

**C.I.H.E.A.M.**

**Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes**

**I.A.M.Z.**

**Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza**

**Mejora de la productividad del agua en comunidades de riego por aspersión**

**Ahmed SKHIRI**

Este trabajo ha sido realizado en el departamento de Suelos y Riegos del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria C.I.T.A. de la Diputación General de Aragón D.G.A. bajo la tutoría de la Doctora **Nery ZAPATA** (Departamento de Suelos y Riegos (C.I.T.A.-D.G.A.)), [vzapata@aragon.es](mailto:vzapata@aragon.es)) y el Doctor **Enrique PLAYAN JUBILAR** (Departamento de Genética y Producción Vegetal (E.E.A.D.-C.S.I.C.)), [playan@eead.csic.es](mailto:playan@eead.csic.es)).



**A todos aquellos que han hecho posible este trabajo**

**À tous ceux qui ont fait possible ce travail**

**For all those which did possible this work**



## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría empezar esta memoria recordando a todos aquellos que han hecho que este trabajo sea posible. Reciban mi más sincero agradecimiento:

**Dra. Nery ZAPATA**, directora de esta tesis, de cuyas enseñanzas y ejemplo en el trabajo he adquirido unos conocimientos científicos, técnicos y humanos fundamentales para mi desarrollo profesional y personal.

**Dr. Enrique PLAYAN JUBILAR**, director de esta tesis, por la magnífica orientación y apoyo cuando ha sido necesario. Su rigor y su disponibilidad me han permitido terminar este trabajo a tiempo y con mucho aprovechamiento.

A todos los miembros del Departamento de Suelos y Riegos y sobre todo a Miguel Izquierdo, Daniel y Jesús por su ayuda en el trabajo de campo.

Al personal de laboratorio del Departamento de Suelos y Riegos por su ayuda en la gran parte de los análisis.

A la comunidad de regantes de Montesnegros cuya ayuda ha sido decisiva en el desarrollo de esta tesis, quiero recordar también la ayuda que me ofreció Carmelo el gestor de la comunidad de regantes de Montesnegros.

A mi hermana Latifa y el resto de mi familia por su apoyo incondicional y por supuesto a mí mujer Maroua por su confianza y paciencia infinitas.

A mis amigos y compañeros de trabajo, Kadri, Said, Nadhem, Hady, Sandra, Manuela, Elena, Montse, Nacho, Raúl, Julio, Hela, Raquel, Mohamed, Ali, Jesús, Rami...con los que he compartido penas y alegrías.

Al personal del Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza por las ayudas que me ofrecieron a lo largo de mi estancia en España. Un agradecimiento especial para Antonio del Valle por su disponibilidad continúa para ayudarme.



***Mejora de la productividad del agua en comunidades de riego por aspersión.***

**Realizado por:** Ahmed SKHIRI

**Bajo la dirección de:** Dra. Nery ZAPATA y Dr. Enrique PLAYAN JUBILAR

En todos los sistemas de riego, un adecuado diseño y manejo permiten hacer un uso más eficiente del agua, maximizar la producción y limitar las pérdidas de agua. La mejora de la productividad del agua resulta imprescindible para responder a la mayor demanda de alimentos derivada del incremento de la población mundial. Para conseguirlo es necesario modernizar los regadíos mediante actuaciones tanto sobre las infraestructuras como sobre la gestión. Esto contribuirá a la sostenibilidad económica, social y medioambiental de las zonas regables.

En este trabajo se pretende contribuir a la mejora de la productividad del agua en la comunidad de regantes de Montesnegros (CRM., NE España) mediante el análisis de la gestión de sus riegos. Esta comunidad se riega por aspersión desde 1998 y abarca una superficie de 3.475 ha. En el primer apartado de este trabajo se ha caracterizado de forma global toda la superficie de la Comunidad, sus cultivos, sus infraestructuras y los consumos de agua en la campaña 2004 (mediante la base de datos de gestión ADOR). Se ha seleccionado una zona representativa de la CRM, la Zona de Simulación, en la que se ha realizado un estudio pormenorizado sobre las infraestructuras de red y su relación con la estructura parcelaria, los suelos y los cultivos (superficies, costes de producción, ingresos). Además, se ha calibrado y validado el material de riego más utilizado en la zona para su simulación con el modelo ADOR-Aspersión (Playán y col., 2006). Por otro lado, se ha desarrollado una herramienta de simulación “ADOR-Simulación” encaminada a gestionar el riego por aspersión de una zona regable. Esta herramienta se ha utilizado para evaluar el efecto de diferentes estrategias de control del riego en la productividad del agua para diferentes cultivos y diferentes tamaños de la red de riego. Finalmente, se ha utilizado el modelo para simular la productividad del agua de una zona regable bajo diferentes estrategias de gestión. Las distintas estrategias se

han comparado en términos de productividad del agua en margen neto. Asimismo, se han comparado los consumos reales con los consumos simulados.

Los cultivos mayoritarios en la CRM son el maíz (41 %) y la alfalfa (48 %). Los consumos medios en la zona se sitúan en  $9.300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  para el maíz y  $9.550 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  para la alfalfa. Las características técnicas de los amueblamientos en parcela de las coberturas totales (sistema mayoritario en la zona) han resultado muy homogéneas. Los marcos triangulares  $18 \times 18 \text{ m}$ , el aspersor VYR 35 de doble boquilla colocado a 2 m sobre el suelo y la presión de trabajo de 350 kPa, son las características técnicas más comunes.

La calibración y validación del modelo ADOR-Aspersión para el material de riego VYR 35 trabajando a 350 kPa equipado con doble boquilla  $4,8 \text{ mm} + 2,4 \text{ mm}$ , ha dado lugar a parámetros de calibración que proporcionan resultados de notable fiabilidad. La predicción del *CU* presenta errores entre 1 y 2 %. En cuanto a los errores en la determinación de la pluviometría, el RMSE se sitúa por debajo de  $2 \text{ mm h}^{-1}$ . Las mejores predicciones del modelo (mejores estadísticos) se dan para velocidades del viento intermedias entre  $2,5$  y  $4 \text{ m s}^{-1}$ .

El modelo ADOR-Aspersión calibrado y validado se ha utilizado para analizar el efecto de la orientación de las líneas porta-aspersores en el *CU* de una cobertura sometida a la acción del viento. Para el caso de coberturas triangulares, se advierten dos ejes de uniformidad baja, uno a  $180^\circ$  y el otro a  $360^\circ$ . Esto quiere decir que cuando el viento sopla en una dirección paralela a la línea de aspersores, el coeficiente de uniformidad se ve más afectado y alcanza valores menores que en otras direcciones. Además, se advierten otros ejes de uniformidad baja cada  $60^\circ$  (lo que corresponde con la simetría de las posibles líneas de aspersión que pueden dibujarse en los marcos triangulares). La orientación de las líneas de aspersores buscando ciertos ángulos respecto al viento dominante podría ayudar a mejorar la uniformidad.

El modelo desarrollado en este trabajo ADOR-Simulación está formado por cuatro módulos, uno de simulación del riego por aspersión en parcela (ADOR-Aspersión), otro de balance hídrico y crecimiento de cultivos (ADOR-Cultivo), otro de estructura de la red y su relación con el parcelario (ADOR-Red) y por último, un módulo que analiza la información y decide el momento del riego (ADOR-Decisión).

Los dos primeros módulos ya se habían desarrollado en trabajos anteriores del grupo de investigación, el tercero (ADOR-Red) es una adaptación de los datos que proporciona el programa de gestión de Comunidades de Regantes (llamado ADOR), y el último, es el que se ha desarrollado en este trabajo. Por lo tanto, la principal novedad de esta herramienta radica en la conexión de estos módulos y en la definición de ADOR-Decisión.

ADOR-Decisión gestiona los resultados del resto de módulos y toma decisiones de si se riega o no en base a una serie de parámetros. En este trabajo se han identificado dos parámetros que de forma conjunta mejor determinan la estrategia de control del riego: Días de Estrés Equivalente (*DEE*) y Eficiencia Potencial del cuarto bajo (*EPcb*). La caracterización de los parámetros que determinan la estrategia óptima de control del riego se ha realizado en una parcela tipo de la CRM para diferentes cultivos y diferentes tamaños de hidrante (caudales ficticios continuos). Los análisis realizados en términos de productividad del agua en margen neto han puesto de manifiesto que tanto el cultivo como el tamaño del hidrante determinan el valor óptimo de *DEE* y *EPcb*. Así, la estrategia de riego que maximiza la productividad del agua en maíz es menos exigente que la que maximiza la productividad de la alfalfa.

Esto se debe a que pequeños niveles de estrés provocan importantes reducciones del rendimiento del maíz, mientras que la alfalfa soporta un mayor nivel de estrés sin que su producción disminuya. Estos análisis se han realizado en las condiciones meteorológicas del año 2004, aspecto que puede mermar la representatividad de los resultados. Con el objetivo de generalizar la adecuación de las estrategias seleccionadas, es necesario analizar su comportamiento en series temporales más amplias. La aplicación del modelo a la gestión de una zona regable real ha puesto de manifiesto su utilidad para mejorar la productividad del agua de riego. También se ha puesto de manifiesto la ventaja que supone la gestión centralizada del riego frente a una gestión individualizada de cada agricultor.

La aplicación de ADOR-Simulación para gestionar el riego de una zona regable precisa un trabajo previo de calibración local:

1. El módulo ADOR-Aspersión debe de incluir el material de riego más común de la zona, calibrado y validado en las condiciones técnicas locales.

2. ADOR-Cultivos debe de incluir la definición de los cultivos comunes en la zona, así como sus funciones de producción.
3. Es preciso un trabajo de adaptación de los datos del programa de gestión de la CR (ADOR) para incluirlos en ADOR-Red. Aspecto que incluye la recopilación de los datos de campo no incluidos en el programa de gestión y necesarios para este módulo (caracterización de suelos,...).
4. Calibración local de la estrategia de control del riego. La mejor estrategia de control depende de las condiciones meteorológicas locales (evaluar series temporales de varias campañas de riego), de las infraestructuras de red y su relación con la estructura parcelaria, así como de los cultivos.

*Amélioration de la productivité de l'eau dans les périmètres irrigués par aspersion.*

**Réalisé par:** Ahmed SKHIRI

**Sous la direction de:** Dra. Nery ZAPATA et Dr. Enrique PLAYAN JUBILAR

Pour tous les systèmes d'irrigation, une conception et une gestion adéquates permettent un usage plus efficace de l'eau, une maximisation de la production et une limitation des pertes. L'amélioration de la productivité de l'eau s'avère indispensable pour répondre à la grande demande d'aliments dérivée de l'accroissement de la population mondiale. Pour l'obtenir, une modernisation des irrigations s'avère indispensable au moyen d'activités au tant sur les infrastructures comme sur la gestion. Ceci contribuera à avoir une soutenabilité économique, sociale et environnementale des périmètres irrigués.

Dans ce travail on prétend contribuer à l'amélioration de la productivité de l'eau dans le périmètre irrigué de Montesnegros (CRM, NE Espagne) analysant la gestion de ses irrigations. Ce périmètre est irrigué avec le système d'irrigation par aspersion depuis 1998 et comprend une surface de 3.475 ha. Dans le premier chapitre de ce travail toute la surface du périmètre s'est caractérisée d'une manière globale: ses cultures, ses infrastructures et les consommations d'eau durant la campagne 2004 (utilisant la base de données d'ADOR). On a choisi une zone représentative du périmètre irrigué de Montesnegros (CRM), Zone de Simulation, où on a effectué une étude détaillée sur les infrastructures de réseau et sa relation avec la structure parcellaire, les sols et les cultures (surfaces, coûts de production, recettes).

En outre, on a calibré et validé le matériel d'irrigation le plus utilisé dans le périmètre au moyen du modèle de simulation ADOR-Aspersion (Playán y col., 2006). Finalement, on a développé un outil de simulation "ADOR-Simulation" embarqué à gérer l'irrigation par aspersion d'un périmètre irrigué. Cet outil a été utilisé pour évaluer l'effet de différentes stratégies de contrôle de l'irrigation sur la productivité de l'eau pour différentes cultures et différentes dimensions du réseau d'irrigation. Finalement, on a

utilisé le modèle pour simuler la productivité de l'eau d'une zone irriguée sous différentes stratégies de gestion. Ces dernières ont été comparées en termes de productivité de l'eau basée sur la marge nette. De même, on a comparé les consommations réelles avec les consommations simulées.

Les cultures majoritaires du périmètre irrigué de Montesnegros sont le maïs (41 %) et la luzerne (48 %). Les consommations moyennes dans le périmètre sont respectivement  $9.300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  pour le maïs et  $9.550 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  dans le cas de la luzerne. Les caractéristiques techniques des ameublements en parcelle des couvertures totales (système d'irrigation majoritaire dans le périmètre) se sont avérées très homogènes. Une disposition triangulaire  $18 \times 18 \text{ m}$ , un asperseur de double buses de marque VYR35 placé à  $2 \text{ m}$  par rapport au sol et une pression de travail de  $350 \text{ kPa}$ , sont les caractéristiques techniques les plus communes du périmètre irrigué de Montesnegros.

Le calibrage et la validation du modèle ADOR-Aspersion pour le matériel d'irrigation VYR35 travaillant sous une pression de  $350 \text{ kPa}$  et équipé de double buses  $4,8 \text{ mm}$  et  $2,4 \text{ mm}$ , a donné lieu à des paramètres de calibrage qui fournissent des résultats de fiabilité remarquable. La prévision du *CU* présente des erreurs entre  $1$  et  $2 \%$ . Quant aux erreurs à la détermination de la pluviométrie, le R.S.M.E. se situe que dessous de  $2 \text{ mm h}^{-1}$ . Les meilleures prévisions du modèle (meilleures statistiques) sont données pour des vitesses du vent intermédiaires entre  $2,5$  et  $4 \text{ m s}^{-1}$ .

