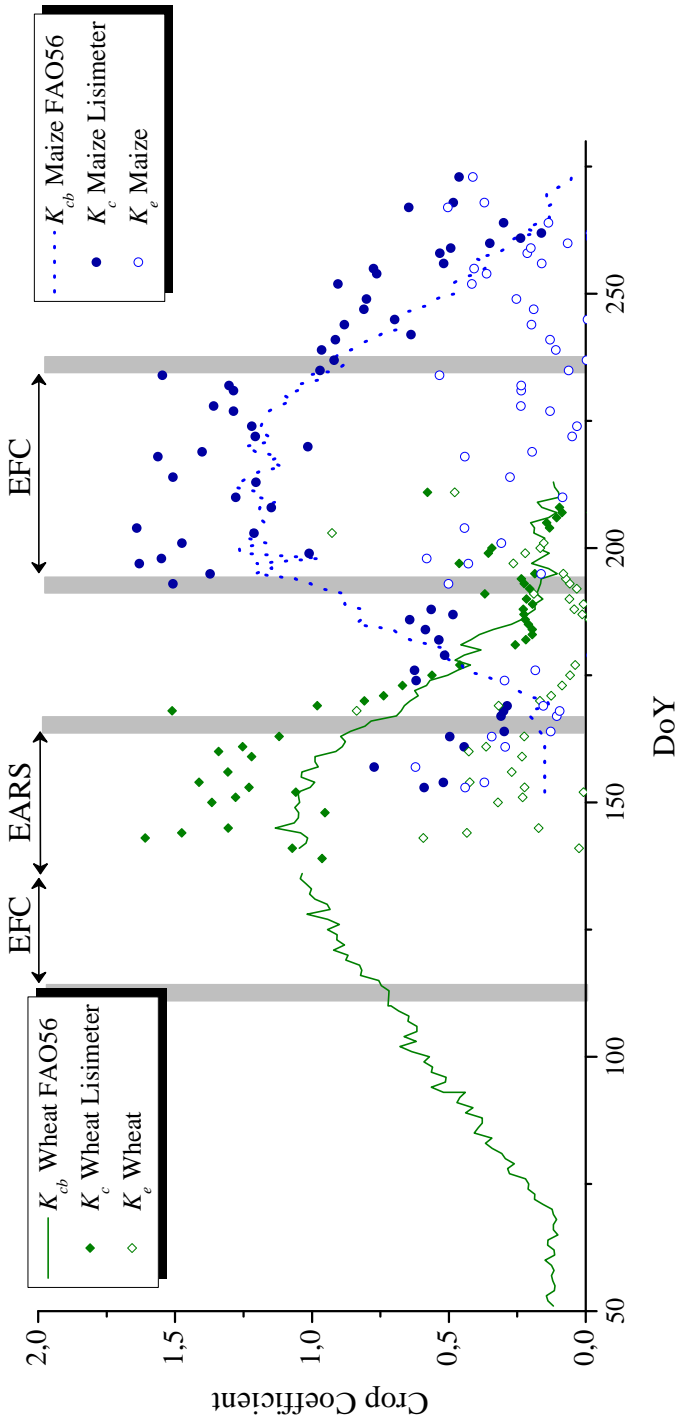


Figure V.7: The K_c for wheat (\blacklozenge) and maize (\bullet) are plotted versus DoY. The basal crop curve was obtained by FAO56 methodology for wheat (---) and maize (- - -). The evaporation coefficient for wheat (\diamond) and maize (\circ) was calculated assuming no crop water stress ($K_s = 1$).

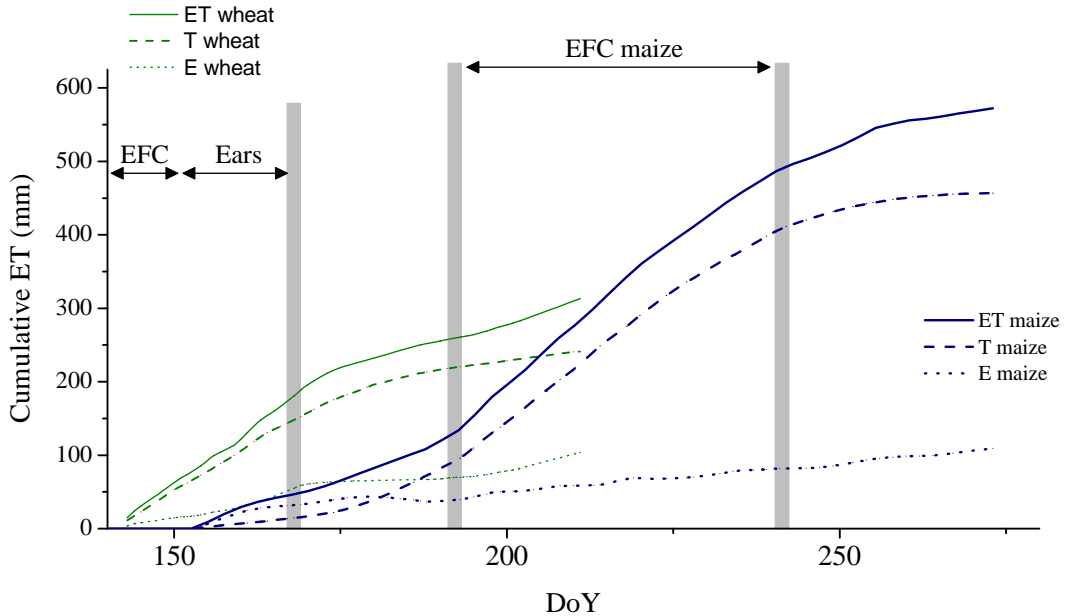


Figure V.8: The cumulative values of evapotranspiration for maize and wheat along DoY are shown in the graph. The values for wheat start on DoY=140 until the end of the cycle. For maize the values were integrated from the DoY=152 until the end of the cycle.

V.6.2. Basal Crop coefficient and Vegetation Index.

As it was indicated in section V.1 the vegetation indices can monitor the crop growth stages for both crops. The tendency in the biophysical variables such as f_c , LAI and K_{cb} is observed in the VI. In the FAO methodology the development stages are determined by f_c ; how it was seen previously due to a linear relationship (fig. V.3) the same stages can be determined by the VI. This allows to compare both magnitudes, the K_{cb} values and the vegetation indices by means of the model described in equation III.32. The values of K_{cb} and the VI are shown in figure V.9 for both crops wheat and maize showing that a linear relationship can be established (Bausch, 1995). Considering individual crops, this relationship for maize offers correlation values of R^2 ranging from 0,94 to 0,95 for all the proposed indices (Gonzalez-Piqueras *et al.*, 2003). When considering the data for both crops this high correlation values is maintained. The slope and intercept values for the linear relationship between the basal crop coefficient and the vegetation indices are shown in Table V.4. For all the cases, the correlation coefficient ranges from 0,85 to 0,93.

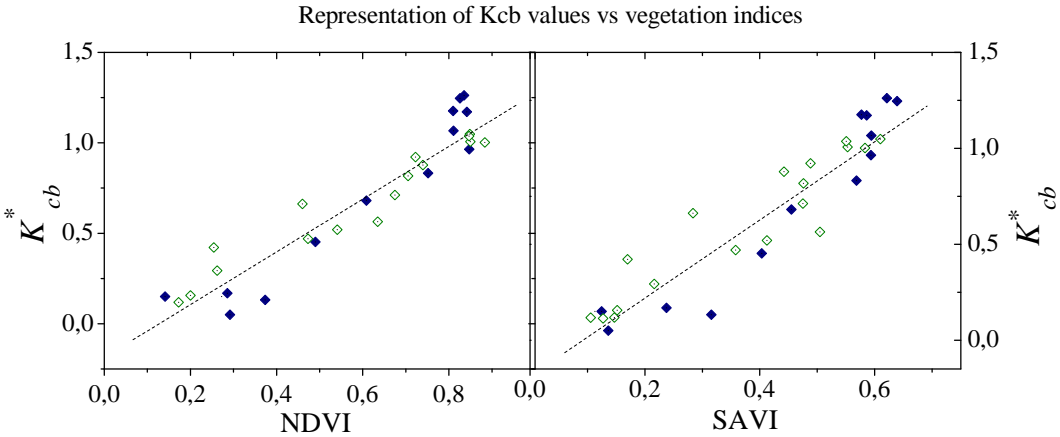


Figure V.9: The basal crop coefficient versus the selected vegetation indices for maize (\blacklozenge) and wheat (\diamond) is shown in the graph. Basal crop coefficient was calculated from f_c and LAI according to FAO56 methodology.

This technique allows to determine the basal crop coefficient by means of spectral reflectance in visible and near infrared. For this reason the coefficient obtained from the reflectance is called *spectral crop coefficient* and to be coherent with the nomenclature provided in chapter III this will be indicated by K_{cb}^* to distinguish the basal crop coefficient obtained from other method such as measured by the lysimeter. The transpiration coefficient used for the regression with the vegetation index were obtained for two crops under optimum water conditions, thus, the value of K_{cb}^* represents the maximum transpiration coefficient for the culture observed under optimal water conditions. So if some disease occurs to the culture, transpiration can decrease the days before and the vegetation indices should detect it. In figure V.11 the values of the K_{cb}^* obtained from the different vegetation indices are plotted coincident in time with K_{cb} . The K_{cb}^* curve offer similar results for the VI selected. Most of the indices, due to the saturation observed at high values of K_{cb} in figure V.9, do not reach the maximum value in the basal crop coefficient. The indices that take into account the brightness and color of soil background (SAVI, PVI, TSAVI, WdVI, OSAVI, MSAVI and GESAVI), are sensitive to the lower values of cover and thus to the lower values of K_{cb} at the initial and senescent period.

The K_{cb}^* computed from previous models are plotted versus DoY in the same graph on figure V.10. These models were adapted to the same reference surface. A first approach was made adapting the linear relationship multiplying the K_{cb} by the factor 1,15 following the indications in the ASCE manual (Allen, 1996). The models used are indicated in table V.5. The models defined from NDVI are shown in the figure V.10-a and those using SAVI are shown in the figure V.10-b. Three models

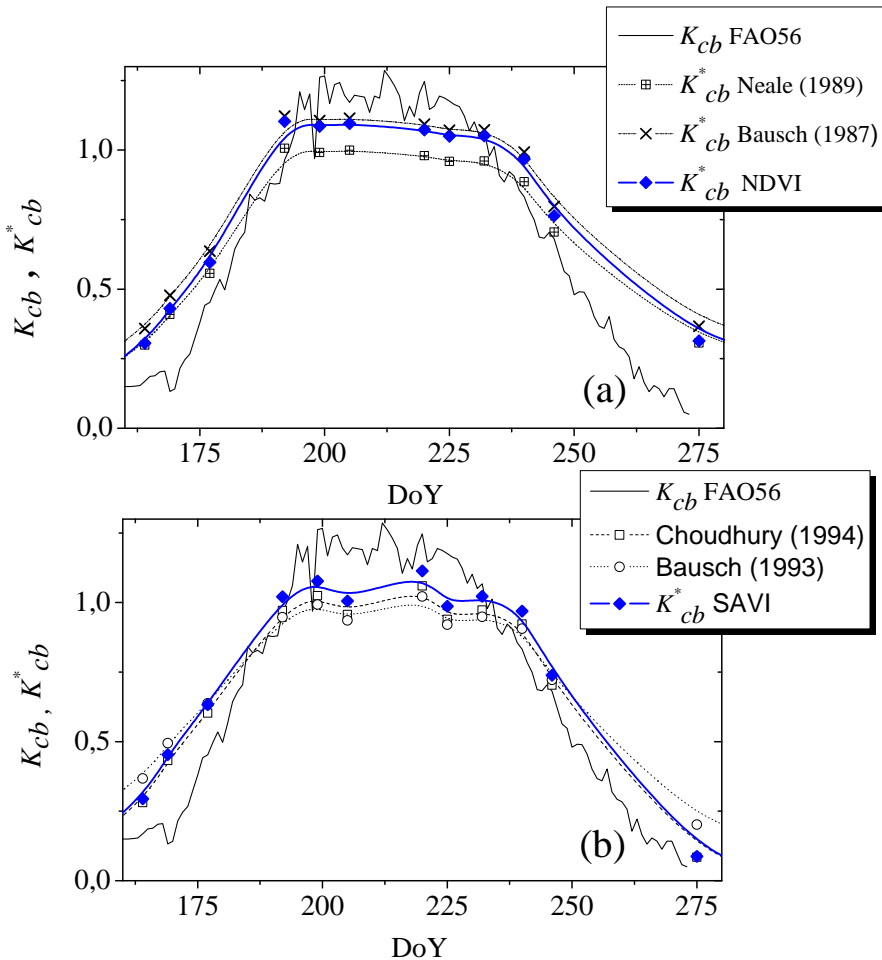


Figure V.10: The maize basal crop coefficient FAO56 versus DoY are compared to different models: (a) By using the NDVI models from Neale (1989), Bausch & Neale (1987) and the equation proposed in this work for NDVI, (b) By using the SAVI models from Bausch (1993), Choudhury (1994) and the equation proposed in this work for SAVI.

in each graph show similar results, in coherence with the linearity between the basal crop coefficient with NDVI and SAVI. The figure V.10 show the different nature of the coefficients, the K_{cb}^* are related to actual crop conditions and the K_{cb} to optimal FAO conditions. It can be seen that the local calibration in the relationship K_{cb} -VI (plotted in blue line) for both indices enlarges its range of variation for adapting to the rate of evapotranspiration of the crop under (actual) optimal water and nutrient supply.

Table V.4: Slope, intercept and correlation coefficient for the linear relationship established between the basal crop coefficient and each of the VI proposed for both crops wheat and maize.

VI	slope (err)	Intercept (err)	R ²
NDVI	1,46 (0,11)	-0,19 (0,07)	0,93
SAVI	2,04 (0,19)	-0,19 (0,09)	0,90
TSAVI	1,30 (0,10)	-0,03 (0,03)	0,93
OSAVI	2,00 (0,16)	-0,20 (0,07)	0,92
MSAVI	1,85 (0,16)	-0,12 (0,08)	0,91
PVI	5,20 (0,60)	-0,16 (0,12)	0,93
WDVI	2,80 (0,30)	-0,03 (0,09)	0,85
GESAVI	0,48 (0,04)	+0,17 (0,05)	0,93

Table V.5: Adaptation of the lineal equations K_{cb} vs VI from the alfalfa reference surface to grass using the ASCE 28 methodology (Allen, 1996).

Author	equation
Bausch & Neale (1987)	1,36·NDVI-0,03
Neale (1989)	1,26·NDVI-0,06
Bausch (1993)	1,63·SAVI-0,02
Choudhury (1994)	1,94·SAVI-0,18

V.7. Vegetation Indices and K_c .

The transpiration and evaporation are included in the single crop coefficient and this introduces more dispersion at lower to intermediate green cover plotting the K_c versus the VI. As it was exposed in the section III.4.4 the soil water status in terms of the frequency of irrigation or rain is the factor that affects primarily to this variability. Due to this variability, the data are going to be analyzed in terms of different time scale. The crop coefficient measured at three time scale, daily, averaged at seven days and averaged at fifteen days versus the NDVI and SAVI is shown in figure V.12. The graph includes the data for maize and wheat, the other proposed indices are plotted in figure C.8-C.9. The table V.6 shows the values for the linear regression in each graph.

A saturation value can be observed when the crop coefficient is over 1, at daily time scale for all the vegetation indices when the cover reaches the maximum value. The maximum value in cover fraction for both crops shown in figure V.1 is up to 0,8 for maize and 0,9 for wheat. But the ranges of the crop coefficient for both crops is the same. When the f_c reaches the maximum value, the crop coefficient increases over 1 and the proposed VI are non-sensitive to an increase in the evapotranspiration coefficient. It's also observed more dispersion in the correlation at low and interme-

diate cover values. This behavior is consequence of the soil water status that can not be detected by the VI. At daily scale the best correlation is offered by the NDVI.

For the seven-days averaged K_c values, the saturation effect is smoothed and the regression fits better at this time scale for all the vegetation indices proposed. For the fifteen-days averaged values of crop coefficient, the correlation is better than the other time scales but this relationship is not recommended for predicting crop water requirements and irrigation scheduling. The vegetation indices proposed show similar regression results, the main difference is on the saturation effect at the maximum values of the crop coefficient. For this reason to avoid this saturation other indices such as the SAVI, OSAVI or GESAVI present the same correlation coefficient and not saturate at high values in crop cover. The different models exposed in the work for obtaining the K_{cb}^* are plotted in the figure V.13 in coincidence to the K_c -NDVI relationship and the K_c data (+) obtained in the lysimeter during the growing cycle of maize, where the evaporation component estimation can be observed because of averaging at seven days. The RMSE in the K_c -NDVI estimation is 0,06.

K_{cb} and K_{cb}^* values vs DoY.

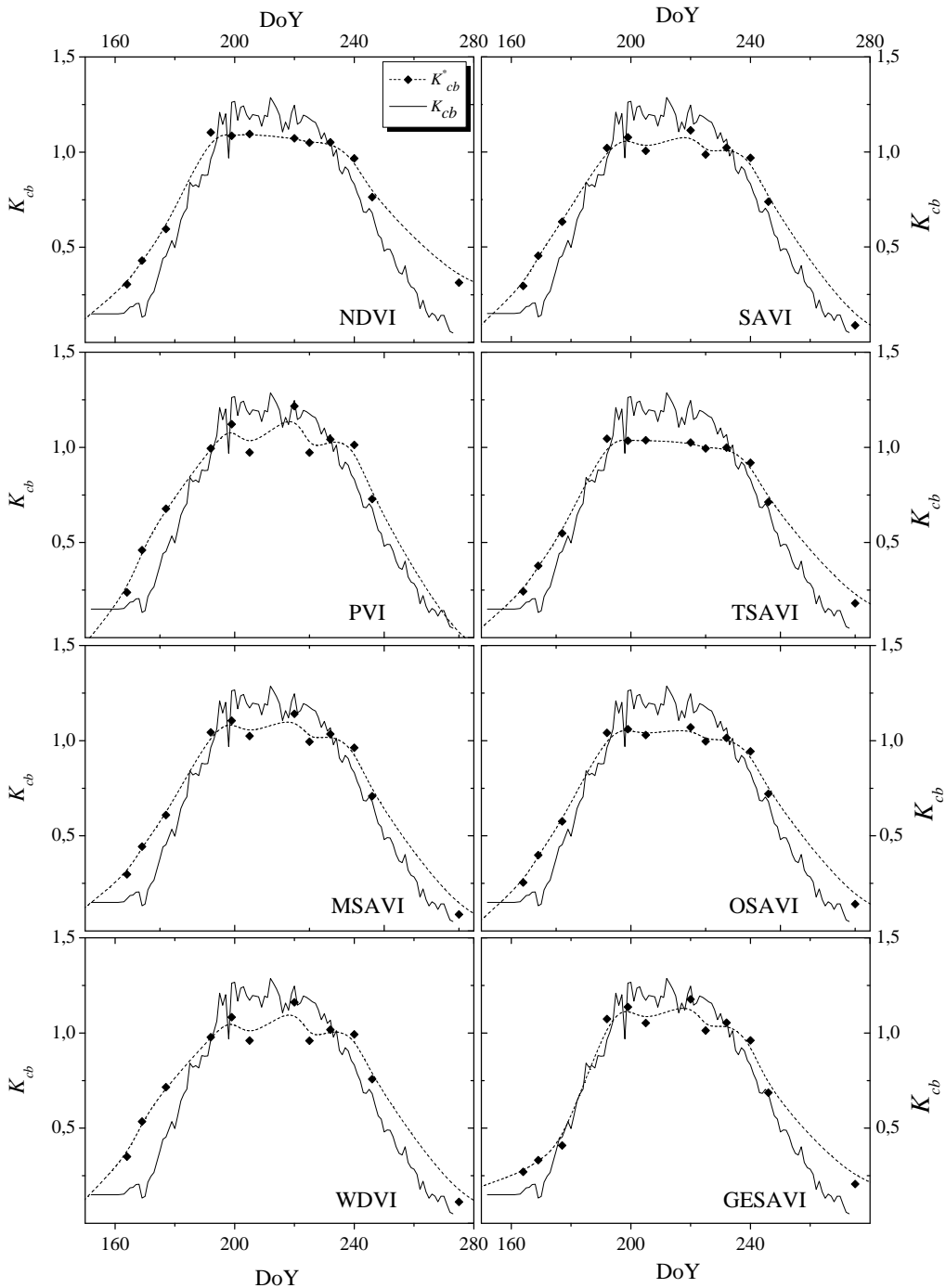


Figure V.11: The basal crop coefficient (continuous line) and the basal coefficient from VI (diamonds and dotted line) versus the DoY for maize are shown in the graph.

Table V.6: Slope, intercept and correlation coefficient for the linear relationship ($K_c = a \cdot IV + b$) established between the crop coefficient and each of the VI proposed for wheat and maize averaged at three time intervals: daily, 7 days and 15 days. The error in the estimation is indicated between brackets.

Veg. Index	Daily			7 Days			15 Days			R^2
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	
NDVI	1,20 (0,20)	0,15 (0,10)	0,94	1,56 (0,13)	-0,02 (0,09)	0,94	1,54 (0,10)	-0,03 (0,06)	0,96	
PVI	3,30 (0,70)	0,37 (0,10)	0,75	4,20 (0,70)	0,27 (0,12)	0,83	4,15 (0,55)	0,26 (0,10)	0,86	
SAVI	1,60 (0,28)	0,21 (0,13)	0,79	2,04 (0,26)	0,05 (0,12)	0,88	1,97 (0,21)	0,07 (0,09)	0,91	
MSAVI	1,45 (0,25)	0,25 (0,12)	0,79	1,81 (0,23)	0,14 (0,11)	0,88	1,75 (0,19)	0,15 (0,09)	0,90	
TSAVI	1,11 (0,17)	0,30 (0,10)	0,83	1,41 (0,13)	0,17 (0,08)	0,95	1,38 (0,10)	0,17 (0,06)	0,95	
OSAVI	1,61 (0,26)	0,18 (0,12)	0,92	2,06 (0,21)	0,01 (0,10)	0,92	2,00 (0,17)	0,02 (0,08)	0,94	
WDVI	2,07 (0,44)	0,36 (0,12)	0,73	2,63 (0,42)	0,25 (0,12)	0,83	2,61 (0,34)	0,24 (0,10)	0,87	
GESAVI	0,39 (0,06)	0,45 (0,08)	0,81	0,39 (0,07)	0,48 (0,05)	0,90	0,38 (0,06)	0,48 (0,05)	0,94	

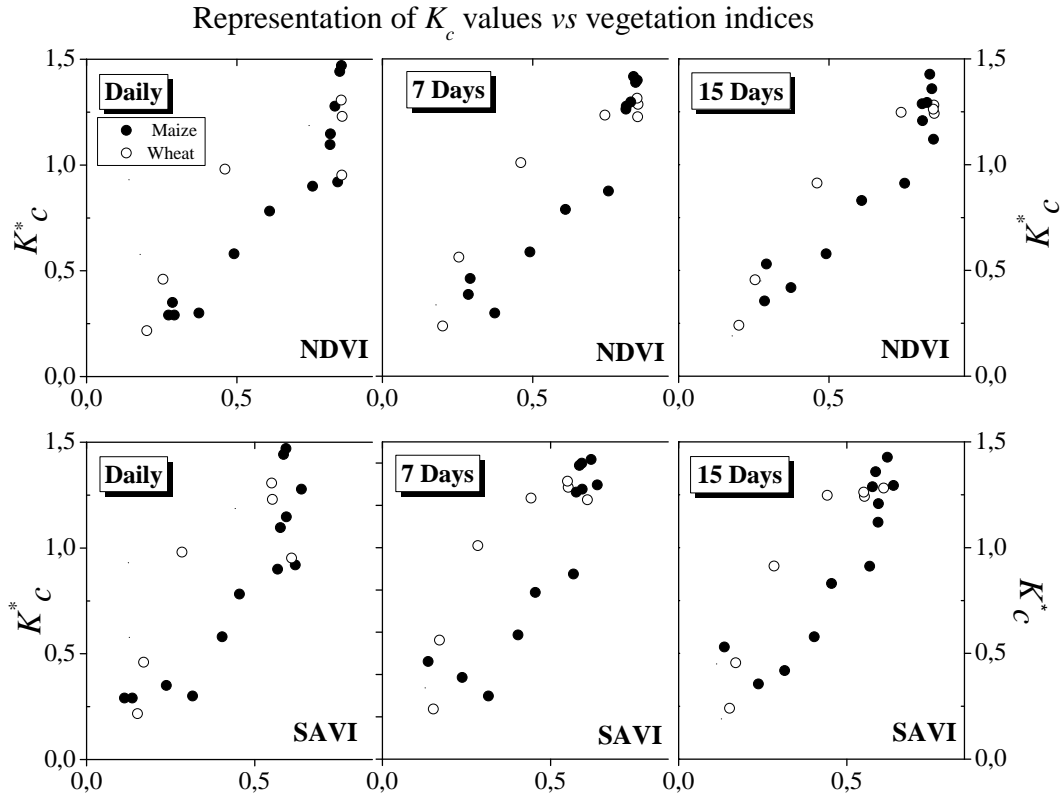


Figure V.12: The basal crop coefficient versus the vegetation indices are shown for maize and wheat.

V.8. Conclusions

The time evolution of the vegetation indices allow to differentiate the initial, crop development, reproduction and senescence stages for corn and wheat. Most of the indices proposed in the work are able to detect differences in the crop development inside and outside of the lysimeter showed by the f_c in section IV.2.3. The linear relationship between the VI and the f_c allow to use both magnitudes to distinguish the crop growth stage. The function obtained from f_c versus VI is the same for wheat and maize because it is not possible to distinguish between data for both crops (see figure V.3 and C.3).

The f_c and LAI show an exponential relationship with a maximum value in $f_c=0,91$ and a damping factor $\theta=0,46$ corresponding to an erectophile cover. The values of these coefficients agree with the model proposed in the section III.4.2 that explains in terms of the biophysical variables the linearity between the basal crop

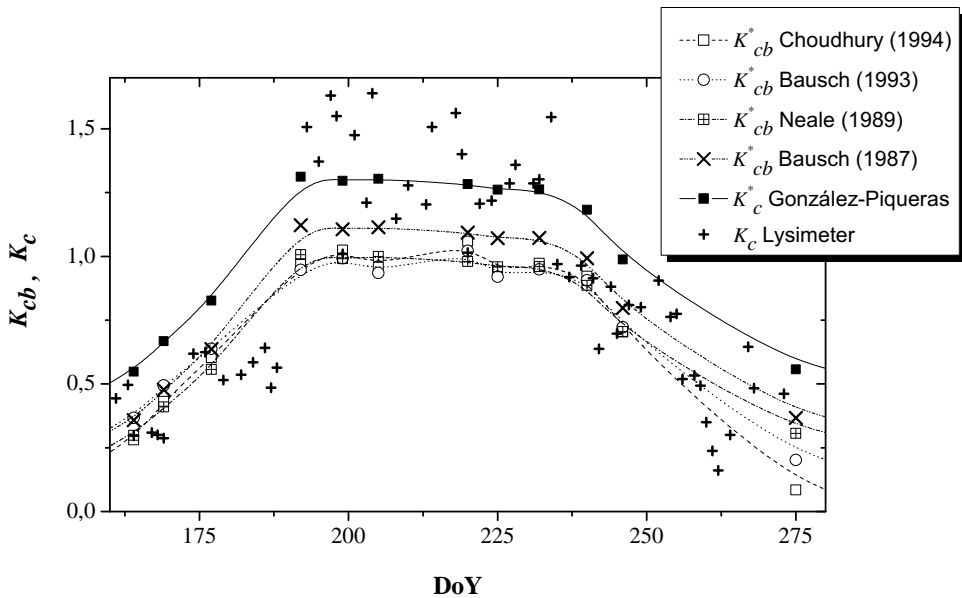


Figure V.13: The maize crop coefficient measured by the lysimeter versus DoY is compared with the models:(i) the K_c -NDVI in this work, (ii) the models from Neale (1989), (iii) Bausch & Neale (1987), (iv) Bausch (1993) and (v) Choudhury (1994).

coefficient and the VI. The exponential function is coherent with the relationship between the VI and the LAI, reaching most of the indices the saturation values for $LAI > 3$, except the GESAVI, sensitive for values of LAI over 5. To obtain these results the parameters measured for both crops, wheat and maize, have been used.

The link between the VI and the biophysical rates such as biomass production allow to understand the linearity between K_{cb} and VI. As is known, it is not recommended to use direct relationship between VI and dry biomass because while VI is in the plateau stage with a near constant value, the dry matter accumulation is at maximum rate (see figure V.2). So, in the case of corn during this stage, while NDVI value remains constant at 0.85, dry biomass ranges from 0.2–2 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$. It seems more appropriate in order to describe the relation between biomass and VI to use models proposed by Monteith (1977) and Asrar *et al.* (1989), known as the Light Use Efficiency or epsilon models (Gower *et al.*, 1999). In these models the VI is introduced as a good estimator of f_{APAR} . Application of these LUE models, in spite of warning to work on cumulated variables (Malet *et al.*, 1997), establishes a linear

relationship between dry biomass and Time-Integrated value of the vegetation index, *IntVI*, obtaining good agreement with experimental data for wheat and corn analyzed in this work. This relationship is highly dependant on the light use efficiency to convert radiation into biomass, ϵ , changing the values in the coefficients for maize and wheat. The other mainly factor is the water stress coefficient (Calera *et al.*, 2004). In agreement with these LUE models, NDVI is related to dry biomass growth rate, CGR. Due to the linear relationship between the f_{APAR} and the IV, the *plateau* on IV corresponds to constant and positive CGR, and biomass increases linearly with time. When the IV is low o decreases on time, corresponds to negligible or low increase biomass.

The linearity of the production functions that links the evapotranspiration to the biomass, lead to a linear relationship between the basal crop coefficient and the VI, dependant on the efficiency to convert f_{APAR} into dry matter, variable between crops and time. This is coherent when observing the temporal evolution of the cumulated ET and biomass simultaneously for both crops. This coherence is maintained when fits the basal crop coefficient to the VI studied. The NDVI, TSAVI and OSAVI show a saturation for values of K_{cb} over 1. The SAVI, PVI, MSAVI, WDVI and GESAVI are sensitive for values of $K_{cb} > 1$. When inverting the model, to describe the temporal curve of the basal crop coefficient, the GESAVI is the index that best determines the K_{cb} during the growing, development and reproductive stage.

The estimation of the K_c from the vegetation indices is limited by the prediction of evaporation from soil. Because of the definition of a VI «... *particularly sensitive to the vegetation amount and not sensitive to color and brightness of soil background*» they can not detect changes on the water content of surface soil. This affects to the daily values of K_c and is dependant of the irrigation/rain frequency. For irrigated wheat and maize in La Mancha, the irrigation time-period ranges from 2 to 7 days. The average value of K_c in a week period of time takes into account the frequency of irrigation and the temporal variation of the VI. All the proposed indices show a good correlation with the K_c data, emphasizing on the NDVI that best fits to the crop coefficient values at the 7 and 15 days time-intervals proposed in the work. Other benefit in the VI using the 7 days time-scale is the smoothing of the saturation effect for values of $K_c > 1$. Thus, the NDVI should be used for the determination of the unique K_c^* coefficient at seven days time-scale applying the relationship in table V.6 at field scale:

$$K_c^* = 1,56 \cdot NDVI - 0,02 \quad (V.2)$$

This equation is adapted for the extensive irrigated crops under the climatic and culture practices in La Mancha. It has been obtained with data from the lysimeter in a semiarid environment.

Finally, as far as the meaning of the K_c^* , that represents the maximum coefficient of evapotranspiration for the observed cover, the VI is sensitive to variations of this

cover from the standard (FAO) behavior and more adapted to current conditions, determining the level of the K_c^* curve (shown in case of wheat).

CAPÍTULO VI

Aplicación a Escala Regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental.

Remote sensing and its continued development has added new techniques that hydrologists can use in a large number of applications. However important remote sensing data can be, it must be emphasized that this is just another tool in the hydrologist's tool kit and for the most part should be considered an addition to, rather than a replacement for, familiar hydrologic procedures.

La Teledetección y su continuo desarrollo han aportado nuevas técnicas que los hidrólogos pueden utilizar en gran número de aplicaciones. Por muy importante que los datos de teledetección puedan ser, debe destacarse que esto es precisamente otra herramienta en hidrología y deben ser principalmente consideradas una contribución, más que una sustitución, a las técnicas hidrológicas comunes.
(Engman, 1992)

En el presente capítulo se plantea la aplicación de la relación $K_c^* \cdot ET_o$ al ámbito del acuífero 08.29. Debe entenderse esta aplicación como una primera aproximación al cálculo de ET_c^* sobre las cubiertas vegetales presentes en el área. Obviamente, una aplicación exhaustiva exigiría una relación empírica $K_c^* - IV$ adaptada a una selección en las cubiertas, pues su generalización a todas las cubiertas puede introducir errores. No obstante, dada la representatividad de los cultivos utilizados en el desarrollo experimental, y en muchos casos la imposibilidad de obtener la relación $K_c^* - IV$ en otras cubiertas, nos lleva a aplicar las relaciones empíricas obtenidas y a su interpretación posterior a la luz de los resultados. El interés de obtener el techo de la evapotranspiración acumulada extendida a todo el acuífero es relevante en el uso del agua en agricultura, de forma particular en los cultivos regados donde la evapotranspiración

real se aproximará a esta envolvente de máximo. En otras cubiertas de secano proporcionará el valor de la evapotranspiración máxima de esa cubierta en óptimo estado de suministro hídrico, su valor de evapotranspiración real estará por debajo de esta envolvente al estar estas cubiertas gran parte del año sometidas a estrés hídrico y presentar éstas mecanismos de adaptación al mismo.

Otra aportación relevante del uso de imágenes de satélite sobre la zona de estudio es la obtención de las curvas de K_c^* de las clases de cultivo representativas. Estas curvas están adaptadas a las cubiertas vegetales en la zona de la Mancha Oriental y por tanto se puede diseñar un mejor suministro hídrico para mantener la cubierta en condiciones óptimas.

El estudio de los valores de ET_c^* frente a la pluviometría dentro de la zona del acuífero durante el año 2003, permite hacer un primer acercamiento a la cuantificación del déficit hídrico al que las cubiertas presentes en la escena están sometidas a lo largo del año. El estudio de la evapotranspiración máxima en cubiertas forestales (800 mm/año) y matorral (480 mm/año) ofrece valores por encima de los valores medios de la precipitación (350 mm/año) y reflejan su adaptación por medio de mecanismos radicales de acceso a recursos hídricos plurianuales así como un funcionamiento estomático de adaptación al estrés hídrico no contemplados en la relación $K_c^* - IV$.

VI.1. Metodología.

El uso de los datos obtenidos desde satélite combinado con el conocimiento de los cultivos en la zona permite definir una metodología para estimar la ET_c^* diaria en cada parcela. Los datos usados desde satélite son imágenes de alta resolución espacial, con varias bandas espectrales, que se utilizarán con dos objetivos: elaborar el mapa de usos de suelo mediante el análisis multitemporal de NDVI, y determinar la fenología del cultivo para establecer la curva del coeficiente de cultivo para cada clase. Tal y como se indica en el diagrama VI.1 el mapa de coeficientes de cultivo se puede obtener bien directamente desde la imagen de IV (línea discontinua) o utilizando la clasificación para obtener las curvas representativas de cada clase y obtener su ET_c^* . Como primer acercamiento al coeficiente de cultivo desde el NDVI a nivel de satélite se hará un estudio de la evapotranspiración en el ciclo de crecimiento de cada clase. Con el mapa de coeficiente de cultivo, mediante el valor de ET_o obtenida en la parcela del lisímetro (línea discontinua en el diagrama VI.1) o bien elaborando un mapa de evapotranspiración de referencia se calcula la ET_c^* . En este trabajo se introduce la ET_o utilizada en los datos de campo y analizada en la estación lisimétrica. Todo este proceso se describe en los apartados siguientes.

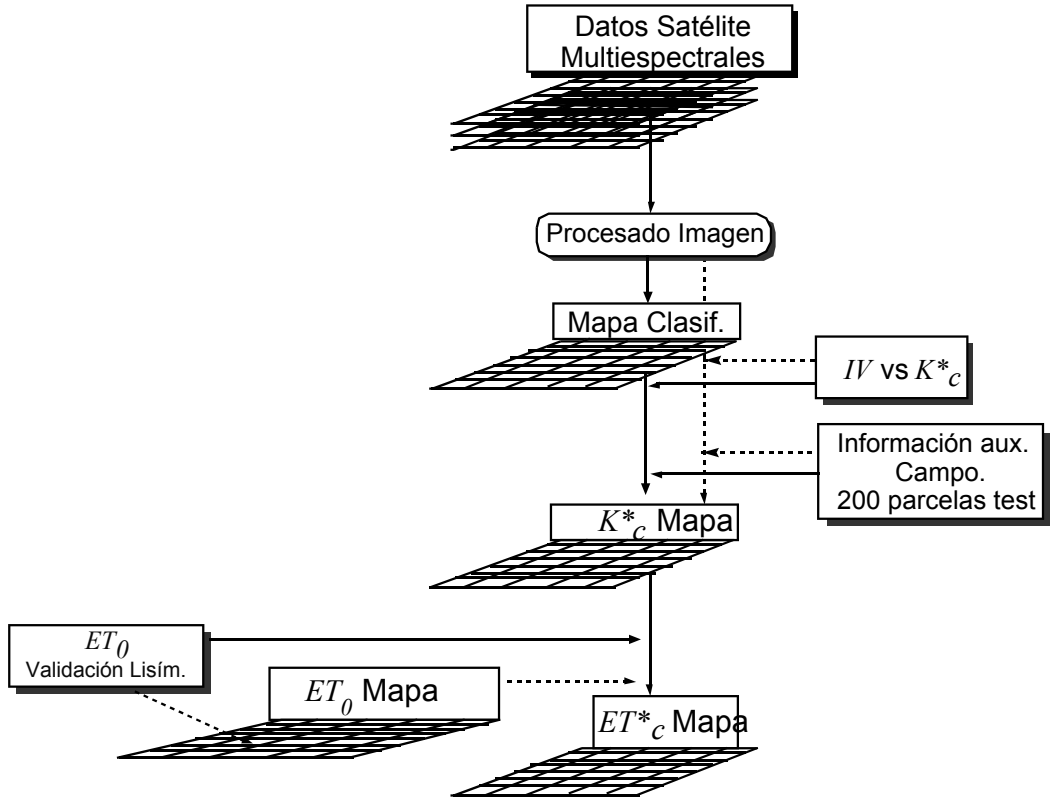


Figura VI.1: Diagrama de la metodología para estimar la ET_c^* a la escala del acuífero.

VI.2. Mapa de Usos de Suelo del Año 2003.

Como elemento clave en la aplicación de la metodología propuesta aparece el mapa de usos de suelo en el año 2003. La elaboración del mapa de usos de suelo se hace mediante la metodología de clasificación supervisada de una serie anual de imágenes de índice de vegetación combinando la información de la evolución temporal de cubiertas con los árboles de decisión.

VI.2.1. Imágenes disponibles.

Entre los sensores operativos actualmente de medio/alta resolución espacial, en torno a 30 m de píxel y considerando que esto permite detectar parcelas por encima de 1 ha de extensión, sensores como TM a bordo del satélite Landsat o LISS a bordo de la serie IRS resultan adecuados para obtener un mapa de clasificación de usos de suelo de la zona. Aunque su resolución temporal resulta inicialmente baja, debido a

que su período de repetición temporal en la adquisición sobre la misma zona es de 16 días, la combinación de las diferentes series (en este caso Landsat 5TM y ETM+) permite acortar éste en una resolución semanal que resulta suficiente para observar cambios fenológicos en las cubiertas consideradas. No obstante, las inclemencias meteorológicas, en especial la presencia de nubes, hace que a veces incluso esta resolución temporal pueda ser insuficiente. Por motivos operacionales se ha seleccionado la serie Landsat TM con este propósito aunque con la misma metodología se pueden incorporar otros sensores.

La situación idónea supone que el mismo sensor adquiera de forma simultánea la totalidad de la superficie del acuífero. Esto como se comprueba en la figura VI.2 es complicado en nuestro caso por lo que la zona mejor determinada por su resolución temporal es la zona de solape entre las pasadas 199/33 y 200/33 de Landsat.

Cobertura Landsat e IRS (1C y 1D) sobre el límite del acuífero 08.29

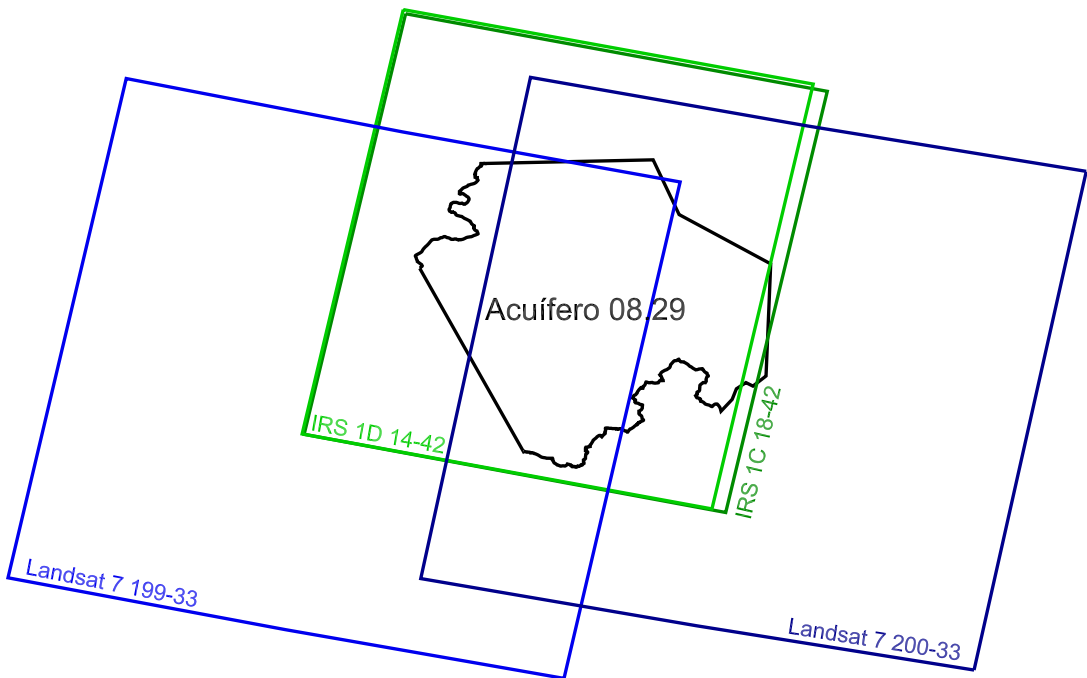


Figura VI.2: Gráfico con la cobertura en las pasadas de IRS 1C (Path-row) 14-42, IRS 1D 18-42, Landsat 7 TM (Path-row) 199-33 y 200-33 sobre la delimitación administrativa del acuífero 08.29.

Es conveniente a la hora de definir la adquisición (entre otros, por motivos económicos) un calendario de pasadas de los satélites que permiten configurar un análisis

previo de la información necesaria para cubrir los objetivos. Como se ha citado anteriormente, con una periodicidad de visita por debajo de diez días es suficiente para detectar los cambios en la fenología de las cubiertas bajo estudio. Por ello, en la tabla adjunta se presentan las pasadas junto a las imágenes seleccionadas para la elaboración del mapa de clasificación (Calera, 2003) y uso posterior.

Cuadro VI.1: Imágenes utilizadas en la elaboración del mapa de usos de suelo (ULxmap y ULymap son respectivamente las coordenadas x e y del píxel superior izquierdo en la imagen).

Fecha	Sensor Plataforma	Path row	n Fil.	n col.	ULymap	ULxmap
10 Marzo	ETM+ Landsat 7	199-33	8403	9312	4 413 227,16	540 432,72
27 Abril	ETM+ Landsat 7	199-33	8402	9318	4 413 073,28	540 011,74
4 Mayo	ETM+ Landsat 7	200-33	8519	9408	4 413 088,27	404 218,35
13 Mayo	ETM+ Landsat 7	199-33	8397	9319	4 413 012,69	539 981,15
20 Mayo	ETM+ Landsat 7	200-33	8517	9410	4 413 094,40	405 609,11
29 Mayo	ETM+ Landsat 7	199-33	8401	9313	4 413 102,88	539 747,06
29 Junio	TM Landsat 5	200-33	8493	9326	4 412 257,96	408 463,47
8 Julio	TM Landsat 5	199-33	8396	9234	4 412 653,01	543 923,38
15 Julio	TM Landsat 5	200-33	8491	9335	4 411 450,99	409 067,53
24 Julio	TM Landsat 5	199-33	8389	9235	4 413 165,93	544 444,98
31 Julio	TM Landsat 5	200-33	8489	9335	4 409 620,73	406 630,70
9 Agosto	TM Landsat 5	199-33	8390	9228	4 412 204,34	544 101,59
25 Agosto	TM Landsat 5	199-33	8423	9197	4 413 178,38	544 091,66
17 Sept.	TM Landsat 5	200-33	8521	9277	4 412 626,02	408 252,48

En el procesado de las imágenes, la asignación de coordenadas se ha hecho en UTM (*Universal Transverse Mercator*) huso 30, que corresponde a la zona de trabajo. Las características de la proyección están basadas en el elipsoide de Hayford o Internacional, utilizándose el datum Europeo. El método de georreferenciación utilizado es el de los puntos de control, utilizando polinomios de segundo orden con un error cuadrático medio inferior a 0,5 píxel, proporcionando éste la precisión adecuada para el trabajo. Para ello se ha utilizado una imagen maestra correspondiente a la banda pancromática de Landsat 7 ETM+ de 29 de Agosto de 1999 con un tamaño de 15x15 m georreferenciada mediante puntos de control adquiridos con GPS. Al ser las imágenes utilizadas de diferente tamaño de píxel, exige su remuestreo para poder ser comparadas, por ello, se han interpolado las imágenes a 25 m en tamaño de píxel por el método de convolución cúbica. Se han procesado por este método todas las bandas, excepto el canal térmico.

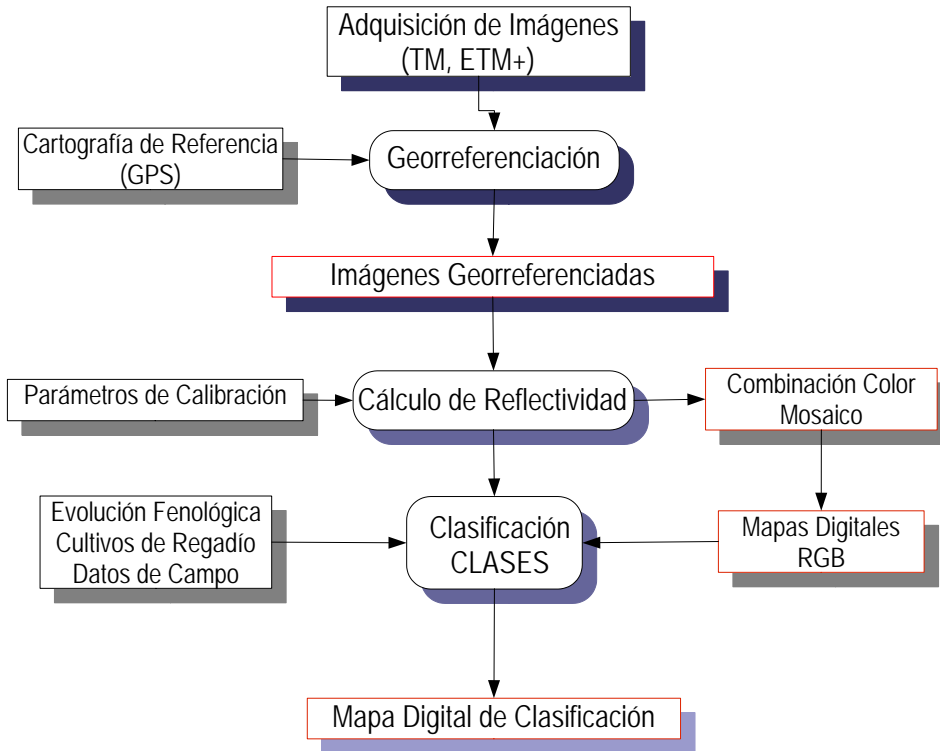


Figura VI.3: Diagrama de evolución en el tratamiento de las imágenes de satélite para obtener el mapa de usos de suelo en el año 2003 (adaptado de Calera (2003)).

VI.2.2. Selección de Clases.

La selección de clases se ha hecho teniendo en cuenta la evolución temporal de las cubiertas consideradas. Para observar la evolución de las cubiertas se ha recurrido al coeficiente de cultivo K_c que muestra la evolución fenológica de la cubierta vegetal, comparable a como es la evolución de la f_c (Allen *et al.*, 2000; 1998) y por tanto, similar a la evolución del NDVI (Calera, Martínez and Meliá, 2001; Galvao *et al.*, 1999; Carlson and Ripley, 1997).

Dado que se dispone de la evolución fenológica en parcelas de entrenamiento se ha hecho la siguiente leyenda del mapa de usos de suelo (figura VI.4), que como se verá en la figura VI.16 permite con bastante claridad su diferenciación:

1. **Regadío de Primavera:** Donde están incluidos cultivos del tipo: Trigo de regadío, cebada de regadío, ajos, colza,...
2. **Regadío de Verano:** Correspondiente a cultivos del tipo: Maíz ciclo largo, remolacha, cebollas, ...

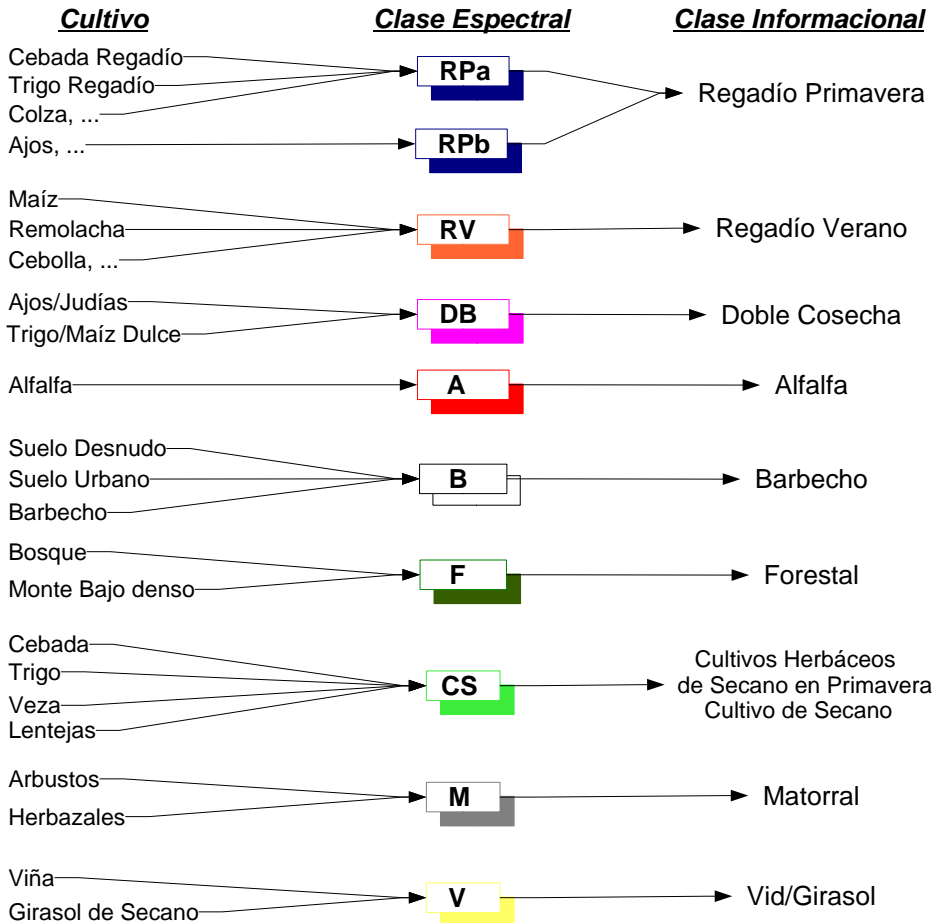


Figura VI.4: Clases consideradas en el mapa de usos de suelo (adaptado de Calera (2003)).

3. **Doble Cosecha:** Es práctica habitual en algunas parcelas, aunque cada vez menos debido a los controles administrativos del agua, simultanear dos cultivos durante el mismo año: uno cuyo ciclo cae en invierno-primavera (trigo, ajos,...) y otro en verano-otoño (maíz ciclo corto, ...).
4. **Alfalfa:** Debido a que los ciclos de corte y desarrollo de la planta son más cortos que el resto de cultivos es una clase que ofrece una evolución temporal característica y fácil de distinguir de otras clases de regadío.
5. **Barbecho:** En esta clase se incluyen superficies no cultivadas con ausencia de vegetación como superficies urbanas, o suelo desnudo.
6. **Forestal:** Donde se incluyen las cubiertas de bosque y cubiertas arbustivas densas.

7. **Cultivo de Secano:** Están incluidas los cultivos cuyo ciclo de desarrollo cae en la etapa de invierno-primavera no regados: cebada, trigo, veza, lentejas, . . .
8. **Matorral:** Es posible establecer una distinción entre cubiertas forestales, en este caso se consideran cubiertas de tipo monte bajo, disperso y matorral.
9. **Vid/girasol:** Son cubiertas que en un mismo ciclo coinciden en los valores de índice de vegetación debido a que ofrecen coberturas similares a lo largo de su desarrollo (verano/otoño). No obstante, es posible distinguir las en estudios multianuales debido a que la parcela con viña ofrece un patrón análogo de repetición en diferentes años, mientras que las parcelas con girasol no suelen repetir cultivo.

Así, utilizando la secuencia temporal de imágenes, la evolución del índice de vegetación derivado de ellas permite describir la evolución temporal de la cubierta vegetal. A partir de las imágenes multitemporales se puede hacer un seguimiento de las fases de desarrollo en el crecimiento del cultivo. Aquellos cultivos que presenten una similar evolución fenológica, así como una evolución semejante en su cobertura de suelo, presentarán una similar evolución de su NDVI.

VI.2.3. Elaboración del Mapa de Usos de Suelo.

Marco de Trabajo.

El procedimiento de clasificación utilizado es el de *clasificación supervisada*. Se parte del conocimiento de la cubierta vegetal o de determinados cultivos en lo que se conoce como parcelas de entrenamiento, este conocimiento permite asignar las características que distinguirán las clases presentes en el área de estudio. En un primer paso se ha utilizado el clasificador de máxima probabilidad por ser el más ampliamente utilizado, posteriormente se han utilizado procesos de clasificación denominados proceso secuencial de clasificador en árbol, que permite introducir información adicional para mejorar la clasificación obtenida por el clasificador de máxima probabilidad. Finalmente se ha aplicado un clasificador de contexto espacial cuyo uso permite la obtención de mejores estimaciones en la cuantificación de superficies. En la figura VI.5 aparece resumido el proceso para obtener el mapa de usos de suelo. El mapa de usos de suelo correspondiente al año 2003 se ha representado en la figura D.1.

Análisis de Calidad.

Con objeto de contrastar la fiabilidad tanto de la clasificación como de la metodología, se han realizado trabajos de campo en colaboración con la Junta Central de Regantes (Calera, 2003). Estos trabajos consisten en un test sobre 344 parcelas distribuidas sobre todo el acuífero que cubren un área de 8 552 ha, con un tamaño medio de 25 ha. El análisis parcela a parcela, muestra que los regadíos se identifican con un error del 1%, el uso de las parcelas regadas muestra una coincidencia del 96,7%, mientras que al incluir todas las clases, el nivel de coincidencia está en un 87%.

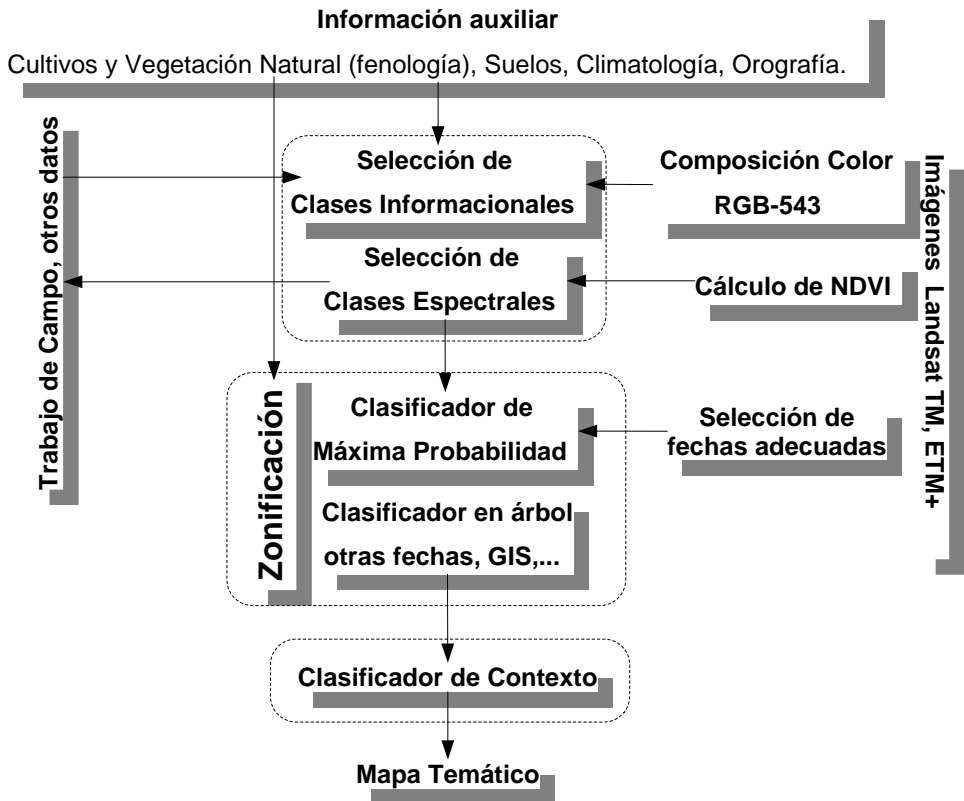


Figura VI.5: Diagrama del proceso de clasificación (adaptado de Calera (2003)).

VI.3. Coeficiente de cubierta en lisímetro frente al coeficiente medio en la zona.

Con objeto de ver la representatividad de la curva de cubierta obtenida en el lisímetro respecto a los mismos cultivos en la zona, se hace una comparación con los datos obtenidos en las visitas de los técnicos a las parcelas de muestreo del SAR. En la figura VI.6 se han representado los ciclos de ambos cultivos maíz durante el año 2001 y trigo durante el año 2003. La curva de K_c^* en ambos cultivos es la envolvente superior de la curva media de estos cultivos en la zona de estudio, estableciendo que las parcelas en la zona de estudio, aunque en muchos casos estén evapotranspirando a su ritmo máximo, esto es a ET_c^* , en la práctica pueden estar por debajo de este valor. Existe una salvedad en el caso de maíz comparando los datos del lisímetro durante el inicio del ciclo debido a un desfase en la siembra respecto a los cultivos de la zona que se traslada en un retraso durante esta primera fase de desarrollo hasta alcanzar la EFC. Aunque la curva obtenida del lisímetro es una parcela más dentro de la zona y resulta comparable a las curvas medias, mostrando esa envolvente de máximo, resulta del máximo interés obtener unas curvas de cubierta representativas, extendidas a toda el área de estudio. Para ello es necesario el uso de datos de teledetección, obteniendo el valor de NDVI de cada uno de los píxeles en la escena, y por tanto de K_c^* . Todo este procedimiento se presenta en la siguiente sección.

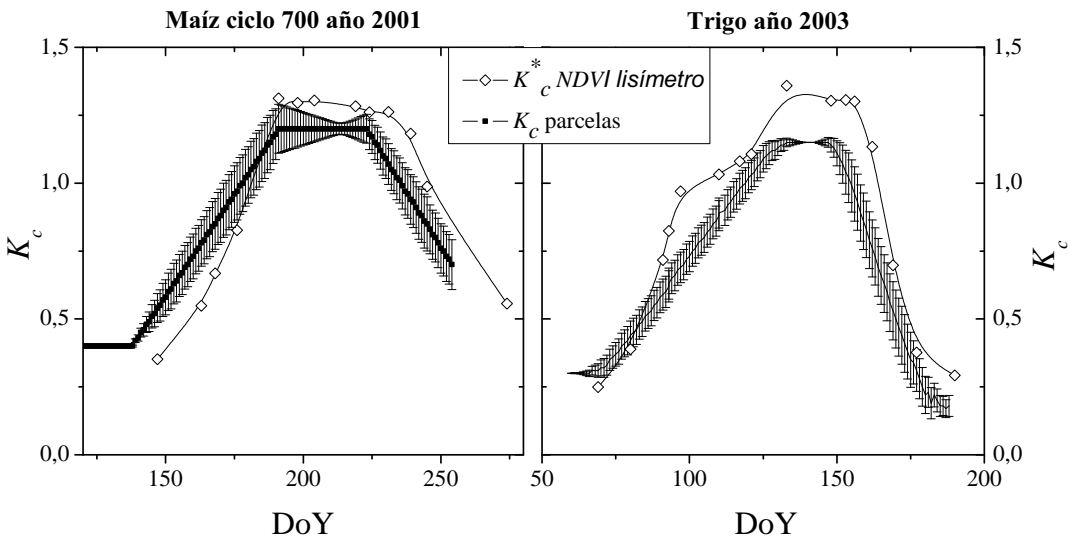


Figura VI.6: Curva de K_c^* obtenida en el lisímetro para maíz el año 2001 y trigo en año 2003 frente a la curva media de los mismos cultivos calculada sobre la zona de estudio en las visitas a parcelas del SAR.

VI.4. Evolución temporal de NDVI de cada clase.

El objetivo en esta sección es obtener la evolución temporal del *NDVI* para cada una de las clases definidas anteriormente en el mapa de usos de suelo. Dicha evolución se va a extraer desde las 14 imágenes seleccionadas de un total de 24 adquiridas que constituyen la secuencia temporal a lo largo del año 2003 y que se relacionan en la Tabla VI.1. Las imágenes seleccionadas van del 10 de Marzo al 17 de Septiembre y describen adecuadamente la estación de crecimiento (libre de heladas) de dicho año. Como se utilizan imágenes correspondientes a los recorridos 199-33 y 200-33 la zona sobre la que se van a extraer los *NDVI* para cada clase es la zona de solape entre ambas imágenes, tal y como se puede observar en la figura VI.2.

El *NDVI* calculado en las imágenes es el usualmente denominado *NDVI* calculado desde las reflectividades en el techo de la atmósfera, *NDVI_{TOA}*, siguiendo el procedimiento descrito en la figura VI.5, utilizando los parámetros de calibrado actualizados para Landsat 5TM (Chander and Markham, 2003) y Landsat7-ETM+, que permite la intercomparación de los valores de *NDVI* entre Landsat5TM y Landsat7-ETM+ (Steven *et al.*, 2003).

La utilización de una secuencia temporal de imágenes requiere de la corrección de los efectos debidos a la atmósfera que puede variar de imagen a imagen. Dado que se plantea la aplicación de una metodología basada en los Índices de Vegetación y que el uso del *NDVI_{TOA}* ya supone una cierta corrección del efecto atmosférico, se ha seguido un procedimiento de validación de la calidad de las imágenes seleccionadas para su intercomparación. Dicho procedimiento se ha basado por un lado en la comprobación de la invarianza del valor del *NDVI_{TOA}* sobre suelo desnudo (0,14 en promedio) a lo largo del tiempo y, por otro lado, en la presencia en todas las imágenes seleccionadas de superficies de vegetación densa pertenecientes a alfalfa en el máximo de desarrollo con coberturas vegetales verde superior al 90 %, con valor *NDVI_{TOA}* de 0,82-0,85 para la parcela en días claros y con elevada visibilidad. Procedimientos que utilizan directamente el *NDVI* para normalizar series multitemporales de imágenes, aprovechando la invarianza de algunas superficies vegetales se describen por Chen *et al.* (2005). Ejemplos de algunas de las parcelas de alfalfa y suelo desnudo utilizadas para esta comprobación se muestran en el Anexo E .

El procedimiento de extracción ha consistido en manejar los valores de *NDVI_{TOA}* de todos los píxeles correspondientes a cada una de las clases para cada imagen de la secuencia. Para representar los valores se ha calculado el valor medio correspondiente a cada fecha y se ha representado en la figura correspondiente el histograma de la distribución estadística, ya normalizada, de dichos valores, lo que proporciona información valiosa acerca de dicha distribución. Para todo ello se han manejado herramientas SIG y el software de tratamiento de datos Origin®.

La evolución temporal de los *NDVI_{TOA}* correspondiente a cada una de las clases se muestra en las figuras VI.7 a VI.15.

Finalmente se ha extrapolado el valor del $NDVI_{TOA}$ para cada uno de los días del año, basándonos por un lado en los datos extraídos y por otro en la información auxiliar de la evolución fenológica de las cubiertas que integran las clases, tal como se refleja en el Cuadro VI.2, donde se señalan en promedio el día del año en que se producen los cambios de tendencia en la curva de evolución. Para extrapolar al resto del año, especialmente los meses de Noviembre a Marzo, período no cubierto por la secuencia de imágenes utilizadas, se considera que la cubierta vegetal existente se aproxima a suelo desnudo, dadas las frecuentes heladas en esa época. La excepción a esta regla son las clases Matorral y Forestal, ya que las constituyen principalmente tipos de vegetación permanente no caducifolia, principalmente arbustos y coníferas; para estas clases que mantienen un valor prácticamente constante con una suave disminución hacia el verano, se han extendido los valores a todo el año.

VI.4.1. Clase regadío de primavera

Representada en la figura VI.7. Indica el comportamiento típico de los cultivos que la constituyen, presentando una meseta en los meses de Abril y Mayo, y una acusada caída a lo largo del mes de Junio correspondiente a la maduración y senescencia; cebadas y trigo son los cultivos que tiene mayor peso en esta clase. La dispersión que presentan los valores en los meses de Abril y Mayo podría ser debida a la presencia del cultivo de ajos cuyos valores de $NDVI_{TOA}$ se sitúan alrededor de 0,45, lejos de los valores típicos de 0,80 correspondientes a los $NDVI_{TOA}$ de las mesetas de las cubiertas vegetales completas de la cebada y el trigo. También se puede observar finalmente como los valores de $NDVI_{TOA}$ se acercan a los de suelo desnudo tras la cosecha, la cual se realiza aproximadamente a finales de Junio o principios de Julio.

Dentro de la clase regadío de primavera, están incluidos principalmente los cereales regados, sembrados durante el invierno, época durante la cual tiene lugar su crecimiento, desarrollo durante la primavera y recogida al principio de verano. Dentro de esta clase de cultivo están incluidos también hortalizas como los ajos, con un ciclo de desarrollo más corto. La evolución temporal de los cultivos más representativos de esta clase (principalmente cereales de regadío), obtenidos en una campaña extensiva por el Servicio de Asesoramiento de Riegos de Albacete durante el año 2003, se pueden observar en la figura F.1.A-F.1.F dentro del apéndice F.

La primera fecha que es el 10 de Marzo (DoY=69) muestra una distribución de frecuencias en el histograma en torno a un valor central. Al inicio del ciclo, la f_c de las cubiertas es baja, ofreciendo valores de IV que corresponden casi a valores de suelo desnudo. La siguiente fecha disponible que es el 27 de Abril (DoY=123) muestra una distribución de frecuencias más repartida que en la fecha anterior, debido principalmente a que dentro de la zona del acuífero las parcelas de los cultivos de regadío de primavera difieren en el día que alcanzan su máximo de cobertura. Asimismo, se observa que según se va alcanzando el final del período de meseta hacia el inicio de la maduración el histograma de frecuencias muestra una campana más amplia. De

esta manera se traduce la incertidumbre al agrupar parcelas dentro de una zona de estudio amplia como es el acuífero 08.29, pues de una zona a otra, debido a factores como las prácticas de cultivo, climatológicas, ... difieren en varios días el inicio de la maduración. La siguiente imagen muestra un acuerdo claro dentro de la clase pues el 29 de Junio (DoY=179) la mayoría de las parcelas han alcanzado el final del ciclo mostrando valores de $NDVI_{TOA}$ correspondientes a cubierta senescente o suelo desnudo. En el resto de imágenes disponibles, la clase muestra un histograma de frecuencias que responde a una distribución clara en torno a un valor representativo de la clase.

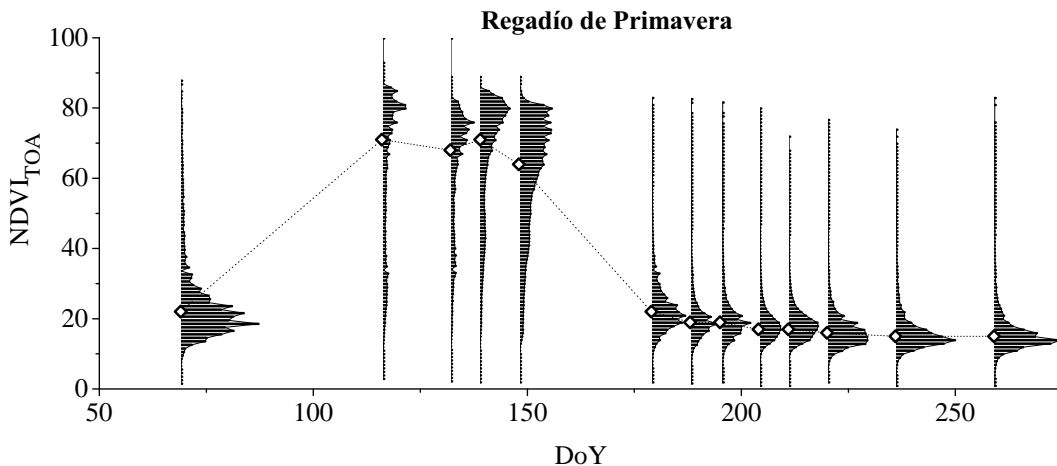


Figura VI.7: Evolución del histograma de valores para cada fecha sobre la clase regadío de primavera. El histograma está representado sobre la horizontal en cada fecha junto al valor medio de $NDVI_{TOA}$.