Le modèle ADOR-Aspersion calibré et validé a été utilisé pour analyser l'effet de l'orientation des lignes porte asperseurs sur le *CU* d'une couverture soumise à l'action du vent. Pour le cas des dispositions triangulaires, on signale deux axes de faible uniformité, l'un à  $180^\circ$  et l'autre à  $360^\circ$ . Ceci veut dire que quand le vent soufflera dans une direction parallèle à la ligne d'asperseurs, le coefficient d'uniformité est plus touché et atteint des valeurs plus faibles que dans d'autres directions. En outre, on signale autres axes d'uniformité faible chaque  $60^\circ$  (ce qui correspond avec la symétrie des possibles lignes d'aspersion qui peuvent être dessinées dans les dispositions triangulaires). L'orientation des lignes d'asperseurs en cherchant certains angles par rapport au vent dominant pourrait aider à améliorer l'uniformité.

Le modèle développé dans ce travail ADOR-Simulation est formé par quatre modules, un premier qui sert pour la simulation de l'irrigation par aspersion en parcelle

(ADOR-Aspersion), un deuxième de bilan hydrique et croissance de cultures (ADOR-Culture), un troisième de structure du réseau et sa relation avec la structure parcellaire (ADOR-Réseau) et finalement, un module qui analyse l'information et décide le moment de l'irrigation (ADOR-Décision). Les deux premiers modules avaient été déjà développés dans des travaux précédents du groupe de recherche, le troisième (ADOR-Réseau) est une adaptation des données que fournit le programme de gestion du périmètre irrigué (appelé ADOR) et en fin le dernier, est celui qui a été développé dans ce travail. Par conséquent, la principale nouveauté de cet outil est située dans la connexion de ces modules et dans la définition d'ADOR-Décision.

ADOR-Décision gère les résultats du reste des modules et prend les décisions de si s'irrigue ou non en se basant sur une série de paramètres. Dans ce travail on a identifié deux paramètres que d'une manière conjointe déterminent la stratégie de contrôle de l'irrigation: jours de stress équivalent (*DEE*) et Efficience Potentielle du Quart Bas (*EPcb*). La caractérisation des paramètres qui déterminent la stratégie optimale de contrôle de l'irrigation a été effectuée dans une parcelle type du périmètre irrigué de Montesnegros (CRM) pour différentes cultures et différentes tailles des vanes de prise d'eau (débits fictifs continus).

Les analyses effectuées en termes de productivité de l'eau basée sur la marge nette ont mis en évidence que la culture comme la taille de la vanne de prise d'eau déterminent la valeur optimale de *DEE* et de l'*EPcb*. Ainsi, la stratégie d'irrigation qui maximise la productivité de l'eau en maïs est moins exigeante que celle qui maximise la productivité de la luzerne. Ceci est dû au fait que des bas niveaux de stress provoquent importantes réductions du rendement du maïs, tandis que la luzerne supporte un plus grand niveau de stress sans que sa production diminue. Ces analyses ont été effectuées en se basant sur les conditions météorologiques de l'année 2004, aspect qui peut diminuer la représentativité des résultats. Dans le but de généraliser l'adéquation des stratégies choisies, il est nécessaire d'analyser son comportement dans des séries temporaires plus vastes.

L'application du modèle à la gestion d'un périmètre irrigué réel a mis en évidence son utilité pour améliorer la productivité de l'eau d'irrigation. On a aussi mis en évidence l'avantage que suppose la gestion centralisée de l'irrigation face à une gestion individualisée de chaque agriculteur.

L'application d'ADOR-Simulation pour gérer l'irrigation d'un périmètre irrigué spécifie un travail préalable de calibrage local:

1. le module ADOR-Aspersion doit inclure le matériel d'irrigation le plus commun dans le périmètre irrigué, calibré et validé dans les conditions techniques locales.
2. ADOR-Cultures doit inclure la définition des cultures communes du périmètre, comme par exemple leurs fonctions de production.
3. Un travail d'adaptation de la base de données du programme de gestion du périmètre irrigué (ADOR) est nécessaire pour l'inclure dans ADOR-Réseau. Aspect qui inclut la recompilation des données du champ non incluses dans le programme de gestion et nécessaires pour ce module (caractérisation de sols...).
4. Calibrage local de la stratégie de contrôle de l'irrigation. La meilleure stratégie de contrôle dépend des conditions météorologiques locales (évaluer des séries temporaires de plusieurs campagnes d'irrigation), des infrastructures de réseau et sa relation avec la structure parcellaire, ainsi que des cultures.

*Improvement of the productivity of water in sprinkler irrigated perimeters.*

**By:** Ahmed SKHIRI

**Under the supervision of:** Dra. Nery ZAPATA and Dr. Enrique PLAYAN JUBILAR

In irrigation systems, proper design and management lead to an efficient water use, to the maximization of crop yield and to the limitation of water losses. Improving water productivity is essential to respond to the growing demand for food derived from the increase world-wide population. It is therefore compulsory to modernize irrigated areas by a coordinated effort on both structures and management. This will contribute to the economic, social and environmental sustainability of the irrigated areas.

In this work, the improvement of water productivity in the Montesnegros irrigation district (CRM, NE Spain) is addressed. This district is sprinkler irrigated since 1998 and has a total area of 3.475 ha. In the first section of the thesis a characterization of the district is presented. The plots, irrigation systems, conveyance structures and the water records corresponding to the 2004 campaign are presented and discussed.

A representative part of the CRM, denoted as the simulation area, was selected and characterized in detail. The conveyance structures were analysed and their relationship with the hydrants, the farms and the plots was established. The agronomic and economic characteristics of the two main local crops (corn and alfalfa) were obtained for the local condition of the CRM. Additionally, the ballistic simulation model ADOR-Sprinkler (Playán and col., 2006) was calibrated and validated for the local specific conditions (sprinkler model, operating pressure and wind speed range).

Finally, the "ADOR-Simulation" tool was improved to extend the simulation domain from just one irrigation sector (a part of an irrigated plot which is irrigated simultaneously) to an irrigated area. This tool has been applied to the evaluation of the effect of different irrigation strategies and irrigation network design parameters on

water productivity in a typical farm. Finally, the model was used to analyse water allocation, crop yield and economic return under different management strategies. These strategies were compared in terms of water productivity based on net margin. Simulation results were also compared to water allocation records.

The most common crops in the CRM are corn (41 %) and alfalfa (48 %). The average water use in 2004 was  $9.300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  for corn and  $9.550 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  for alfalfa. The vast majority irrigation district is solid-set irrigated. The technical characteristics of these systems are varied, although the typical configuration is that of a triangular spacing T 18 x 18 m, with a VYR35 sprinkler placed at an elevation of 2 m over the soil surface. The average nozzle pressure was 350 kPa, and the nozzle diameters were 4,8 and 2,4 mm for the main and auxiliary nozzles, respectively.

The ADOR-Sprinkler model was calibrated and validated for the abovementioned conditions. The resulted calibration parameters proved to have a remarkable reliability. In fact, the prediction of the Christiansen Coefficient of Uniformity (*CU*) resulted in standard errors between 1 and 2 %. As for the prediction of precipitation rate within the sprinkler spacing, the Root Mean Standard Error (*RMSE*) was lower than  $2 \text{ mm h}^{-1}$ . The best model performance occurred for intermediate wind speeds, between 2,5 and  $4,0 \text{ m s}^{-1}$ .

The calibrated and validated ADOR-Sprinkler model was used to characterize the effect of wind speed and direction on *CU*, Wind Drift and Evaporation Losses (*WDEL*) and water distribution resulting from a solid-set. In the analysed case, characterized by a triangular spacing, two axes of low uniformity, at wind directions of  $180^\circ$  and  $360^\circ$  were noticed. When the wind blows from a direction parallel to the sprinkler lines, *CU* is severely affected and reaches lower values than in other directions. Other axes of low uniformity were noticed at an interval of  $60^\circ$  (corresponding to the axes of symmetry of a triangular sprinkler layout). Aligning the sprinklers in precise directions respect to the prevailing wind could help improve uniformity in this particular layout.

The current version of ADOR-Simulation is composed by four modules. The first one is the solid-set sprinkler simulation module (ADOR-Sprinkler); the second one is ADOR-Crop, a soil water and crop yield model; the third one manages the

conveyance network, the hydrants, the farms, the plots and the irrigation sectors (ADOR-Network); finally, ADOR-Decision allocates water to the plots following an analysis of the existing information and respecting the system constraints in terms of capacity and simultaneity. ADOR-Sprinkler and ADOR-Crop had been developed in previous works of the research group. ADOR-Network is an adaptation of the database structure used in the software ADOR-Management for irrigation districts. The last module, ADOR-Decision was specifically developed for this work. Therefore, the main innovation in the current version of ADOR-Simulation is the connection of the four modules and the custom development of ADOR-Decision.

Two parameters were identified in this work to characterize the control strategy of district irrigation: the Days of Equivalent Stress (*DEE*) and the Potential Application Efficiency of the low Quarter (*EPcb*). The values of these parameters that result in an optimal control strategy were determined for a typical field and different hydrant capacities. The analyses made in terms of water productivity (based on the net margin) showed that both of the crop and the hydrant capacity determine the optimum value of *DEE* and *EPcb*. As a consequence, the irrigation strategy maximizing water productivity in corn is less restrictive than the one maximizing water productivity in alfalfa. This is due to the fact that small stress levels can cause significant yield reductions in corn, while alfalfa is much more drought resistant. These analyses were performed in the meteorological conditions of 2004, an aspect that can decrease the representativeness of the results. A generalised recommendation of model parameters will require the analysis of long time series.

The application of the model to the management of a real irrigated area composed of a number of farms and hydrants demonstrated its capacity to improve regional water productivity. A centralized irrigation management has proven to be more advantageous than individualized farmer management, showing more capacity to avoid strong winds, keeping uniformity at safe levels, sustaining crop yield and limiting water use. The application of ADOR-Simulation to manage the irrigation of an irrigated area will require additional calibration and further analyses.

The application of ADOR-Simulation to an irrigated area requires the following steps:

1. ADOR-Sprinkler must be calibrated for the local condition(s): sprinkler model, nozzle diameter, wind speed range, solid set spacing, nozzle elevation and operating pressure;
2. ADOR-Crop must be updated to include the characterization of the common crops in the study area;
3. The ADOR-Management database (if existing) must be analysed to extract the data required for ADOR-Network. A number of additional parameters must be field collected.
4. The strategy of irrigation control must be locally calibrated to adapt to the local meteorological conditions, conveyance network, crops and land tenure.

## ÍNDICE GENERAL

**Agradecimiento**

**Resumen en Castellano**

**Resumen en Francés**

**Resumen en Inglés**

**Índice de figuras**

**Índice de tablas**

**CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS** ..... 3

**I.1. INTRODUCCIÓN GENERAL**..... 3

**I.2. OBJETIVOS**..... 6

**CAPÍTULO II: REVISION BIBLIOGRÁFICA** ..... 11

**II.1. ANÁLISIS DEL USO DEL AGUA EN COMUNIDADES DE  
REGANTES** ..... 11

II.1.1. Las comunidades de regantes y su gestión del agua ..... 11

II.1.2. El análisis del uso del agua en comunidades de regantes ..... 12

II.1.3. El programa ADOR para la gestión de comunidades de regantes ..... 13

**II.2. MODELOS BALÍSTICOS DE SIMULACIÓN DE RIEGO POR  
ASPERSIÓN EN COBERTURA TOTAL** ..... 14

II.2.1. Simulación del riego por aspersión..... 14

II.2.2. Introducción a los modelos balísticos del riego por aspersión ..... 15

II.2.3. Ecuaciones del movimiento de una gota de agua en el aire..... 18

II.2.4. Formulaciones del coeficiente de resistencia aerodinámico ..... 19

II.2.5. Corrección del coeficiente de resistencia aerodinámico ..... 21

II.2.6. Solapamiento de la distribución del agua en aspersores aislados: el  
marco de aspersión ..... 22

<b>II.3. USO DEL AGUA DE RIEGO, UNIFORMIDAD, PRODUCCIÓN Y PRODUCTIVIDAD</b> .....	23
II.3.1. Respuesta de los cultivos al agua y su relación con la uniformidad de riego .....	23
II.3.2. El modelo CropWat .....	24
II.3.3. Gestión y productividad del agua .....	26
<b><u>CAPÍTULO III: MATERIAL Y MÉTODOS</u></b> .....	33
<b>III.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b> .....	33
III.1.1. La Comunidad de Regantes de Montesnegros .....	33
III.1.1.1. Localización y características generales.....	33
III.1.1.2. Determinación de las necesidades de agua de los cultivos.....	35
III.1.1.3. Estimación del margen bruto de los cultivos.....	38
III.1.2. La Zona de Simulación.....	39
III.1.2.1. Localización y características generales.....	39
III.1.2.2. Caracterización de algunas propiedades físicas de los suelos .....	41
III.1.2.3. Caracterización técnica de los amueblamientos en parcela.....	42
<b>III.2. ANÁLISIS DEL USO DEL AGUA EN LA COMUNIDAD DE REGANTES DE MONTESNEGROS EN 2004</b> .....	43
III.2.1. Caracterización del uso del agua .....	43
III.2.2. Determinación de la productividad del agua basada en el margen bruto de los cultivos.....	43
<b>III.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE RIEGO POR ASPERSIÓN</b> .....	44
III.3.1. Evaluación de la distribución de agua en un aspersor aislado.....	44
III.3.2. Evaluación de la distribución de agua en una cobertura de riego por aspersión.....	45
III.3.3. Calibración y validación del modelo de riego por aspersión.....	47
III.3.3.1. Calibración del modelo para riego con aspersores aislados .....	47
III.3.3.2. Calibración del modelo para riego en coberturas totales.....	48