VI.4.2. Clase regadío de verano

En la figura VI.8 se ha representado el histograma de frecuencias del valor de $NDVI_{TOA}$ para la clase regadío de verano. Muestra un comportamiento típico de los cultivos que la constituyen, presentando una meseta en los meses de Julio y Agosto, con una caída prolongada durante los meses de Septiembre y Octubre. Remolacha y maíz son los cultivos más representativos de esta clase. Se observa que la campana principal del histograma aparece bien definida en torno al valor medio de $NDVI_{TOA}$ las fechas 10 de Marzo (DoY=69), 27 de Abril (DoY=116), 13 de Mayo (DoY=132), apreciándose la inflexión hacia el período de crecimiento los días 20 al 29 de Mayo (DoY=139-148). La imagen del 29 de Junio muestra que ya se ha alcanzado el *plateau* aunque el histograma indica mayor variabilidad debido a la mezcla de cultivos en la clase. Como se ha indicado anteriormente existe una diferencia apreciable en el momento que alcanzan dicho estado. Durante esta etapa las imágenes disponibles

muestran que el histograma de $NDVI_{TOA}$ de la clase se agrupa en torno a un valor central. El 25 de Agosto (DoY=236) ya se aprecia una disminución en el valor central del histograma además de una cola de valores más importante. La etapa de maduración y senescencia introduce más variabilidad en esta clase debido a las diferencias que presentan los distintos cultivos al final de cada uno de sus ciclos. Esta diferencia se debe principalmente al desfase temporal durante la etapa de maduración entre el cultivo de maíz y remolacha.

La evolución temporal de los cultivos más representativos de esta clase (principalmente maíz y remolacha), obtenidos en la campaña extensiva del Servicio de Asesoramiento de Riegos de Albacete durante el año 2003, se pueden observar en la figura F.2.A-F.2.F comentadas dentro del apéndice F.

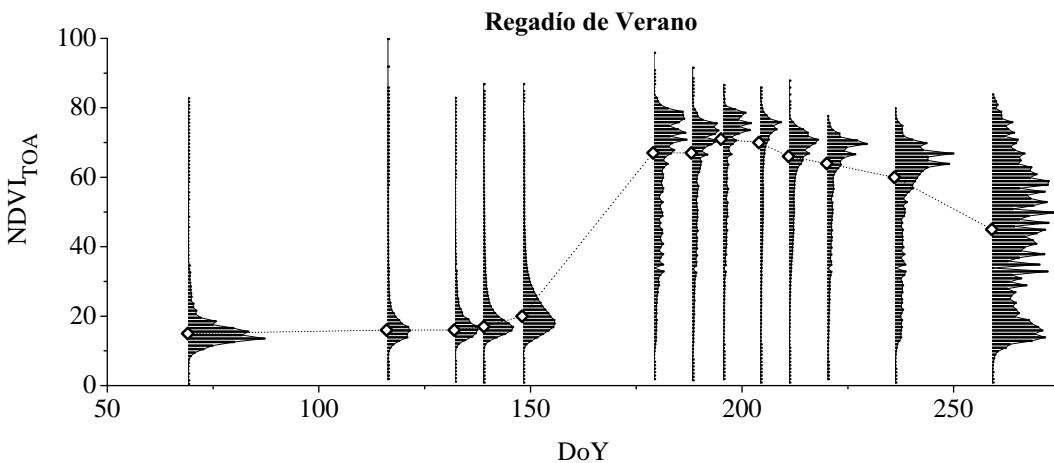


Figura VI.8: Evolución del histograma de valores para cada fecha sobre la clase regadío de verano. El histograma está representado sobre la horizontal en cada fecha junto al valor medio de $NDVI_{TOA}$.

VI.4.3. Clase alfalfa.

Las parcelas estudiadas en la campaña de seguimiento intensivo muestra una alta variabilidad debido a que los cortes en la recolección del cultivo no son coincidentes entre parcelas. Este desfase se puede apreciar en la figura VI.9 donde el valor representativo de la alfalfa utilizando los datos de la campaña extensiva introduce un error elevado. Este desfase temporal provoca que no sea posible determinar por el mismo método al establecido en las dos clases anteriores y sea necesario seleccionar una parcela *patrón* bien caracterizada. En la misma figura a la derecha (fig. VI.9) aparecen representados los valores de una curva de K_c para una parcela de seguimiento en la zona de La Felipa. En esta figura aparecen representados los ciclos de corte y

recolección correspondientes a una campaña de campo llevada a cabo durante el año 2004 sobre una parcela de alfalfa y sobre la cual se ha hecho un seguimiento similar a los cultivos de maíz y trigo expuestos en el capítulo IV excepto la evapotranspiración por no disponer durante la campaña de estación de lisimetría en la zona ni de otro método de estimación directa de la misma. Así, utilizando los valores de NDVI se reproduce la curva de K_c^* .

En la figura VI.9 se ha representado la curva correspondiente a un ciclo completo. El primer ciclo se ha determinado con las fechas de corte y los valores establecidos por FAO: el crecimiento de la alfalfa comienza el 1 de Marzo (DoY=60) manteniendo el estado inicial durante 30 días, el estado de desarrollo se prolonga 20 días hasta el 20 de Abril (DoY=110), el estado medio se prolonga otros 20 días hasta el día de corte que se produjo el 16 de Mayo (DoY=136). La primera medida de radiometría se produce el 8 de Junio, cuando el cultivo está ya en su máximo, por ello, no se ha registrado la evolución del cultivo desde el primer corte hasta el momento que alcanza su máximo. No obstante, se han seguido el resto de los ciclos de corte, observando un patrón similar al propuesto por Wright (1982), con una longitud media en el estado medio de 20 días y el estado de desarrollo de 10. Con estas recomendaciones a partir del primer corte se configura la evolución de este coeficiente de cultivo que alcanza su máximo el día 28 de Mayo (DoY=148), perdurando este estado de crecimiento hasta el siguiente día de corte el 17 de Junio (DoY=169). Los sucesivos máximos en el desarrollo del cultivo se localizan entre los días 14 de Julio (195) y 23 de Julio (204), para el cuarto ciclo se cierra el 20 de Agosto (232) y el quinto ciclo se cierra el 28 de Septiembre (271).

VI.4.4. Clase doble cosecha.

Los valores de $NDVI_{TOA}$ para la clase doble cosecha, aparecen representados en la figura VI.11 mostrando dos máximos en su evolución temporal durante el ciclo del cultivo, uno en primavera y otro en verano. El 10 de Marzo el histograma presenta los valores centrados en torno a un valor correspondiente a suelo desnudo, para fechas posteriores, aunque el valor medio de $NDVI_{TOA}$ va en aumento, el histograma presenta una mayor amplitud debido a la diferencia de fases en los cultivos incluidos en la clase. Al final del ciclo de primavera (DoY=180), se vuelve a definir con mas claridad el histograma al estar los cultivos en etapa senescente o de recolección. Al inicio del ciclo de los cultivos de verano el valor medio de $NDVI_{TOA}$ es creciente, viéndose afectado por las prácticas de cultivo (diferencias en fecha de recolección y siembra). Al final del ciclo, se aprecian varios grupos de cultivos que evolucionan de forma similar dentro de la clase doble cosecha al visualizarse hasta tres picos dentro del histograma. La clase doble cosecha, al ser una combinación durante el mismo año de un cultivo de primavera y un cultivo de verano, la curva de coeficiente de cultivo se traduce en la doble evolución de las dos clases: regadío de primavera y regadío de verano. Esta

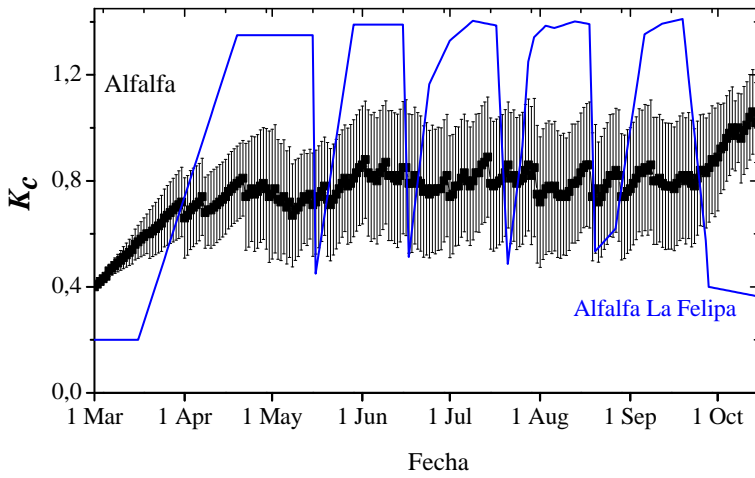


Figura VI.9: Curva del coeficiente de cultivo para Alfalfa, obtenida a partir de la campaña extensiva (puntos negros) y en un seguimiento intensivo sobre una parcela ubicada en La Felipa (línea azul), dentro del ámbito del acuífero 08.29.

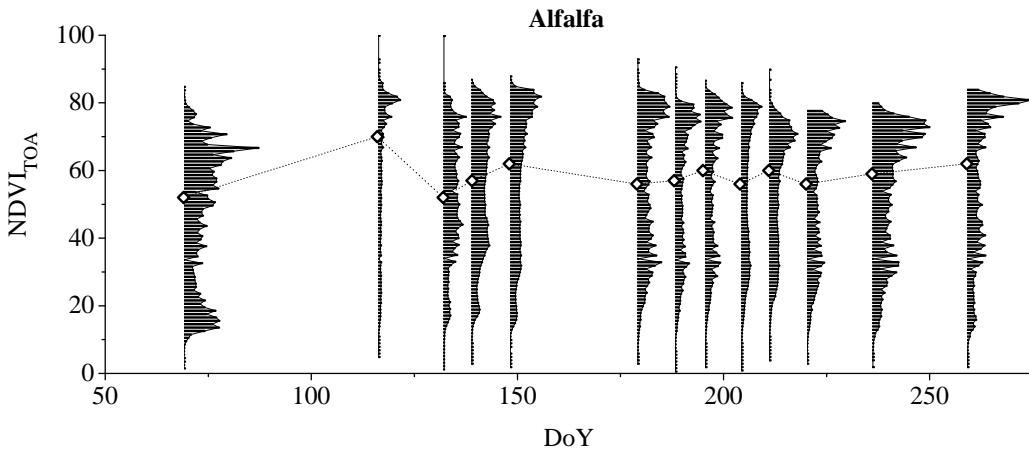


Figura VI.10: Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de cultivo alfalfa.

evolución temporal se corresponde con las curvas de K_c en la figura F.1 para cultivos de primavera y figura F.2 para los cultivos de verano.

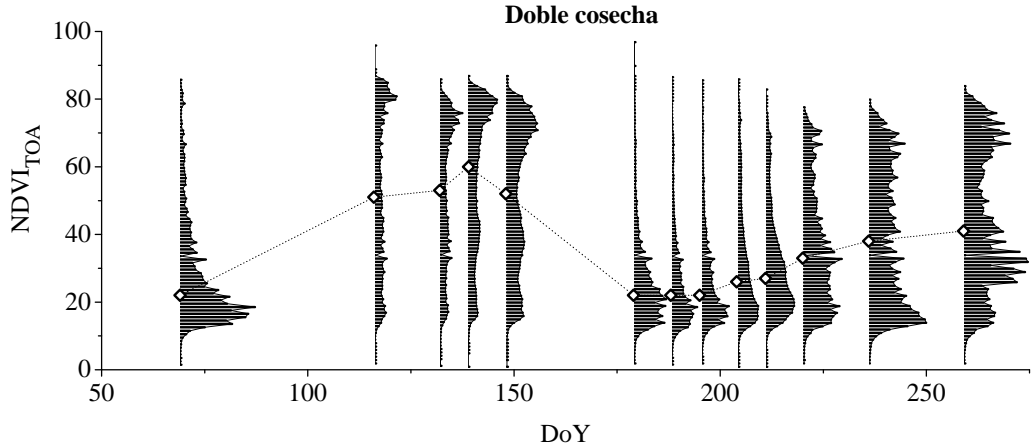


Figura VI.11: Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de cultivo doble cosecha.

VI.4.5. Clase cereal de secano.

En la figura VI.12 se ha representado la evolución del histograma de valores de $NDVI_{TOA}$ para la clase de cultivo cereal de secano. Dentro de esta clase se incluyen principalmente el cultivo de cebada y variedades leguminosas (lentejas y garbanzos). Se observa que inicialmente el 10 de Marzo existe una campana de valores debido a la variabilidad de la clase dentro del área de estudio. El histograma en la etapa de cubierta efectiva completa $DoY=116,132$ y 139 muestra una distribución gaussiana con una distribución de valores amplia. Esta variabilidad es en gran medida debida a la distribución de lluvias dentro del acuífero que presenta variaciones de una zona a otra de 300 a 500 mm anuales, esto tiene una repercusión en el período y nivel de desarrollo de las cubiertas de secano. La etapa de maduración y senescencia presenta una distribución de valores centradas en un pico de valores casi coincidente con su valor medio. La evolución temporal del K_c de cereal de secano presenta un comportamiento similar al mostrado en la figura F.1 para el cereal de regadío, con valores más bajos del coeficiente de cultivo en la etapa de EFC y una semana más corta en término medio al final del ciclo.

VI.4.6. Clase forestal.

En la figura VI.13 los valores de $NDVI_{TOA}$ para la clase forestal muestran una evolución del índice que mantiene a lo largo del año un valor constante, bajando ligeramente hacia los meses de verano, coincidiendo con el período del año de menor precipitación.

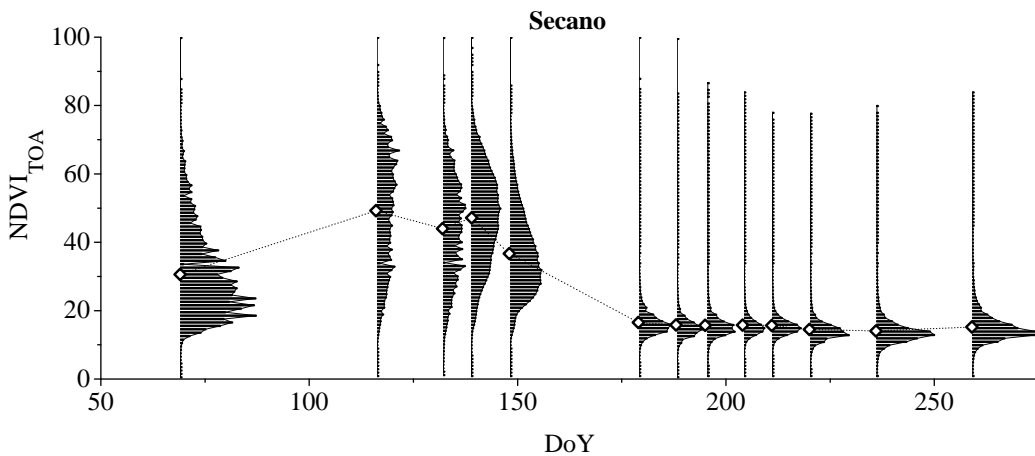


Figura VI.12: Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de cultivo cereal de secano.

VI.4.7. Clase matorral.

En la figura VI.14 la distribución de valores de $NDVI_{TOA}$ para la clase matorral muestra los valores agrupados en torno al valor medio de forma sistemática a lo largo del ciclo de crecimiento. Al igual que ocurre con la clase de forestal, es en los meses de verano cuando los valores de $NDVI_{TOA}$ experimentan una sensible bajada, cuando se produce una disminución en las precipitaciones.

VI.4.8. Clase vid.

En la figura VI.15 se muestra la evolución temporal de $NDVI_{TOA}$ para la clase vid, mostrando que a partir del $DoY=120$ comienza su desarrollo reflejándose este efecto sobre un aumento en el valor del índice de vegetación lo que se traducirá en un aumento en el valor de K_c . Hacia el 25 de Junio ($DoY=175$) se alcanza el máximo de cobertura manteniéndose hasta la mitad del mes de Agosto ($DoY=226$) cuando se produce el decrecimiento, suave pues la pérdida de hoja no se produce hasta la época de recolección a partir del día 15 de Septiembre ($DoY=255$) pérdida foliar que se mantiene hasta la segunda quincena de Octubre.

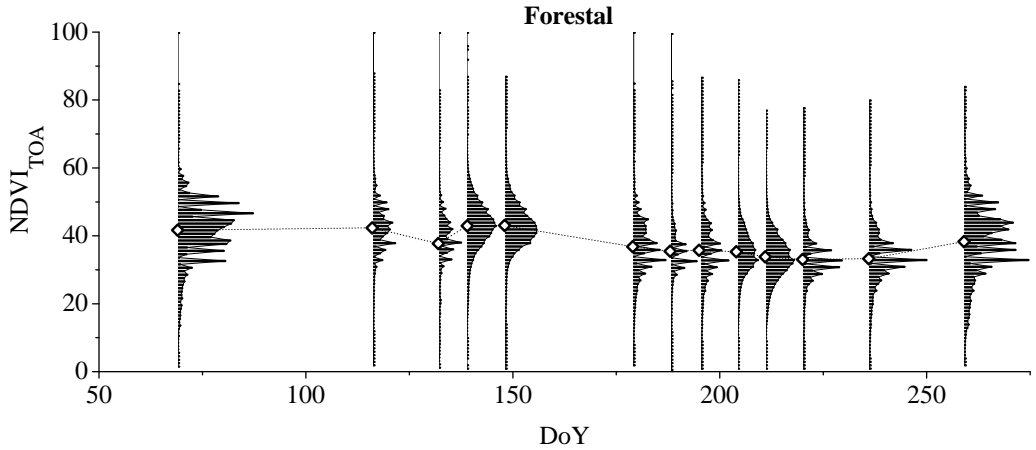


Figura VI.13: Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de forestal.

VI.5. Aplicación de la metodología $K_c^* \cdot ET_o$ a la zona del acuífero.

La determinación de las curvas del coeficiente de cubierta promedio K_c^* a partir de la evolución del $NDVI_{TOA}$ promedio para cada clase y cada día, y su producto espacial con el mapa de ET_o diario para toda la zona considerada nos va a permitir estimar el valor en esa fecha de ET_c^* , esto es el ritmo máximo de evapotranspiración que podría tener la cubierta en el momento y condiciones dadas, lo que sucedería realmente si dicha cubierta tuviera un óptimo suministro de agua y nutrientes, que garanticen en ese instante un óptimo desarrollo. En caso contrario la ET real sería inferior. Dado que se utiliza el valor promedio $NDVI_{TOA}$ para todos los píxel de la clase, el valor de la ET_c^* sería también un valor techo promedio equivalente.

Así pues el producto $K_c^* \cdot ET_o$ para cada día permitirá obtener la evolución a lo largo del tiempo de los valores de ET_c^* . Para las superficies regadas y, razonablemente, en condiciones óptimas de manejo dicho valor coincidirá con el valor de la ET_c en la fecha correspondiente, y por tanto será un buen estimador de las necesidades hídricas brutas de dichas cubiertas. Para las superficies no regadas, y por tanto fuera de las condiciones óptimas de suministro de agua, lo que suele ocurrir frecuentemente en las zonas de clima semi-árido como la que nos ocupa, el valor ET_c^* será un estimador del techo para la evapotranspiración de dicha cubierta; su evolución temporal podría representar la envolvente de la evapotranspiración para la cubierta que consideremos. En aquellas fechas en que dicha cubierta estuviera en condiciones óptimas de suministro de agua, la ET real promedio de la cubierta coincidiría con el valor ET_c^* .

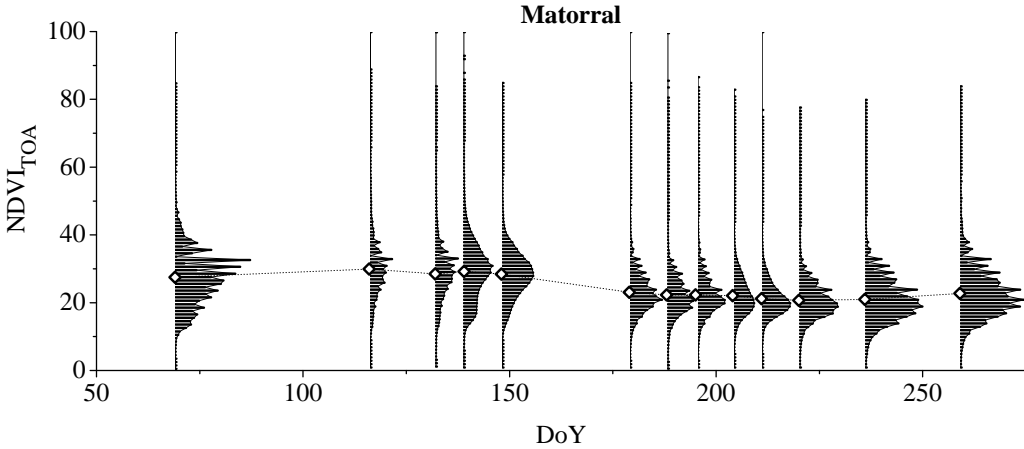


Figura VI.14: Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de matorral.

VI.5.1. Relación $NDVI_{TOA}$ con K_c^* .

Así pues el objetivo es derivar de la evolución temporal de $NDVI_{TOA}$ el valor correspondiente del coeficiente de cubierta K_c^* . En el capítulo V se ha obtenido una relación entre $NDVI$ derivado de espectros de reflectividad obtenidos mediante radiometría de campo, ajustados a los anchos de banda y respuesta de los sensores TM y ETM+, (ec. V.2). A partir de dicha ecuación, y dado que es una relación lineal, podemos reescalar la relación a los valores $NDVI_{TOA}$.

Para ello consideramos que el valor del $NDVI_{TOA}$ máximo es $NDVI_{TOA\ mx} = 0,85$ para una cubierta vegetal óptima en el máximo punto de desarrollo y que el valor correspondiente máximo $NDVI$ mediante radiometría de campo de esa cubierta es $NDVI_{mx} = 0,91$. Para el suelo desnudo, los valores correspondientes serán $NDVI_{TOA\ suelo} = 0,14$ y $NDVI_{suelo} = 0,15$. Este reescalado lineal conduce a la relación

$$K_c^* = 1,69 \cdot NDVI_{TOA} - 0,04 \quad (VI.1)$$

Los valores máximos se han obtenido midiendo sobre superficies de alfalfa en el máximo desarrollo en campañas de radiometría de campo (González-Piqueras, 2006).

Para el caso de la clase alfalfa, dada la dispersión que presenta la curva de evolución correspondiente, debida a los distintos ritmos de corte de las diferentes parcelas se ha elegido una parcela representativa que ha sido seguida mediante radiometría de campo en una campaña posterior, con una mayor frecuencia temporal que la obtenida mediante el uso de la secuencia temporal de imágenes de satélite.

Utilizando los datos obtenidos en la tabla VI.2 y aplicando las relaciones propuestas en la ecuación VI.1, se ha obtenido la curva temporal de K_c^* para cada clase

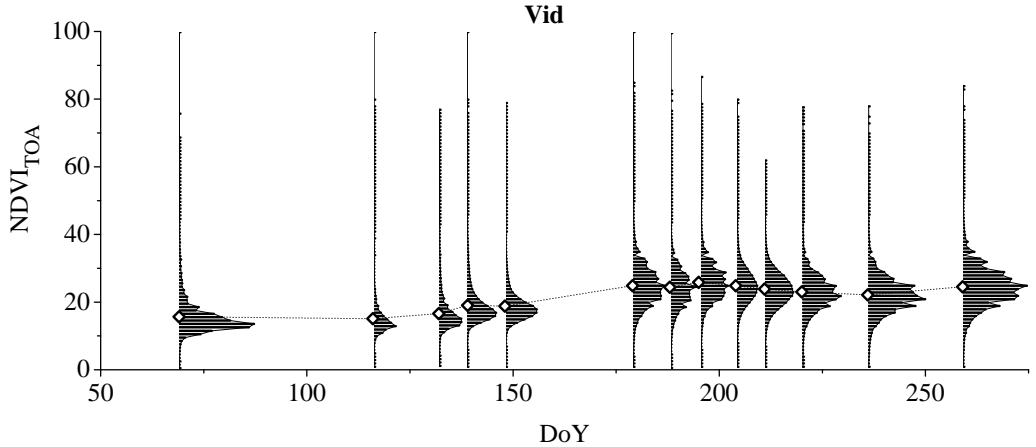


Figura VI.15: Evolución de los valores de $NDVI_{TOA}$ a partir de los histogramas de la imagen en horizontal para la clase de vid.

Cuadro VI.2: Día del año en que se inicia el cambio de fase en cada clase de cultivo obtenido como información auxiliar desde la campaña de campo extensiva. La ausencia de dato indica que la curva se reproduce directamente desde satélite.

Clase	Fase Crec.	Cubierta Efec. Completa	Senescencia	Fin Riego
Reg. Verano	145	180		245
Reg. Primavera	61	92	147	160
Alfalfa				
Doble Cosecha	61	92		284
Barbecho				
Forestal				
Secano		92		160 (cosecha)

propuesta dentro del acuífero. Esta curva de K_c^* así obtenida está adaptada a las condiciones climáticas, de suelo y de cultivo de la zona. En las figuras VI.16 y VI.17 se han representado las curvas obtenidas por este método para todas las clases.

Durante el año 2003, el regadío de verano ha estado bien determinado temporalmente con las imágenes disponibles, pues el inicio del crecimiento con una resolución temporal de 7 días se encuentra bien localizado así como el día en que alcanza el punto de *EFC*. Para el regadío de primavera, es complicado localizar el punto de inicio de crecimiento mediante imagen de satélite pues durante el mes de Marzo-Abril, la probabilidad de cobertura nubosa es alta y no existe una fácil disponibilidad de

imágenes. Así, con ayuda de la campaña extensiva se ha determinado el día de inicio de crecimiento en DoY=61, así como la localización del máximo de f_c en el DoY=92. Para definir la curva de K_c^* en la clase alfalfa, se ha utilizado una parcela de seguimiento del ITAP (en la población de «La Felipa») que a nivel de campo se ha estudiado radiométricamente durante el año 2004. Además para el año 2004 se dispone medidas de reflectividad y de NDVI para la mayor parte de su ciclo de crecimiento tal y como se expuso en el apartado VI.4.3. El seguimiento de esta cubierta se ha hecho siguiendo los mismo protocolos expuestos en las campañas experimentales expuestas en capítulos anteriores y su curva de K_c^* se ha hecho aplicando la relación V.2 obtenida en campo. En la figura VI.16 donde se representan los valores de NDVI y K_c^* , se observa la curva de cultivo obtenida para la alfalfa. La etapa de crecimiento se desarrolla durante 12 días, siendo de 20 días la etapa de EFC.

En la figura VI.16 está representada la curva de K_c^* para la clase doble cosecha, en su etapa inicial difiere ligeramente del regadío de primavera por presentar este último un ciclo en primavera un poco más largo. Se aprecia la doble estructura de crecimiento en coincidencia con los cultivos de primavera y verano.

En las clases barbecho (fig. VI.16), forestal (fig. VI.16), matorral (fig. VI.17), y otros (fig. VI.17), al ser de secano se observa que durante verano los valores de K_c^* experimentan un suave descenso respecto a los valores de primavera y otoño.

La clase secano, alcanza el máximo de EFC en DoY=92, iniciando la etapa de maduración y senescencia en DoY=142.

La clase vid (que incluye algunas superficies de girasol), mantiene valores de K_c^* correspondientes a suelo desnudo prácticamente hasta el día DoY=125, en el que se inicia el desarrollo de la planta manteniendo el máximo del coeficiente de cultivo por debajo de 0,4 hasta el día 260 con la finalización de la recolección (vendimia) e inicio del otoño (pérdida de hojas).

VI.5.2. Cálculo de la Evapotranspiración máxima de cubierta, ET_c^* , para cada clase

El producto $K_c^* \cdot ET_o$ para cada día permitirá obtener la evolución a lo largo del tiempo de los valores de la evapotranspiración máxima de cubierta, ET_c^* . La sección anterior describe la obtención del parámetro coeficiente de cubierta K_c^* . Para el valor de la evapotranspiración de referencia, ET_o , se ha elegido el obtenido desde los parámetros meteorológicos medidos por la estación meteorológica Anchor Station descrita en el Capítulo IV. Este valor se suele utilizar como referencia para prácticamente toda el área del acuífero dado que en su conjunto es una gran planicie, con características climáticas muy semejantes. La ET_o acumulada a lo largo de todo el año 2003 es de 1440 mm.

Operando de la manera descrita se ha obtenido el mapa de ET_c^* en diferentes intervalos temporales: diario, semanal, mensual y anual. En la figura VI.18 aparece el mapa de ET_c^* acumulada anual (mm/año) para todo el ámbito del acuífero aplicando

K_c^* a partir de NDVI

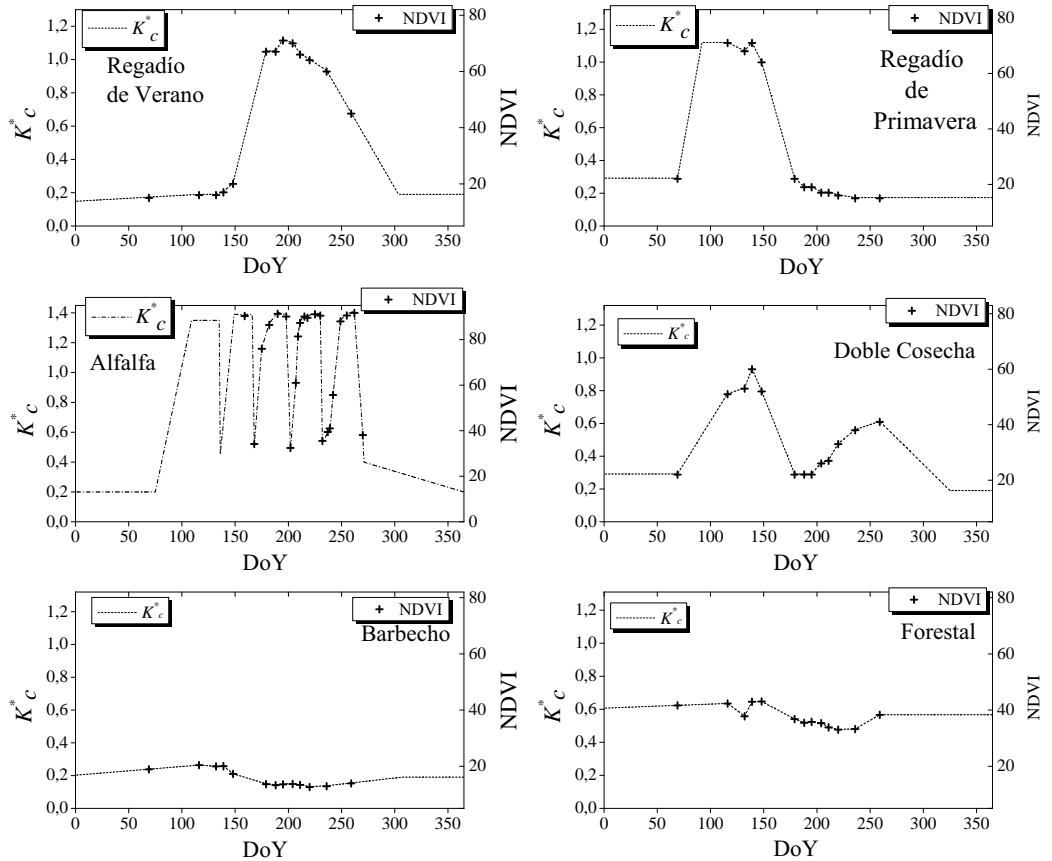


Figura VI.16: Curvas de K_c^* obtenidas a partir del $NDVI_{TOA}$ para las clases regadío de verano, regadío de primavera, alfalfa, doble cosecha, barbecho y forestal.

cada curva de cultivo por clases. Los mismos valores de cada clase integrados anualmente están indicados en la tabla VI.3. En tonos hacia el amarillo destacan el regadío de verano con una evapotranspiración máxima del cultivo anual de 880 mm, en verde claro se sitúa el regadío de primavera con una ET_c^* de 680 mm en valor promedio. Destaca en tono rosado el cultivo de alfalfa con un valor de evapotranspiración máxima del cultivo por encima de 1300 mm/año. Este último valor resulta elevado al comparar con las cifras introducidas por otros autores que en términos generales las sitúan por debajo de los 1200 mm/año. Esto se entiende al revisar la curva de K_c^* obtenida para la clase alfalfa, como se ha visto antes se ha utilizado una única parcela representativa para reproducir el ciclo de desarrollo de esta clase a nivel de campo.

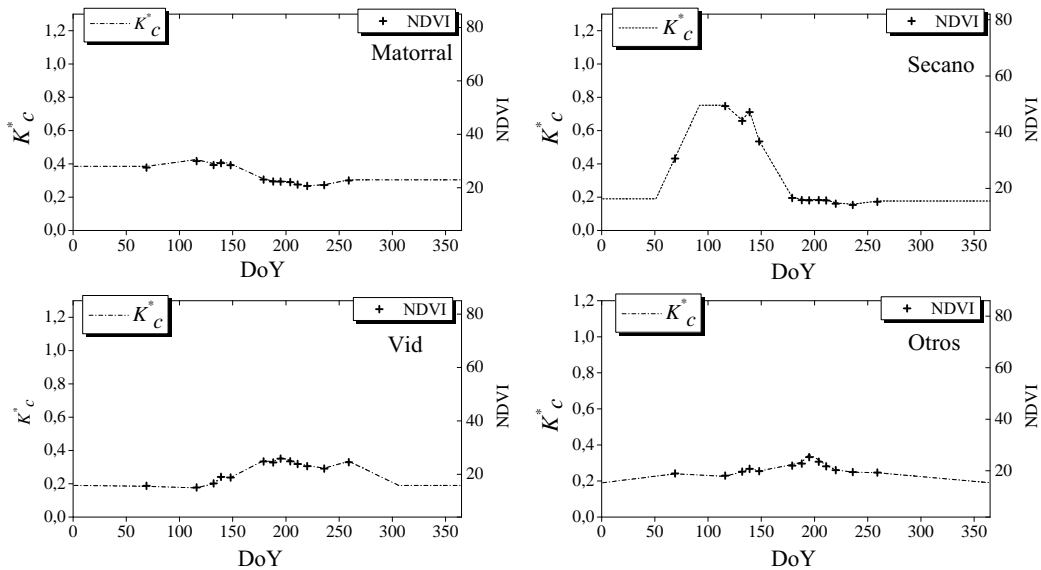


Figura VI.17: Curvas de K_c^* obtenidas a partir del $NDVI_{TOA}$ para las clases matorral, seco, vid y otros.

Los valores más bajos en la ET_c^* acumulada anual (265 mm/año) corresponden a la clase barbecho que la mayor parte del año corresponde a suelo desnudo. La clase forestal, con valores anuales de evapotranspiración máxima de 800 mm/año, ofrece valores análogos al cultivo de regadío. Es evidente, como se comprobará más adelante, que esta cubierta no evapotranspira a su ritmo máximo durante la mayor parte del ciclo, pues el aporte hídrico únicamente es debido a la pluviometría y no abastece esa demanda. El valor real de ET quedará muy por debajo del techo máximo debido a que estas cubiertas (principalmente pino y encina) están adaptadas a las condiciones de estrés hídrico mediante el desarrollo radicular y el cierre estomático lo que supone un aumento en la resistencia de la hoja a la transpiración.

Cuadro VI.3: Evapotranspiración máxima de cubierta (ET_c^*) acumulada durante el año 2003 para cada clase de cultivo.

Clase	ET_c^* (mm/año)	Clase	ET_c^* (mm/año)	Clase	ET_c^* (mm/año)
R. Verano	880	Doble Cosecha	700	Secano	460
R. Primavera	640	Barbecho	265	Matorral	480
Alfalfa	1380	Forestal	810	Vid	390

ET^{*}c acumulada (mm/año) en el ámbito del acuífero para el año 2003
Cumulative ET^{*}c (mm/year) in the aquifer 08.29 during year 2003

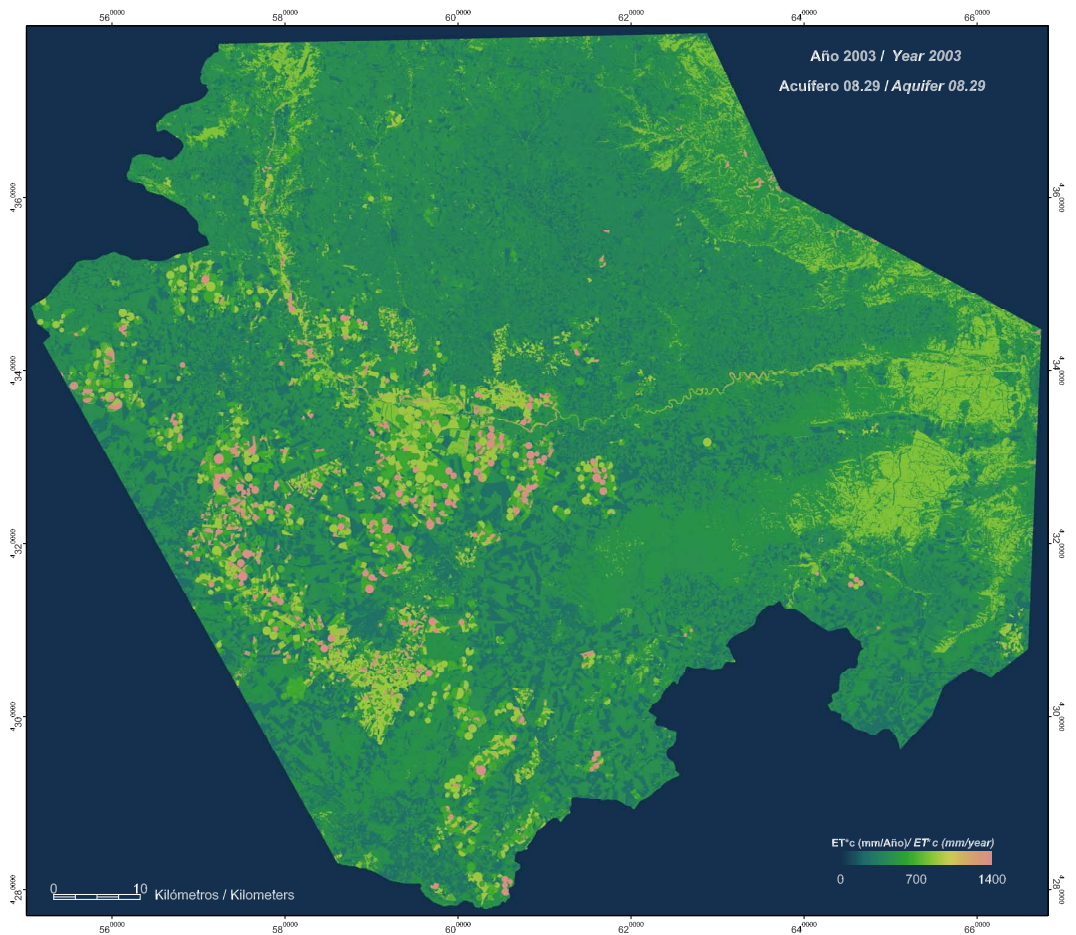


Figura VI.18: ET_c^* acumulada (mm/año) para cada clase el año 2003 en el ámbito del acuífero Mancha Oriental.

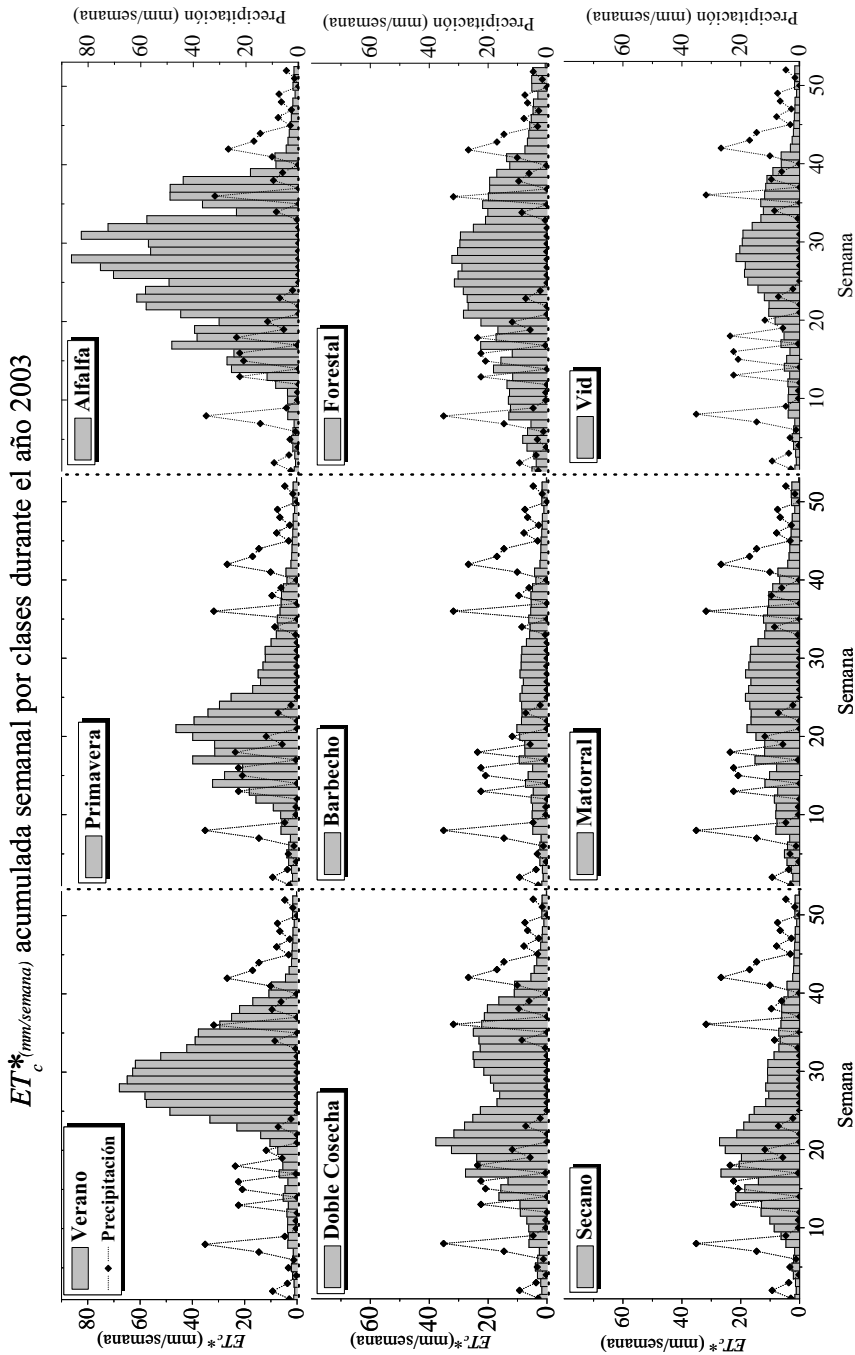


Figura VI.19: ET_c^* acumulada (mm/sem) semanal para cada clase el año 2003 en el ámbito del acuífero Mancha Oriental junto a los valores de pluviometría de la estación principal en Los Llanos.

ET_c^* (mm/mes) acumulada mensual por clases durante el año 2003

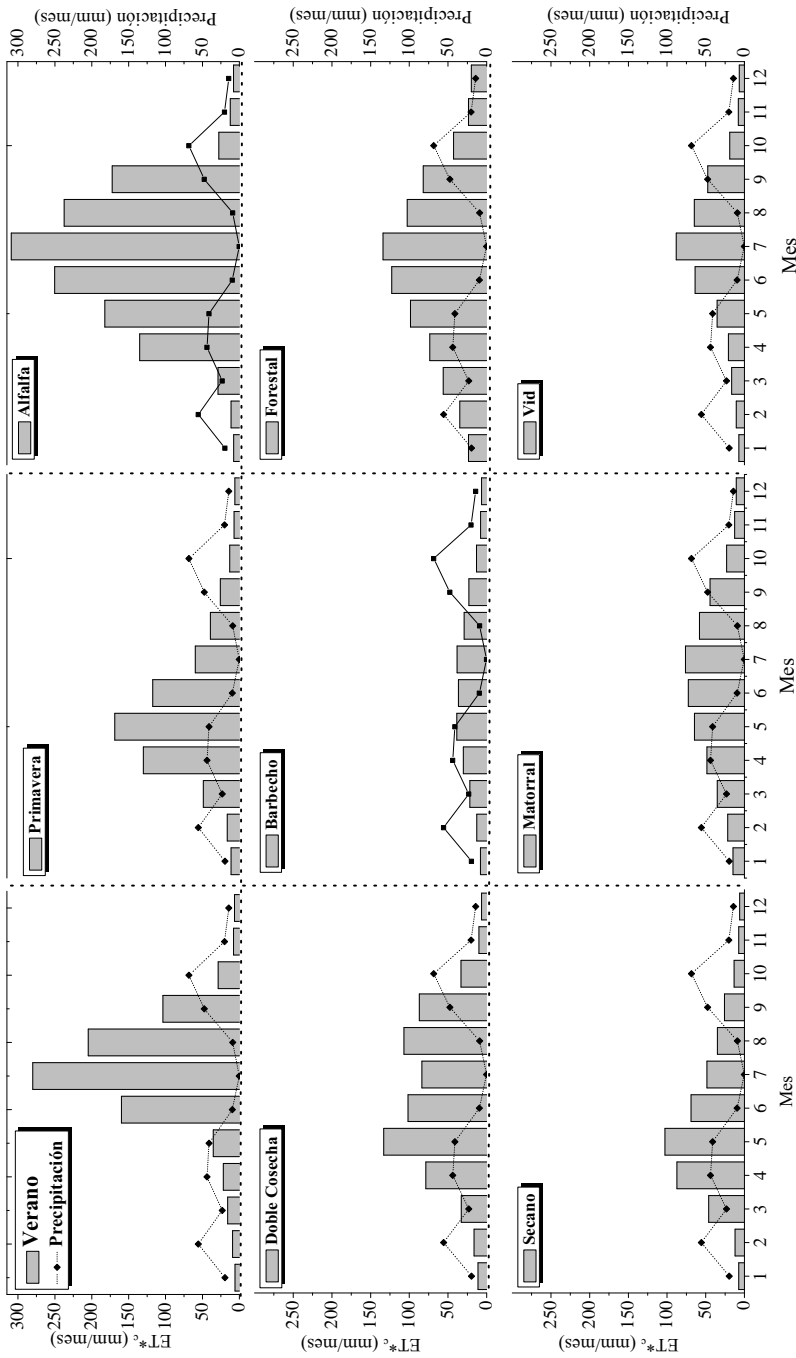


Figura VI.20: ET_c^* acumulada (mm/mes) mensual para el año 2003 en el ámbito del acuífero Mancha Oriental junto a los valores de pluviometría de la estación principal en *Los Llanos*.

VI.5.3. Balance entre precipitaciones y evapotranspiración máxima de cubierta.

El concepto de evapotranspiración máxima de cubierta calculado anteriormente acopla vegetación y atmósfera ya que uno por un lado la demanda evaporativa de la atmósfera, esto es la evapotranspiración de referencia, con la caracterización de la vegetación a través del coeficiente de cubierta. Es de interés establecer el balance entre el valor de la evapotranspiración máxima de cubierta, ET_c^* , y el de la precipitación, P . En primera aproximación podremos considerar el concepto de Déficit Hídrico, DH , de una cubierta para un período temporal determinado como la diferencia entre ambos conceptos en la forma:

$$DH = ET_c^* - P \quad (VI.2)$$

Donde DH es el déficit hídrico y P es la precipitación. Así, se plantea en esta sección realizar dicho balance para el año 2003 a la escala del acuífero, esto es a escala regional dado el tamaño, como un primer ejercicio de aproximación que necesariamente requerirá su extensión a varios años para que sus resultados alcancen pleno significado.

El mapa de precipitación ha sido elaborado a través de los datos de las red de estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología durante el año 2003 (Rubio, 2006; Instituto Nacional de Meteorología, 2004). Los valores medios mensuales vienen recogidos en la tabla VI.4, siendo el valor medio anual de las precipitaciones del año 2003 de 350 mm.

Para el caso de superficies regadas, el objetivo es mantener la cubierta en condiciones tales que su ET real sea la correspondiente al crecimiento óptimo, esto es ET_c^* , que en este caso coincidiría con el concepto de ET_c . Así pues, la cantidad de agua aplicada como riego, al menos ha de ser igual al valor del Déficit Hídrico con el objetivo de mantener la humedad del suelo en la zona de raíces en niveles que no provoquen estrés hídrico en la vegetación (Allen et al,1998).

En la figura VI.21 se han representado el déficit hídrico en un balance anual dentro del acuífero. Dicho balance permite cuantificar el nivel del déficit hídrico por clase y distribuidas dentro del acuífero. El valor negativo indica que la precipitación cubre la evapotranspiración máxima, en caso contrario (valor positivo) en el global del año el cultivo sufre un déficit en el suministro hídrico de la cubierta. El tercio occidental del acuífero registra anualmente mayor precipitación, con máximos en torno a 650 mm/año en la parte noroccidental, que el resto del acuífero por lo que se aprecia una tonalidad más oscura indicando un menor déficit hídrico en general para todas las clases. Los máximos de necesidad están marcados por los cultivos de regadío, especialmente alfalfa, que destacan en tonalidad rosa marcando valores entre 900 y 1000 mm por año, en consonancia con los consumos marcados por este cultivo en esta zona. Destaca la masa forestal, ubicada principalmente en la zona oriental del acuífero,

Cuadro VI.4: Valores de precipitación mensual medios en el año 2003 y los valores medios en el intervalo 1945-2002 en la estación de *Los Llanos* del INM (Instituto Nacional de Meteorología, 2004; de León-Llamazares, 1988; Dirección General de Obras Hidráulicas, 1988).

Mes	Año 2003	1945-2002	Mes	Año 2003	1945-2002
Enero	20	25	Julio	0	9
Febrero	56	27	Agosto	9	14
Marzo	23	29	Septiembre	47	30
Abril	44	46	Octubre	68	42
Mayo	41	47	Noviembre	20	35
Junio	10	40	Diciembre	14	33

en la zona de confluencia entre los ríos Júcar y Cabriel, con necesidades respecto a su valor máximo en torno a 400 mm por año por encima de las precipitaciones en la zona. Los valores negativos de DH en suelo desnudo presentan valores que van desde -100 hasta -200 mm/año, valores que se pueden considerar de recarga al acuífero, aunque para obtener este dato con precisión es necesario establecer un modelo de gestión del acuífero más complejo, incluyendo retención de humedad de suelo, escorrentía, . . . previsto en futuras acciones dentro de modelos más complejos como MORE (Calera and Rubio, 2006).

Es igualmente interesante observar como este déficit hídrico se manifiestan a lo largo del ciclo de desarrollo de la cubierta. Ambas escalas temporales de trabajo, semanal y mensual permiten estudiar este balance. Por ello, en las figuras VI.19 y VI.20 está representada la evolución de la ET_c^* de cada clase frente a la precipitación en la estación de *Los Llanos* por ser considerada principal y de referencia en la zona (Dirección General de Obras Hidráulicas, 1988). Las precipitaciones se concentran en la primavera (semana 10-25) y en el otoño (semana 35-45). Cultivos como los regadíos de primavera tienen una demanda menor que los cultivos de verano debido a que su ET_c^* es menor pero además coincide con el periodo de más lluvias quedando cubiertas sus necesidades en mayor medida. En el cultivo de alfalfa, aunque se puede apreciar la oscilación con el corte en la ET_c^* , es menos apreciable que en la K_c^* debido al incremento de la demanda evaporativa atmosférica en verano. Las clases de secano, como la vid, matorral y forestal presenta un déficit hídrico mayor al estar su ritmo

de evapotranspiración concentrado en el verano. Los cultivos como el secano, en su mayoría cereal, tienen cubiertas sus necesidades hídricas durante la etapa de crecimiento y desarrollo hasta la maduración, éstas se centran principalmente en la última etapa de crecimiento del cultivo. El efecto del promedio en los valores de evaporación al calcular el K_c^* se aprecia en la clase de barbecho, durante la época de verano, en ausencia de precipitaciones (figura VI.19).

VI.6. Conclusiones

La relación obtenida en el capítulo V para obtener el coeficiente de cultivo desde el índice de vegetación con valores medidos en un lisímetro de pesada continua, se ha llevado a escala de satélite. Se ha hecho mediante un reescalado de los valores de $NDVI$ derivado de radiometría de campo a $NDVI$ en el techo de la atmósfera, $NDVI_{TOA}$ comparando los valores de ambos correspondientes al suelo desnudo y a una cubierta de alta cobertura vegetal verde. Operando de esta manera se obtiene la ecuación VI.1:

$$K_c^* = 1,69 \cdot NDVI_{TOA} - 0,04$$

De esta forma, utilizando una secuencia temporal de 14 imágenes de satélite distribuidas temporalmente a lo largo de la estación de crecimiento del año 2003, se ha obtenido el coeficiente de cubierta K_c^* para las clases señaladas en el mapa de usos de suelo del acuífero Mancha Oriental, de cerca de 8000 km² de extensión.

La determinación de las curvas del coeficiente de cubierta promedio K_c^* a partir de la evolución del $NDVI_{TOA}$ promedio para cada clase y cada día, y su producto espacial con el mapa de ET_o diario para toda la zona considerada nos va a permitir estimar el valor en esa fecha de ET_c^* , esto es el ritmo máximo de evapotranspiración que podría tener la cubierta en el momento y condiciones dadas, lo que sucedería realmente si dicha cubierta tuviera un óptimo suministro de agua y nutrientes, que garanticen en ese instante un óptimo desarrollo.

El concepto de evapotranspiración máxima de cubierta acopla vegetación y atmósfera ya que une por un lado la demanda evaporativa de la atmósfera, esto es la evapotranspiración de referencia, con la caracterización de la vegetación a través del coeficiente de cubierta, K_c^* . Representa el techo de lo que podría evapotranspirar una cubierta en ese momento con un determinado estado de vegetación y bajo unas condiciones climáticas dadas, si dicha cubierta tuviera en ese momento un adecuado suministro de agua.

Las necesidades hídricas en las cubiertas naturales presentan valores por encima de la pluviometría, lo que correspondería a la adaptación de estas cubiertas a situaciones de estrés hídrico por mecanismos de desarrollo radical y accesibilidad de agua a capas más profundas del suelo (recursos plurianuales) y por mecanismos de cierre estomático no estudiados en la relación K_c^* -IV.

Los resultados obtenidos en este capítulo no pretenden ser concluyentes, pues como se citó en la introducción es un primer ejercicio de aproximación a la metodología $K_c^* - IV$ y para obtener resultados concluyentes es necesario hacer un estudio extendido a un intervalo temporal que cubra más años. Asimismo, en las cubiertas fuera de las condiciones óptimas, donde la evapotranspiración real se aleja de la evapotranspiración máxima se hace necesario el diseño de experiencias para cuantificar con más precisión estas diferencias.

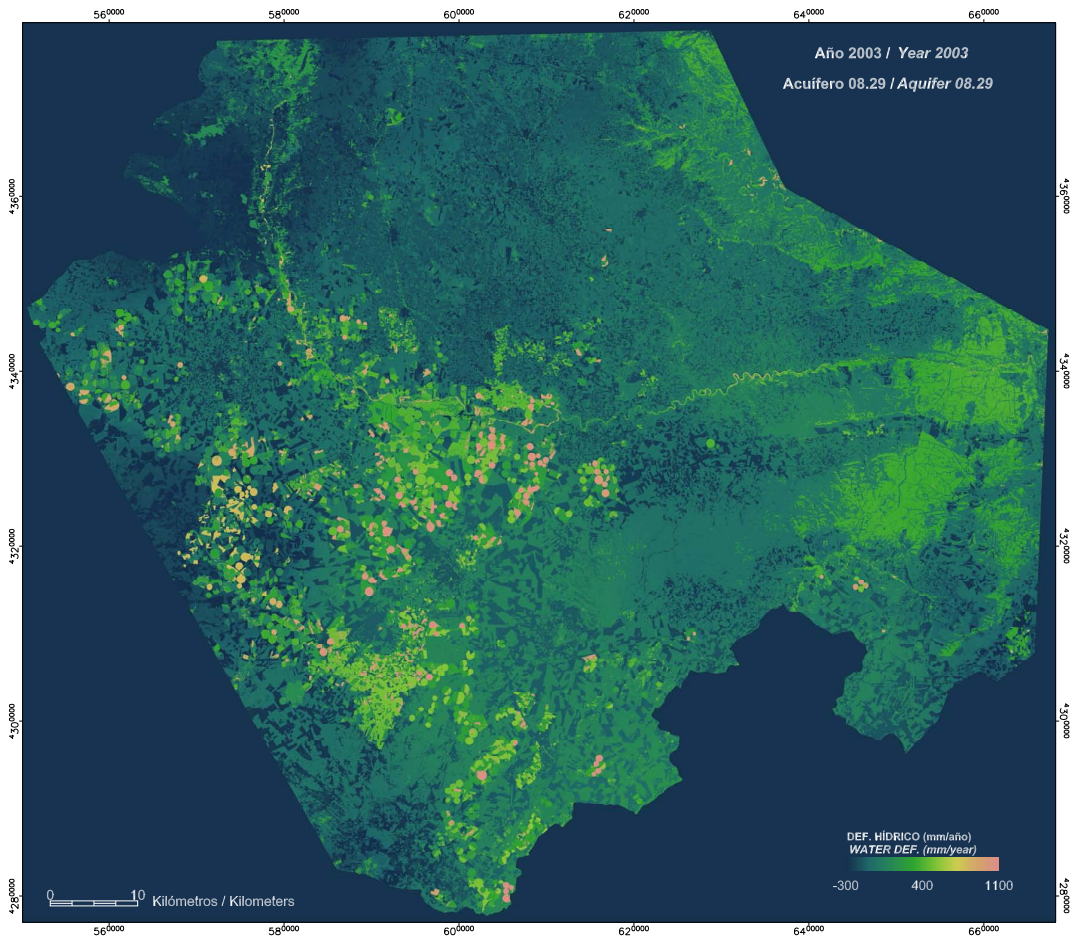


Figura VI.21: Balance entre ET_c^* y precipitación a lo largo del año 2003 dentro del acuífero 08.29.

CAPÍTULO VII

Conclusiones y Perspectivas

Conclusiones

La metodología conocida como « $K_c \cdot ET_o$ », o metodología de cálculo de la evapotranspiración «en dos pasos» es la más utilizada desde el punto de vista operativo, en el seguimiento de cultivos para la estimación de sus necesidades hídricas (Allen *et al.*, 1998). Ésta radica en un coeficiente de cultivo K_c que depende principalmente de las características de la cubierta vegetal y de la evapotranspiración de referencia ET_o que recoge la demanda evaporativa de la atmósfera. Este método destaca por su carácter operacional al ofrecer resultados comparables a modelos más sofisticados basados en el balance de energía en superficie. Una de las vías para la estimación de este coeficiente han sido los índices de vegetación, que suponen un método no destructivo para la estimación en tiempo real de las necesidades hídricas de los cultivos. En esta línea se plantea el objetivo general del trabajo que es *analizar y desarrollar la metodología que permite obtener el coeficiente de cultivo de una cubierta desde su respuesta espectral utilizando índices de vegetación y estimar así la evapotranspiración*. Existen modelos propuestos por varios autores y publicados durante los años noventa. Entre ellos existen diferencias al no coincidir en el cultivo de trabajo, en zonas climáticamente diferentes y sobre superficies de referencia a su vez distintas. Intentar aplicar estos modelos en condiciones diferentes a las obtenidas, puede llevar a incoherencias al cambiar tanto la superficie de referencia (unos a gramíneas y otros a alfalfa), como la naturaleza de los propios datos (medidas sobre cubiertas diferentes, datos simulados, ...).

Con objeto de establecer el marco de trabajo y caracterizar la zona de estudio se han propuesto los capítulos I y II.

Los fundamentos teóricos de la relación $K_c^* - IV$ se establecen en el capítulo III y se justifica la linealidad entre el coeficiente de cultivo basal K_{cb}^* y los IV más utilizados teniendo en cuenta la variabilidad introducida por la arquitectura de la cubierta. Esta dependencia se estudia a partir de las relaciones entre los índices de vegetación por un lado con los ritmos biofísicos como la transpiración y biomasa, y por otro lado con variables biofísicas de estado como la fracción de cobertura y el índice de área foliar.

La relación entre los IV y el K_{cb}^* muestra la relación de estos índices de vegetación con indicadores de los ritmos biofísicos en la cubierta como es la evapotranspiración, en relación a su vez con el ritmo de producción de biomasa. Haciendo uso de las funciones de producción que relacionan la biomasa con la evapotranspiración acumulada y de los modelos de eficiencia que relacionan los ritmos de crecimiento y ritmos de absorción de radiación se demuestra la coherencia en la relación lineal K_{cb}^* e IV .

Los caminos empleados en la fundamentación teórica de la relación entre transpiración a través del coeficiente K_{cb}^* e IV nos permiten dar luz a la dependencia de la pendiente y ordenada con factores determinantes principalmente como el tipo de cubierta (referidos a la arquitectura de cubierta y la eficiencia en la conversión de radiación a materia), y de forma menor de suelo y climáticos. Aunque a priori una cubierta similar ofrecerá una relación comparable $K_{cb}^* - IV$, es recomendable hacer un estudio experimental para obtener una relación en la zona de estudio y estudiar las obtenidas por otros autores en otras zonas. Como se ha estudiado en los capítulos IV y V la relación $K_{cb}^* - IV$ se ha demostrado consistente con la obtenida por otros autores sobre cultivos de arquitectura similar y obtenidas en otras zonas [Objetivo OP 2].

La evaporación de suelo desnudo hace que la relación entre evapotranspiración a través del coeficiente K_c^* con el IV muestre una dispersión mayor, especialmente en la etapa de nacimiento cuando la fracción de cobertura es más baja, dado que los IV no recogen significativamente los cambios en suelo desnudo. Con este planteamiento teórico es conveniente obtener una relación empírica sobre datos experimentales de cubiertas vegetales que sean representativas de los cultivos en la zona de estudio. Las cubiertas seleccionadas han sido maíz durante el año 2001 y trigo durante el año 2003, cultivados en una estación lisimétrica donde la evapotranspiración es medida junto a otros parámetros biofísicos como fenología, fracción de cobertura vegetal verde, LAI, altura del cultivo y biomasa para caracterizar la curva de evolución de ambos [Objetivo OP 1]. El método de medida de ET seleccionado ha sido el lisímetro de pesada continua, como método de medida directa, siendo especialmente destacable las exigencias de su mantenimiento para un perfecto funcionamiento. Las variables meteorológicas utilizadas han sido obtenidas de dos estaciones agrometeorológicas anexas a la estación lisimétrica con las que se ha calculado la ET_0 .

Los datos de evapotranspiración de referencia presentan un comportamiento similar a lo largo del año en ambas campañas, tanto para el año 2001 como 2003, siendo máximo durante los meses de Julio y Agosto y mínima durante los meses de invierno.

Para el cálculo de la ET_o , se han usado tres métodos: dos métodos de estimación a partir de datos meteorológicos, el método de FAO56 para datos promedios diarios, y el recomendado por ASCE a partir de datos horarios aplicados a la estación *Anchor Station*, y la evapotranspiración obtenida directamente del lisímetro de referencia. La reproducción de los parámetros meteorológicos por dos estaciones resulta una garantía de calibración entre ambas, y de suplencia mutua en caso de fallo, siguiendo por tanto las recomendaciones de los autores más reconocidos en la bibliografía (Allen *et al.*, 2006). Bajo esta misma recomendación se ha seguido el protocolo de calidad de datos para todas las variables medidas en especial para las radiaciones, humedad, temperatura y velocidad del viento, reforzando la fiabilidad de los sensores. La aplicación de la metodología Penman-Monteith en el cálculo de la ET_o tanto a escala horaria como diaria, ofrece resultados similares durante ambas campañas.

El seguimiento radiométrico de ambas cubiertas ha permitido a través de un método no destructivo determinar su evolución temporal, observando una signatura contrastada entre los máximos de cobertura, el suelo y la cubierta al final de su madurez. En la madurez se ha observado una diferencia espectral entre ambas cubiertas, debido principalmente a su arquitectura, de mayor altura y con un suelo de fondo más húmedo y más sombreado el maíz ofrece un albedo menor que el trigo.

La metodología usada para obtener la fracción de cobertura vegetal verde (f_c) por medio de la clasificación de fotografía digital, combinada con la fenología permite caracterizar la evolución temporal de la cubierta. Por otro lado, al ser una metodología no destructiva puede ser utilizada, simultáneamente al resto, para estimar la f_c dentro y fuera del lisímetro con objeto de tener conocimiento de la representatividad de ésta respecto a la parcela de protección.

La cubierta dentro del lisímetro ofrece un desarrollo menor, con un retraso en el caso de maíz en torno a 5 días y en caso de trigo casi inapreciable con respecto al exterior. En el lisímetro se dan los efectos combinados de oasis y humedad de suelo. El primero tiene lugar cuando la parcela de protección, donde se ubica el lisímetro, está rodeada por zonas más áridas o no vegetadas. En estas zonas, la energía aportada por radiación que no es invertida en el proceso de evaporación debido a la ausencia de agua en suelo se convierte en calor sensible que puede penetrar por efecto de advección a la parcela de protección y, por tanto, en el lisímetro. Este efecto es más acusado en los meses de Julio y Agosto, y por ello es más apreciable en cultivos de verano como maíz que en cultivos de primavera como trigo. Evitar el efecto advectivo local hubiera requerido un tamaño mayor de parcela. La relaciones que recomiendan algunos autores nos llevan a un tamaño de parcela que puede ser superior a 1 ha, ubicando el lisímetro en el centro de la misma.

La medida de LAI por tres métodos diferentes en caso de maíz, ha hecho concluir que el método no destructivo del LICOR-LAI-2000 ofrece valores comparables al método destructivo (más fiable) en la etapa de crecimiento y cubierta efectiva completa, pero sobreestima el LAI en la etapa de maduración debido a la presencia de

hoja senescente o seca. En ambos cultivos el LAI crece de forma continua durante las etapas de crecimiento y cubierta efectiva completa donde el valor de LAI está en torno a 3-3,5 en ambas cubiertas. El máximo de LAI se alcanza durante la etapa de reproducción, los valores de LAI máximo son de 5,5 para maíz y de 4,5 para trigo [Objetivo OP 1].

La biomasa seca presenta un incremento exponencial durante la etapa de crecimiento siendo lineal durante la etapa de cubierta efectiva completa, llegando a un valor asintótico en torno a $2000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ durante la maduración. El trigo presenta un comportamiento similar aunque la estructura de la cubierta no permite distinguir el *plateau* continuando el crecimiento durante el espigado, alcanzando durante la maduración un valor asintótico ligeramente inferior al maíz.

La *ET* para los cultivos en óptimo suministro hídrico y de nutrientes, al principio del desarrollo del cultivo muestra una alta variabilidad debido a la frecuencia del riego y los cambios de fase en la evaporación de suelo por la baja f_c . El valor máximo de *ET* durante la etapa de EFC es de 11 mm/día para maíz, siendo de 10 mm/día en el trigo y tiene lugar durante la etapa del espigado. La evolución del coeficiente de cultivo ofrece un comportamiento similar a la *ET*, al principio una variabilidad como consecuencia en los cambios de la humedad de suelo, aumentando hasta valores máximos de 1,5 en caso de maíz [Objetivo OP 1].

El análisis de los índices de vegetación utilizados muestra que todos ellos son capaces de distinguir la curva de evolución del cultivo distinguiendo sus estados de crecimiento. En la comparación de los valores dentro y fuera del lisímetro muestran una sensibilidad similar a la f_c . La función obtenida en la relación f_c con los IV es la misma para maíz y trigo.

La f_c y el LAI muestran una relación exponencial con un máximo en la fracción de cobertura en 0,91 y un factor de extinción $\theta=0,46$ que es el valor correspondiente a una cubierta erectófila. Este factor de extinción es consistente con la linealidad existente entre el coeficiente de cultivo basal y los IV tal y como se establece en los fundamentos teóricos [Objetivo OP 2].

El razonamiento que relaciona los IV con ritmos biofísicos en la cubierta vegetal como es el ritmo en la producción de biomasa, permite entender la relación entre K_{cb}^* y el índice de vegetación. Para estudiar estas relaciones se usan los modelos de eficiencia o modelos LUE. En estos modelos el índice de vegetación se introduce como un buen estimador de f_{APAR} . La aplicación de estos modelos lleva a relacionar el valor integrado en el tiempo del índice de vegetación con la biomasa obteniendo un buen acuerdo con los datos experimentales para todos los índices estudiados. Esta relación es altamente dependiente de la eficiencia en la conversión de radiación en materia de la cubierta, esto se ha puesto de manifiesto en las diferencias entre maíz y trigo. Estos modelos explican que el índice de vegetación está relacionado con el ritmo de producción de biomasa (CGR) pues ambos experimentan un comportamiento similar [Objetivo OP 3].