III.3.4. Validación del modelo final .....	49
III.3.5. Elaboración del modelo final.....	49
<b>III.4. DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DEL RIEGO</b>	
<b>EN UNA COMUNIDAD DE REGANTES.....</b>	<b>49</b>
III 4.1 Descripción del modelo de gestión de riego colectivo .....	49
III.4.2. Identificación de estrategias de gestión del riego en una parcela dimensionada para permitir una gestión avanzada .....	58
III.4.3. Efectos de las infraestructuras de riego sobre la productividad del agua en una parcela tipo para dos cultivos, maíz y alfalfa .....	59
III.4.4. Análisis de la productividad del agua de la Zona de Simulación bajo distintas estrategias de gestión del riego.....	61
III.4.5. Comparación entre los consumos de agua de la Comunidad de Regantes y los consumos simulados con el modelo de gestión.....	62
<b><u>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>.....</b>	<b>65</b>
<b>IV.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>65</b>
IV.1.1. La Comunidad de Regantes de Montesnegros .....	65
IV.1.1.1. Determinación de las necesidades de agua de los cultivos .....	65
IV.1.1.2. Estimación del margen bruto de los cultivos .....	66
IV.1.2. La Zona de Simulación .....	68
IV.1.2.1. Caracterización de algunas propiedades físicas de los suelos.....	66
IV.1.2.2. Caracterización técnica de los amueblamientos en parcela.....	69
<b>IV.2. ANÁLISIS DEL USO DEL AGUA EN LA COMUNIDAD DE</b>	
<b>REGANTES DE MONTESNEGROS EN 2004.....</b>	<b>70</b>
IV.2.1. Uso del agua .....	70
IV.2.2. Productividad del agua basada en el margen bruto de los cultivos.....	73
<b>IV.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE RIEGO</b>	
<b>POR ASPERSIÓN.....</b>	<b>74</b>
IV.3.1. Estimación de los parámetros $D_{50}$ y $n$ .....	74
IV.3.2. Estimación de los parámetros $K1$ y $K2$ .....	77
IV.3.3. Validación del modelo de riego por aspersión.....	82

IV.3.4. Aplicación del modelo de riego por aspersión .....	86
<b>IV.4. DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DEL RIEGO EN UNA COMUNIDAD DE REGANTES .....</b>	<b>88</b>
IV.4.1. Evaluación de estrategias de gestión del riego en una parcela dimensionada para permitir una gestión avanzada .....	88
IV.4.2. Efectos de las infraestructuras de riego sobre la productividad del agua en una parcela tipo para dos cultivos, maíz y alfalfa .....	91
IV.4.3. Productividad del agua de la Zona de Simulación bajo distintas estrategias de gestión del riego .....	94
IV.4.4. Comparación entre los consumos de agua de la Comunidad de Regantes y los consumos simulados con el modelo de gestión.....	97
<b><u>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES</u>.....</b>	<b>101</b>
<b><u>CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA</u> .....</b>	<b>107</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura II.1.</b>	Teoría balística aplicada a una gota de agua en el aire. Esquema de los vectores velocidad (A) y de fuerzas (B) que actúan sobre la gota (según Montero y <i>col.</i> , 1997).....	16
<b>Figura II.2.</b>	Relación entre la productividad económica del agua y el porcentaje de agua aplicada al cultivo (Reproducido de Playán y Mateos (2005), quienes elaboraron los datos de Lorite y <i>col.</i> , (2004). Las barras indican el doble de la desviación estándar .....	29
<b>Figura II.3.</b>	Productividad del agua (Margen bruto obtenido por cada unidad de volumen de agua de riego) para diferentes cultivos de la provincia de Albacete. Elaborado a partir de los datos presentados por de Juan y <i>col.</i> , (2003).....	30
<b>Figura III.1.</b>	Mapa de la comunidad de regantes de Montesnegros.....	33
<b>Figura III.2.</b>	Mapa de localización y emplazamiento de la Zona de Simulación dentro de la CRM.....	40
<b>Figura III.3.</b>	Mapa de distribución de los puntos de muestreo para la caracterización de algunas propiedades físicas de los suelos .....	41
<b>Figura III.4.</b>	Esquema de siete radios de pluviómetros y del aspersor evaluado. La figura no pretende ser una representación a escala, ya que en cada radio se instalaron 33 pluviómetros separados 0,5 m.....	45
<b>Figura III.5.</b>	Esquema de la distribución de aspersores y pluviómetros en la parcela experimental .....	46
<b>Figura III.6.</b>	Descripción esquemática del ADOR-Simulación.....	51
<b>Figura IV.1.</b>	Evapotranspiración del cultivo de la alfalfa ( $ET_c$ ) durante la campaña agrícola 2004 de la comunidad de regantes de Montesnegros calculada a partir de la evapotranspiración de referencia de la misma ( $ET_0$ ) .....	65
<b>Figura IV.2.</b>	Evapotranspiración del cultivo de maíz ( $ET_c$ ) durante la campaña agrícola 2004 de la comunidad de regantes de Montesnegros calculada a partir de la evapotranspiración de referencia de la misma ( $ET_0$ ) .....	66
<b>Figura IV.3.</b>	Esquema de la curva de $K_c$ para el cultivo de maíz en la comunidad de regantes de los Montesnegros para la campaña agrícola de 2004 .....	67

<b>Figura IV.4.</b>	Consumo medio de agua de riego de los cultivos de la CRM en 2004. Para cada cultivo las barras representan $\pm$ una desviación estándar .....	71
<b>Figura IV.5.</b>	Mapa de los consumos de agua totales de la comunidad de regantes de Montesnegros durante la campaña agrícola de 2004.....	72
<b>Figura IV.6.</b>	Mapa de los cultivos de la comunidad de regantes de Montesnegros durante la campaña agrícola de 2004 .....	72
<b>Figura IV.7.</b>	Patrón radial de distribución de agua observado en el ensayo 1 y simulado con $D_{50} = 0,0019$ m y $n = 2,3$ para el aspersor VYR35, equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm de diámetro y con una presión de funcionamiento de 350 kPa.....	75
<b>Figura IV.8.</b>	Patrón radial de distribución de agua observado en el ensayo 2 y simulado con $D_{50} = 0,0019$ m y $n = 2,3$ para el aspersor VYR35, equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm de diámetro y con una presión de funcionamiento de 350 kPa.....	75
<b>Figura IV.9.</b>	Altura de agua simulada y observada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $0,9 \text{ m s}^{-1}$ (ensayo 1).....	79
<b>Figura IV.10.</b>	Mapas de isolíneas de las dosis de riego ( $\text{mm h}^{-1}$ ) observadas (Izquierda) y simuladas (Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $0,9 \text{ m s}^{-1}$ (ensayo 1) .....	79
<b>Figura IV.11.</b>	Alturas de agua simulada y observada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $2,7 \text{ m s}^{-1}$ (ensayo 2).....	80
<b>Figura IV.12.</b>	Mapas de isolíneas de las dosis de riego ( $\text{mm h}^{-1}$ ) observadas (Izquierda) y simuladas (Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $2,7 \text{ m s}^{-1}$ (ensayo 2).....	80
<b>Figura IV.13.</b>	Alturas de agua simulada y observada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $6,7 \text{ m s}^{-1}$ (ensayo 3).....	81

<b>Figura IV.14.</b> Mapas de isolíneas de las dosis de riego ( $\text{mm h}^{-1}$ ) observadas (Izquierda) y simuladas (Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $6,7 \text{ m s}^{-1}$ (ensayo 3).....	81
<b>Figura IV.15.</b> Relaciones entre la velocidad del viento y los parámetros $K1$ (izquierda) y $K2$ (derecha) obtenidas a partir de los resultados obtenidos en el proceso de calibración. Se muestran los valores de los parámetros y la relación funcional propuesta para cada parámetro .....	82
<b>Figura IV.16.</b> Alturas de agua observada y validada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $3,5 \text{ m s}^{-1}$ (ensayo 5) .....	83
<b>Figura IV.17.</b> Mapas de isolíneas de las alturas de agua observadas(Izquierda ) y simuladas(Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, trabajando a una presión de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $3,5 \text{ m s}^{-1}$ (ensayo 5) .....	83
<b>Figura IV.18.</b> Alturas de agua observada y validada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $3,9 \text{ ms}^{-1}$ (ensayo 6) .....	84
<b>Figura IV.19.</b> Mapas de isolíneas de las alturas de agua observadas(Izquierda) y simuladas(Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, trabajando a una presión de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $3,9 \text{ m s}^{-1}$ (ensayo 6).....	84
<b>Figura IV.20.</b> Alturas de agua observada y validada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $5,1 \text{ m s}^{-1}$ (ensayo 8).....	85
<b>Figura IV.21.</b> Mapas de isolíneas de las alturas de agua observadas(Izquierda ) y simuladas(Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, trabajando a una presión de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de $5,1 \text{ m s}^{-1}$ (ensayo 8) .....	85

<b>Figura IV.22.</b> Mapa de isolíneas del Coeficiente de uniformidad ( <i>CU</i> ) en función de la velocidad y dirección del viento para el aspersor VYR35 equipado de boquilla principal de 4,8 mm boquilla auxiliar de 2,4 mm, trabajando a una presión de 350 kPa, con una disposición en campo en marco triangular de 18 x 18 m.....	87
<b>Figura IV.23.</b> Relación entre el <i>CU</i> y el viento para el modelo de aspersor VYR35 equipado con boquilla principal de 4,8 mm y para a) el modelo VYR70 equipado con dos tamaños de boquilla principal (4,0 y 4,4 mm) (Izquierda); y b) el modelo RC130H equipado con dos tamaños de boquilla principal (4,0 y 4,4 mm) (Derecha).....	88
<b>Figura IV.24.</b> Estrategias de gestión de riego por aspersión basadas en la productividad del agua expresada en margen neto ( $WP_{MN}$ ) para el cultivo de maíz en la comunidad de regantes de Montesnegros para el año 2004 .....	89
<b>Figura IV.25.</b> Estrategias de gestión de riego por aspersión basadas en la productividad del agua margen neto para el cultivo de la alfalfa en la comunidad de regantes de Montesnegros para el año 2004.....	90
<b>Figura IV.26.</b> Productividad del agua basada en el margen neto ( $WP_{MN}$ ) en función del caudal ficticio continuo para el cultivo del maíz durante la campaña agrícola 2004 en la comunidad de regantes de Montesnegros .....	93
<b>Figura IV.27.</b> Productividad del agua basada en el margen neto en función del caudal ficticio continuo para el cultivo de la alfalfa durante la campaña agrícola 2004 en la comunidad de regantes de Montesnegros .....	94
<b>Figura IV.28.</b> Productividad del agua de la Zona de Simulación basada en el margen neto del cultivo de maíz en función de distintas estrategias de riego para la campaña agrícola 2004 en la comunidad de regantes de Montesnegros .....	95
<b>Figura IV.29.</b> Productividad del agua de la zona de simulación basada en el margen neto del cultivo de la alfalfa en función de distintas estrategias de riego para la campaña agrícola 2004 en la comunidad de regantes de Montesnegros .....	96
<b>Figura IV.30.</b> Consumos de agua medios y sus desviaciones estándar para las estrategias de riego real y las cinco simuladas en la Zona de Simulación de la CRM.....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla III.1.</b>	Relaciones entre los caudales ficticios continuos, el tiempo de operación de la red y la amortización anual.....	60
<b>Tabla IV.1.</b>	Costes e ingresos aplicados a los cultivos de la alfalfa y maíz en la comunidad de regantes de los montesnegros durante la campaña agrícola 2004 .....	67
<b>Tabla IV.2.</b>	Margen bruto de la alfalfa y maíz en las zonas regables del Montijo y la Margen Izquierda del Porma .....	68
<b>Tabla IV.3.</b>	Resumen detallado de las diferentes características de los suelos de las parcelas de la comunidad de regantes de los Montesnegros .....	69
<b>Tabla IV.4.</b>	Productividad media del agua para los cultivos de alfalfa y maíz en la comunidad de regantes de los Montesnegros durante la campaña agrícola 2004.....	73
<b>Tabla IV.5.</b>	Productividad del agua para las zonas regables del Montijo y la Margen Izquierda del Porma.....	74
<b>Tabla IV.6.</b>	Resumen de los valores de las variables meteorológicas y de la uniformidad de riego en los diez ensayos realizados en la cobertura de riego por aspersión .....	76
<b>Tabla IV.7.</b>	Valores del diámetro medio de las gotas de agua ( $D_{50}$ ) y el exponente adimensional ( $n$ ) obtenidos tras el proceso de ajuste .....	77
<b>Tabla IV.8.</b>	Valores óptimos de los parámetros $K1$ y $K2$ para cada experimento en cobertura total usados para la calibración, diferencia entre $CU$ observado y simulado ( $Dif\ CU$ ), $RSME$ y $r$ .....	78
<b>Tabla IV.9.</b>	Relaciones de los parámetros $K1$ y $K2$ en función del viento introducidas en el modelo .....	82
<b>Tabla IV.10.</b>	Coeficientes de uniformidad experimental y simulada, y diferencia en $CU$ para los ensayos utilizados para la validación del modelo de simulación .....	86



**CAPÍTULO I:**  
**INTRODUCCIÓN GENERAL**  
**Y OBJETIVOS**



## I. Introducción general y objetivos

### I.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Durante las próximas décadas, el incremento de la población mundial va a generar unas mayores necesidades de producción de alimentos. Para lograrlo se requerirá, además de un incremento de la superficie cultivable y la mejora del rendimiento de los cultivos, una intensificación de los sistemas productivos (FAO, 2003).

La introducción del regadío en muchas zonas agrícolas resulta necesaria, ya que la producción de ciertos cultivos se puede hacer únicamente bajo regadío. Según el sistema de información sobre el uso del agua en la agricultura (AQUASTAT) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en el mundo existen más de 277,1 millones de hectáreas de superficie regada. Aproximadamente el 92% de dicha superficie se riega mediante la técnica de riego por superficie (FAO, 2003).

Dadas las necesidades de intensificación de la producción de los alimentos, se estima que en el período 2015-2030 cerca de 40 millones de hectáreas se transformarán en regadío, y más de 160 millones de hectáreas actuales se modernizarán (FAO, 2003). La realización de nuevas transformaciones en regadío está limitada por la disponibilidad del recurso agua. Para ello es preciso aumentar la eficiencia de riego, minimizar las pérdidas de agua que se producen en las conducciones y en parcela.

En todos los sistemas de riego, un adecuado diseño y manejo permiten hacer un uso más eficiente del agua disponible, maximizar la producción y limitar las pérdidas por percolación profunda. En muchas zonas regables del mundo la eficiencia de riego está por debajo de los niveles esperados (Clemmens y Dedrick, 1994). Estas bajas eficiencias pueden ser debidas a un déficit de agua y/o a un manejo inadecuado.

En España, un 80 % del agua se utiliza en el ámbito de la agricultura. La aportación de la agricultura de regadío a la producción final agraria nacional es del 50 %, a pesar de que la superficie regada representa únicamente en 13% (3.344.637 ha) de la superficie agraria útil (Forteza del Rey, 2002). Esta contribución fue el resultado de la transformación en regadío de tierras agrícolas. Esta opción fue planteada para

aumentar la producción agrícola y contribuir al desarrollo económico del país durante el siglo XX (Fereres, 1995).