El estudio de la linealidad entre coeficiente de cultivo e índices de vegetación extendido a los índices más utilizados muestra diferencias basadas en la definición del propio índice. El NDVI, TSAVI y OSAVI muestran una saturación para valores de K_{cb}^* por encima de 1, otros índices como SAVI, PVI, MSAVI, WdVI y GESAVI no presentan esta saturación. Al invertir el modelo, para describir la curva temporal de K_{cb}^* , el GESAVI es el índice que mejor determina el K_{cb}^* durante el desarrollo de la cubierta, crecimiento, desarrollo, estado reproductivo y senescente [Objetivo OP 2]. Los modelos propuestos por otros autores, obteniendo en K_{cb}^* a partir de NDVI y SAVI, muestran resultados comparables a la ecuación sobre trigo y maíz obtenida en la zona de estudio. Esto justifica el tipo de cubierta como el principal factor de dependencia.

La estimación del K_c^* desde los índices de vegetación está limitado por la insensibilidad de estos a la evaporación de suelo, inherente a la propia definición de los IV. Esto afecta a los valores diarios de K_c^* y es dependiente de la frecuencia de riego y/o lluvia. En el caso de maíz y trigo de regadío en La Mancha, el intervalo entre eventos de riego oscila entre 2 y 7 días. El valor promedio de K_c^* a escala temporal semanal tiene en cuenta esta frecuencia de riego y la variación temporal del IV. Todos los IV estudiados en el trabajo muestran una buena correlación con los valores de K_c^* , destacando sensiblemente el NDVI en la escala temporal semanal. Esta escala de trabajo resuelve el problema de saturación que experimenta este índice para valores de K_c^* por encima de la unidad. La relación lineal obtenida entre el K_c^* y los índices de vegetación está deducida de cultivos herbáceos que cubren suelo en la zona. Hay que señalar que la parcela sobre la que se ha obtenido la relación empírica además de estar en un ambiente semiárido puede estar algunos días bajo efecto de advección. Esto introduce una sobreestimación del K_c^* hasta en un 10 %.

En resumen podríamos decir que *el IV en el estado de EFC representa un estimador del ritmo de crecimiento potencial de la cubierta en la generación de biomasa y del ritmo potencial de evapotranspiración, en función del cultivo y de las condiciones medioambientales; este ritmo de crecimiento potencial es un valor máximo y coincide con el ritmo real de crecimiento cuando la cubierta vegetal está en óptimas condiciones de suministro hídrico y de nutrientes*. Fuera de las condiciones óptimas, por ejemplo, bajo estrés hídrico ambos ritmos biofísicos son menores (Objetivo OP 3). Así, *la ET_c^* determinada a través de los índices de vegetación representa el valor de la evapotranspiración de una cubierta vegetal en el momento de observación y bajo condiciones óptimas de desarrollo, sin limitaciones en el suministro hídrico y de nutrientes*.

La adaptación a escala de satélite de la relación K_c^* -IV obtenida en campo (a escala de parcela) se ha realizado sobre la base de la linealidad, con dos puntos de referencia, el correspondiente a una superficie de cobertura vegetal completa y otro el correspondiente a suelo desnudo. La aplicación a nivel de satélite permite establecer

en valores promedio la ET_c^* de la cubierta vegetal en ese instante, estando dicha cubierta sin limitaciones de agua y nutrientes [Objetivo 3].

Para desarrollar la capacidad que esta metodología tiene en teledetección, como primer ejercicio de uso a escala de satélite se ha optado por aplicar la relación K_c^* -NDVI a la zona del acuífero 08.29 [Objetivo OP 4]. Se ha utilizado el mapa de clasificación de cultivos sobre el conjunto de 14 imágenes disponibles de la serie Landsat durante la primavera-verano del año 2003 junto a datos auxiliares de fenología. Con las curvas de evolución de NDVI de cada clase se han elaborado las curvas de K_c^* y mediante el uso de la ET_o se ha calculado la ET_c^* a escala semanal, mensual y anual extendida a todo el ámbito del acuífero.

Los valores de ET_c^* obtenidos para cada clase están en consonancia con los valores publicados en la bibliografía y concretamente, para los cultivos regados, con las recomendaciones en los cultivos de regadío proporcionadas por el SAR del Instituto Agronómico Provincial de Albacete. En la clase de regadío alfalfa al ser la de mayor consumo hídrico se manifiesta una sobreestimación en torno a un 10 % de las necesidades hídricas debido al efecto de advección introducida en la relación de campo K_c^* -IV.

Las necesidades hídricas en las cubiertas naturales presentan valores por encima de la pluviometría, lo que correspondería a la adaptación de estas cubiertas a situaciones de estrés hídrico por mecanismos de desarrollo radical y accesibilidad de agua a capas más profundas del suelo y por mecanismos de cierre estomático no estudiados en la relación K_c^* -IV. Para una determinada cubierta y bajo unas condiciones atmosféricas determinadas, la evolución en el tiempo del producto $K_c^* \cdot ET_o$ es el techo que puede alcanzar la evapotranspiración. Así, bajo condiciones de escasez de agua, esto es estrés hídrico, y otros limitantes, el valor de la evapotranspiración será inferior al que señala la envolvente determinada por $K_c^* \cdot ET_o$. [Objetivo OP 5].

Perspectivas.

La metodología propuesta permite avanzar en uno de los caminos existentes en la determinación de la evapotranspiración de la cubierta por teledetección, y lejos de cerrar, abre a su vez sugerencias a futuras mejoras en esta dirección. La disponibilidad a nivel de satélite de plataformas de mayor resolución temporal supone un valor añadido para poder describir con mayor precisión la curva de cultivo. Se hace también necesario el diseño de nuevos estudios que permitan cuantificar dependencias específicas de la relación K_c^* -IV con factores climatológicos, de suelo o relativos a la cubierta vegetal para extrapolar a otras zonas de estudio.

En este sentido existen ya algunos trabajos o proyectos donde se concretan estas líneas de trabajo futuro, mostrando por tanto que es una metodología viva y demandada en el momento actual. Las líneas en curso actuales son,

-
- Fruto del trabajo desarrollado en el proyecto DEMETER¹ existe ya en el servicio de asesoramiento de riegos de Albacete una herramienta en fase de implantación basada en las imágenes de teledetección (Jochum *et al.*, 2006; Calera *et al.*, 2005). Este servicio de asesoramiento al regante desde satélite ha estado en fase de pruebas, de forma operativa, durante el año 2005 y basado en la técnica $K_c^* - IV$. Dicho servicio se puede consultar a través del enlace: <http://www.demeter-ec.net>
 - El proyecto MORE (*Modelo Operativo de estimación de recarga y evapotranspiración a escala regional*-código: REN2003-02956) en curso, que incluye el balance de agua en suelo. Este modelo está aplicado a la zona del acuífero 08.29 e implementa el seguimiento de la evapotranspiración desde el índice de vegetación.
 - Experimentos de campo en curso sobre alfalfa y otros cultivos llevados a cabo por el grupo de teledetección, que ayudarán a introducir la dependencia de la relación $K_c - IV$ en otros cultivos de la zona.
 - Mediante la participación en el proyecto PLEIADeS (FP6-2005-GLOBAL-4, *Participatory multi-Level EO-assisted tools for Irrigation water management and Agricultural Decision-Support*), financiado por la comisión europea es un proyecto para el desarrollo técnico y de investigación co-financiado por la Comunidad Europea bajo el programa Desarrollo Sostenible, Cambio Global y Ecosistemas (contrato 037095). El objetivo principal es la mejora en la gestión del uso del agua en zonas de Europa y América latina mediante la incorporación de técnicas de observación de la tierra. Una de las técnicas utilizadas para estimar las necesidades hídricas de los cultivos es la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección.
 - La comparación en la zona de estudio con otros métodos de balance de energía en superficie que determinan la evapotranspiración real como MSSEBS y METRIC. Actualmente existe un trabajo en colaboración con otros grupos de investigación que, entre otros objetivos, mediante su aplicación a la zona del acuífero 08.29 permite avanzar en varios aspectos en la determinación de la ET_c^* a través de la relación $K_c^* - IV$ (Rubio *et al.*, 2006).
 - El proyecto ECOFLUJ, (*Evaluación del balance de carbono y flujos de vapor de agua en sistemas agrícolas y forestales Castilla-La Mancha* - PBC05-013-01) financiado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. El estudio de los flujos de vapor de agua, y por tanto de la evapotranspiración en cubiertas naturales puede ayudar entender cómo afectan los mecanismos de adaptación al estrés hídrico en la determinación del coeficiente de cultivo a través de los índices de vegetación.

¹ Demonstration of Earth observation Technologies in Routine irrigation advisory services (Research and Demonstration project co-funded by the European Community under the Energy, Environment and Sustainable Development Programme, contract EVG1-CT-2002-00078)

Conclusions and Perspectives

Conclusions

The methodology known as « $K_c \cdot ET_o$ », or evapotranspiration estimation in «two steps» is, from an operational point of view, the most frequently applied in crop monitoring to estimate the crop water requirements (Allen *et al.*, 1998). It's based on the crop coefficient K_c which depends mainly on crop characteristics and on the reference evapotranspiration ET_o which represents the atmospheric demand. It is an operational method that provides results comparable to more sophisticated methods based on the surface energy budget over crops under optimal nutrient and water conditions. One way to estimate the crop coefficient is from the vegetation indices (VI), a non-destructive methodology for the crop the estimation of crop water requirements in real time. Following along these lines, the objective of the work is *to analyze and improve the methodology that provides the crop coefficient from the canopy spectral response using the vegetation index to estimate the crop evapotranspiration*. Several models have been published over the last ten years. The differences found between them are due to the crop, the climate, and the reference surface. The application of these models in different areas can lead to inconsistencies due to differences in the reference surface (grass or alfalfa) or the data (different crops, simulations,...).

The framework and the description of the study area have been described in chapters I y II.

The theoretical foundations in the relationship K_c^* -VI are established on chapter III, where the linearity between the basal crop coefficient K_{cb}^* and the most frequently vegetation indices are studied taking into account their dependency on the crop architecture. This study is based on the relationship between the vegetation indices with biophysical rates such as the transpiration and biomass on one hand, and

with biophysical variables such as the fraction cover and the leaf area index on the other hand.

The relationship between the VI and the K_{cb}^* shows that the vegetation indices are indicators of the biophysical rates in the canopy such as the evapotranspiration, which in turn is related to the rate of biomass production. Using the crop yield functions that relates the biomass with the cumulative evapotranspiration and the light use efficiency models that relates the crop growth rate with radiation absorption, the linear relationship between K_{cb}^* and the VI is obtained from biophysical principles.

The two ways used to obtain theoretically the linear relationship between the basal crop coefficient and the VI allow for determination of the coefficients in the relationship as functions principally of the cover type (related with crop architecture and light use efficiency), and to a lesser extent of soil and climate factors. Although, similar canopies should have a comparable K_{cb}^* -VI relationship, it is recommended to carry out an experimental study in order to obtain an empirical relationship in the area of interest and to compare with other authors. This work shows that *the K_{cb}^* -VI obtained in the study area is consistent with the models obtained by other authors for similar crops and in different areas* [Objective 2].

Soil evaporation affects the linear relationship between the K_c^* and the VI and thus introduces more dispersion in the field data. This effect is more important during the initial stage of crop growth when the green cover fraction is lower because of the VI are non-sensitive to the soil water content. Thus, an empirical relationship between the K_c^* and the VI for representative crops must be obtained from experimental data in the study area. Two crops were monitored, maize during the year 2001 and wheat during the year 2003, grown on a weighing lysimeter where the evapotranspiration is directly measured along with other biophysical parameters such as phenology, green cover fraction, LAI, crop height and biomass [Objective 1]. The lysimeter has the advantage of being a method for measuring directly the evapotranspiration, although it is very costly in set-up and maintenance. The meteorological variables used to calculate the ET_o were obtained from two adjacent meteorological stations.

The reference evapotranspiration data exhibit the same behavior during both campaigns, in the years 2001 and 2003, reaching the maximum on July and August and the minimum during winter months. Three methods were used to calculate ET_o : the FAO56 method at daily scale, based on weather data from the stations, the ASCE method using hourly data from the Anchor station and the evapotranspiration measured directly by the reference lysimeter. The simultaneous measurement at two adjacent stations guarantees the quality of the data and the replacement in case of failure, following the recommendations in the bibliography (Allen *et al.*, 2006). This quality protocol was applied to the measured radiation, wind speed, humidity and temperature. The application of the Penman-Monteith equation to estimate ET_o at two time scales, hourly and daily, to estimate ET_o gives similar results in both campaigns.

The radiometric measurements along in both crops allow to describe their temporal evolution by a non-destructive method. During the maturation stage a difference in spectral reflectance between maize and wheat was observed, due mainly to the crop architecture. The maize plants are taller and have lower albedo than wheat, because the soil is wetter and more shadowed.

The methodology used to obtain the green fraction cover (f_c) by means of supervised classification of the digital photography, combined with the phenology allows to characterize the temporal evolution of the crop. Furthermore, as a non-destructive method it can be used, simultaneously to the others to estimate the f_c inside and outside of the lysimeter in order to assess the representativeness of the plot.

The canopy inside the lysimeter develops differently from the surrounding area, with a delay in the crop growth of 5 days in the case of maize, but hardly detectable in the case of wheat. These differences are due mainly to the combination of two effects, the oasis effect and the soil moisture. The oasis effect occurs when the lysimeter is surrounded by dry or non-vegetated areas. In these areas, the incoming radiation non converted into latent heat is converted into sensible heat that penetrates by advection into the protection plot and thus in the lysimeter. This effect is stronger during the summer (in July and August) and is more noticeable in summer irrigated crops like maize than in spring crops such as wheat. This effect can be avoided by increasing the protection area. The recommended area sizes can well be more than 1 ha, depending on crop height.

The LAI measurements were made by three different methods for maize, the non-destructive method using the LICOR-LAI-2000 shows comparable values to the destructive method (more reliable) during the growing and effective full cover stage, but overestimates the LAI during the maturation stage due to the presence of dry leaves. In both crops the LAI increases during the growing and effective full cover stages, where the LAI value is about 3-3,5 in both crops. The maximum value of LAI is reached during the reproductive stage, being 5,5 for maize and 4,5 for wheat [Objective 1].

Dry biomass shows an exponential increase with time during the growing stage and becomes linear during the effective full cover (EFC), reaching an asymptotic value of 2000 g·m⁻² for maize during the maturation. The wheat presents a similar behavior but there, the crop architecture does not allow to distinguish a plateau during the effective full cover. Consequently, the biomass reaches the asymptotic value ending the maturation. This maximum value is lower in wheat than in maize.

The ET , for the crops under optimal conditions, at the beginning of the crop growth shows high variability due to the irrigation frequency and the changes in the evaporation phases because of the low f_c . The maximum value of the ET during the EFC stage is 11 mm/day for maize and 10 mm/day for wheat and it occurs when ears are emerging. The time evolution of the K_c is similar to that of ET_c , showing a

high variability during initial stage, increasing during the growing stage and reaching a maximum of 1.5 in the case of maize [Objective 1].

The analysis of the vegetation indices shows that all of the selected VI are able to monitor the crop evolution and to distinguish the crop growth stages. The VI measured inside and outside of the lysimeter show similar sensitivity to f_c . The linear relationship obtained between f_c and VI is the same for maize and wheat.

The f_c and the LAI show an exponential relationship with a maximum in the green cover fraction of 0.91 and a damping factor $\theta = 0.46$ corresponding to an erectophile cover. This damping factor is consistent with the linearity between the basal crop coefficient and the VI, as was established in the theoretical foundations [Objective OP 3].

The reasoning used to relate the VI with biophysical rates in the crop such as the biomass production, explains the linear relationship between the K_{cb} and the VI. For the study of this relationship the Light Use Efficiency models or LUE models were used. In these models the VI is used as a good estimator of the f_{APAR} . The application of these models relates the integrated value of the vegetation index to the biomass in a good agreement with experimental data for all the indices studied. This relationship depends strongly on the efficiency of the crop in the conversion of radiation into dry matter, as became evident in the differences between maize and wheat [Objetivo 3].

The linearity between the K_{cb}^* and the proposed indices shows differences based on the definition of these indices. The NDVI, TSAVI and OSAVI reach saturation when K_{cb} values are over 1, whereas the other indices SAVI, PVI, MSAVI, WdVI and GESAVI do not show this saturation effect. When inverting the model, in order to describe the temporal evolution of K_{cb}^* , the GESAVI is the index that best fits during all the stages, initial, crop growth, mid-stage, reproductive and senescence [Objective 2]. The models proposed by other authors, who obtain K_{cb}^* from NDVI and SAVI, show results comparable to the equation obtained here for wheat and maize in the study area. Similar crop architecture leads to a comparable K_{cb}^* -VI relationship, showing the crop type as the principal dependence factor.

The estimation of the K_c^* by means of the VI is limited its incapability to detect soil water evaporation which is inherent in the definition of the VI. This affects the daily values of K_c^* and depends on the frequency irrigation and/or rainfall. For maize and wheat in La Mancha, the time interval between irrigation events is 2-7 days. The average value of K_c^* at weekly time scale takes into account this irrigation frequency and the temporal variation of the VI. All the studied VI in this work show a good correlation with the K_c^* values, with NDVI giving the best results at weekly time scale. This time scale smoothes the saturation of NDVI for K_c^* values over 1. This linear relationship between K_c^* and VI has been obtained for crops that cover the soil during the EFC. The plot used to obtain the experimental data is sometimes under advection because of the presence of the dry surrounding area. This can introduce an overestimation in the K_c^* of up to 10 %.

In conclusion the *the VI during the EFC* represents a measure of the potential rate to generate biomass and of the potential rate of evapotranspiration, depending on crop and weather conditions; this potential crop growth rate is a maximum value and coincides with the actual growth rate whenever the crop cover is under optimal water and nutrient supply. Under non-optimal conditions, for example, under water stress the biophysical rates are lower [Objective 3]. Thus, ***the ET_c^* obtained by means of the vegetation indices, represents the crop evapotranspiration at observation time under optimal nutrient and water supply.***

The adaptation of the field K_c^* -VI relationship to the satellite image scale was made using two reference points, one corresponding to full green cover and the other corresponding to bare soil. The application at satellite image scale allows to establish the average values of the crop evapotranspiration, ET_c^* , at the time of observation under optimal growth development [Objective 3].

To explore the capability of this methodology based on remote sensing data, a first application was performed over the extent of the 08-29 aquifer [Objective 4]. The land use map over a set of 14 Landsat images in spring-autumn of 2003 was used in combination with field data of phenology. The K_c^* curve for each class was calculated using the time evolution of the NDVI. Three time scales were used to calculate de ET_c^* , weekly, monthly, and for the whole year.

The values of the ET_c^* estimated for each class are in agreement with the published values. For the irrigated crops, they agree with the recommendations provided by the local irrigation advisory service at the Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP). In the alfalfa class, which has the highest water consumption, an overestimation of up to 10 % was found due to the advection effect present in the field K_c^* -VI relationship.

The method estimates water requirements in forests higher than measured rainfall. This reflects the response mechanisms of these plants to water stress, like developing the root system and closing the stomata, which are not included in the relationship K_c^* -VI. For a given canopy and given atmospheric conditions, the value $K_c^* \cdot ET_o$ is the upper limit that the evapotranspiration can reach. Thus, under crop water stress, and other limiting conditions, the crop evapotranspiration can be lower than the one obtained using the $K_c^* \cdot ET_o$ method [Objective 5].

Perspectives.

This methodology contributes to the determination and monitoring of the crop evapotranspiration by remote sensing, and opens suggestions for future improvements. The availability in new remote sensing data with higher temporal resolution can enhance the precision in the definition of the crop growth curve. New studies will be necessary to quantify dependencies in the relationship K_c^* -VI with climate, soil or crop type for other areas.

Several studies and projects are currently carried out along these these lines, showing that there is a strong demand of this methodology. The main studies and projects in progress are:

- Resulting from the DEMETER² project (Jochum *et al.*, 2006; Calera *et al.*, 2005), a remote sensing based tool is currently used in the irrigation advisory service in Albacete. This remote sensing-based irrigation advisory service was operationally tested during the year 2005 and is based on the K_c^* -VI relationship. This service can be accessed at: <http://www.demeter-ec.net>
- The MORE project (*Operational Model for recharge and evapotranspiration estimation at regional scale*-code: REN2003-02956), based on the soil water balance. This model is applied in the aquifer 08.29 and monitors the crop evapotranspiration using the vegetation index.
- Various field experiments are being carried out over alfalfa and other crops that can help to study the dependence of the K_c^* -VI relationship with other crops in the study area.
- The PLEIADeS project (FP6-2005-GLOBAL-4, *Participatory multi-Level EO-assisted tools for Irrigation water management and Agricultural Decision-Support*) is a Research and Technical Development project co-funded by the European Community under the Sustainable Development, Global Change and Ecosystems Programme (contract 037095). Its main objective is to improve the performance of the irrigation schemes in Mediterranean areas and Latin America by means of remote sensing techniques. One of the techniques used to determine the crop water requirements is the crop coefficient estimation by remote sensing data.
- The comparison between different evapotranspiration estimation models based on the energy surface budget extended to the study area such as MSSEBS and METRIC (Rubio *et al.*, 2006). A collaboration with other groups ET_c is being estimated from different methods in the aquifer 08.29 which can provide useful information for clarification of further details in the relationship K_c -VI.
- The ECOFLUJ project, (*Evaluación del balance de carbono y flujos de vapor de agua en sistemas agrícolas y forestales Castilla-La Mancha* - PBC05-013-01) funded by the *Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha*. The study of water fluxes and thus the evapotranspiration over natural vegetation can give information about the influence of the water stress to the estimation of the crop coefficient.

² Demonstration of Earth observation Technologies in Routine irrigation advisory services (Research and Demonstration project co-funded by the European Community under the Energy, Environment and Sustainable Development Programme, contract EVG1-CT-2002-00078)

Apéndice

Appendix

APÉNDICE A

Símbolos

- r_s , resistencia de superficie
 r_a , resistencia aerodinámica
 ET_c , evapotranspiración del cultivo
 ET_c^* , evapotranspiración máxima de la cubierta
 ET , evapotranspiración real
 P , precipitación
 R , riego
 D , drenaje
 Δw , variación en humedad de suelo
 λ , calor latente de vaporización
 R_n , radiación neta
 G , flujo de calor en suelo
 β , razón de bowen,
 T , temperatura del aire
 e , presión de vapor
 H , flujo de calor sensible
 w' , velocidad del viento vertical
 q' , densidad de vapor
 C_p , calor específico del aire
 Δ , pendiente de la curva presión de saturación del vapor de agua con la temperatura.
 ρ , densidad del aire
 $(e_s - e_a)$, déficit presión de vapor
 γ , constante psicrométrica
 r_c , resistencia de la cubierta

u_2 , velocidad del viento promedio medida a 2 m de altura
 K_c *INI*, coeficiente de cultivo en fase inicial
 I_w , intervalo temporal de lluvia/riego
 v_w , frecuencia de riego/lluvia
 K_c *MED*, coeficiente de cultivo en la fase media
 LAI , índice de área foliar
 EFC , cubierta efectiva completa
 H_R , humedad relativa
 h , altura del cultivo
 K_c *FIN*, coeficiente de cultivo en el estado final
 K_e , coeficiente de evaporación
 REW , agua en suelo fácilmente evaporable
 TEW , agua total evaporable en suelo
 K_s , coeficiente reductor de agua en suelo
 f_{ew} , fracción de suelo expuesta a radiación bajo aporte hídrico
 f_c , fracción de cubierta vegetal
 f_w , fracción de suelo bajo aporte hídrico
 $NDVI$, normalized soil adjusted vegetation index
 PVI , perpendicular vegetation index
 $SAVI$, soil adjusted vegetation index
 $TSAVI$, transformed soil adjusted vegetation index
 $OSAVI$, optimized soil adjusted vegetation index
 $WDVI$, weighted difference vegetation index
 $GESAVI$, generalized soil adjusted vegetation index
 $MSAVI$, modified soil adjusted vegetation index
 ρ_R , reflectividad espectral en el rango del rojo
 ρ_{IRC} , reflectividad espectral en el rango del infrarrojo cercano
 L , parámetro de optimización para SAVI
 X , parámetro de optimización para TSAVI
 Y , parámetro de optimización para OSAVI
 K_{scb} , coeficiente de cultivo basal obtenido a partir de IV
 VI o IV , índice de vegetación
 f_{APAR} , fracción de radiación absorbida fotosintéticamente activa
 B , biomasa
 PAR , radiación fotosintéticamente activa
 ϵ , eficiencia en la conversión de radiación a materia seca
 w , factor de estrés hídrico
 $IntVI$, valor integrado en el tiempo del índice de vegetación
 K , constante de proporcionalidad en la función de producción
 f_{GDD} , fracción de los días acumulados frente al total del ciclo de crecimiento
 GDD , grado de días de crecimiento

CumGDD, grados de días de crecimiento acumulados
IHD, intervalo de humedad disponible
CC, capacidad de campo
PMP, punto de marchitamiento permanente
AU, agua útil
NAP, nivel de agotamiento permisible
 N_n , necesidades netas de riego
 P_e , precipitación efectiva
 M , masa del lisímetro
 P_w , acumulación de biomasa sobre el lisímetro
 NH , necesidades de riego brutas

APÉNDICE B

Cálculo de ET_0

B.1. Determinación de la evapotranspiración de referencia mediante la ecuación FAO-56 Penman-Monteith

Cálculo Diario.

La ecuación de Penman-Monteith FAO-56 está basada en una cubierta de festuca cuyas resistencias aerodinámicas y de cubierta vienen dadas por la definición en este manual obtenida a partir de la ecuación de Penman-Monteith adaptada a la superficie de referencia a escala diaria,

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (\text{B.1})$$

Donde:

ET_0 , es la evapotranspiración de referencia, $mm \cdot dia^{-1}$

R_n , es la radiación neta, $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$.

G , es el flujo de calor en suelo, $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$.

T , es la temperatura media del aire medida a 2 m de altura, $^{\circ}C$.

u_2 , velocidad media del viento medida a 2 m de altura, $m \cdot s^{-1}$.

$(e_s - e_a)$, representa el deficit de presión de vapor del aire, kPa .

e_s , es la presión de vapor de saturación del aire, kPa .

e_a , es la presión de vapor actual del aire, kPa .

Δ , es la pendiente de saturación en la relación presión de vapor temperatura, $kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$.

γ , es la constante psicrométrica, $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$.

Los datos necesarios para cálculo diario son:

T_M , Temperatura máxima diaria, medida a 2 m de altura, $^\circ C$.

T_m , Temperatura mínima diaria, medida a 2 m de altura, $^\circ C$.

HR_M , Humedad relativa máxima diaria, medida a 2 m de altura, %.

HR_m , Humedad relativa mínima diaria, medida a 2 m de altura %.

R_n , Radiación neta $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$

u_2 , Velocidad del viento media diaria ($m \cdot s^{-1}$), medida a 2 m de altura.

Cálculo Horario.

La ecuación del apartado B.1 para datos horarios adopta la forma,

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{37}{T+273} \cdot u_2 \cdot (e^0 - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (B.2)$$

Donde:

ET_0 , es la evapotranspiración de referencia, $mm \cdot h^{-1}$.

R_n , es la radiación neta, $MJ \cdot m^{-2} \cdot hora^{-1}$.

G , es el flujo de calor en suelo, $MJ \cdot m^{-2} \cdot hora^{-1}$.

T , es la temperatura media del aire medida a 2 m de altura, $^\circ C$.

u_2 , velocidad media del viento medida a 2 m de altura, $m \cdot s^{-1}$.

$(e_s - e_a)$, representa el deficit de presión de vapor del aire, kPa .

e_s , es la presión de vapor de saturación del aire, kPa .

e_a , es la presión de vapor actual del aire, kPa .

Δ , es la pendiente de saturación en la relación presión de vapor temperatura, $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$.

γ , es la constante psicrométrica, $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$.

Los datos necesarios para cálculo diario son:

T , Temperatura media horaria, medida a 2 m de altura $^\circ C$.

HR , Humedad relativa media horaria, medida a 2 m de altura %.

R_n , Radiación neta $MJ \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$

u_2 , Velocidad del viento media horaria ($m \cdot s^{-1}$), medida a 2 m de altura.

Además, para ambos casos es necesario tener en cuenta la latitud (39,03 grados), longitud (2,08 grados Este), longitud de zona horaria (15 Este), así como la elevación (690 m) sobre el nivel de mar.

B.1.1. Parámetros intermedios en el Método FAO-Penman Monteith.

Resistencia Aerodinámica.

La resistencia aerodinámica para condiciones de estabilidad neutral se puede calcular utilizando la expresión:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_2-d}{z_{0m}}\right] \cdot \ln\left[\frac{z_h-d}{z_{0h}}\right]}{k^2 \cdot u_2} \quad (\text{B.3})$$

Donde,

r_a , es la resistencia aerodinámica, $s \cdot m^{-1}$.

z_w , es la altura en la medida de la velocidad del viento ($2m$).

z_h , es la altura en la medida de la humedad relativa y temperatura ($2m$).

d , altura en el desplazamiento del plano cero (m), $= 0,67 \cdot h$.

z_{0m} , longitud en rugosidad para la transferencia de momento (m), $= 0,123 \cdot h$.

z_{0h} , longitud en rugosidad para la transferencia de calor y vapor (m), $= 0,0123 \cdot h$.

k , constante de von Karman, $0,41$.

u_2 , velocidad del viento a $2m$.

h , altura media de la vegetación, m .

Resistencia de Superficie.

La resistencia de superficie se puede calcular como:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{ACTIVO}} \quad (\text{B.4})$$

Donde,

r_s , es la resistencia de superficie, $s \cdot m^{-1}$.

r_l , es la resistencia estomática de una hoja bien iluminada. $r_s = 100s \cdot m^{-1}$ para cálculos diarios y $r_s = 70s \cdot m^{-1}$ para cálculos horarios.

LAI_{ACTIVO} , índice de área foliar (LAI) activo (iluminado).

En general, para cultivos de referencia que conformen cubiertas de alta cobertura y homogéneas,

$$LAI_{ACTIVO} = 0,5 \cdot LAI \quad (\text{B.5})$$

Que para festuca: $LAI = 24 \cdot h$, donde h es la altura de la vegetación (m) que se considera constante e igual a $0,12m$, obteniendo un $r_s = 70s \cdot m^{-1}$.

B.1.2. Parámetros atmosféricos.

Presión Atmosférica.

$$P = P_0 \cdot \left\{ \frac{T_0 - \alpha_l \cdot (z - z_0)}{T_0} \right\}^{\frac{g}{\alpha_l \cdot R}} \quad (\text{B.6})$$

Donde,

P , Presión atmosférica a la altura sobre el nivel del mar z , kPa .

P_0 , Presión atmosférica al nivel del mar = $101,3kPa$.

z , Altura sobre el nivel del mar, m .

z_0 , Altura de referencia sobre el nivel del mar, m .

g , Aceleración gravitacional, = $9,807m \cdot s^{-2}$.

R , Constante específica de los gases = $287J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

α_l , constante de retardo en humedad del aire = $0,0065K \cdot m^{-1}$.

T_0 , Temperatura de referencia (K) a la elevación z_0 dada por: $T_0 = 273,16 + T_{media}$, donde T_{media} es la temperatura media durante el período de cálculo (horario o diario).

Utilizando $P_0 = 101,3kPa$ a $z_0 = 0m$, y $T_0 = 293K$ para $T_{media} = 20^{\circ}C$, la ecuación B.6 se transforma en,

$$P = 101,3 \cdot \left\{ \frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right\}^{5,26} \quad (\text{B.7})$$

Densidad del Aire.

$$\rho = \frac{1000 \cdot P}{T_{KV} \cdot R} = 3,486 \frac{P}{T_{KV}} \quad (\text{B.8})$$

Donde,

ρ , Densidad atmosférica, $kg \cdot m^{-3}$.

R , Constante específica de los gases = $287J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

T_{KV} , Temperatura media virtual (K), $T_{KV} = T_K \cdot (1 - 0,378 \frac{e_a}{P})^{-1}$.

T_K , Temperatura absoluta media (K), siendo $T_K = 273,16 + T_{media}(^{\circ}C)$.

e_a , Presión de vapor actual, kPa .

Constante Psicrométrica.

$$\gamma = \frac{C_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} = 0,00163 \frac{P}{\lambda} = 6,65 \cdot 10^{-4} \cdot P \quad (\text{B.9})$$

Donde

γ , Constante psicrométrica, $kPa \cdot ^\circ C$.

C_p , Calor específico del aire húmedo = $1,013 \cdot 10^{-3} MJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$.

ε , Cociente del peso molecular del vapor de agua/aire seco = 0,622.

λ , Calor latente de vaporización = $2,45 MJ \cdot kg^{-1}$.

Pendiente de la curva de presión de saturación, Δ .

$$\Delta = \frac{2504 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T+237,2}\right)}{(T+273,3)^2} \quad (\text{B.10})$$

Donde

Δ , Pendiente de la curva presión de vapor, $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$.

T , Temperatura del aire.

En cálculos diarios, Δ se calcula usando datos medios diarios de la temperatura. En cálculos horarios T se refiere a la media horaria.

Presión de vapor de Saturación, (e_s).

La función de presión de vapor de saturación es:

$$e^0(T) = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T+237,3}\right) \quad (\text{B.11})$$

Donde

$e^0(T)$, función de presión de vapor de saturación, kPa .

T , Temperatura del aire, $^\circ C$.

Debido a la no linealidad de la ecuación anterior, para períodos de tiempo superiores a un día se parametriza en función de las temperaturas máxima (T_M) y mínima (T_m) diaria:

$$e_s = \frac{e^0(T_M) - e^0(T_m)}{2} \quad (\text{B.12})$$

Para intervalos horarios se utiliza $e_s = e^0(T_{horaria})$.

Presión de vapor Actual (e_a).

Para el calculo diario si se dispone de la humedad relativa, se puede utilizar la ecuación:

$$e_a = \frac{e^0(T_m) \frac{RH_M}{100} + e^0(T_M) \frac{RH_m}{100}}{2} \quad (B.13)$$

Donde,

e_a , presión de vapor actual, kPa .

$e^0(T_M)$, presión de vapor de saturación a la temperatura máxima diaria, kPa .

$e^0(T_m)$, presión de vapor de saturación a la temperatura mínima diaria, kPa .

RH_M , Humedad relativa máxima, %.

RH_m , Humedad relativa mínima, %.

Para el cálculo horario, la humedad relativa (RH) se puede suponer constante en este intervalo temporal y la presión de vapor actual se puede calcular según,

$$e_a = \frac{RH}{100} e^0(T) \quad (B.14)$$

Radiación Solar Neta (R_n).

La radiación solar neta (R_n) es la diferencia entre la radiación solar neta de onda corta incidente (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga saliente (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (B.15)$$

Densidad de Flujo de Calor en Suelo (G).

Para cálculos diarios, el flujo de calor en suelo bajo una cubierta completa de festuca es relativamente pequeña. De este modo se ignora y por tanto en la ecuación B.1, $G_{\text{día}} \simeq 0$.

Para períodos horarios, G bajo una cubierta completa de festuca se puede aproximar de la forma:

$$G_{\text{horas día}} = 0,1 \cdot R_n \quad (B.16)$$

$$G_{\text{horas noche}} = 0,5 \cdot R_n \quad (B.17)$$

APÉNDICE C

Cálculo de Índices de Vegetación.

El estudio hecho sobre los diferentes índices de vegetación extraídos de la bibliografía da una perspectiva más amplia de la metodología estudiada en la tesis doctoral. Con objeto de no dispersar durante la lectura de la memoria -teniendo en cuenta la densidad del trabajo por la cantidad de datos expuestos- parte de las figuras que podrían ir incluidas en el capítulo V se han traído a este apéndice.

En el apartado C.1 se representan todos los índices seleccionados para ambas campañas de maíz (año 2001) y trigo (2003). En estas mismas figuras se representan simultáneamente los índices dentro y fuera del lisímetro donde se comprueba su sensibilidad a la variación en la cubierta vegetal.

La relación de los IV con la fracción de cobertura vegetal se ha recogido en la sección C.2, mostrando una linealidad general en todos ellos excepto en GESAVI donde se aprecia una ligera curvatura. Este hecho es debido a su definición, por ser un índice más sensible a la dispersión de la radiación entre las diferentes capas de la cubierta vegetal y por tanto ante el incremento de LAI. Esto se puede observar en el apartado C.3 donde se representan los índices de vegetación frente al LAI de forma conjunta para ambos cultivos trigo y maíz.

El estudio de los ritmos de crecimiento se hace a través de la evolución de la biomasa en ambas cubiertas, por ello se ha representado la biomasa frente al valor integrado en el tiempo de los IV, *IntIV*, en el apartado C.4.

Finalmente, en la sección C.5 se han representado todos los índices frente al coeficiente de cultivo basal. En este mismo apartado se ha representado el coeficiente de cultivo frente a los IV a diferentes escalas de tiempo: diaria, semanal y quincenal.

C.1. Evolución en el tiempo de los IVs.

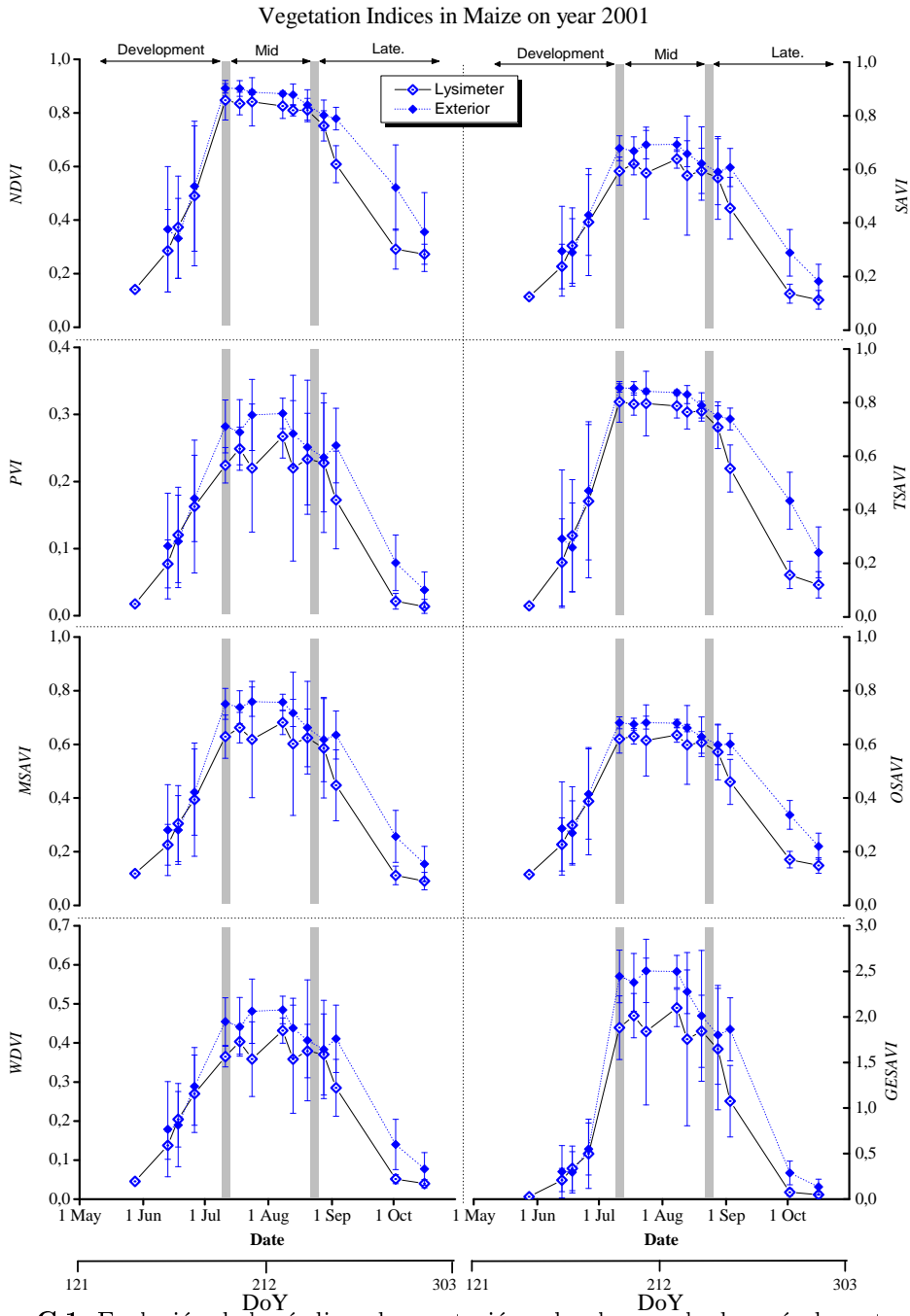


Figura C.1: Evolución de los índices de vegetación sobre la parcela de maíz durante el año 2001.

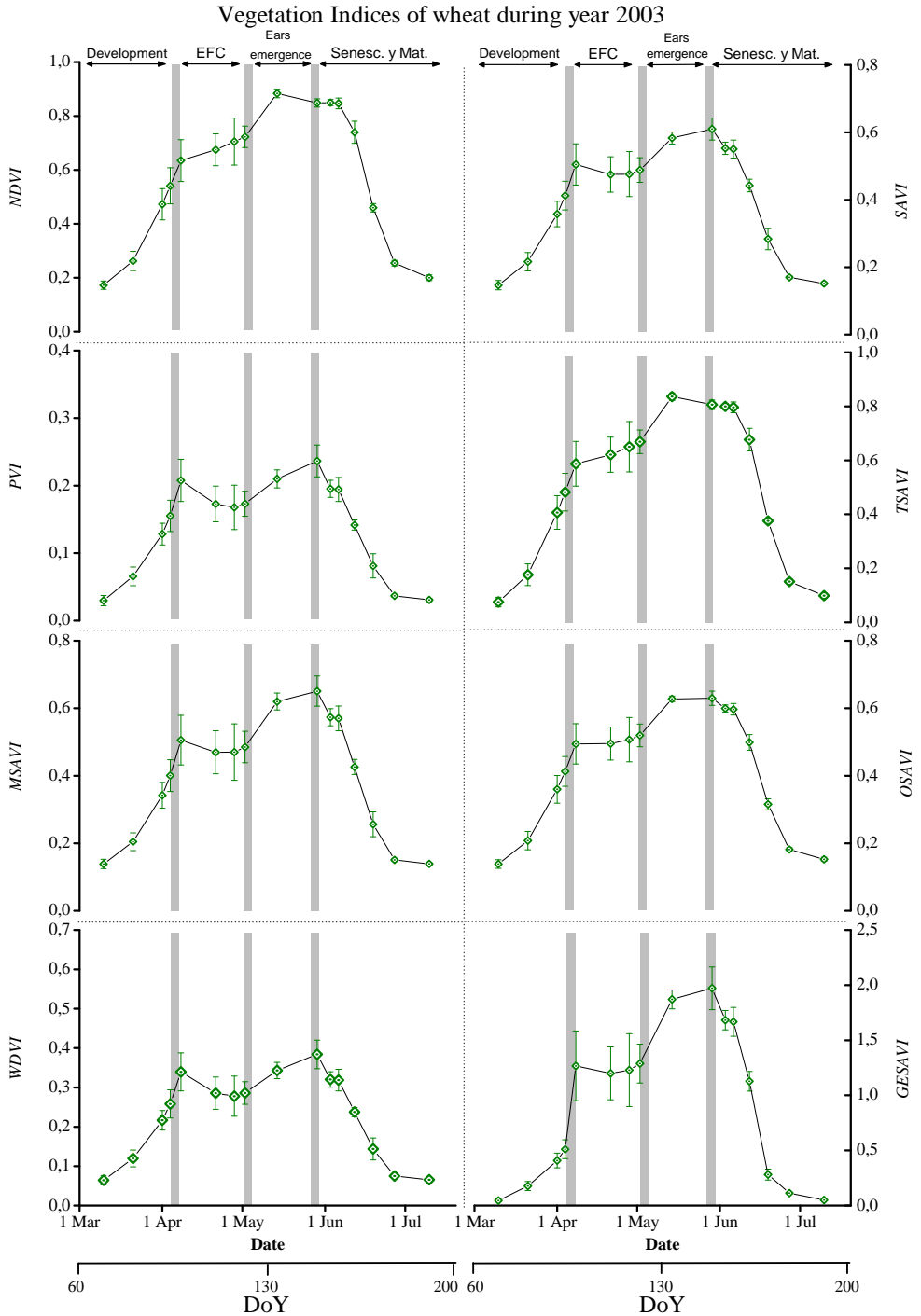


Figura C.2: Evolución de los índices de vegetación sobre la parcela de trigo durante el año 2003.

C.2. f_c e Índices de Vegetación

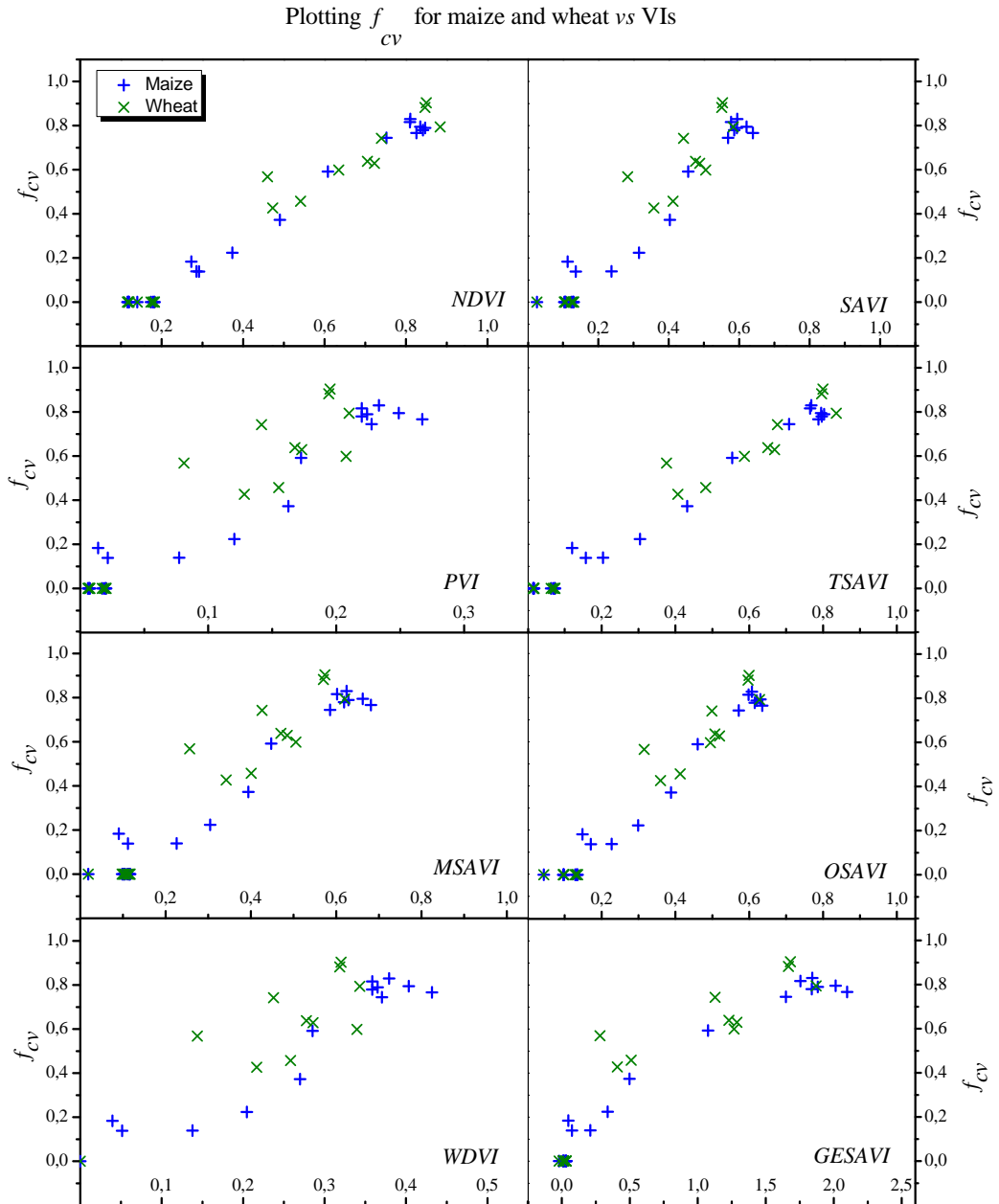


Figura C.3: Representación de la fracción de cobertura vegetal verde (f_c) frente a cada uno de los índices de vegetación (IVs) seleccionados distinguiendo entre los datos obtenidos sobre maíz (+) y trigo (x).

C.3. LAI e Índices de Vegetación

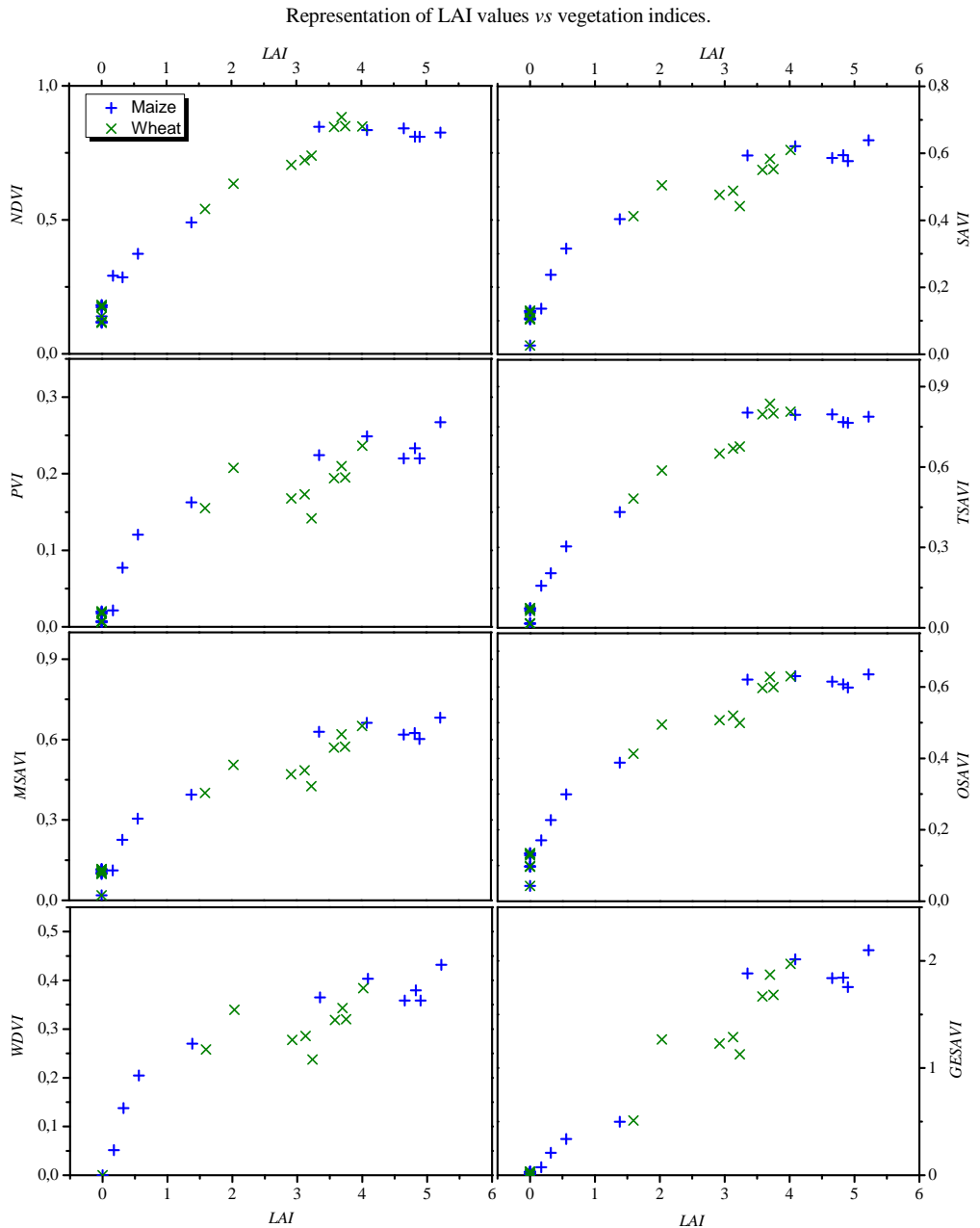


Figura C.4: Representación del LAI frente a cada uno de los índices de vegetación (IVs) seleccionados distinguiendo entre los datos obtenidos sobre maíz (+) y trigo (x).

C.4. Biomasa e Índices de Vegetación

Biomass and IntIV for maize

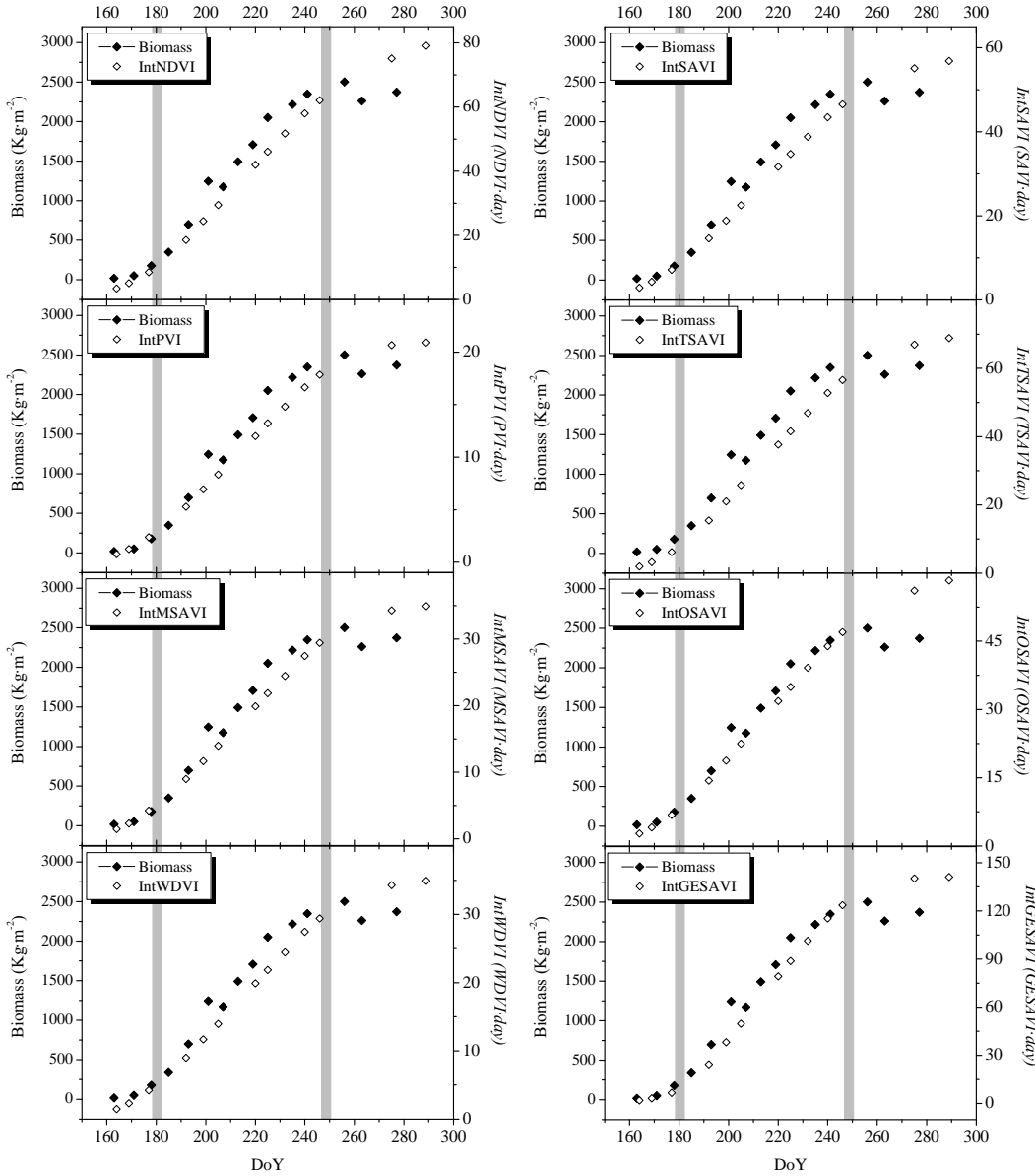


Figura C.5: Representación de la biomasa (—◆—) y del valor integrado en el tiempo de los IVs (IntVI - ◇) frente al DoY para maíz.

Biomasa and IntIV for wheat

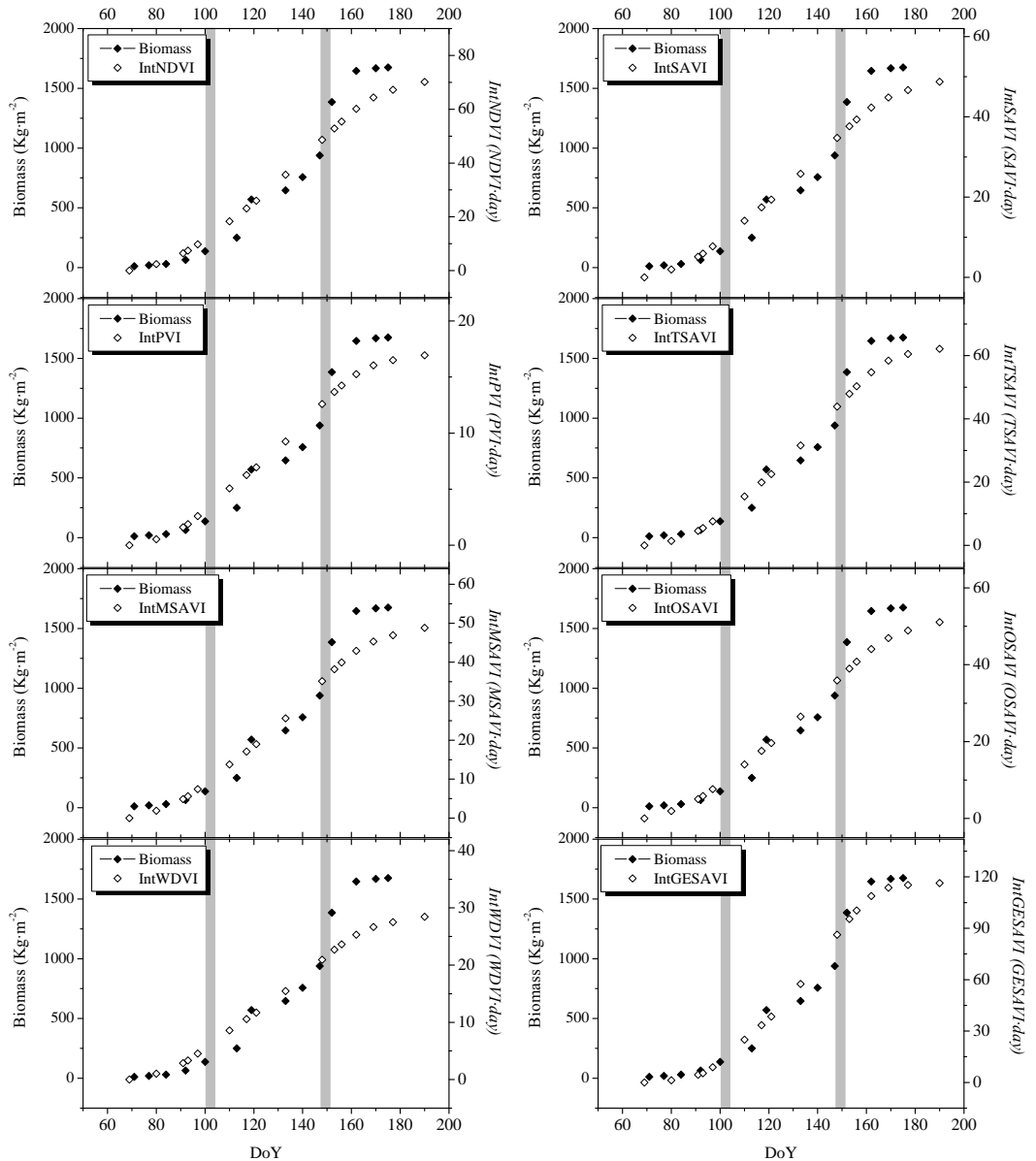


Figura C.6: Representación de la biomasa (—◆—) y del valor integrado en el tiempo de los IVs (IntVI - ◇) frente al DoY para trigo.

C.5. Relación entre Coeficiente de Cultivo e índices de vegetación.

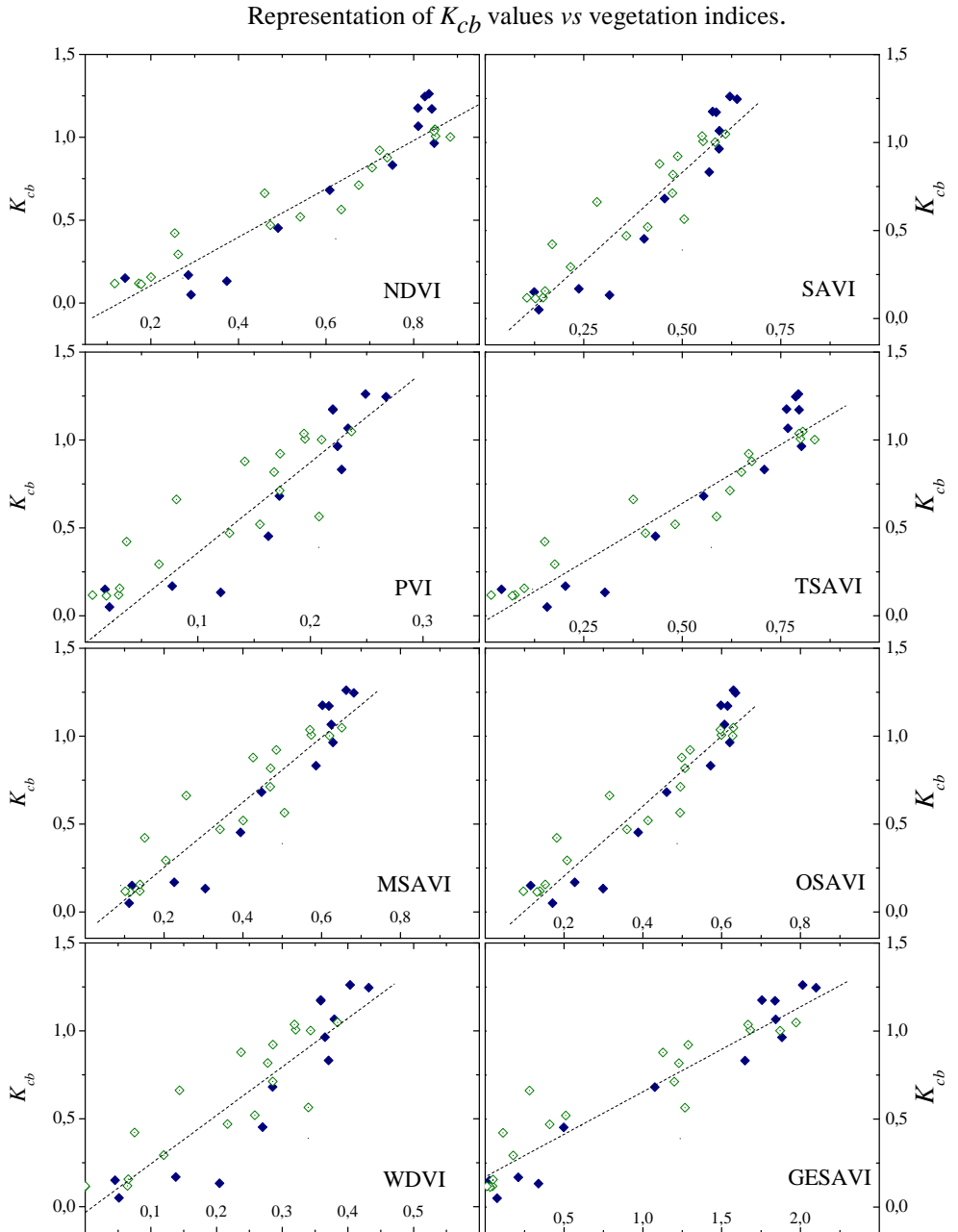


Figura C.7: Representación del coeficiente de cultivo basal frente a los índices de vegetación seleccionados para maíz (◆) y trigo (◇).

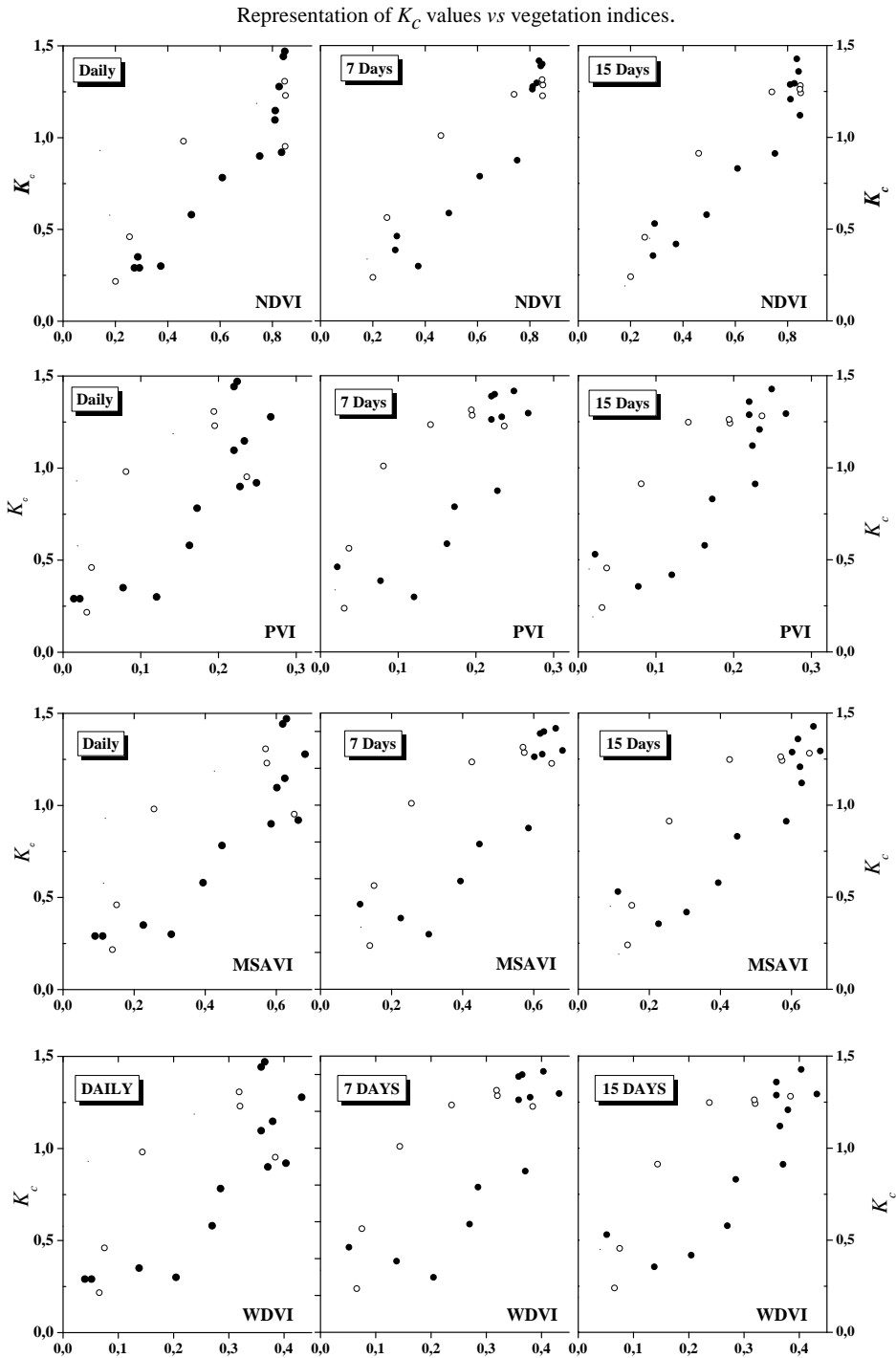


Figura C.8: Representación del coeficiente de cultivo basal y el índice de vegetación para maíz (●) y trigo (○).