En Túnez la superficie regada es de 367.000 ha, de las cuales el 25,0 % se riega mediante la técnica de riego por aspersión. (FAO, 2003). La superficie regable en Aragón es de 406.325 ha, de las cuales 377.685 ha son regadas. La superficie regada mediante la técnica de riego por aspersión representa el 20,7 % del total. En la cuenca del Ebro los regadíos tienen un nivel tecnológico diverso, ya que combinan sistemas tradicionales y sistemas modernos. El riego por superficie es el más frecuente en esta zona y representa aproximadamente un 80 % de la superficie regada (Navarro, 2002).

Estos sistemas de riego se caracterizan por una eficiencia de riego baja. Entre los problemas típicos de estas zonas se incluyen los siguientes: 1) los sistemas de distribución tienen una capacidad inferior a la de la demanda punta; 2) la frecuencia de reparto del agua es rígida; 3) las parcelas están mal niveladas; 4) el sistema de distribución está muy ramificado; 5) las parcelas son de tamaño pequeño (Faci y *col.*, 2000; Playán y *col.*, 2000). La modernización de estos sistemas basada en la mejora de la estructura de la red de distribución y en la mejora de la eficiencia de riego en parcela fue la solución de la mayoría de los análisis hechos sobre las zonas regables regadas por superficie. Los sistemas de riego por superficie tienen la capacidad, cuando están bien diseñados y gestionados, de alcanzar un alto nivel de eficiencia.

Consciente de todo ello, el Gobierno español aprobó en 2002 un Plan Nacional de Regadíos en el que el 61% de su presupuesto se destina a actuaciones de modernización de regadío hasta el horizonte del año 2008 (Forteza del Rey, 2002). Este plan se enmarca en el proceso de planificación hidrológica de la Ley de Aguas de 1985 para el correcto ordenamiento y administración de los recursos hídricos del país. Al mismo tiempo se están realizando inversiones públicas y privadas para poner en marcha nuevos regadíos con sistemas de riego por aspersión (Navarro, 2002).

Estos sistemas tienen algunas ventajas sobre el riego por superficie. Así, el riego por aspersión se puede adaptar a una gran variedad de cultivos, aplicando riegos más frecuentes y una gama amplia de condiciones topográficas y características de suelos. Dentro del riego por aspersión, en el valle del Ebro resultan muy frecuentes los sistemas de cobertura total, ya que las parcelas con frecuencia no tienen las dimensiones

necesarias para que los pivotes o las máquinas de desplazamiento lateral resulten económicos.

En los riegos por aspersión la baja uniformidad y las pérdidas por evaporación y arrastre hacen disminuir en gran medida la eficiencia de aplicación. En las últimas décadas, se han sucedido muchas mejoras en la tecnología del riego por aspersión (Tarjuelo, 1995). Los cambios han permitido mejorar la calidad del riego, disminuir las pérdidas de agua y aumentar el rendimiento de los cultivos. En el ámbito del riego por cobertura total, los sistemas actuales en el valle del Ebro se basan en el uso de redes colectivas que garantizan a los regantes individuales un conjunto de condiciones de acceso al agua de los hidrantes. Entre estas condiciones se encuentran unos mínimos de presión y caudal.

La automatización del riego se ha convertido en un complemento indispensable de las nuevas instalaciones y una carencia relevante en las instalaciones más antiguas. Los programadores del riego por aspersión son hoy en día robustos, potentes y baratos. En la actualidad, están apareciendo aplicaciones tecnológicas que pretenden avanzar en la automatización y trasladar el control de la programación del riego de la parcela del agricultor a la oficina de la comunidad de regantes.

Desde los años sesenta se han venido utilizando modelos informáticos para el diseño y la gestión de sistemas de riego (Basset y Fritzsimmmons, 1976; Clemmens, 1979; Strelkoff, 1970). Los primeros esfuerzos para la puesta a punto de modelos de diseño y simulación del riego por aspersión en coberturas totales se realizaron con aproximaciones balísticas (Fukui y *col.*, 1980; von Bernuth y Gilley, 1984; Vories y *col.*, 1987; von Bernuth, 1988; Seginer y *col.*, 1991; Tarjuelo y *col.*, 1994). En este momento, la principal limitación del uso de los modelos de simulación de riego por aspersión reside en el complejo proceso de calibración a que está sujeto el uso de una determinada combinación de aspersor, boquilla y presión de funcionamiento. En la actualidad se cuenta con modelos para riego por aspersión en cobertura total, en pivotes y en cañones de riego.

En la última década, numerosos modelos han sido desarrollados para simular el crecimiento de los cultivos y su balance de agua. Estos modelos ayudan a identificar los factores que controlan el rendimiento del cultivo y su evapotranspiración, así como a

cuantificar su influencia. El CropWat (Smith, 1993) es probablemente el más conocido y utilizado. El modelo CropWat, a pesar de su relativa sencillez, ha sido aplicado con éxito en la simulación del efecto del estrés hídrico sobre el rendimiento de los cultivos (Frenken, 2000; George y *col.*, 2000). En las condiciones del Ebro, (Cavero y *col.*, 2000) aplicaron los modelos CropWat y EPIC-phase a la simulación de experimentos de riego deficitario por superficie y aspersión en un cultivo de maíz.

Los trabajos realizados en esta tesis han tenido por objeto desarrollar un modelo que permita simular la productividad del agua de riego en una comunidad de regantes. De esta forma se podrá reproducir la interacción entre los distintos factores que influyen en el uso del agua y la producción agraria. Para ello, se han incorporado distintos módulos que permiten simular el crecimiento de los cultivos, el riego por aspersión, el funcionamiento de las infraestructuras y la toma de decisiones en la distribución de agua.

## **I.2. OBJETIVOS**

En el marco de esta tesis se pretende contribuir a la mejora de la productividad del agua en el riego por aspersión. Para ello, se adoptará una zona de estudio que es la comunidad de regantes de Montesnegros. Se desarrollará un modelo combinado del riego por aspersión en cobertura total y del crecimiento de los cultivos. El modelo será calibrado y validado con experimentos de campo. Finalmente, se aplicará el modelo para la identificación de estrategias que permitan una buena gestión del riego, optimizando la productividad del agua respecto del margen neto de los cultivos. Los objetivos concretos de esta tesis son:

**Objetivo 1:** Caracterizar las infraestructuras de riego en la comunidad de regantes de Montesnegros.

**Objetivo 2:** Calibrar y validar el modelo ADOR-Sprinkler para las condiciones técnicas más comunes de las coberturas totales de aspersión de la zona de estudio.

**Objetivo 3:** Analizar los consumos y la productividad del agua de riego en la comunidad de regantes para los cultivos más representativos.

**Objetivo 4:** Simular la productividad del agua de riego en función de la flexibilidad de la red de distribución y de sus parámetros de gestión, con el objetivo de optimizar la productividad del agua.



**CAPÍTULO II:**  
**REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**



## II. Revisión bibliográfica

### II.1. ANÁLISIS DEL USO DEL AGUA EN COMUNIDADES DE REGANTES

#### II.1.1. Las comunidades de regantes y su gestión del agua

La vigente Ley de Aguas de España<sup>1</sup> establece que los usuarios del agua que disfrutan de una misma toma o concesión administrativa deberán agruparse en una comunidad de usuarios. Cuando el fin principal de estas comunidades es el riego, la ley permite que se puedan denominar comunidades de regantes. Esta es la figura legal que regula lo que tradicionalmente se ha venido llamando “sindicatos de riego” o “colectividades”. En los siguientes párrafos se describe la naturaleza y funcionamiento de las comunidades de regantes en España. Esta descripción no cubre la gestión del agua de riego en las islas Canarias, que es específica de esta Comunidad.

Siguiendo a Del Campo (2003), se puede afirmar que una comunidad de regantes es “la agrupación de todos los propietarios de una zona regable (comuneros) que se unen obligatoriamente por ley para la administración del agua pública sin ánimo de lucro”. Según la Ley de Aguas, la concesión del agua está ligada a la tierra y no al propietario. El objetivo fundamental de las comunidades es el aprovechamiento colectivo de las aguas que le son comunes. En el desarrollo de este objetivo, las comunidades se rigen por las leyes vigentes y por las ordenanzas que la comunidad se otorga.

A la hora de hablar de la gestión del agua en las comunidades de regantes se diferencia entre dos tipos de obras de riego, según se construyeran antes o después de 1970 (Playán y Castillo, 2001).

Los grandes sistemas públicos construidos hasta principios de los años 70 conforman un grupo bastante homogéneo. Estos regadíos necesitan de acciones de mejora y consolidación, ya que su tecnología no está actualizada y su sostenibilidad no

---

<sup>1</sup> Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE núm. 176, de 24-07-2001, pp. 26791-26817). Modificado por la Ley 24/2001, de 27 de diciembre, de Medidas Fiscales, Administrativas y del Orden Social (BOE núm. 313, de 31-12-2001, p. 50595). La modificación introduce un segundo párrafo en el art. 132.1. Modificado por la Ley 53/2002, de 30 de diciembre, de Medidas Fiscales, Administrativas y del Orden Social (BOE núm. 313, de 31-12-2002, pp. 46186-46187). Se modifican los artículos 55 y 116.

está en ocasiones garantizada. En estas zonas, las comunidades de regantes están organizadas, y dirigen activamente el reparto del agua. Con frecuencia los agricultores realizan una petición previa a la comunidad o al guarda de riego, y el agua les es concedida por un cierto periodo de tiempo. En las semanas más difíciles de la campaña es frecuente que este sistema de gestión de la red se cambie por uno de rotación, en el que el criterio de flexibilidad se sustituye por uno de equidad. Aunque ya son mayoría las comunidades de este tipo que tarifican el agua de forma binómico, quedan algunos casos en los que el agua se paga exclusivamente por unidad de superficie. El progreso de las obras de modernización de regadíos impulsadas por distintas instituciones públicas desde aproximadamente 2000 empieza a ser notable.

Por otro lado, estarían los sistemas transformados desde 1970, la gestión de estas comunidades suele ser más pasiva que la anterior, ya que las redes funcionan de una forma parecida a la demanda. Estas comunidades de regantes suelen usar peticiones previas de agua, que organizan en el tiempo para evitar picos de demanda. Con frecuencia el agua se paga volumétricamente por adelantado para agilizar la gestión y hacer frente a los costes energéticos.

### **II.1.2. El análisis del uso del agua en comunidades de regantes**

El proceso de modernización de una zona regable debe iniciarse con la realización de un estudio que permita realizar un diagnóstico previo de la situación actual de la misma (Losada, 1994). De esta forma se pueden determinar cuales son los problemas específicos que afectan al uso del agua, y así plantear alternativas de mejora que, tras su posterior evaluación, permitan obtener la mejor solución a dichos problemas.

Faci y *col.*, (2000) y Playán y *col.*, (2000) realizaron un estudio para la modernización de las 3.579 ha de la comunidad de regantes de Almudévar (Huesca, España). Entre las etapas del estudio, se realizó un diagnóstico relativo al aprovechamiento actual del agua, y se plantearon y analizaron con criterios técnicos y económicos una serie de alternativas para la mejora del uso del agua en la zona.

Dechmi y *col.*, (2003a, b) abordaron un estudio para analizar el uso del agua y el funcionamiento del regadío por aspersión de las 2.606 ha de la comunidad de regantes de la Loma de Quinto (Zaragoza, España). Este trabajo se llevó a cabo dentro de un

Programa de Mejora de la Gestión (Dedrick y *col.*, 1989), en el que se realizaron diversas evaluaciones de riego en campo, y se utilizaron un modelo balístico de simulación del riego por aspersión y un modelo de cultivos. De esta forma se obtuvieron los parámetros de diseño y manejo que optimizan la uniformidad del riego en la zona.

En una línea paralela a estos trabajos a escala de comunidad de regantes, también se han desarrollado otros que pretenden evaluar el funcionamiento del regadío a escala de zona regable (Ray y *col.*, 2002; Bandara, 2003). Para ello se utilizan parámetros hidrológicos obtenidos a partir de imágenes de satélite, estaciones meteorológicas, y estaciones de aforo disponibles en las infraestructuras de distribución de agua. Mediante dichos parámetros se deducen una serie de índices que sirven para monitorizar en el tiempo el nivel de aprovechamiento del agua en la zona de estudio.

### **II.1.3. El programa ADOR para la gestión de comunidades de regantes**

En los últimos años se han construido aplicaciones informáticas para la gestión del agua en comunidades de regantes y otras organizaciones de mayor entidad. Estas aplicaciones informáticas son programas que se utilizan para la gestión del agua en comunidades de regantes y que permiten a los gestores desarrollar capacidades de gestión que no serían abordables con recursos administrativos convencionales.

La FAO ha desarrollado el programa SIMIS (Mateos y *col.*, 2002). Este programa cubre los aspectos de gestión de un organismo dedicado a la gestión del agua y tiene utilidades para gestionar el reparto de agua a los agricultores. A pesar de que la introducción de estos hábitos de gestión en las comunidades de regantes no es fácil, muchas de ellas, incluso de países en desarrollo, están comenzando a confiar en este tipo de herramientas para mejorar el servicio a sus usuarios.

La Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía ha desarrollado una aplicación informática para mejorar la gestión del agua en comunidades de regantes. El programa desarrollado se llama GESTAGUA-CAP. Esta aplicación informática permite hacer un análisis de la situación de la comunidad a partir de la información que ésta realmente maneja. Este análisis permite mejorar el conocimiento de la comunidad y contribuye a la toma de decisiones, permitiendo alcanzar una mayor eficiencia de riego.

Playán y *col.* (2006) han desarrollado otra herramienta informática que presenta similitudes con las citadas anteriormente: el programa ADOR. El programa está basado en los principios de la norma ISO 9000, particularmente en lo que respecta al principio de trazabilidad. El uso de este programa de gestión (que ya se emplea en aproximadamente la mitad del regadío de Aragón, unas 175.000 ha) permite a las comunidades de regantes conocer dónde y para qué se usa cada metro cúbico de agua que entra en la comunidad. Dicho programa ha sido diseñado para 1) fomentar un uso racional del uso del agua, 2) facilitar las tareas del reparto del agua, 3) asegurar la trazabilidad del agua en agricultura y 4) aumentar la capacidad de servicio a los regantes.