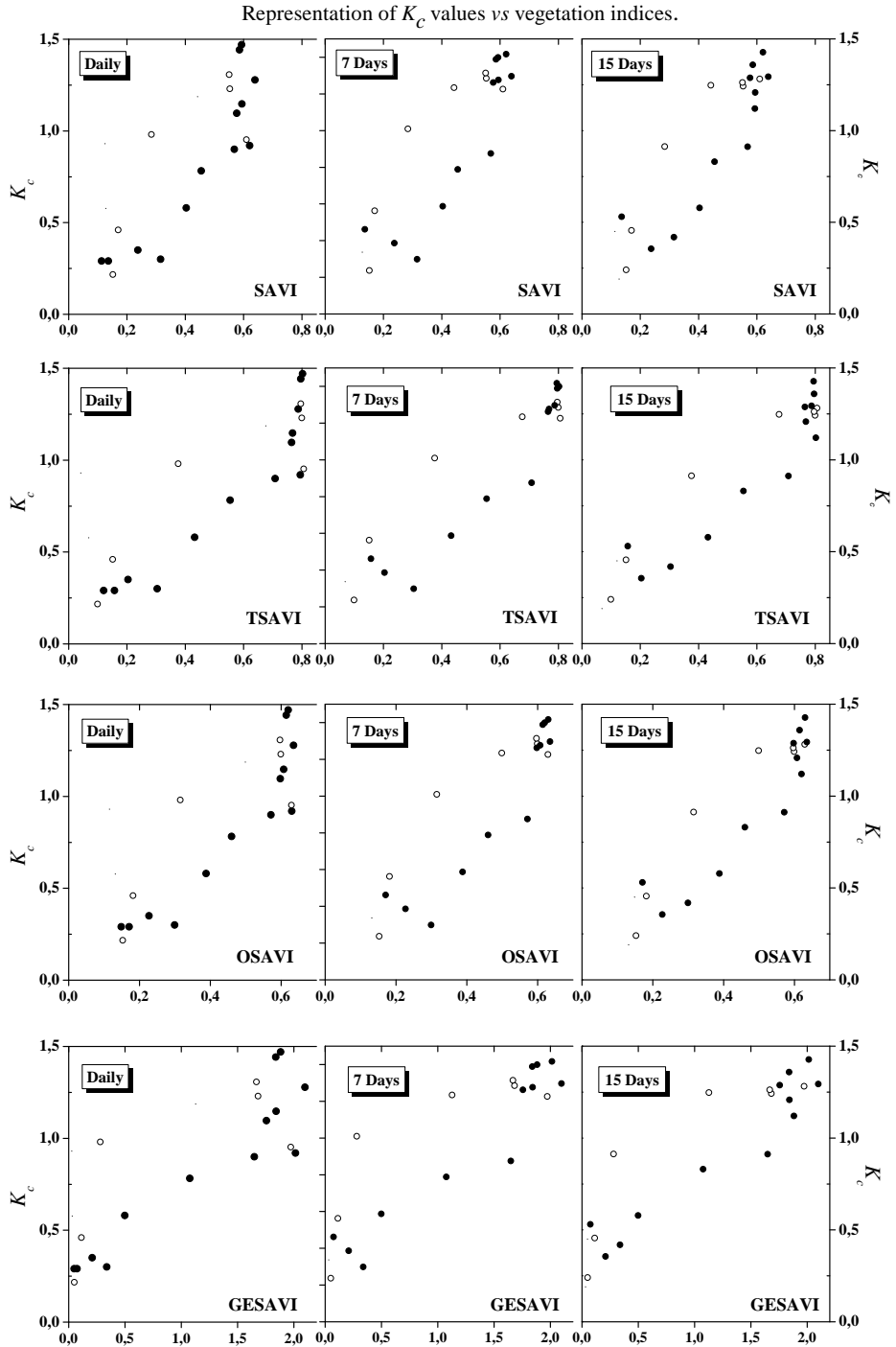


Figura C.9: Representación del coeficiente de cultivo basal y el índice de vegetación para maíz (●) y trigo (○).

APÉNDICE D

Mapa de Usos de Suelo para el año
2003

Mapa de Usos de Suelo año 2003 en el área de acuífero 08.29
Land Use Map for year 2003 in the 08.29 aquifer

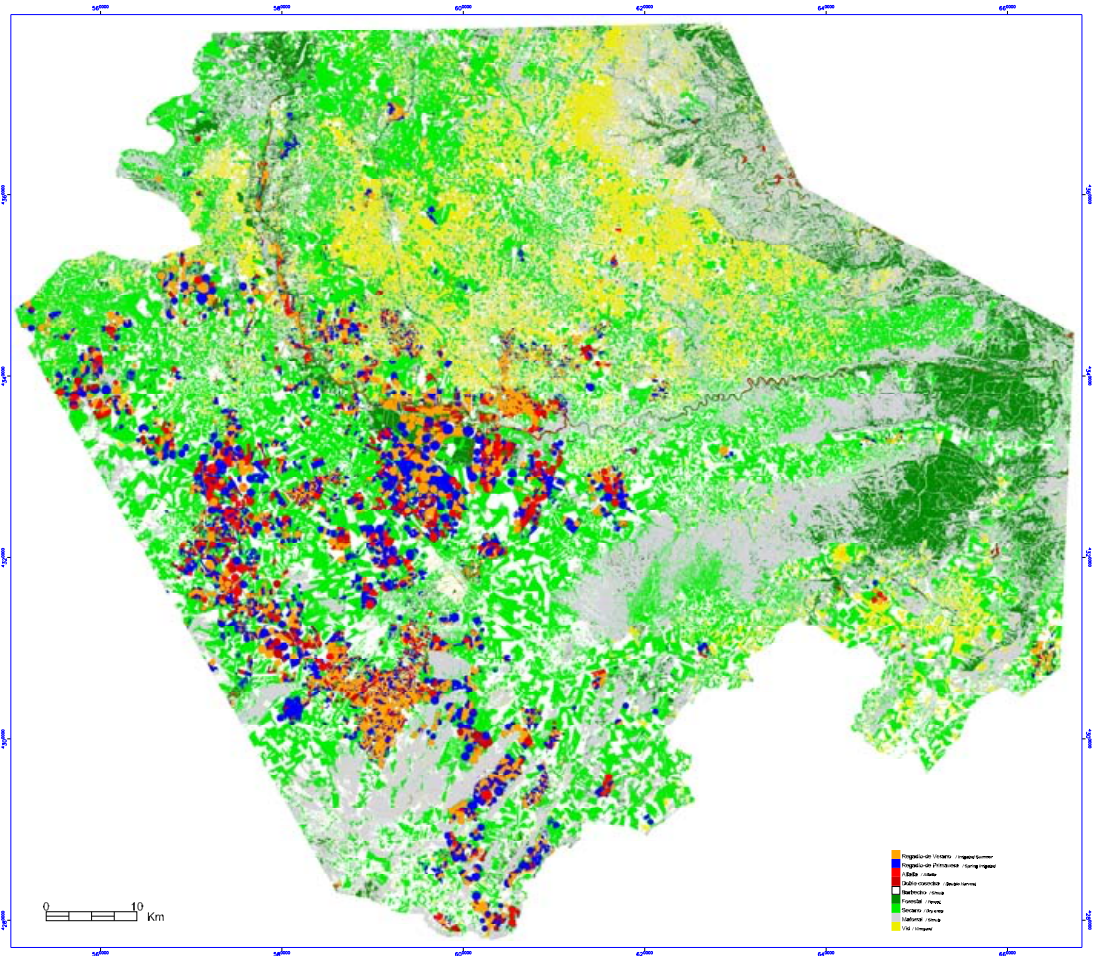


Figura D.1: Mapa de usos de suelo dentro del acuífero 08.29 correspondiente al año 2003 (Calera, 2003).

APÉNDICE E

Seguimiento de alfalfa desde satélite.

En la figura E.1 se muestra la evolución temporal del índice de vegetación obtenido desde satélite para una parcela de alfalfa y otra de suelo. El valor del píxel representado en la figura inferior se ha obtenido mediante un promedio tomando como referencia el píxel central de la imagen mostrada.

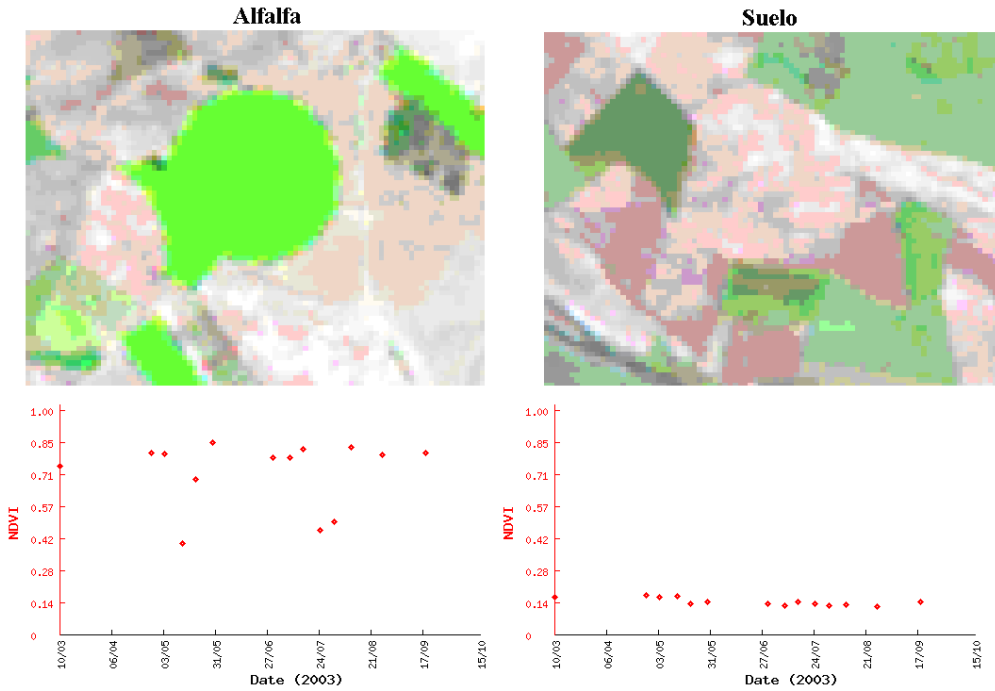


Figura E.1: Composición RGB de una parcela de alfalfa (izquierda) y suelo (derecha) junto a su evolución temporal de $NDVI_{TOA}$ (figuras inferiores) a lo largo de un ciclo de crecimiento durante el año 2003.

APÉNDICE F

Curvas K_c de cultivos en la zona.

En este apéndice se muestran las curvas de cultivos obtenidas en la campaña extensiva del SAR con objeto de obtener los valores de K_c proporcionados por FAO pero adaptados a la zona. Las curvas de cultivo mostradas en este apéndice están agrupadas por dos clases, regadío de primavera y de verano para ilustrar los cultivos más representativos pertenecientes a cada una de las clases utilizadas en el cálculo de la evapotranspiración máxima.

F.1. Regadío de primavera

Dentro de la clase regadío de primavera, están incluidos principalmente los cereales regados, sembrados durante el invierno, época durante la cual tiene lugar su crecimiento, desarrollo durante la primavera y recogida al principio de verano. Dentro de esta clase de cultivo están incluidos también hortalizas como los ajos, que son más difíciles de seguir por su baja cobertura y ciclo de desarrollo más corto. En la figura F.1 aparecen representadas las curvas de K_c obtenidas para los cultivos de trigo (A), cebada (B), ajo morado (C), avena (D), avena forrajera (E) y adormidera (F). El error representado en la gráfica representa la variabilidad del muestreo en las parcelas de observación.

En la figura F.1 A y B, para cebada y trigo, se aprecian comportamientos similares. Para trigo, durante los primeros diez días de Marzo ($60 < \text{DoY} < 70$) se produce la inflexión del coeficiente de cultivo pasando de la etapa de nacimiento a la de crecimiento; esta etapa se mantiene hasta el día 10 de Mayo ($\text{DoY}=130$), alcanzando a partir de este día la etapa de meseta que perdura hasta el 28 de Mayo ($\text{DoY}=148$). La etapa de madurez y senescencia se prolonga hasta el día 1 de Julio ($\text{DoY}=182$) donde finaliza el ciclo. En el caso de cebada en torno al día 13 de Marzo ($\text{DoY}=72$)

se inicia la etapa de crecimiento que se mantiene hasta el 15 de Mayo (DoY=135), a partir de este día comienza la etapa de meseta que se mantiene hasta el día 29 de este mes (DoY=149). El período de maduración y senescencia continúa hasta finales de Junio (DoY=180).

El ajo morado alcanza la etapa de *plateau* el 13 de Mayo (DoY=133) prolongándose hasta el 2 de Junio (DoY=153), produciéndose la recolección a primeros de Julio en torno al DoY=180. La avena no ofrece una tendencia tan clara en las etapas de evolución en el coeficiente de cultivo al presentar una variabilidad alta entre parcelas. Se aprecia una etapa clara de crecimiento desde el día 8 de Marzo (DoY=67) hasta el día 19 de Mayo (DoY=139); a la vista de los valores representados en la figura F.1-D se considera una etapa de meseta más corta que en el caso de los cereales trigo y cebada, considerando una duración de 13 días que van desde el 19 de Mayo hasta el 2 de Junio ($139 < \text{DoY} < 143$). Se ha incluido otra variante de la avena, con fin forrajero, representado en la figura F.1-E, cuyo ciclo se interrumpe al final de desarrollo cuando se alcanza el máximo de biomasa verde en la planta el 28 de Mayo (DoY=148). No se aprecia en esta representación la variabilidad anterior al haber hecho el seguimiento de una única parcela. La adormidera inicia su etapa de crecimiento en torno al 15 de Abril (DoY=105) alcanzando el *plateau* el 1 de Junio (DoY=152), etapa que tiene un periodo de duración de 8 días ($152 < \text{DoY} < 160$). La maduración se inicia el 15 de Junio (DoY=166) y perdura hasta el final del ciclo en torno al 7 de Julio (DoY=177).

Cultivos incluidos en la clase Regadío de Primavera

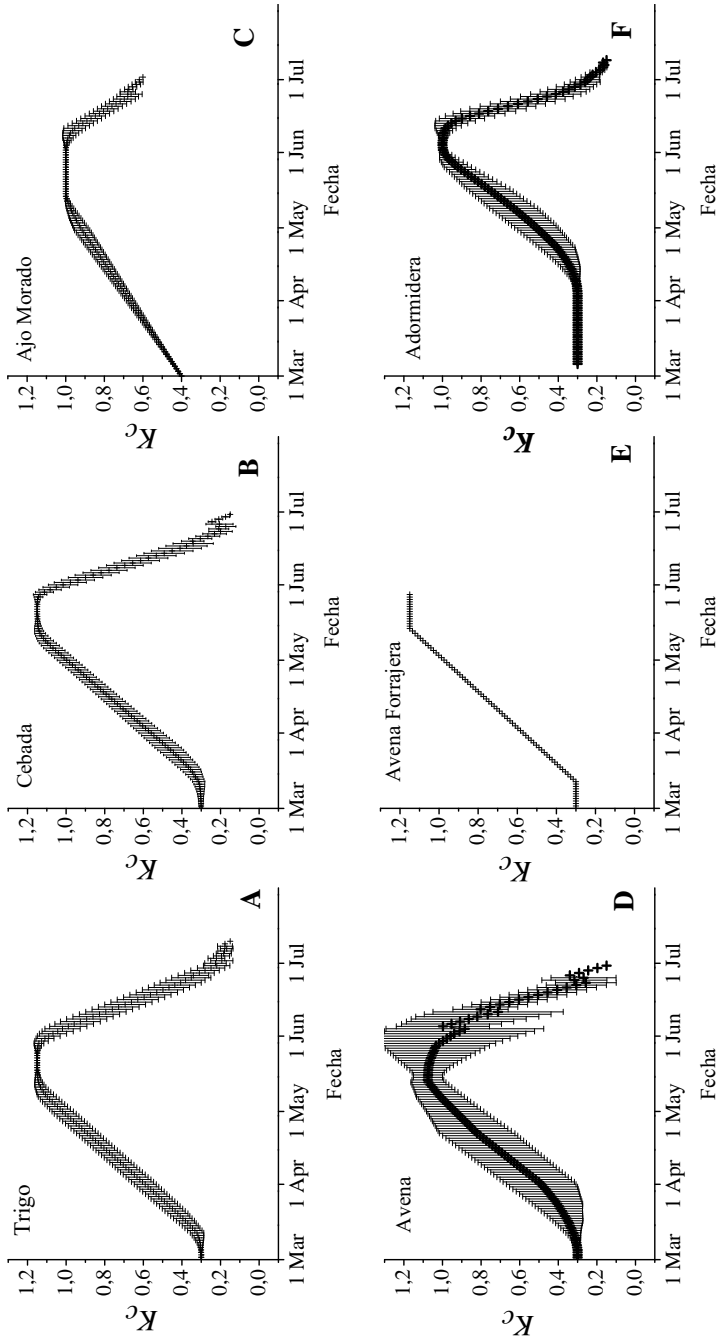


Figura F.1: Curvas de coeficiente de cultivo obtenidas a partir de los registros realizados en la campaña extensiva del ITAP para los cultivos mayoritarios que caen dentro de la clase regadío de primavera.

F.2. Clase regadío de verano

Las curvas representativas de los cultivos de verano aparecen representadas en la figura F.2.A-F donde se han incluido los más representativos de la clase: patata (fig. F.2-A), cebolla (fig. F.2-B), maíz (figs. F.2-D y F.2-E), remolacha (fig. F.2-F) y judía (fig. F.2-C). La patata presenta su punto de inflexión el día 1 de Mayo (DoY=121) hacia la etapa de crecimiento, alcanzando el *plateau* el 4 de Junio (DoY=155). El período de meseta presenta una duración de 30 días, produciéndose el inicio de la maduración el día 4 de Julio, perdurando hasta el inicio de la recogida, que dependiendo de la variedad se prolonga durante el mes de Agosto. La cebolla adopta un valor de coeficiente de cultivo inicialmente mayor que el resto de cultivos ($K_{c \text{ INICIAL}}=0,5$) debido a una frecuencia de riego mayor y por tanto de una componente de evaporación de suelo mayor. El crecimiento se inicia el 28 de Mayo (DoY=148) hasta alcanzar la meseta el 23 de Junio (DoY=174), la etapa de meseta se prolonga 42 días hasta el inicio de la senescencia el 5 de Agosto (DoY=217). La etapa de senescencia presenta una alta variabilidad pues el cultivo de la cebolla presenta una oferta amplia de variedades, la principal diferencia radica en el final del ciclo, con el objeto de dosificar la producción a la demanda de mercado. Por ello, la recolección en determinadas parcelas comienza en torno al 18 de Agosto (DoY=230) prolongándose hasta el mes de Octubre. La judía cuyo ciclo aparece representado en la figura F.2-C, no es un cultivo altamente representativo de la clase regadío de verano. Su uso es más propio de parcelas cultivadas con dos cosechas por año, un cultivo en invierno-primavera y otro que cubre el ciclo en primavera-verano, se han seguido unas parcelas ofreciendo un comportamiento que no incluye la etapa de senescencia al producirse su cosecha entre el 15 y el 25 de Septiembre ($258 < \text{DoY} < 268$) cuando el cultivo se encuentra en su máximo de maduración.

El ciclo de maíz, representando dos variedades con un peso importante dentro del área de estudio, una de ciclo 600 y otra de ciclo 700 cuya diferencia principal radica en la longitud del ciclo de crecimiento. Aunque las fecha de siembra también difieren, el inicio de la etapa de crecimiento en ambos casos se produce en torno al día 20 de Mayo (DoY=140), alcanzando el máximo el maíz ciclo 600 el 15 de Julio (DoY=196) y el ciclo 700 aproximadamente dos días más tarde. La etapa de meseta en ambos ciclos es aproximadamente igual, comenzando la etapa de maduración entre los días 5 y 7 de Agosto (DoY=217-219). Es en la duración de la etapa de maduración donde difieren ambas variedades, produciéndose la recolección del ciclo 600 en torno al 15 de Septiembre (DoY=258) y el ciclo 700 casi un mes mas tarde (DoY=288).

El ciclo de remolacha inicia su crecimiento el día 23 de Abril (DoY=113), prolongándose hasta el día 30 de Junio (DoY=181) donde se alcanza la meseta, estado que se prolonga 38 días hasta el 7 de Agosto (DoY=219) donde comienza la maduración hasta la recolección en torno al 8 de Octubre (DoY=281).

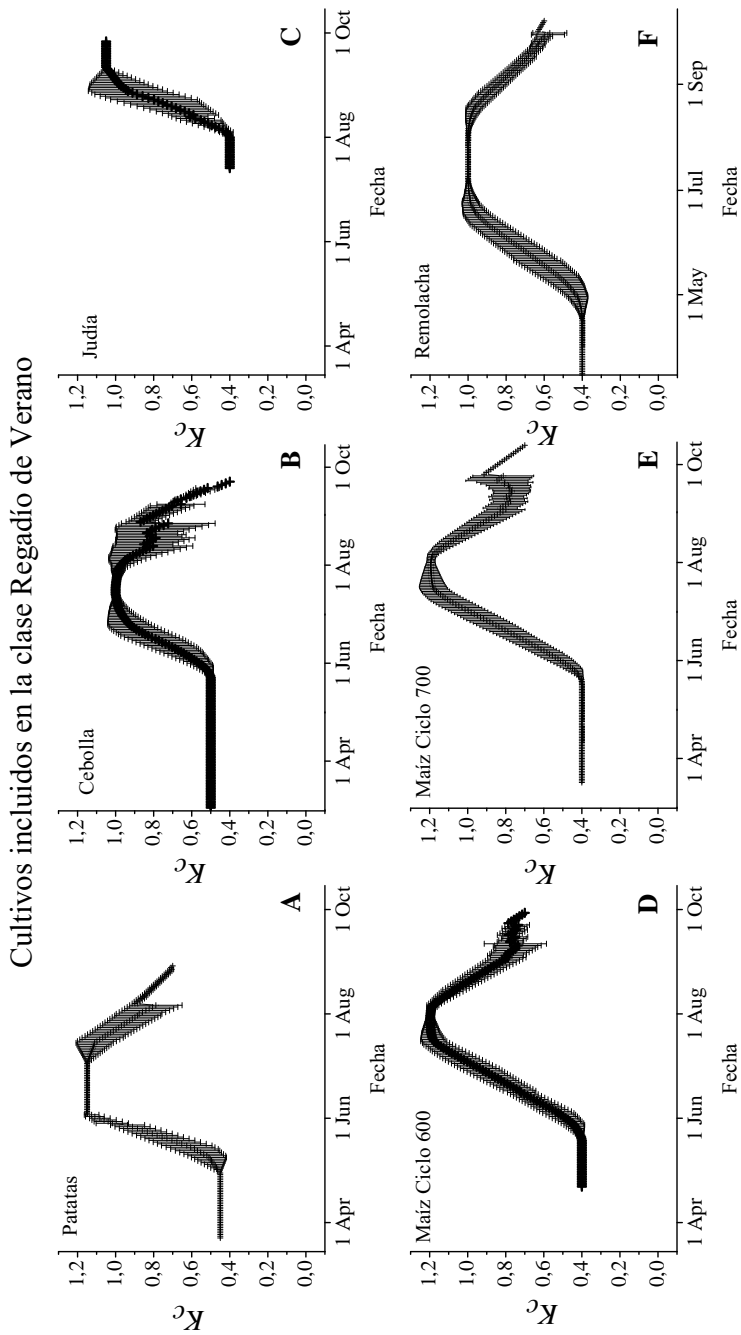


Figura F.2: Curvas de coeficiente de cultivo obtenidas a partir de los registros realizados en la campaña extensiva del ITAP para los cultivos mayoritarios que caen dentro de la clase regadío de verano.

BIBLIOGRAFÍA

- Aboukhaled, A., Alfaro, J. F. and Smith, M. (1986). *Los Lisímetros*, Vol. Serie Riego y Drenaje vol. 39, FAO, Roma.
- Ahmed, R. H. (1997). *Estimating Crop Water Requirements for a Command Area Using MultiSpectral Video Imagery and Geographic Information Systems*, PhD thesis, Utah State University, Logan, Utah.
- Allen, R. G. (1986). A Penman for all seasons, *Journal of Irrigation and Drainage*, **112**(4): 348–368.
- Allen, R. G. (1996). *Hydrology Handbook 2nd Edition*, Vol. 28 of *ASCE manuals and reports on engineering practice*, American Society of Civil Engineers, New York, Chapter: Evaporation and Transpiration, pp. 125–252.
- Allen, R. G. (2000a). REF-ET: Reference evapotranspiration calculation software, University of Idaho Research Extension Center paper.
URL: www.kimberly.uidaho.edu
- Allen, R. G. (2000b). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study, *Journal of Hydrology*, **229**: 27–41.
- Allen, R. G. (2004). Calculation of crop evapotranspiration: What is our accuracy?, Personal Communication.
- Allen, R. G. and Fisher, D. K. (1991). Direct load cell-based weighing lysimeter system, in R. G. Allen, T. A. Howell, W. O. Pruitt, I. A. Walter and M. E. Jensen (eds), *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, ASCE, Honolulu, Hawaii, pp. 114–124.

- Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L. and Burman, R. D. (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration, *Agronomy Journal*, **81**(4): 650–662.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage*, Vol. 56, Food and Agriculture Organization.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O. and Jensen, M. E. (1991a). Environmental requirements of lysimeters, *Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements*, ASCE, ISBN 0-87262-813-2, Honolulu, Hawaii, pp. 171–180.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O. and Jensen, M. E. (1991b). Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements., in R. G. Allen, T. A. Howell, W. O. Pruitt, I. A. Walter and M. E. Jensen (eds), *Environmental Requirements for Lysimeters*, Proc. of the ASCE Int. Symp. on Lysimetry, ASCE, New York, pp. 170–181.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., Howell, T. A., Ventura, F., Snyder, R., Itenfisu, D., Steduto, P., Berengena, J., Yrisarry, J. B., Smith, M., Pereira, L. S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I. and Elliott, R. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_o by the FAO56 penman-monteith method, *Agricultural Water Management*, **81**(1-2): 1–22.
- Allen, R. G., Smith, M., Pereira, L. S., Raes, D. and Wright, J. L. (2000). Revised FAO Procedures for Calculating Evapotranspiration-Irrigation and Drainage Paper No. 56 sith Testint in Idaho, *Proceedings (CD) of the ASCE Watershed Management Conference*, Ft. Collins, CO, p. 10 p.
- Amos, B. R., Stone, L. R. and Bark, L. D. (1989). Fraction of thermal units as the base for an evapotranspiration crop coefficient curve for corn, *Journal of Agronomy*, **81**: 713–717.
- Anderson, G. L., Hanson, J. D. and Haas, R. H. (1993). Evaluating Landsat Thematic derived vegetation index for estimating above ground biomass on semiarid rangelands, *Remote Sensing of Environment*, **45**: 165–175.
- ASCE (2002). The ASCE standardized reference evapotranspiration equation.
URL: www.kimberly.uidaho.edu/water/asceewri/main.pdf
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T. and Hatfield, J. L. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat, *Agronomy Journal*, **76**: 300–306.
- Asrar, G., Minessy, R. B. and Kanemasu, E. T. (1989). *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, John Wiley and Sons, Chichester, Chapter: Estimation of plant-canopy attributes from spectral reflectance measurements, pp. 252–292.

- Bailey, J. O. (1990). The potential value of remotely sensed data in the assesment of evapotranspiration and evaporation, *Remote sensing reviews*, **4**(2): 349–377.
- Baret, F. and Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assesment, *Remote Sensing of Environment*, **35**: 161–173.
- Baret, F., Guyot, G. and Mayor, D. J. (1989). Crop biomass evaluating using radiometric measurements, *Photogrammetria*, **43**: 241–256.
- Baret, F., Jacquemoud, S. and Hanocq, J. F. (1993). The soil line concept in remote sensing, *Remote Sensing Reviews*, **7**: 65–82.
- Bastiaanssen, W. G. M. (1998). *Remote Sensing in Water Resources Management: The State of the Art*, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
- Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D. J. and Makin, I. W. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications, *Agricultural Water Management*, **46**: 137–155.
- Bastiaanssen, W., Menenti, M., Feddes, R. A. and Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): I. formulation, *J. Hydrology*, **212-213**(1-4): 198–212.
- Bausch, W. C. (1993). Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn, *Remote Sensing of Environment*, **46**: 213–222.
- Bausch, W. C. (1995). Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn, *Agricultural Water Management*, **27**: 55–68.
- Bausch, W. C. and Neale, C. M. U. (1989). Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling, *Trans. ASA E*, **46**: 1901–1908.
- Bausch, W. C. and Neale, C. U. (1987). Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept, *Transactions American Soc. Agric. Engin.*, **30**(3): 703–709.
- Briggs, L. J. and Shantz, H. J. (1914). Relative water requirements of plants, *J Agr. Res.*, **3**: 1–65.
- Bronswijk, J. J. B., Hamminga, W. and Oostindie, K. (1995). Fieldscale solute transport in a heavy clay soil., *Water Resources Research*, **31**(3): 517–526.
- Bruinsma, J. (2003). World agriculture: towards 2015/2030. an FAO perspective., *Technical report*, FAO and Earthscan Publication, Rome, London.

- Brutsaert, W. H. (1982). *Evaporation into Atmosphere: Theory, History and Applications*, D. Reidel, Dordrecht.
- Buchleiter, G. W., Duke, H. R. and Heermann, D. F. (1988). User's guide for USDA-ARS irrigation scheduling program SCHED, USDA Agricultural Research Service,.
- Burrough, P. A. (1989). Matching spatial databases and quantitative models in land resource assessment., *Soil Manag.*, **5**: 3–8.
- Calera, A. (2000). *Seguimiento mediante Teledetección de la cubierta vegetal de los cultivos de secano y su relación con variables climáticas en Castilla-La Mancha*, PhD thesis, Facultad de Física. Universidad de Valencia, Valencia.
- Calera, A. (2003). Evolución de Superficies en Regadío mediante Teledetección en el ámbito del Acuífero Mancha Oriental. Años 1989, 1993 y 2003 (ERMOT 2003), *Technical report*, Sección de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha.
- Calera, A. (2005). *Agua y Agronomía*, MundiPrensa, Madrid, Chapter: La evapotranspiración: Concepto y metodología de cálculo.
- Calera, A. (2006). Datos experimentales en el seguimiento de alfalfa, Personal communication.
- Calera, A., Cuesta, A., Domínguez, A., González-Piqueras, J. and Fabeiro, C. (2001). Evaporación en suelo desnudo en condiciones de alta demanda atmosférica, in A. J. Pérez-Cueva, E. L. Baeza and J. T. Carmona (eds), *El Tiempo del Clima*, Asociación Española de Climatología, Serie A, n. 2, p. 15.
- Calera, A., González-Piqueras, J. and Meliá, J. (2004). Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale, *International Journal of Remote Sensing*, **25**(1): 97–109.
- Calera, A., Jochum, A. M., Cuesta, A., Montoro, A. and Fuster, P. L. (2005). Irrigation management from space: Towards user-friendly products, *Irrig. Drain. Systems*, **19**: 337–353.
- Calera, A., Martínez, C. and Meliá, J. (2001). A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley, *International Journal of Remote Sensing*, **22**: 3357–3362.
- Calera, A. and Rubio, E. (2006). Modelo operativo de estimación de recarga y evapotranspiración a escala regional (MORE) - Código: REN2003-02956.
- Camacho-de Coca, F. (2000). *La anisotropía de la reflectividad de las cubiertas vegetales: el efecto hot spot*, Master's thesis, Facultat de Física. Universitat de València.

- Camacho-de Coca, F. (2004). *La anisotropía de la BRDF en la estimación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal mediante teledetección*, PhD thesis, Facultat de Física. Universitat de València.
- Carlson, T.Ñ., Capehart, W. J. and Gillies, R. R. (1995). A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration, *Remote Sensing of Environment*, **54**: 161–167.
- Carlson, T.Ñ. and Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index, *Remote Sensing of Environment*, **62**: 241–252.
- Casanova, D., Epema, G. F. and Goudriaan, J. (1998). Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and lai, *Field Crops Research*, **55**(1-2): 83–92.
- Castillo, F. E. and Beltrán, L. R. (1981). *Estudio Agroclimático de Castilla-La Mancha*, Departamento de Agricultura. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.
- Ceccato, P., Flasse, S. and Grégoire, J.-M. (2002). Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications, *Remote Sensing of Environment*, **82**(2-3): 198–207.
- Cellier, P. and Brunet, Y. (1992). Flux-gradient relationships above tall plant canopies, *Agric. For. Meteorol.*, **58**: 93–117.
- Chander, G. and Markham, B. (2003). Revised Landsat-TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**(11): 2674–2677.
- Chen, X., Vierling, L. and Deering, D. (2005). A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time, *Remote Sensing of Environment*, **98**: 63–79.
- Choudhury, B. J. (1987). Relationships between vegetation indices, radiation, absorption and photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis, *Remote Sensing of Environment*, **22**: 209–233.
- Choudhury, B. J. (1989). *Theory and applications of optical remote sensing*, John Wiley, New York, Chapter: Estimating evaporation and carbon assimilation using infrared temperature data: Vistas in modeling, pp. 628–690.
- Choudhury, B. J., Ahmed, N. U., Idso, S. B., Reginato, R. J. and Daughtry, C. S. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations, *Remote Sensing of Environment*, **50**: 1–17.

- Choudhury, B. J. and Monteith, J. L. (1988). A four-layer model for heat budget of homogenous land surfaces, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **114**: 373–398.
- Clevers, J. G. P. V. and Verhoef, W. (1993). LAI estimation by means of the WDVI: a sensitivity analysis with a combined PROSPECT-SAIL model, *Remote Sensing Reviews*, **7**: 43–64.
- Clevers, J. G. P. W. (1988). The derivation of a weighted infrared-red vegetation index for estimation of LAI, *Vegetation Indices and their interpretation*, Nottingham.
- Clevers, J. G. P. W. (1989). The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture, *Remote Sensing of Environment*, **29**: 25–37.
- Clevers, J. G. P. W. (1997). A simplified approach for yield prediction of sugar beet based on optical remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, **61**: 221–228.
- Clevers, J. G. P. W., Büker, C., van Leeuwen, H. J. C. and Bouman, B. A. M. (1994). A framework for monitoring crop growth by combining directional and spectral remote sensing information, *Remote Sensing of Environment*, **50**: 161–170.
- Clevers, J. G. P. W. and Verhoef, W. (1996). LAI estimation by means of the WDVI: a sensitivity analysis with a combined POSPECT-SAIL model, *Remote Sensing Reviews*, **7**: 43–64.
- Cob, A. M. and Yrisarry, J. B. (2001). Efecto del viento sobre la precisión de un lisímetro de pesada en el valle medio del Ebro. Comunicación Personal.
- Courault, D., Seguin, B. and Olioso, A. (2003). Review to estimate evapotranspiration from remote sensing data: Some examples from the simplified relationship to the use of mesoscale atmospheric models, in ICID (ed.), *54th IEC Meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) - International Workshop on Use of Remote Sensing of Crop Evapotranspiration for Large Regions*, ICID, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), Montpellier, France, p. 11.
- C.S.I.C. (2004). Proyecto MIMAM.
URL: <http://irnas106.irnase.csic.es/mimam/>
- Cuenca, R. H. (1987). *Irrigation system design: an engineering approach*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- De Juan, A. and de Santa-Olalla, F. J. M. (1992). *Agronomía del Riego*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, Chapter: Las Funciones de Producción Versus Agua.