Una de las características más innovadoras del programa es que incorpora un sistema de información geográfica para gestionar visualmente la comunidad. Este programa se puede descargar libremente de Internet a partir de su propia página Web (<http://www.eead.csic.es/ador>). El programa ADOR ha sido instalado en muchas zonas regables, principalmente en Aragón. Entre ellas se cuenta la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón dentro de ésta, la comunidad de regantes de Montesnegros.

La implantación de programas de gestión de comunidades de regantes tendrá muchos beneficios adicionales a la solución de los problemas de gestión administrativa del agua. Así, una gestión informatizada permitirá establecer indicadores de la demanda de agua en una determinada zona, así como suministrar los datos necesarios para hacer una correcta planificación de los recursos disponibles.

## **II.2. MODELOS BALÍSTICOS DE SIMULACIÓN DE RIEGO POR ASPERSIÓN EN COBERTURA TOTAL**

### **II.2.1. Simulación del riego por aspersión**

Los modelos de simulación de riego se vienen desarrollando en paralelo a la evolución de los ordenadores digitales. Sin embargo, su mayor progreso se ha producido en la última década (Montero, 1999). Los objetivos de estos modelos son: 1) evitar la laboriosidad de los ensayos de campo que permitan conocer la distribución del agua por un sistema de riego bajo condiciones reales de funcionamiento y, sobre todo, 2) disponer de una herramienta fundamental para el análisis y la mejora de los regadíos existentes y para el diseño de nuevos regadíos.

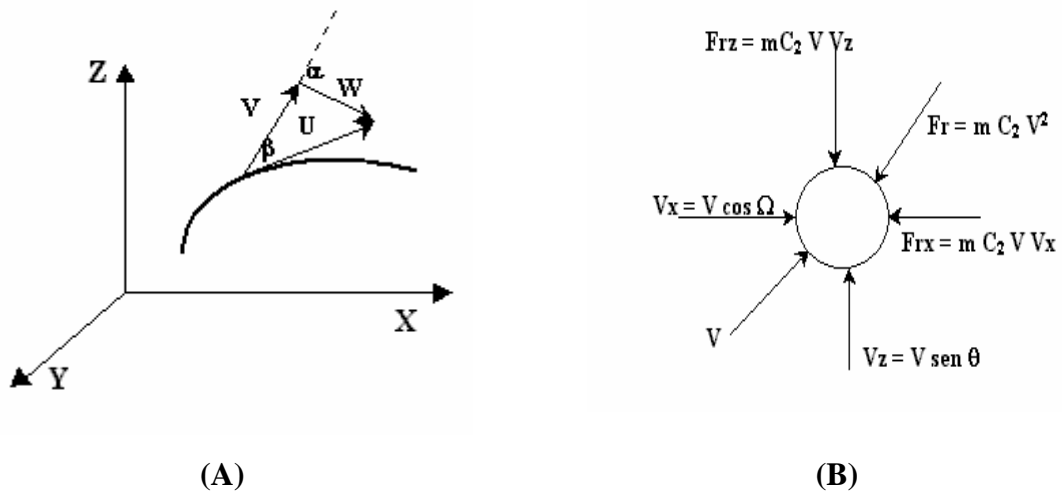
En el campo del riego por aspersión, los desarrollos se han venido sucediendo desde el principio de los años 80. Así, se han desarrollado modelos de simulación para las coberturas totales (Fukui y *col.*, 1980; Han y *col.*, 1994; Tarjuelo y *col.*, 1994; Carrión y *col.*, 2001; Montero y *col.*, 2001; Playán y *col.*, 2006), para los pivotes (Heerman, 1990; Bremond y Molle, 1995) y para los cañones de aspersión (Richards y Weatherhead, 1993; Augier, 1996).

### II.2.2. Introducción a los modelos balísticos del riego por aspersión

Ya que el proceso de rotura del chorro es difícil de modelizar, los estudios de simulación de trayectorias tienden a simplificarlo. Así, se considera al chorro como un conjunto de gotas de diferentes tamaños que se mueven independiente en el aire. Otra importante simplificación es que el coeficiente de resistencia del aire sólo se considera función del diámetro de la gota (Seginer, 1965; Von Bernuth y Gilley, 1984) o del número de Reynolds de una gota esférica (Fukui y *col.*, 1980). Para simplicidad del modelo se pretende, en principio, que el coeficiente de resistencia tenga una validez general, considerándolo independiente de la altura del aspersor sobre el suelo, la inclinación del chorro, la velocidad del viento o el diámetro de la boquilla (Montero, 1999).

La principal línea de trabajo en la simulación del riego por aspersión está basada en la aplicación de la teoría balística a las gotas de agua que son emitidas por el aspersor. Se supone que cada gota es independiente, ya que el chorro que sale del aspersor rápidamente se separa en gotas independientes (Seginer y *col.*, 1991).

Dos fuerzas actúan sobre una gota en vuelo: por un lado la acción de la gravedad, en la dirección vertical, y por otro una fuerza de resistencia que se opone al movimiento relativo de la gota en el aire (Vories y *col.*, 1987; Seginer y *col.*, 1991). En la Figura [II.1] se presenta un esquema bidimensional de una gota de agua moviéndose en el aire, y las velocidades y fuerzas que actúan sobre ella.



**Figura II.1.** Teoría balística aplicada a una gota de agua en el aire. Esquema de los vectores velocidad (A) y de fuerzas (B) que actúan sobre la gota (según Montero y col., 1997).

Seginer (1965) propuso que la fuerza de resistencia que actúa sobre una gota de agua en movimiento en el aire es:

$$Fr = m C_n V^2 \tag{II.1}$$

Siendo:

Fr: fuerza de resistencia de la gota en el aire

m: masa de la gota de agua

Cn: coeficiente de resistencia

V: vector velocidad de la gota de agua con respecto al aire

n: exponente numérico;

Seginer (1965) afirmó que un valor razonable para *n* podía ser 2. De esta forma la ecuación anterior se transforma en la siguiente:

$$Fr = m C_2 V^2 = \rho_w \frac{4}{3} \pi r^3 C_2 V^2 = \rho_w \frac{4}{3} \pi \frac{D^3}{8} C_2 V^2 \tag{II.2}$$

Siendo:

$\rho_w$  = densidad del agua

$D$  = diámetro nominal de la gota de agua

Fukui y *col.*, (1980) propusieron por su parte calcular la fuerza de resistencia del aire sobre el movimiento de la gota de la siguiente forma:

$$Fr = 1/8 \rho_a C \pi D^2 V^2 \quad [II.3]$$

Siendo:

$\rho_a$  = densidad del aire

$C$  = coeficiente de resistencia aerodinámico

La relación que existe entre  $C$  y  $C_2$  es la siguiente:

$$C_2(D) = \frac{3}{4} \rho_a / \rho_w C/D \quad [II.4]$$

En ausencia de viento, la trayectoria de una gota se mueve en un plano vertical, pero en general, las trayectorias tienen tres dimensiones. Sin viento, la velocidad de una gota respecto al suelo ( $U$ ) es igual a la velocidad de la gota respecto al aire ( $V$ ), pero actuando el viento (Figura II.1) se cumple que (Seginer y *col.*, 1991):

$$\vec{U} = \vec{V} + \vec{W} \quad [II.5]$$

Donde  $\vec{W}$  es la velocidad del viento (relativa al suelo), actuando siempre en un plano horizontal. Por tanto, la velocidad  $V$  y la fuerza de resistencia  $Fr$  no son tangentes al segmento del chorro de agua. Así, el vector velocidad ( $V$ ) será igual a la suma de sus componentes y su módulo se calculará como:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad [II.6]$$

Siendo:

$$V_x = U_x - W_x \quad [II.7]$$

$$V_y = U_y - W_y \quad [II.8]$$

$$V_z = U_z \quad [II.9]$$

La velocidad de salida del agua por la boquilla ( $U_0$ ) puede calcularse con la expresión siguiente:

$$U_0 = c \sqrt{2gH} \quad [\text{II.10}]$$

Siendo:

$c$ : coeficiente de descarga, que toma valores ligeramente menores a 1

$g$ : aceleración de la gravedad (9,81 ms<sup>-2</sup>)

$H$ : altura de presión en la boquilla en (m.c.a.)

### II.2.3. Ecuaciones del movimiento de una gota de agua en el aire

El movimiento de una gota de agua en su equilibrio dinámico se define según las siguientes ecuaciones (Von Bernuth y Gilley, 1984; Tarjuelo y col., 1994; Seginer y col., 1991):

$$\sum F = m \frac{dV}{dt} \quad [\text{II.11}]$$

$$A_x = \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C}{D} V \left( \frac{dx}{dt} - W_x \right) = -C_2 V (U_x - W_x) \quad [\text{II.12}]$$

$$A_y = \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C}{D} V \left( \frac{dy}{dt} - W_y \right) = -C_2 V (U_y - W_y) \quad [\text{II.13}]$$

$$A_z = \frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C}{D} V \left( \frac{dz}{dt} - W_z \right) = -C_2 V U_z - g \quad [\text{II.14}]$$

Siendo:

$x$ ,  $y$  y  $z$ : coordenadas cartesianas referidas al aspersor, de donde sale el chorro

$dx/dt$ ,  $dy/dt$  y  $dz/dt$ : componentes de la velocidad de la gota de agua

$t$ : tiempo del vuelo

$A$ : la aceleración de la gota en el aire.

Algunos autores consideran que el chorro se rompe en gotas inmediatamente al salir de la boquilla, mientras que otros utilizan una cierta distancia con respecto al aspersor que el chorro recorre antes de desintegrarse por completo formando las gotas.

Fukui y *col.*, (1980) y Von Bernuth y Gilley (1984) determinaron, en ausencia de viento, los tamaños de las gotas emitidas en algunas condiciones experimentales, y dibujaron las curvas radiales generadas por el aspersor con distintas presiones de trabajo. Li y Kawano (1995) propusieron la siguiente ecuación que determina la frecuencia de cada tamaño de gota en función de parámetros experimentales y empíricos:

$$P_v = \left( 1 - e^{-0.693 \left( \frac{D}{D_{50}} \right)^n} \right) 100 \quad [\text{II.15}]$$

Siendo:

D: diámetro de gota

P<sub>v</sub>: porcentaje total descargado en gotas menores que D

D<sub>50</sub>: diámetro medio de gota

n: exponente adimensional

$$D_{50} = ad + bnR \quad [\text{II.16}]$$

Los valores de D<sub>50</sub> y n pueden ser estimados de la siguiente manera:

$$n = an + bnR \quad [\text{II.17}]$$

Donde ad, bd, an, bn son coeficientes empíricos, y R es la relación entre el diámetro de la boquilla y la presión. Kincaid y *col.*, (1996) calcularon experimentalmente valores de estos parámetros para diversos aspersores, boquillas y fabricantes.

#### II.2.4. Formulaciones del coeficiente de resistencia aerodinámico

El coeficiente de resistencia aerodinámico C, es un componente de la fuerza Fr que se opone al movimiento horizontal de la gota de agua en el aire. Diversos estudios teóricos y experimentales se realizaron para determinar este coeficiente. En todos estos estudios el coeficiente de resistencia aerodinámico aparece como función del diámetro de gota.

Existen diferentes formulaciones del coeficiente de resistencia aerodinámico, el cual se expresa como función de distintas variables. Las expresiones más frecuentes son:

- ✓ En función del número de Reynolds (diámetro de la gota de agua y su velocidad) (Fukui y *col.*, 1980; Von Bernuth and Seginer, 1990; Kincaid, 1996);
- ✓ En función del diámetro de la gota (Seginer, 1995; Von Bernuth y Gilley, 1984; Li y Kawano, 1995);
- ✓ En función de las condiciones de funcionamiento (presión y forma y diámetro de la boquilla) (Hills y Gu, 1989; Li y Kawano, 1995)
- ✓ En función de las condiciones de funcionamiento (presión, diámetro de boquilla y velocidad del viento) (Seginer y *col.*, 1991, Tarjuelo y *col.*, 1994).

Todas estas aproximaciones sirven para conseguir que la simulación de las distribuciones de los tamaños de gotas se parezca lo más posible a las medidas experimentales.

La formulación más utilizada es la referida al número de Reynolds Fukui y *col.*, (1980) la definieron de la siguiente forma:

$$\text{Si } Re \leq 100 \rightarrow C = \frac{33,3}{Re} - 0,0033Re + 1,2 \quad [\text{II.18}]$$

$$\text{Si } 100 \leq Re \leq 1000 \rightarrow C = \frac{72,2}{Re} - 0,0000556Re + 0,48 \quad [\text{II.19}]$$

$$\text{Si } 1000 \leq Re \rightarrow C = 0,45 \quad [\text{II.20}]$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad [\text{II.21}]$$

Siendo:

*Re*: número de Reynolds

*V*: velocidad de la gota respecto del aire

*D*: diámetro nominal de la gota

$V$ : viscosidad cinemática del aire

### II.2.5. Corrección del coeficiente de resistencia aerodinámico

El modelo de reparto de agua de un solo aspersor que se obtiene con el planteamiento expuesto hasta aquí mantiene una forma casi circular aún en presencia de viento. El contraste de los resultados del modelo con resultados experimentales mostró que la forma del área mojada por el aspersor muestra un fuerte estrechamiento en la dirección perpendicular al viento, así como un acortamiento a barlovento y un alargamiento a sotavento (von Bernuth y Seginer, 1990). Para conseguir que el modelo reproduzca esta deformación, Seginer y *col.*, (1991) propusieron una corrección del coeficiente de resistencia aerodinámico  $C$  de la siguiente forma:

$$C' = C (1 + K \operatorname{sen} \beta) \quad [\text{II.22}]$$

Siendo:

$\beta$ : ángulo que forman los vectores  $V$  y  $U$ , tal como se presenta en la Figura (II.1)

$K$ : parámetro empírico, determinado mediante calibración con datos experimentales

Posteriormente, Tarjuelo y *col.*, (1994) introdujeron un parámetro empírico adicional para el coeficiente de resistencia al aire:

$$C' = C (1 + K1 \operatorname{sen}\beta - K2 \operatorname{cos}\alpha) \quad [\text{II.23}]$$

Siendo:

$\alpha$ : ángulo que forman los vectores  $V$  y  $W$  como se presenta en la Figura [II 2].