- de León-Llamazares, A. (1988). *Caracterización Agroclimática de la Provincia de ALBACETE*, Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid.
- de Santa-Olalla, F. J. M. (1994). *Agronomía del Riego*, Francisco J Martín de Santa Olalla, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, Chapter: El proyecto EFEDA, p. 254.
- de Santa-Olalla, F. J. M. (2001). La gestión del agua en el sistema mancha oriental, *Las Nuevas Tecnologías hacia la Agricultura Sostenible*, Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP), Albacete.
- Dirección General de Obras Hidráulicas (1988). Estudio de explotación de aguas subterráneas en el acuífero de la mancha oriental y su influencia sobre los caudales del río júcar. informe número 3 hidrología superficial., *Technical report*, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. (1977a). *Guidelines for predicting crop water requirements*, Vol. 24 of *FAO Irrigation and Drainage Paper*, Food and Agriculture Organization.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. (1977b). Las necesidades de agua de los cultivos, *Estudio FAO riego y Drenaje*, **24**.
- Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J. C. B., Kharrou, M. H., Khabba, S., Mougnot, B., Olioso, A., Rodriguez, J. C. and Simmoneaux, V. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices., *Agricultural Water Management*, **79**: 1–27.
- Dugas, W. A., Fritschen, L. J., Gay, L. W., Held, A. A., Matthias, A. D., Reicosky, D. C., Steduto, P. and Steiner, J. L. (1991). Bowen ratio, eddy correlation, and portable chamber measurements of sensible and latent flux over irrigated spring wheat., *Agric. For. Meteorol*, **56**: 1–20.
- D'Urso, G. (2001). *Simulation and Management of On-Demand Irrigation Systems. A Combined Agrohydrological and Remote Sensing Approach.*, PhD thesis, DLO-Staring Centrum of Wageningen, Netherlands.
- D'Urso, G. and Menenti, M. (1995). Mapping crop coefficients in irrigated areas from Landsat TM images., *in* Europto (ed.), *Proceed. European Symposium on Satellite Remote Sensing II*, SPIE, SPIE, Paris, p. 2585.
- Dyer, A. J. (1961). Measurement of evaporation and heat transfer in the lower atmosphere by an automatic eddy-correlation technique, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **87**: 401–412.

- Engman, E. T. (1992). *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill.
- Engman, E. T. (1995). Recent advances in remote sensing in hydrology, *Reviews on Geophysics*, **33**: Supplement.
URL: www.agu.org/revgeophys/engman00/engman00.html
- ESA (2005). Sparc data acquisition report, <http://www.nilu.no/pip/>.
- ESA (ed.) (2001). *Surface Radiometric Measurements at Barrax. Proceedings of the DAISEX Final Results Workshop, ESA SP-499*, ESTEC, The Netherlands.
- Estrela, T., Fidalgo, A., Fullana, J., Maeztu, J., Pérez, M. A. and Pujante, A. M. (2004). Júcar pilot river basin, provisional article 5. pursuant to the water framework directive.
URL: www.chj.es
- Fabeiro, C. (1995). *Análisis del crecimiento y del rendimiento de un cultivo de soja (Glycine max (L.) Merr.) sometido a diferentes tratamientos hídricos en la zona de los Llanos de Albacete*, PhD thesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete, Universidad de Castilla-La Mancha.
- FAO (2005). Key to the FAO Soil Units in the FAO/Unesco Soil Map of the World, www.fao.org/ag/agl/default.stm.
URL: www.fao.org/ag/agl/default.stm
- Fensholt, R., Sandholt, I. and Rasmussen, M. S. (2004). Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements, *Remote Sensing of Environment*, **91**(30): 490–507.
- Fuchs, M. and c. B. Tanner (1970). Error analysis of bowen ratios measured by differential psychrometry., *Agric. Meteorol.*, **7**: 329–334.
- Fuster, P. L. (2000). *Los Regadíos de la Mancha Oriental. Una quimera hecha realidad.*, Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP). Diputación de Albacete. Caja Castilla-La Mancha.
- Galvao, L. S., Vitorello, I. and Pizarro, M. A. (1999). An adequate band positioning to enhance NDVI contrasts among green vegetation, senescent biomass, and tropical soils, *International Journal of Remote Sensing*, **21**(9): 1953–1960.
- Gates, D. M. and Hanks, R. J. (1976). *Irrigation of Agricultural Lands*, America Society of Agronomy, Madison, WI, Chapter: Plant Factors Affecting Evapotranspiration, pp. 506–521.
- Gavilán, P. D. (2002). *La advección de calor sensible en el Valle Medio del Guadalquivir y su influencia en la medida y estimación de la evapotranspiración.*, PhD thesis, ETSIA - Universidad de Córdoba.

- Gilabert, M. A., Gandía, S. and Meliá, J. (1996). Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy, *Remote Sensing of Environment*, **55**: 11–20.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., García-Haro, F. J. and Meliá, J. (2002). A generalized soil-adjusted vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, **82**: 303–310.
- Gilabert, M. A. and Meliá, J. (1993). Solar angle and sky light effects on ground reflectance measurements, *Remote Sensing of Environment*, **45**: 281–293.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R. and don Rundquist (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction, *Remote Sensing of Environment*, **80**: 76–87.
- Gleick, P. H. (2000). Water: The potential consequences of climate variability and change for the water resources of the united states, *Technical report*, Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security, 654 13th Street.
- González-Piqueras, J. (1999). *Diseño de un nuevo índice de vegetación: GESAVI*, Master's thesis, Facultat de Física. Universitat de València, Valencia.
- González-Piqueras, J. (2006). Seguimiento de alfalfa durante el año 2004 mediante teledetección y radiometría de campo., Comunicación Personal.
- Gonzalez-Piqueras, J., Calera, A. and Gilabert, M. A. (2003). Estimation of crop coefficients by means of optimized vegetation indices for corn, in M. Owe, G. D'Urso, J. F. Moreno and A. Calera (eds), *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology V*, Vol. 5232, The International Society for Optical Engineering, SPIE, Barcelona, pp. 110–118.
- González-Piqueras, J., Rubio, E., Calera, A., Cuesta, A., Moratalla, A. and Gilabert, M. A. (2005). Seguimiento de la evapotranspiración mediante los coeficientes de cultivo desde teledetección. aplicación a maíz y trigo., in M. A. Pérez, A. G. Fernández and J. C. P. Darias (eds), *Teledetección. Avances en la Observación de la Tierra*, Asociación Española de Teledetección, pp. 81–84.
- Gower, S. T., Kucharik, C. J. and Norman, J. H. (1999). Direct and indirect estimation of Leaf Area Index, f_{APAR} , and net primary production of terrestrial ecosystems, *Remote Sensing of Environment*, **70**: 29–51.
- Grattan, S. R., Bowers, W., Dong, A., Snyder, R. L., Carrol, J. J. and George, W. (1998). New crop coefficients estimate ware use of vegetables, row crops, *California Agriculture*, **52**(1): 16–21.

- Grimes, D. W., Dickens, W. L. and Anderson, W. (1969). Functions for Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) production from irrigation and nitrogen fertilization variables. II. Yield Components and quality characteristics, *Agronomy Journal*, **61**: 773–776.
- Grupta, S. C. and Larson, W. E. (1979). Estimating soil and water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content and bulk density, *Water Resources*, **15**: 1633–1635.
- Hanks, R. J. and Rasmussen, V. P. (1983). Crop production and plant water stress, *Advances in Agronomy*, **35**: 193–215.
- Hansen, P. M. and Schjoerring, J. K. (2003). Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression, *Remote Sensing of Environment*, **86**(4): 542–553.
- Heilman (1982). Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance, *Agronomy Journal*, **74**: 967–971.
- Hicks, B. B. (1970). The measurement of atmospheric fluxes near the surface: a generalized approach, *J. Appl. Meteorol.*, **9**: 386–388.
- Hillel, D. and Guron, D. (1973). Relation between evapotranspiration rate and maize yield, *Water Resour. Res.*, **9**: 743–749.
- Holmes, J. W. (1984). Measuring evapotranspiration by hydrological models, *Agricultural Water Management*, **8**: 29–40.
- Howell, T. A., Evett, S. R., Tolk, J. A., Schneider, A. D. and Steiner, J. L. (1996). Evapotranspiration of Corn–southern high plains, in C. R. Camp, E. J. Adler and R. E. Yoder (eds), *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, San Antonio, TX, pp. 158–166.
- Howell, T. A., Schneider, A. D., Dusek, D. A., Marek, T. H. and Steiner, J. L. (1995). Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters, *Transactions of the ASAE*, **38**(4): 1019–1024.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, **25**: 195–309.
- Huete, A. R., Jackson, R. D. and Post, D. F. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds, *Remote Sensing of Environment*, **17**: 37–53.

- Humes, K. S., Kustas, W. P. and Moran, M. S. (1994). Use of remote sensing and reference site measurements to estimate instantaneous surface energy balance components over a semiarid rangeland watershed, *Water Resources Research*, **30**(5): 1363–1374.
- Hunsaker, D. J. (1999). Basal crop coefficients and water use for early maturity cotton., *Transactions of the ASAE*, **42**(4): 927–936.
- Hunsaker, D. J., Pinter, P. J., Barnes, E. M. and Kimball, B. A. (2003). Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index, *Irrigation Science*, **22**(2): 95–104.
- Hurtado, E., Caselles, V. and Artigao, M. (1995). Estimating corn evapotranspiration from NOAA-AVHRR data in the albacete area, *International Journal of Remote Sensing*, **10**: 2023–2037.
- Idso, S. B., Reginato, R. J. and Jackson, R. D. (1979). Calculation of evaporation during the three stages of soil drying, *Water Resources Research*, **15**(2): 487–488.
- Idso, S. B., Schmugge, T. J., Jackson, R. D. and Reginato, R. J. (1975). The utility of surface temperature measurements for remote sensing of soil water studies, *Journal of Geophysical Research*, **80**(21): 3044–3049.
- IGBP (2001). *Global Change and the Earth System: A planet under pressure*, Vol. 4 of *IGBP Science*.
- IGME (1979). Investigación hidrogeológica de la cuenca alta de los ríos Júcar y Segura, *Technical report*, IGME.
- IGME (1980). El Sistema Hidrogeológico de Albacete (Mancha Oriental), *Technical report*, IGME.
- IGME (1984). Cálculo de la explotación de agua de los recursos hídricos subterráneos en el área de la Manchuela (provincias de Albacete y Cuenca), *Technical report*, IGME.
- Instituto Nacional de Meteorología (2004). Valores climatológicos de la base aérea de los llanos (albacete). período 1971-2003, html.
URL: www.inm.es
- Jackson, R. D. (1983). Spectral indices in n-space, *Remote Sensing of Environment*, **13**: 409–421.
- Jackson, R. D., Idso, S. B. and Reginato, R. J. (1976). Calculation of evaporation during the transition from energy-limiting to soil-limiting phases using albedo data, *Wash. Agr. Exp. Stn. Circ.*, **386**: 14.

- Jackson, R. D., Jr, P. J. P., Reginato, R. J. and Idso, S. B. (1980). Hand-held radiometry.
URL: *www.uswcl.ars.ag.gov*
- Jackson, R. D., Reginato, R. J. and Idso, S. B. (1977). Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements, *Water Resources Research*, **13**: 651–656.
- Jackson, R. D. and Robinson, B. F. (1985). Field evaluation of the temperature stability of a multispectral radiometer, *Remote Sensing of Environment*, **17**: 103–108.
- Jacquemoud, S., Bacour, C., Poilvé, H. and Frangi, J. P. (2000). Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: direct and inverse mode., *Remote Sensing of Environment*, **74**(3): 471–481.
- Jensen, M. E. (1973). *Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements*, American Society of Civil Engineers, NY.
- Jensen, M. E., Burnam, R. D. and Allen, R. G. (1990). *Evaporation and Irrigation Water Requirements*, Vol. 70, American Society of Civil Engineers, New York.
- Jensen, M. E., Robb, D. C.Ñ. and Franzoy, C. E. (1970). Scheduling irrigations using climate-soil estimating soil moisture depletion from climate-crop-soil data, *Journal of Irrigation and Drainage Division*, **96**: 25–28.
- Jochum, A. M., Calera, A. and co authors (2006). Operational space assisted irrigation advisory services: Overview and lessons learned from the demeter project., *Proceedings International Conference on Earth Observation for vegetation monitoring and water management*, American Institute of Physics, Naples, 9-11 November, pp. 1–13.
- Kang, S., Gu, B., Du, T. and Zhang, J. (2003). Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region, *Agricultural Water Management*, **59**: 239–254.
- Kemphorne, O. and Allmarras, R. R. (1986). *Methods of Soil Analysis*, ASA and ASSI. Madison., WI, Chapter: Errors and variability of observations, pp. 1–31.
- Kern, J. S. (1995). Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties, *Soil Sci. Am. J.*, **59**: 1134–1141.
- Kimes, D. S. (1983). Dynamics of directional reflectance factor distribution for vegetation canopies, *Applied Optics*, pp. 1364–1372.

- Kimes, D. S. and Kirchner, J. A. (1982). Radiative transfer model for heterogeneous 3-d scenes, *Applied Optics*, **21**: 4119–4129.
- Kimes, D. S., Knyazikhin, Y., Privette, J. L., Abuelgasim, A. A. and Gao, F. (2000). Inversion methods for physically-based models, *Remote Sensing Reviews*, **18**: 381–439.
- Kimura, R., Okadab, S., Miura, H. and Kamichika, M. (2004). Relationships among the leaf area index, moisture availability, and spectral reflectance in an upland rice field, *Agricultural Water Management*, **69**: 83–100.
- Kite, B. W. and Droogers, P. (2000). Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data: A case study from western Turkey, *Journal of Hydrology*, **209**: 3–18.
- Kjelgaard, J. F., Stöckle, C. O., Black, R. A. and Campbell, G. S. (1997). Measuring sap flow with the heat balance approach using constant and variable heat inputs, *Agric. For. Meteorol.*, **85**: 239–250.
- Klocke, N. L., Heermann, D. F. and Duke, H. R. (1985). Measurements of evaporation and transpiration with lysimeters, *Trans. ASAE*, **28**(1): 183–189.
- Kumar, M. and Monteith, J. L. (1981). *Plant and the daylight spectrum*, Academic Press, London, Chapter: Remote Sensing of crop growth, pp. 133–144.
- Kustas, K. P., Perry, E. M., Doraiswamy, P. C. and Moran, M. S. (1994). Using satellite remote sensing to extrapolate evapotranspiration estimates in time and space over a simarid rangeland basin, *Remote Sensing of Environment*, **49**: 275–286.
- Kustas, W. P., Daughtry, C. S. T. and van Oevelen, P. J. (1993). Analytical treatment of the relationships between soil heat flux/net radiation ratio and vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, **46**: 319–330.
- Liu, C., Zhang, X. and Zhang, Y. (2002). Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter, *Agricultural and Forest Meteorology*, **111**: 109–120.
- Llamas Madurga, M. R. and García-Rodríguez, M. (1995). Estudio hidrogeológico para la delimitación oriental del acuífero de la Llanura Manchega., *Technical report*, Bibl. ITAP.
- López-Urrea, R. (2004). *Evapotranspiración de Referencia: Métodos de Cálculo y de Medición Directa en una estación Lisimétrica en ambientes semiáridos*, PhD thesis, Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete, Campus de Albacete.

- Lourence, F. J. and Moore, R. (1991). Prefabricated weighing lysimeter for remote research stations, *in* R. G. Allen, T. A. Howell, W. O. Pruitt, I. Walter and M. E. Jensen (eds), *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, Proceedings of the International Symposium on Lysimetry, ASCE, New York.
- Maidment, D. R. (ed.) (1992). *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill.
- Maisongrande, P. and Lobo, A. (2004). Estimation of crop water requirements in the Midi-Pyrénées. Presentation and interim report, Barcelona March 17th, ER.
- Malet, P., Pecaut, F. and Bruchou, C. (1997). Beware of using cumulated variables in growth and development models, *Agricultural and Forest Meteorology*, **88**: 137–143.
- Martin de Santa Olalla, F. J. and de Juan, J. A. (1993). *Agronomía del Riego*, Mundi-Prensa, Madrid, Chapter: La programación de riegos, pp. 549–610.
- Martinez, B. (2002). *Método operativo para aplicar el GESAVI a imágenes de satélite: Parametrización del factor corrector del suelo*, Master's thesis, Facultat de Física, Universitat de València, Valencia.
- Martonchik, J. V., Bruegge, C. J. and Strahler, A. (2000). A review of reflectance nomenclature used in remote sensing, *Remote Sensing Reviews*, **19**: 9–20.
- Mastrorilli, M., Katerji, N., Rana, G. and Nouna, B. B. (1998). Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions, *Agric. For. Meteorol.*, **90**: 81–89.
- McCluney, R. W. (1995). *Introduction to Radiometry and Photometry.*, Ed. Artech House., Boston.
- Menenti, M., Jia, L. and Su, Z. (2003). On SEBI-SEBS validation in France, Italy, Spain, USA and China, *in* ICID (ed.), *54th IEC Meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) - International Workshop on Use of Remote Sensing of Crop Evapotranspiration for Large Regions*, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), International Commission on Irrigation and Drainage, Montpellier, France, p. 10.
- Milton, E. J. (1987). Principles of field spectroscopy, *International Journal of Remote Sensing*, **8**: 3–14.
- Milton, M. J., Rolling, E. M. and Emery, D. R. (1995). *Advances in Field Spectroscopy.*, John Wiley and Sons.
- Ministerio Medio Ambiente (2000a). Libro Blanco del Agua.
URL: www.mma.es

- Ministerio Medio Ambiente (2000b). Libro Blanco del Agua en España. Documento de Síntesis.
URL: *www.mma.es*
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and the Environment, *The state and movement of water in living organisms*, Society of Experimental Biology, pp. 205–234.
- Monteith, J. L. (1976). *Vegetation and the Atmosphere*, Academic Press.
- Monteith, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain, *Transactions of the Royal Society London*, **281**(B): 277–294.
- Monteith, J. L. and Unsworth, M. S. (1990). *Principles of Environmental Physics*, 2 edn, Edward Arnold, London.
- Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y. and Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, **49**(3): 246–263.
- Moran, M. S., Inoue, Y. and Barnes, E. M. (1997). Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management, *Remote Sensing of Environment*, **61**: 319–346.
- Moran, M. S. and Jackson, R. D. (1991). Assessing the spatial distribution of evapotranspiration using remotely sensed inputs, *J. Environm. Qual.*, **20**: 725–737.
- Neale, C. M., Bausch, W. C. and Heerman, D. F. (1989). Development of reflectance-based crop coefficients for corn, *Transactions of the ASAE*, **32**(6): 1891–1899.
- Neale, C. M. U., Ahmed, R. H., Moran, M. S., Jr., P. J. P., Qi, J. and Clarke, T. R. (1996). Estimating cotton seasonal evapotranspiration using canopy reflectance, *Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, San Antonio, Texas.
- Neale, C. M. U., Jayanthi, H. and Wright, J. L. (2003). Crop and irrigation water management using high resolution airborne remote sensing, in ICID (ed.), *54th IEC Meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) - International Workshop on Use of Remote Sensing of Crop Evapotranspiration for Large Regions*, ICID, International Commission on Irrigation and Drainage, Montpellier, France, p. 12.
- Nicodemus, F. E., Richmond, J. C., Hsia, J. J., Ginsberg, I. W. and Limperis, F. (1977). Geometrical considerations and nomenclature for reflectance, *Natural Bureau of Standards*, **Monograph 160**.

- Olioso, A., Chauki, H., Courault, D. and Wigneron, J. P. (1999). Estimation of evapotranspiration and photosynthesis by assimilation of remote sensing data in SVAT models, *Remote Sensing of Environment*, **68**: 341–356.
- Olioso, A., Inoue, Y., Ortega-Farias, S., Demarty, J., Wigneron, J.-P., Braud, I., Jacob, F., Lecharpentier, P., Ottele, C., Calvet, J.-C. and Brisson, N. (2003). Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models, in ICID (ed.), *54th IEC Meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) - International Workshop on Use of Remote Sensing of Crop Evapotranspiration for Large Regions*, ICID, International Commission on Irrigation and Drainage, Montpellier, France, p. 15.
- Pearson, R. C. and Miller, L. D. (1972). Remote Mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the Shortgrass Prairie Pawnee National Grasslands, Colorado, *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment II*, pp. 1355–1379.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass, in R. Soc. London (ed.), *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. A193.
- Penman, H. L., Angus, D. E. and Bavel, C. H. M. (1967). *Microclimatic Factors Affecting Evaporation and Transpiration. Irrigation of Agricultural Lands*, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 483–505.
- Perrier, A., Archer, P. and de Pablos, A. B. (1974). Etude de l'évapotranspiration réelle et maximale de différentes cultures: dispositifs et mesures, *Ann. Agr.*, **25**: 697–731.
- Postel, S. (1993). *Water in crisis*, Oxford University Press, Chapter: Water and agriculture, pp. 56–66.
- Price, J. C. and Bausch, W. C. (1995). Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data, *Remote Sensing of Environment*, **52**: 55–65.
- Qi, J., Chehbouni, A. L., Huete, A. R., Kerr, Y. H. and Soroshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI), *Remote Sensing of Environment*, **48**: 119–126.
- Rana, G. and Katerji, N. (1996). Evapotranspiration measurement for tall plant canopies: the sweet sorghum case, *Theor. Appl. Climatol.*, **54**(3-4): 187–200.
- Rana, G. and Katerji, N. (1998). A measurement based sensitivity analysis of penman–monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status., *Theor. Appl. Climatol.*, **60**: 141–149.

- Rana, G. and Katerji, N. (2000). Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review, *European Journal of Agronomy*, **13**: 125–153.
- Rana, G., Katerji, N., Mastrorilli, M. and Moujabber, M. E. (1994). Evapotranspiration and canopy resistance of grass in a mediterranean region., *Theor. Appl. Climatol.*, **1-2**(50): 61–71.
- Rana, G., Losavio, N., Mastrorilli, M. and Scarascia, M. E. V. (1990). Crop evapotranspiration measured by two energy balance methods under mediterranean climate, *Acta Horticolae*, **278**: 517–524.
- Rawls, W. L., Brakensiek, D. L. and Saxton, K. E. (1982). Estimation of soil water properties, *Transactions of the ASAE*, **24**: 1316–1320.
- Reicosky, D. C. (1985). *Advances in Evapotranspiration*, ASAE, Chicago, IL, Chapter: Advances in evapotranspiration measured using portable field chambers, pp. 79–86.
- Richardson, A. J. and Wiegand, C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **43**: 1541–1552.
- Richtie, J. T. and Burnett, E. (1971). Dryland Evaporative Flux in a Subhumid Climate: II. Plant Influences, *Journal of Agronomy*, **63**: 75–89.
- Rijtema, P. E. (1965). An analysis of actual evapotranspiration, *Agric. Res. Rep.*, **659**: 107 pp.
- Ritchie, J. T. (1983). *Limitations to efficient water use in crop production*, American Society of Agronomy, Chapter: Efficient water use in crop production: discussion of the generality of relations between biomass production and evapotranspiration, pp. 29–44.
- Romero, M. G. (2003). *Daily Evapotranspiration Estimation by Means of Evaporative Fraction and Reference Evapotranspiration Fraction*, PhD thesis, Utah State University, Logan, USA.
- Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F. (1996). Optimization of soil adjusted vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, **55**: 05–107.
- Rose, C. W. and Sharma, M. L. (1984). Summary and recommendations on the workshop of the evapotranspiration of the plant communities, *Agricultural and Water Management*, **8**: 325–342.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. and Verma, S. (1983). *Microclimate: The biological environment*, Wiley, New York.

- Rouse, J. W., Haas, R. W., Shell, J. A., Deering, D. W. and Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation*, Vol. Final Report, NASA/GSFC, Greenbelt. USA.
- Rubio, E. (2006). Precipitaciones a lo largo del año 2003 dentro del acuífero 08.29 calculadas en el proyecto MORE, Comunicación Personal.
- Rubio, E., Calera, A., Colin, J., DÚrso, G., González-Piqueras, J., Jochum, A., Trezza, R., M.Menenti, Allen, R., Tasumi, M., C.Kelly and F.Vuolo (2006). Golden Day Comparison Of Methods To Retrieve ET (Kc-NDVI, Kc-Analytical, MSSEBS, METRIC)., (*submitted*), .
- Ruíz, D. M., Urrea, R. L., Rodríguez, A. M., Córcoles, H. L. and Fuster, P. L. (2003). Estación de lisimetría. características técnicas.
URL: *www.itap.es*
- Sammis, T. W., Mapel, C. L., Lugg, D. G., Lansford, R. R. and McGucking, J. T. (1985). Evapotranspiration crop coefficients predicted using growing degree days, *Transactions of ASAE*, **28**(3): 773–780.
- Sanz, D. (2005). *Contribución a la caracterización geométrica de las unidades hidrogeológicas que integran el sistema de acuíferos de la Mancha Oriental*, PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid.
- Schaepman-Strub, G., Schaepman, M. E., Painter, T. H., Dangel, S. and Martonchik, J. V. (2006). Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies, *Remote Sensing of Environment*, **103**: 27–42.
- Schmugge, T. J., Kustas, W. P., Ritchie, J. C., Jackson, T. J. and Rango, A. (2002). Remote sensing in hydrology, *Adv. Water Resourc.*, **25**((8-12)): 1367–1385.
- Seen, D. L., Mougin, E., Rambal, S., Gaston, A. and Hiernaux, P. (1995). A regional sahelian grassland model to be coupled with multispectral satellite data: II toward the control of its simulation by remotely sensed indices, *Remote Sensing of Environment*, **52**: 194–206.
- Seguin, B., Assad, E., Fretaud, J. P., Imbernon, J., Kerr, Y. and Lagouarde, J. P. (1989). Use of meteorological satellites for water balance monitoring in sahelian regions, *International Journal of Remote Sensing*, **10**(6): 1101–1117.
- Seguin, B., Courault, D. and Guérif, M. (1994). Surface temperature and evapotranspiration: Application of local scale methods to regional scales using satellite data, *Remote Sensing of Environment*, **49**: 287–295.

- Sellers, P. J. (1987). Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. ii. the role of biophysics in the linearity of their interdependence, *Remote Sensing of Environment*, **21**: 143–183.
- Sellers, P. J., and Randall, R. E. D., Betts, A. K., Hall, F. G., Berry, J. A. and et al., G. J. C. (1997). Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere, *Science*, **275**: 502–509.
- Serrano, L., Filella, I. and Peñuelas, J. (2000). Remote sensing of biomass and yield of winter wheat, *Crop Science*, **40**: 723–731.
- Shiklomanov, I. A. (2000). Appraisal and assessment of world water resources, *Water International*, **25**(1): 11–32.
- Shuttleworth, W. J. (1991). *Land surface evaporation, measurement and parameterization*, Springer-Verlag, New York, Chapter: Evaporation models in hydrology, pp. 93–120.
- Siebert, S., Döll, P., Feick, S. and Hoogeveen, J. (2005). Global map of irrigated areas version 3.0.
URL: www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/main/index.stm
- Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J. M., Frenken, K. and Feick, S. (2005). Development and validation of the global map of irrigation areas, *Hydrology and Earth System Sciences*, **9**: 535–547.
- Silva, L. R. (1978). *Radiation and Instrumentation in Remote Sensing. Remote Sensing: The Quantitative*, Mc Graw-Hill, New York.
- Sinclair, T. R., Allen, L. H. and Lemon, E. R. (1975). An analysis of errors in the calculation of energy flux densities above vegetation by a bowen-ratio profile method., *Boundary-Layer Meteorology*, **8**: 129–139.
- Smith, M. (1991). Report on the Expert Consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements, *Technical report*, May 28-31,1990, Roma.
- Smith, M. (1992). *CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management*, FAO, Rome.
- Snyder, W. C. (1998). Reciprocity of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) in measurements and models of structured surfaces, *International Journal of Remote Sensing*, **36**(2): 685–690.
- Soil Survey Staff (1998). *Keys to Soil Taxonomy*, USDA, Washington, USA.

- Stegman, E. C., Musick, J. T. and Stewart, J. L. (1980). *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*, Jensen, M E, ASAE, St. Joseph, MI, Chapter: Irrigation Water Management, pp. 67–74.
- Steven, M. D., Malthus, T. J., Baretc, F., Xud, H. and Choppinge, M. J. (2003). Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems, *Remote Sensing of Environment*, **88**: 412–422.
- Stewart, J. B. (1989). *Estimation of Areal Evapotranspiration*, Vol. 117, IAHS Publication, Chapter: On the use of the Penman-Monteith equation for determining areal evapotranspiration.
- Stewart, J. I. and Hagan, R. M. (1969). Predicting effects of water shortage on crop yield, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 59, Journal of Irrigation and Drainage Division, pp. 91–104.
- Stewart, J. I. and Hagan, R. M. (1973). Functions to predict optimal irrigation programs, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 99, Journal of Irrigation and Drainage Division, pp. 241–439.
- Strub, G. M., Shapeman, M., Knyazikhin, Y. and Itten, K. (2003). Evaluation of spectrodirectional alfalfa canopy data acquired during the DAISEX'99 campaign, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**: 1034–1041.
- Su, Z. (2002). The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes, *Hydrology and Earth System Sciences*, **6**(1): 85–99.
- Tanner, C. B. and Jury, W. A. (1976). Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover, *Agronomy Journal*, **68**: 239–243.
- Tasumi, M., Allen, R. G., Trezza, R. and Wright, J. L. (2006). Use of SEBAL to assess the band width of crop coefficient curves in Idaho, *ASCE J. Irrigation and Drainage Engineering*, (**In press**).
- Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R. G. and Wright, J. L. (2003). U.S. validation tests on the SEBAL model for evapotranspiration via satellite, *in ICID (ed.), 54th IEC Meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) - International Workshop on Use of Remote Sensing of Crop Evapotranspiration for Large Regions*, ICID, International Commission on Irrigation and Drainage, Montpellier, France, p. 14.
- Thenkabail, P. S., Ward, A. D. and Lyon, J. C. (1994). Landsat-5 Thematic Mapper models of soybean and corn crop characteristics, *International Journal of Remote Sensing*, **15**(1): 49–61.

- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, **8**: 127–150.
- Tucker, C. J., Elgin Jr., J. H., McMurtrey III, J. E. and Fan, C. J. (1979). Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data, *Remote Sensing of Environment*, **8**: 237–248.
- Tucker, C. J., Holben, B.Ñ., Elgin, J. H. J. and McMurtrey, J. E. I. (1981). Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat, *Remote Sensing of Environment*, **11**: 171–189.
- Tyagi, N. K., Sharma, D. K. and Luthra, S. K. (2000). Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter, *Agricultural Water Management*, **45**: 41–54.
- van Wijk, W. R. and de Vries, D. A. (1954). Evapotranspiration, *Netherlands J of Agr. Sci.*, **2**: 105–119.
- Veneman, A. M., Jen, J. J. and Bosecker, R. R. (2004). 2002 census of agriculture-farm and ranch irrigation survey (2003), *Technical report*, United States Department of Agriculture (USDA), National Agricultural Statistics Survey (NASS), <http://www.usda.gov/nass/>.
- Verhoef, W. and Bach, H. (2003). Remote sensing data assimilation using coupled radiative transfer models, *Chem. Earth A/B/C*, **28**(1-3): 2–13.
- Villalobos, F. J. and Fereres, E. (1990). Evaporation measurements beneath corn, cotton and sunflower canopies, *Agronomy Journal*, **82**: 1153–1159.
- Villalobos, F. J., Mateos, L., Orgaz, F. and Fereres, E. (2002). *Bases y Tecnologías de la Producción Agrícola*, Mundi-Prensa, Madrid, 496 pp.
- Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J. and Granier, A. (2005). On the relationship of NDVI with Leaf Area Index in a deciduous forest site, *Remote Sensing of Environment*, **94**(30): 244–255.
- Welles, J. M. and Norman, J. M. (1991). Instrument for indirect measurement of canopy architecture, *Agronomy Journal*, **83**: 818–825.
- White, M. A., Asner, G. P., Nemani, R. R., Privette, J. L. and Running, S. (2000). Measuring fractional cover and leaf area index in arid ecosystems. digital camera, radiation transmittance and laser altimetry methods, *Remote Sensing of Environment*, **74**: 45–57.
- Wiegand, C. L., Maas, S. J., Aase, J. K., Hatfield, J. L., P. J. Pinter, J., Jackson, R. D., Kanemasu, E. T. and Lapitan, R. L. (1992). Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat, *Remote Sensing of Environment*, **42**(1): 1–21.

- Wiegand, C. L., Maas, S. J. and Aese, J. K. (1990). Multisite analysis of spectral-biophysical data for wheat, *Remote Sensing of Environment*, **42**: 1–21.
- Wiegand, C. L. and Richardson, A. J. (1990). Use of Spectral Vegetation Indices to Infer Leaf Area, Evapotranspiration and Yield: I. Rationale, *Agronomy Journal*, **82**: 623–629.
- Wiegand, C. L., Richardson, A. J., Escobar, D. E. and Gerbermann, A. H. (1991). Vegetation indices on crop assessments, *Remote Sensing of Environment*, **35**: 105–119.
- Wieringa, J. (1993). Representative roughness parameters for homogeneous terrain, *Boundary-Layer Meteorol.*, **63**(4): 323–363.
- Wright, J. L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients, *Journal of Irrigation and Drainage*, **108**: 57–74.
- Wyatt, J. L. (1978). *Radiometric Calibration*, Academic Press, London.
- Yang, L., Wylie, B. K., Tieszen, L. L. and Reed, B. C. (1998). An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. Northern and Central Great Plains, *Remote Sensing of Environment*, **65**: 25–37.
- Zhao, C., Nan, Z. and Chen, G. (2005). Methods for estimating irrigation needs of spring wheat in the middle heihe basin, china, *Agricultural Water Management*, **75**(1): 54–70.

Escrito en L^AT_EX.

En el seguimiento de las necesidades hídricas de las cubiertas vegetales, se utiliza en, prácticamente todo el mundo, la metodología K_c-ET_o (conocida como metodología *en dos pasos*), donde K_c es el coeficiente de cultivo y ET_o la evapotranspiración de referencia.

Desde la perspectiva operacional, la determinación desde satélite del coeficiente de cultivo K_c permite hacer una estimación continua de la evapotranspiración y, por tanto, una previsión de las necesidades hídricas de la cubierta vegetal. La teledetección permite determinar dicho coeficiente sobre grandes áreas. Teniendo en cuenta estos precedentes, esta tesis es una continuación de los trabajos previos existentes en la bibliografía sobre la relación del coeficiente de transpiración con los índices de vegetación.

Se plantea, en este contexto, la estimación de la evapotranspiración de cubierta (evaporación de suelo y transpiración de vegetación) a partir de la relación entre dichos índices espectrales y el coeficiente de cultivo. Esta línea viene impulsada por la manifiesta necesidad de los usuarios (servicios de asesoramiento de riegos, modelos hidrológicos, sistemas de gestión ambiental,...) de una herramienta operacional de estas características.

El objetivo general del trabajo es analizar y desarrollar la metodología que permite obtener el coeficiente de cultivo a partir de la respuesta espectral de la cubierta vegetal utilizando índices de vegetación y estimar así su evapotranspiración.