$K1$  y  $K2$ : parámetros empíricos determinados mediante calibración con datos experimentales.  $K1$  es equivalente al parámetro  $K$  propuesto por Seginer y *col.*, (1991).

El parámetro  $K1$  estrecha el modelo de distribución del agua simétricamente en la dirección del viento. El parámetro  $K2$  desplaza el área mojada en la dirección del

viento. De esta manera se acorta la distancia del centro del área mojada del aspersor (dirección barlovento) y se alarga más detrás (dirección sotavento). La combinación de ambos parámetros mejora sustancialmente la capacidad predictiva de los modelos de simulación de distribuciones de agua en presencia de viento (Tarjuelo y col., 1994). *K2* resultó mucho menos relevante que *K1* (Montero y col., 2001). Como contrapartida, el uso de dos parámetros aumenta el trabajo de calibración del modelo.

### **II.2.6. Solapamiento de la distribución del agua en aspersores aislados: el marco de aspersión**

La característica fundamental del riego por aspersión es que el agua se aplica en el aire y cae al suelo en forma de lluvia más o menos intensa. Los aspersores individuales se distribuyen en la finca según un marco determinado intentando conseguir así un buen solape entre ellos para dar una buena uniformidad dentro de la parcela.

La distribución del agua que se consigue en el campo mediante la superposición de las distribuciones de agua de los aspersores individuales no es totalmente uniforme, sino que se muestra una variabilidad espacial cuya magnitud depende entre otros factores de la velocidad y dirección del viento. Para intentar conseguir una distribución uniforme del riego, se eligen unos marcos adecuados que aseguran un buen solapamiento, que a su vez ayude a conseguir elevadas uniformidades.

La pluviometría media del sistema, es decir, la tasa de aplicación de agua de agua por unidad de tiempo deberá de ser inferior a la velocidad de infiltración establecida del suelo, para evitar encharcamiento y escorrentía superficial que reducirían la uniformidad y la eficiencia y podrían causar erosión. La pluviometría máxima admisible varía en función de la textura del suelo, de la pendiente del terreno y de la cobertura vegetal.

Las gotas que alcanzan el suelo son de mayor tamaño a medida que aumentan su distancia del emisor. Conforme disminuye la presión de funcionamiento, aumenta el tamaño medio de las gotas que abandonan la boquilla. Cuando se aumenta el diámetro de la boquilla, también aumentará el tamaño de las gotas. No es conveniente que las gotas sean de gran tamaño, debido a la compactación que provocan en la capa

superficial del suelo. Por otro lado, si las gotas son demasiado finas el viento las puede arrastrar, lo que resultaría en sustanciales pérdidas por evaporación y arrastre.

### **II.3. USO DEL AGUA DE RIEGO, UNIFORMIDAD, PRODUCCIÓN Y PRODUCTIVIDAD**

#### **II.3.1. Respuesta de los cultivos al agua y su relación con la uniformidad de riego**

La falta de uniformidad de riego tiene un claro efecto negativo sobre el rendimiento de los cultivos y las pérdidas de agua por percolación profunda. Este efecto ha sido puesto de manifiesto por trabajos realizados en distintos ambientes y sistemas de riego (Stern y Bresler, 1983; Dagan y Bresler, 1988; Or y Hanks, 1992). En las condiciones del valle del Ebro, Zapata y Playán (2000); Zapata y *col.*, (2000) y Cavero y *col.*, (2001) analizaron el efecto de la uniformidad del riego por superficie sobre la variabilidad espacial de un cultivo de maíz, utilizando evaluaciones de campo, simulación de riegos y modelos de cultivos. En los sistemas de riego por aspersión con cobertura total, Dechmi y *col.*, (2003a, 2003b, 2004a) encontraron resultados similares, destacando el efecto del viento sobre la uniformidad del riego. Estos autores mostraron que es posible diseñar estrategias de programación del riego que eviten el viento, aumentando la producción del cultivo y disminuyendo el uso de agua de riego.

La falta de uniformidad produce dentro de una misma parcela zonas con exceso de riego y zonas con déficit de riego, que pueden ocurrir a la vez. La relación entre la dosis media de riego y las necesidades de agua de los cultivos puede dar lugar a que prevalezca el déficit hídrico y por lo tanto la merma en la producción, o a que las pérdidas por percolación profunda sean muy importantes (Dechmi, 2002). En un determinado sistema agrario, la relación entre el coste del agua y el valor de la producción determinará cuál es la dosis de riego óptima.

Bruckler y *col.*, (2000) sintetizaron numerosos trabajos sobre la uniformidad del riego y su relación con la producción de los cultivos. Estos autores concluyeron que la variabilidad de la humedad del suelo, la altura del cultivo y el rendimiento del cultivo tienen una estructura espacial similar a la de la distribución del agua de riego. Los experimentos sobre este tema fueron generalmente diseñados para caracterizar el

impacto de la variabilidad espacial del agua disponible en el suelo resultante de un riego no uniforme sobre el rendimiento.

### II.3.2. El modelo CropWat

En la última década se han realizado muchos trabajos científicos orientados a simular el balance de agua de los cultivos, así como su crecimiento y producción. Estos modelos sirven para identificar los factores que controlan el rendimiento del cultivo y su evapotranspiración, y para cuantificar su influencia relativa. Uno de los modelos que ha alcanzado mayor difusión es el CropWat (Smith, 1993) propuesto por FAO. A pesar de su sencillez, este modelo ha sido aplicado con éxito en diversos cultivos, sistemas de riego y ambientes (Frenken, 2000; George y *col.*, 2000). En las condiciones del valle del Ebro, Cavero y *col.*, (2000) aplicaron los modelos CropWat y EPIC-phase en la simulación de experimentos de riego deficitario por superficie y aspersión en un cultivo de maíz. De sus resultados se desprende que CropWat puede proporcionar resultados precisos partiendo de un volumen de información reducido.

El modelo ADOR-Crop se basa en el modelo propuesto por (Stewart, 1977), donde la evapotranspiración real del cultivo ( $ET_a$ ) y el rendimiento ( $Y$ ) se normalizan según sus valores máximos. El desarrollo fenológico del cultivo se divide en el desarrollo vegetativo, la floración y las etapas que llenan el grano basadas en el tiempo termal ( $t_d$ ) según lo definido por Gallagher (1979) en la Ecuación siguiente:

$$t_d = \sum_{i=1}^n (\bar{T}_a - T_b) \quad [\text{II.24}]$$

Siendo:

$\bar{T}_a$  : Temperatura diaria media del aire

$T_b$ : Temperatura de base, a partir de la cual el desarrollo del cultivo para

$n$ : número de los días de la observación de la temperatura usados en la adición.

Las reducciones en la producción debido a la tensión del agua del suelo fueron divididas en cuatro etapas del desarrollo del cultivo usando un parámetro  $K_y$  para cada

etapa. Se determina la reducción acumulativa de la producción usando la fórmula multiplicativa siguiente:

$$\frac{y_i}{y_{\max}} = \prod_{f=1}^4 \left[ 1 - k_{yn} \left( 1 - \frac{ET_{ai}}{ET_m} \right)_n \right] \quad [\text{II.25}]$$

Siendo  $f$  el estado de desarrollo.

Como en la mayoría de los modelos funcionales, todos los flujos del agua del suelo se consideran unidimensionales (flujo vertical). El suelo se describe como un depósito, caracterizado por su contenido en agua ( $SWC_{ij}$ ), variando para cada día ( $j$ ) y célula dentro del marco de aspersión ( $i$ ) como sigue:

$$SWC_{ij} = SWC_{ij-1} + P_j + ID_{ij} - ETa_{ij} - Dp_{ij} \quad [\text{II.26}]$$

Siendo:

$SWC_{ij}^{-1}$ : contenido de agua en el suelo en la célula  $i$  en el día  $j-1$

$ID_{ij}$ : altura de agua aplicada

$P_j$ : precipitación efectiva

$ETa_{ij}$ : evapotranspiración real del cultivo

$Dp_{ij}$ : altura de percolación

El drenaje ocurre si  $SWC_{ij}$  es mayor que el agua total disponible en el suelo de la célula  $i$  ( $TAW_i$ ). Durante el crecimiento del cultivo, el TAW aumenta de una forma lineal con el crecimiento de las raíces del cultivo.

Los procedimientos utilizados para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo, las necesidades de agua del cultivo y las necesidades de agua de riego se basan en la metodología de la FAO (Allen y col., 1998). La evapotranspiración diaria del cultivo ( $ET_{cj}$ ) se ha estimado a partir de los valores de la evapotranspiración de referencia ( $ET_{0j}$ ) utilizando la ecuación de Penman-Monteith de la FAO y los coeficientes de cultivos ( $K_c$ ).

La ecuación de evapotranspiración real,  $ETa_{ij}$  es como sigue:

$$ETa_{ij} = ETc_j ; \text{ If } SWD_{ij-1} < AWD \quad [\text{II.27}]$$

$$ETa_{ij} = ETc_j \left( \frac{TAW_i - D_r}{(1-P)TAW_i} \right); \quad \text{If } SWD_{ij-1} > AWD \quad [\text{II.28}]$$

Siendo:

$SWD_{ij}$ : agotamiento del agua en el suelo dentro de la célula  $i$  en el día  $j$

$TAW_i$  : agua total disponible de la célula  $i$

$AWD$ : agotamiento admisible del agua en el suelo

$D_r$ : agotamiento de la zona de las raíces

$P$ : fracción del  $TAW_i$  que el cultivo puede extraer sin sufrir estrés hídrico.

### II.3.3. Gestión y productividad del agua

En todos los sistemas de riego, un adecuado diseño y manejo permiten hacer un uso más eficiente del agua disponible, maximizar la producción y limitar las pérdidas de agua por percolación profunda. Desafortunadamente, en muchas zonas regables del mundo la eficiencia de riego está por debajo de los niveles esperados (Clemmens y Dedrick, 1994). Estas bajas eficiencias son debidas a una mala gestión del uso del agua que puede ser debida a un déficit de agua y/o aun manejo inadecuado.

Una adecuada gestión del agua de riego contribuye a la mejora de su productividad, ya que mejora el rendimiento de los cultivos y disminuye del uso del agua en parcela (Playán y Mateos, 2005). Singh y *col.*, (2006) mostraron que para alcanzar este objetivo es preciso caracterizar y optimizar las relaciones causa-efecto entre las variables hidrológicas (evaporación, transpiración, percolación, subida capilar) y las variables biofísicas (materia seca y producción del grano) en cada ambiente agroecológico.

La productividad del agua puede ser definida de muchas maneras, aunque siempre representa el rendimiento de una actividad que usa agua (en términos monetarios si es posible) dividida por el volumen de agua necesario (Playán y Mateos, 2005). Las variantes de esta definición se basan en las variables que se usan en el numerador y en el denominador de la expresión. Una de las formas más sencillas que se puede utilizar para caracterizar la productividad es la siguiente:

$$WP = \frac{\text{Producción}}{\text{Agua Utilizada}} \quad [\text{II.29}]$$

Siendo:

WP: productividad del agua

Según cuál sea la unidad de producción usada, se diferencia entre productividad agrícola del agua o productividad económica del agua.

$$WP_a = \frac{\text{Producción (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Agua Utilizada (m}^3\text{ ha}^{-1}\text{)}} \quad [\text{II.30}]$$

Siendo:

WP<sub>a</sub>: productividad agrícola del agua (kg m<sup>-3</sup>)

$$WP_e = \frac{\text{Producción (€ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Agua Utilizada (m}^3\text{ ha}^{-1}\text{)}} \quad [\text{II.31}]$$

Siendo:

WP<sub>e</sub>: productividad económica del agua (€ m<sup>-3</sup>)

En el caso de usar la producción económica, se pueden usar indicadores como los ingresos brutos, el margen bruto del cultivo o el margen neto. Respecto del denominador, Playán y Mateos (2005) presentaron varias formas de la ecuación en función de que se utilicen distintas variables hidrológicas. Las variantes incluyen la incorporación o no de la lluvia al agua de riego, el uso del agua de riego medida en distintos puntos de la red de distribución, las necesidades de agua de los cultivos o el agua realmente evapotranspirada por los cultivos.

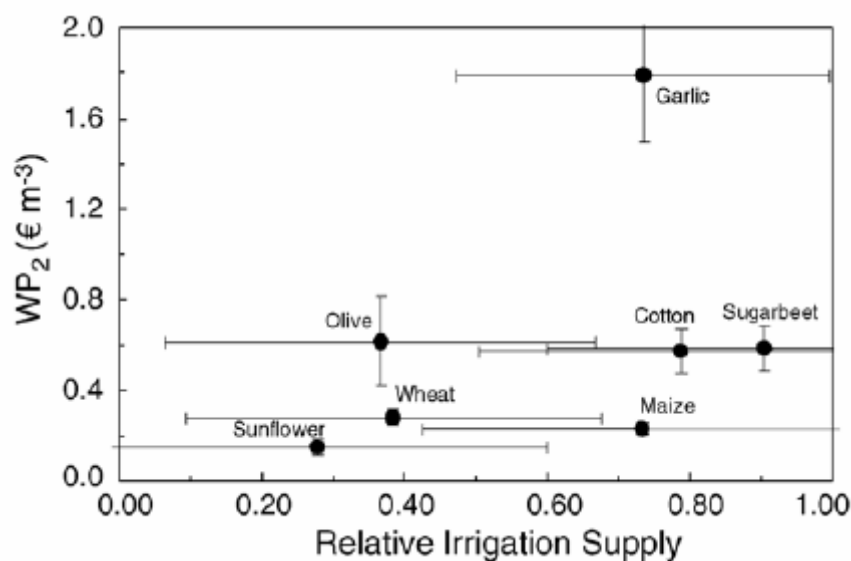
Playán y Mateos adaptaron los resultados presentados por Lorite y *col.*, (2004) para expresar la relación entre Suministro Relativo de Agua (RIS, por sus siglas en inglés) y el término de productividad WP<sub>2</sub>. Estos autores utilizaron las siguientes ecuaciones para calcular estas variables:

$$\text{RIS} = \frac{\text{Agua aplicada en parcela (m}^3\text{)}}{\text{Necesidades de agua del cultivo (m}^3\text{)}} \quad [\text{II.32}]$$

$$WP_2 = \frac{\text{Valor de la producción (€)}}{\text{Agua de riego aplicada en parcela (m}^3\text{)}} \quad [\text{II.33}]$$

Los citados autores utilizaron una figura (reproducida como Figura II.2 de este documento) para ilustrar la relación entre  $WP_2$  y RIS para diferentes cultivos en la zona regable de Genil-Cabra, caracterizada por la escasez y elevado precio del agua de riego. Las barras verticales de la figura se corresponden con dos desviaciones estándar. La productividad económica de un cultivo varía en función de la cantidad de agua aplicada, aunque la variación de  $WP_2$  fue en general muy inferior a la variación del RIS. Resulta significativo que en maíz, trigo y girasol la productividad resulte casi invariable con el suministro de agua, aunque éste último sufra variaciones muy importantes (por ejemplo, en el caso del maíz, el intervalo de agua aplicada está entre 0,40 y 1,00). En el caso del olivo, el RIS varió entre 0,10 y 0,70 y  $WP_2$  se situó en un rango amplio, de entre 0,40 y 0,80 € m<sup>-3</sup>.

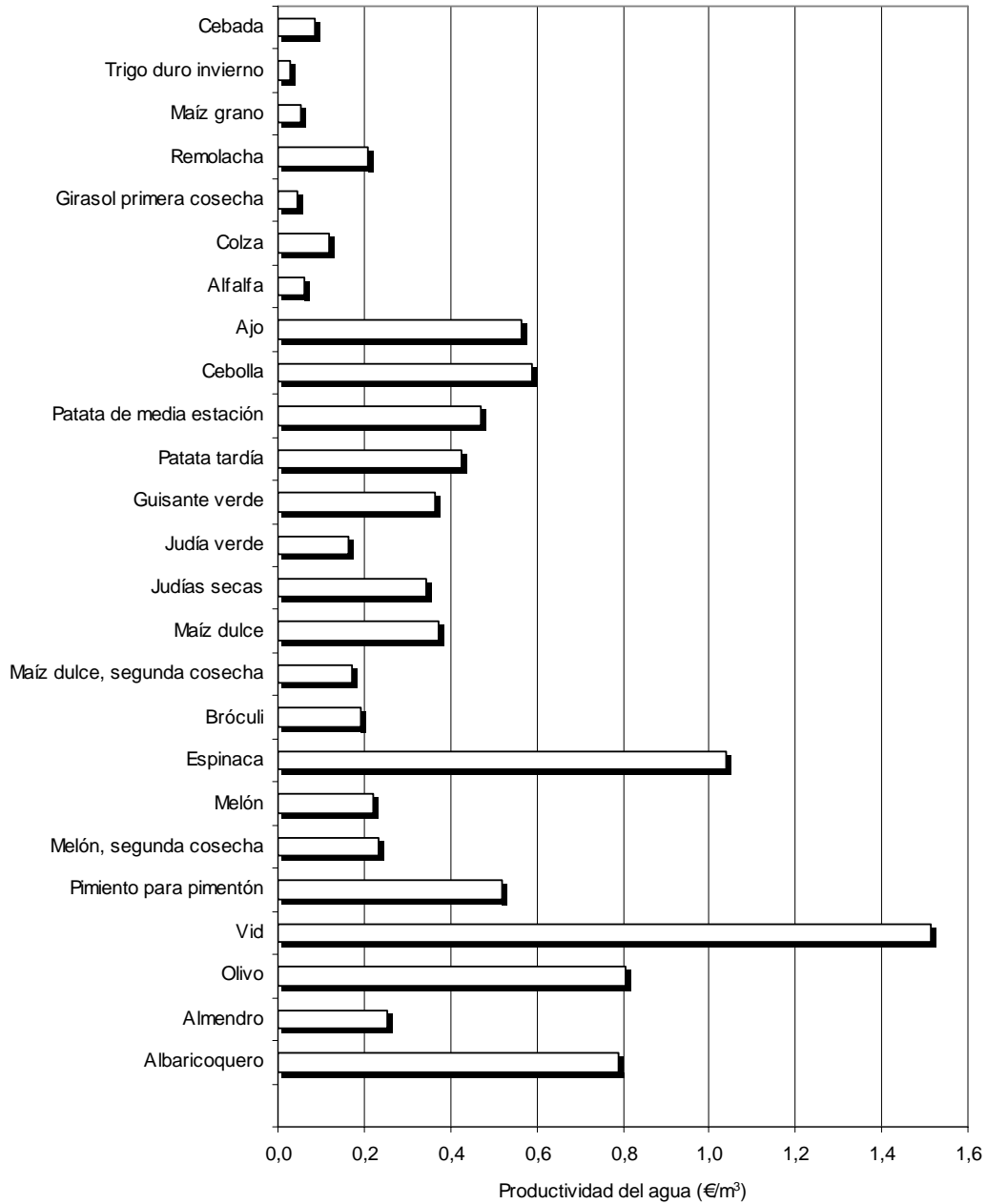
La Figura II.2 muestra una gran variabilidad en las pautas de aplicación del agua de los regantes de una misma comunidad. Esta variabilidad ha sido puesta de manifiesto en estudios anteriores en el valle del Ebro (Faci y *col.*, 2000; Dechmi y *col.*, 2003a) y contribuye a explicar la variabilidad de la productividad económica entre las parcelas de la misma comunidad de regantes. La aplicación del agua de riego es un factor adicional al conjunto de los factores que determinan la productividad de una parcela de cultivo (como el tipo de suelo, las prácticas agrícolas o el nivel de tecnificación).



**Figura II.2.** Relación entre la productividad económica del agua y el suministro relativo de agua aplicada al cultivo (Reproducido de Playán y Mateos (2005), quienes elaboraron los datos de Lorite y col., (2004). Las barras indican el doble de la desviación estándar.

La Figura II.3 muestra la variabilidad de la productividad económica del agua (margen bruto de cada cultivo, dividido por la dosis de riego recomendada) para los cultivos más habituales de la provincia de Albacete. La figura muestra que existe una elevada variabilidad en la productividad del agua agrícola dentro de una misma zona regable. Resulta destacable que algunos cultivos tienen unas productividades muy bajas, en el intervalo de 0,05 a 0,2 € m<sup>-3</sup>. Este es el caso de los cultivos extensivos, como el maíz o la alfalfa. Se trata de cultivos altamente mecanizados, y que muestran un nivel de retorno económico del agua poco competitivo con otros usos alternativos.

Por otro lado, la productividad de algunos cultivos frutales y hortícolas resulta bastante elevada (este es el caso de la vid, la espinaca, el olivo o el albaricoquero). Estos cultivos, cuya productividad se sitúa entre 0,6 y 1,5 € m<sup>-3</sup>, son competitivos con el destino urbano del agua y con la mayor parte de los usos industriales y ganaderos. La elección de uno u otro tipo de cultivos depende de los agricultores, que se basan en criterios como la existencia de mano de obra disponible, el tamaño de la explotación y las posibilidades de comercialización de los productos, además de los típicos factores de suelo y clima.



**Figura II.3.** Productividad del agua (Margen bruto obtenido por cada unidad de volumen de agua de riego) para diferentes cultivos de la provincia de Albacete. Elaborado a partir de los datos presentados por de Juan y col., (2003).

**CAPÍTULO III:**  
**MATERIAL Y MÉTODOS**



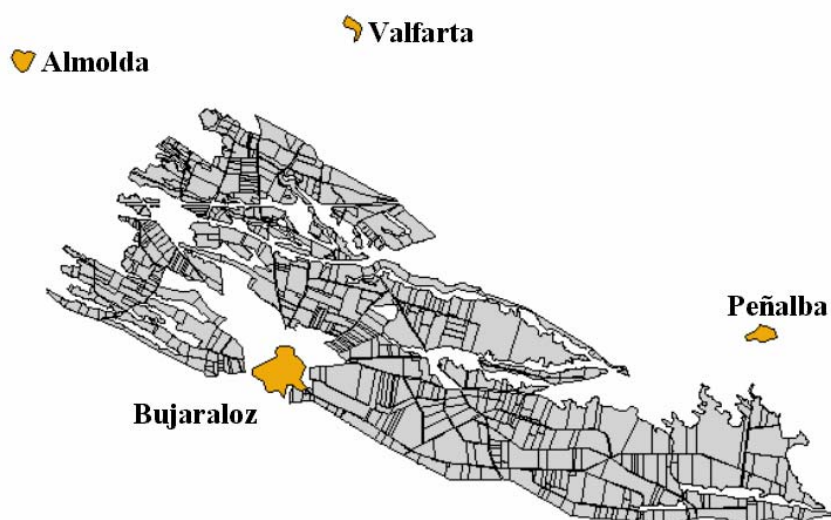
### III. Material y Métodos

#### III.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

##### III.1.1. La Comunidad de Regantes de Montesnegros

###### III.1.1.1. Localización y características generales

La Comunidad de Regantes de Montesnegros (CRM) es una de las 53 Comunidades de Regantes que forman parte de la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón. Está localizada dentro de la comarca aragonesa de Monegros. Esta Comunidad se enmarca en los términos municipales de Bujaraloz, La Almolda, Valfarta y Peñalba, en las provincias de Zaragoza y Huesca.



**Figura III.1.** Mapa de la comunidad de regantes de Montesnegros.

La CRM abarca 3.475 ha, que en su mayoría están cultivadas de alfalfa y maíz. En total, la comunidad tiene 605 parcelas catastrales divididas en dos zonas. La primera zona representa la parte más elevada de la comunidad. Esta zona tiene 211 parcelas, con una superficie total de 870 ha. La segunda zona representa la parte más baja de la comunidad, con 394 parcelas que ocupan una superficie total de 2.605 ha. El tamaño de las parcelas va de 0,023 a 86,0 ha, con un tamaño medio de 5,72 ha.

El agua de riego llega a la CRM desde el Canal de Monegros y se almacena en una balsa a cota de canal con una capacidad total de 307.000 m<sup>3</sup>. De esta balsa de almacenamiento se bombea a dos balsas más elevadas, de forma que éstas son las que alimentan a la red presurizada. La cota de estas balsas es suficiente para proporcionar presión natural a la red en toda su extensión. De cada una de estas balsas parte una red presurizada que riega cada una de las dos zonas de la comunidad antes mencionadas (Zona alta y Zona baja).

La estación de bombeo tiene una potencia instalada total de 1.176 Kw y cuenta con la particularidad de que se alimenta con generadores diesel, ya que no se dispone de suministro eléctrico. Esta particularidad repercute de forma importante en el precio del agua, ya que el encarecimiento del crudo en los últimos años ha resultado en un aumento del precio del agua en la Comunidad. Como ejemplo, en la campaña de 2004 el precio del agua ascendió a 0,048 € m<sup>-3</sup>.

En esta comunidad el riego se organiza a la demanda. Así, cada vez que el agricultor necesita regar solamente tiene que abrir su hidrante. La persona encargada del reparto de agua entre todos los agricultores cuenta con su propia experiencia para estimar el agua que necesitarán los agricultores en los próximos dos días. Esta estimación es muy importante porque la CRM está localizada a dos días de curso del agua desde los embalses que suplen el canal de Monegros. El gestor de la comunidad debe de realizar la petición del agua con dos días de antelación. Puesto que la comunidad tiene una capacidad de regulación interna muy escasa, un error en la estimación puede resultar en un vertido de importantes cantidades de agua al desagüe, situación que está penalizada. Para realizar esta estimación, el gestor cuenta con los datos históricos de uso del agua, la estima de las necesidades hídricas y particularmente con el pronóstico del viento. Esta última información es muy importante porque los agricultores reducen el riego de los cultivos cuando el viento es muy elevado.

Anadón (2006) realizó encuestas para caracterizar técnicamente el riego en parcela en la CRM. En las encuestas se solicitó a los agricultores información sobre diferentes aspectos que pueden clasificarse en tres apartados diferenciados:

- ✓ Información general sobre la superficie manejada por un agricultor.
- ✓ Información técnica sobre el amueblamiento en parcela.
- ✓ Información sobre las prácticas de riego: calendario de riegos y programación.

Las encuestas realizadas engloban una superficie de 1.479 ha, que representan el 42 % de la superficie total de la comunidad. La información generada a partir de las encuestas dio lugar a las siguientes conclusiones:

- ✓ El sistema de riego más utilizado es la cobertura total, frente al segundo sistema en importancia, el pivote. La mayoría de las parcelas equipadas con pivote completan el riego de las esquinas con sistemas de cobertura total. Muy pocas parcelas tienen solamente el sistema de riego por pivote.
- ✓ La mayoría de las parcelas con cobertura total tienen instalados aspersores de la marca VYR S.A., modelo VYR35, equipados con doble boquilla, la principal de 4,8 mm de diámetro y la secundaria de 2,4 mm. La caña porta-aspersor coloca el emisor a una altura de 2 m sobre el suelo.
- ✓ El marco de aspersión más utilizado es el 18 x 18 m en disposición triangular (T 18 x 18). La presencia de otros marcos triangulares, como T 18 x 15 o T 21 x 18, es minoritaria.
- ✓ En cuanto a los sectores, la superficie media de cada sector oscila entre 0,75 y 1,00 ha. El número total de aspersores por sector oscila entre 20 y 30.

#### **III.1.1.2. Determinación de las necesidades de agua de los cultivos**

La determinación de las necesidades de agua de los cultivos es el paso previo para establecer el agua que será necesario aportar con el riego. En nuestro caso, los cultivos más importantes son la alfalfa y el maíz. El cálculo de las necesidades de agua se ha llevado a cabo de acuerdo con los métodos propuestos por Allen y *col.*, (1998).

En el caso de la alfalfa las necesidades de agua han sido calculadas partiendo de la evapotranspiración del cultivo, utilizando la siguiente relación:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad [III.1]$$

Siendo:

$ET_c$ : evapotranspiración del cultivo

$K_c$ : coeficiente del cultivo

$ET_0$ : evapotranspiración potencial del cultivo

El valor del coeficiente de cultivo  $K_c$  ha sido obtenido de la base de datos de la Oficina del Regante del Gobierno de Aragón, gestionada por la empresa pública SIRASA (<http://oficinaregante.aragon.es>). Las necesidades de agua han sido calculadas semanalmente utilizando un valor medio de  $K_c$  del orden de 0,93. Después de calcular la  $ET_c$ , se calculan las necesidades hídricas netas aplicando la siguiente relación:

$$NH_n = ET_c - P_{ef} \quad [III.2]$$

Siendo:

NH<sub>n</sub>: Necesidades Hídricas netas

P<sub>ef</sub>: Precipitación efectiva

La precipitación efectiva se obtiene aplicando factores de corrección a la precipitación que dependen de la capacidad de retención del suelo y de su condición de humedad antes de la lluvia.

En el caso del maíz, la diferencia con el procedimiento seguido para la alfalfa está en el coeficiente de cultivo  $K_c$ . Éste se obtuvo a partir de la integral térmica acumulada relativa, usando la siguiente expresión:

$$K_{c_i} = b_0 + b_1 ITr_i + b_2 ITr_i^2 + b_3 ITr_i^3 \quad [III.3]$$

Siendo:

$ITr_i$ : Integral Térmica acumulada relativa para el día  $i$  (tanto por uno)

$$b_0 = 0,2192$$

$$b_1 = 2.9899$$

$$b_2 = - 0,43784$$

$$b_3 = - 2.2990$$

Para calcular los parámetros de la Ecuación [III.3] se obtuvieron valores experimentales de  $K_c$  por comparación de medidas de evapotranspiración realizadas en lisímetros de maíz y del cultivo de referencia (festuca). Se ajustó mediante mínimos cuadrados una ecuación para explicar los valores de  $K_c$  en base a la integral térmica relativa siguiendo el modelo de la Ecuación [III.3] durante los años 1997 y 1998 (Martínez-Cob, com. Per.). La integral térmica acumulada relativa para el día  $i$  se calculó con la expresión:

$$ITr_i = \frac{IT_i}{ITT} \quad [III.4]$$

Siendo:

$IT_i$ : Integral Térmica acumulada en el día  $i$  (°C)

$ITT$ : Integral Térmica Total en todo el ciclo del cultivo. En este trabajo se ha considerado un valor de  $ITT = 2.130$  °C

La integral térmica acumulada para el día  $i$  se obtuvo con la expresión siguiente:

$$IT_i = \sum_{n=1}^{i-1} IT + Tm_i - T_b \quad \text{si } Tm_i - T_b > 0 \quad [III.5]$$

$$IT_i = \sum_{n=1}^{i-1} IT \quad \text{si } Tm_i - T_b \leq 0 \quad [III.6]$$

Siendo:

$$\sum_{n=1}^{i-1} IT$$

: Integral Térmica acumulada hasta el día  $i-1$  (°C)

$Tm_i$ : Temperatura media en el día  $i$  (°C)

$T_b$ : Temperatura base (°C). En este caso se consideró para maíz  $T_b = 7,5$  °C

### III.1.1.3. Estimación del margen bruto y neto de los cultivos

Se hizo un estudio económico para estimar el margen bruto de los cultivos más representativos de la zona de estudio. Este estudio económico siguió el esquema de ingresos y costes propuesto por de Juan y col. (2003). Los rendimientos de los cultivos, ingresos, costes fijos y variables propios de la Zona de Estudio se obtuvieron a partir de comunicaciones no estructuradas con los técnicos y agricultores de la comunidad de regantes. Tanto los consumos de agua de los cultivos como los costes derivados de su utilización (precio por metro cúbico y derramas anuales) se obtuvieron de las bases de datos ADOR, programa de gestión que utiliza la comunidad de regantes.

Este tipo de estudio permite conocer la situación media de las explotaciones, el interés por la modernización y su capacidad económica para afrontar actuaciones de mejora y consolidación de regadíos. Con esta misma finalidad, Navarro y col., (2006) realizaron un estudio económico en el que compararon datos e indicadores económicos de maíz y alfalfa en la zona regable de de Montijo (Badajoz) y de la Margen Izquierda Del Porma (León). La metodología utilizada en ese estudio es la misma utilizada en esta tesis.

Para calcular el margen bruto de los dos cultivos, se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$\text{Margen bruto} = \text{Ingresos totales} - \text{gastos variables} \quad [\text{III.7}]$$

Para calcular los ingresos totales se consideraron la producción, el precio y la ayuda compensatoria. Para determinar los costes variables se tuvieron en consideración diferentes conceptos (canon del agua, fertilizantes, mano de obra, fitosanitarios, semillas, maquinaria,

seguro integral y secado del grano). Algunos de estos conceptos son aplicables en maíz, o en alfalfa, o en ambos cultivos.

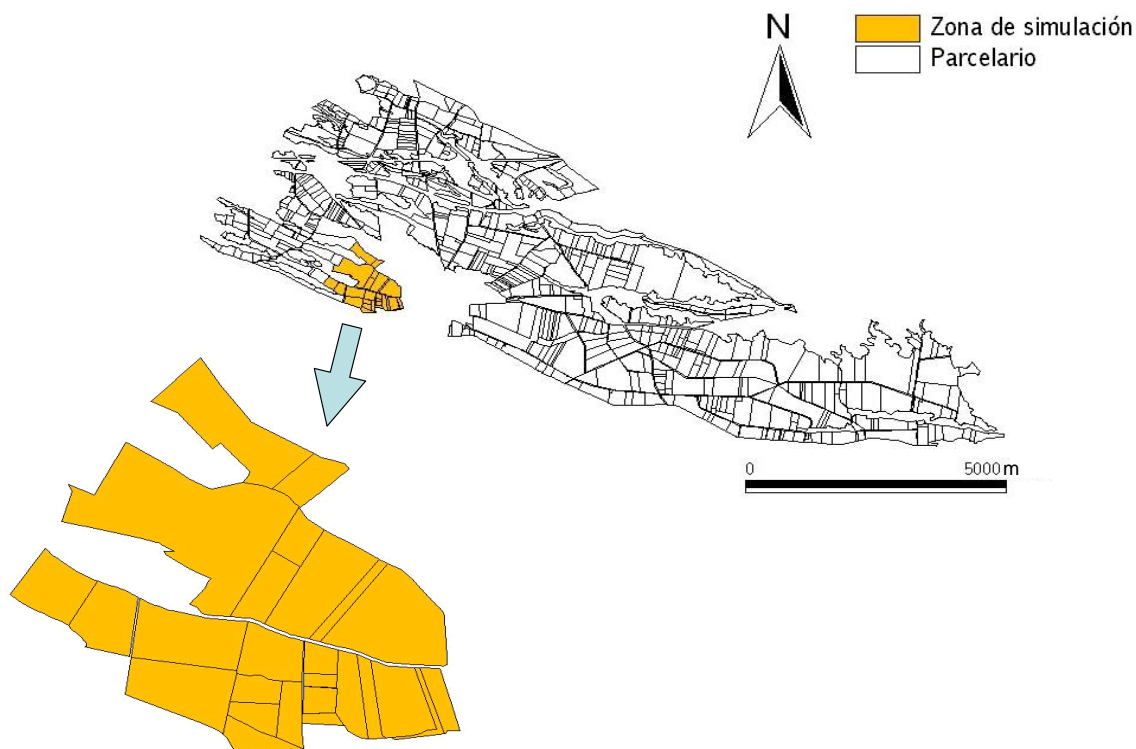
La comunidad de regantes aplica un precio único al agua, siendo en la campaña 2004 de 0,047 € m<sup>-3</sup>. El coste del agua se obtiene multiplicado el precio por unidad de volumen por el volumen total de agua facturado. En el caso del maíz en la campaña de estudio, los agricultores recibieron una ayuda compensatoria procedente de la PAC de 470,0 € ha<sup>-1</sup> (MAPA, 2005). Basándonos en datos de producciones de la propia zona (datos facilitados por la Cooperativa San Isidro de Bujaraloz), se ha estimado que la producción máxima en el caso de la alfalfa es de 15.500 kg ha<sup>-1</sup>. El precio de la misma en la campaña 2004 fue de 0,105 € kg<sup>-1</sup> (datos de la Cooperativa San Isidro de Bujaraloz). En maíz, la producción máxima estimada es de 14.000 kg ha<sup>-1</sup> y el precio de 0,138 € kg<sup>-1</sup>, al 14 % de humedad. El rendimiento de cada parcela particular se calculó mediante el modelo de simulación de cultivos. El modelo calcula el rendimiento relativo expresado en porcentaje respecto al máximo.

Para calcular el margen neto de los cultivos se resta del margen bruto el coste de las amortizaciones de los equipos. En la zona de estudio, las amortizaciones son debidas a los equipos de riego, tanto los colectivos como el amueblamiento de riego en parcela. Puesto que la zona de estudio ya está en regadío y hace frente a la amortización de los equipos de riego instalados durante la transformación, se decidió utilizar costes de amortización derivados de la instalación de una red actual y con las condiciones de financiación resultantes del Plan Nacional de Regadíos. De esta manera, se pueden utilizar los costes de amortización derivados de redes de distribución de distinta capacidad. Para ello, se utilizaron los resultados del estudio presentado por Zapata y col., (2007), tal como se presenta en el Apartado III.4.3. En este estudio se analizaron con criterios de coste actuales las amortizaciones derivadas de redes de riego construidas en las condiciones del valle medio del Ebro y con capacidades de hidrante variando entre 1.0 y 1.8 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>.

### **III.1.2. La Zona de Simulación**

#### **III.1.2.1. Localización y características generales**

Dada la dificultad de caracterizar de forma adecuada todas las parcelas de la CRM para proceder a su simulación, se eligió una zona pequeña, representativa de las condiciones generales. Esta área, denominada “Zona de Simulación”, abarca un total de 26 parcelas. Su representación cartográfica mediante un Sistema de Información Geográfica (GIS) se obtuvo a partir de las coberturas preparadas por Sánchez-Marcos, (2005), y se presenta en la Figura III.2.

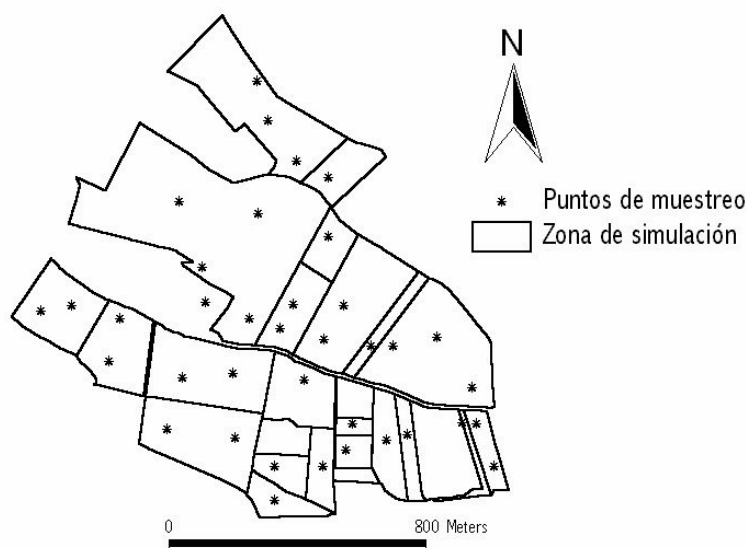


**Figura III.2.** Mapa de localización y emplazamiento de la Zona de Simulación dentro de la CRM.

La Zona de Simulación abarca 113 ha repartidas en 26 parcelas que pertenecen a 21 usuarios y que se riegan a partir de 15 hidrantes. El parcelario medio es de 4,35 ha, con un tamaño mínimo de 0,59 ha y uno máximo de 25,0 ha. Al igual que en el conjunto de la comunidad, los cultivos más representativos de la zona son el maíz (63 %) y la alfalfa (21 %). Todas las parcelas de la Zona de Simulación se abastecen de una misma tubería de riego.

### III.1.2.2. Caracterización de algunas propiedades físicas de los suelos

La determinación de las propiedades físicas de los suelos de la Zona de Simulación se realizó mediante un muestreo llevado a cabo durante la primavera del año 2006. Se tomaron 37 muestras distribuidas por toda la Zona de Simulación usando una barrena bipartida con capacidad de muestreo hasta 2,20 m de profundidad. La Figura III.3 muestra la distribución de los puntos de muestreo.



**Figura III.3.** Mapa de distribución de los puntos de muestreo para la caracterización de algunas propiedades físicas de los suelos.

La profundidad del suelo de cada uno de los puntos de muestreo se obtuvo *in situ* hasta la capacidad de la barrena. La capacidad de campo y el punto de marchitez se obtuvieron en laboratorio a partir de muestras alteradas usando placas de presión. En la determinación de los puntos característicos de humedad del suelo se realizaron dos repeticiones por cada muestra. Las presiones utilizadas para la capacidad de campo y punto de marchitez fueron de 33 kPa y 1.500 kPa respectivamente (Soil Survey Division Staff, 1993). La densidad aparente del suelo se determinó en laboratorio a partir de muestras no perturbadas (Porta y col., 1999).

Con los resultados obtenidos se determinó la capacidad de retención de agua disponible (CRAD, mm) para cada muestra, utilizando la siguiente ecuación (Walker y Skogerboe, 1987):

$$CRAD = 10^3 Z (\theta_{cc} - \theta_{pm}) \frac{\rho_b}{\rho_w} (1 - P) \quad [\text{III.8}]$$

Donde  $Z$  es la profundidad del suelo (m),  $\theta_{cc}$  es el contenido gravimétrico de agua a capacidad de campo (tanto por uno),  $\theta_{pm}$  es el contenido gravimétrico de agua en el punto de marchitez (tanto por uno),  $\rho_b$  es la densidad aparente del suelo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ),  $\rho_w$  es la densidad del agua ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) y  $P$  es el contenido volumétrico de elementos gruesos del suelo (tanto por uno).

A partir de las muestras se determinó el agotamiento inicial del agua en el suelo (AI, %). El agotamiento inicial se calculó como un porcentaje. El numerador corresponde a la diferencia entre la humedad del suelo al inicio del cultivo y la capacidad de campo, y el denominador, la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. Así, un suelo que está a capacidad de campo tiene un agotamiento inicial de 0 %, y si está a punto de marchitez el agotamiento inicial es del 100 %.

### III.1.2.3. Caracterización técnica de los amueblamientos en parcela

La caracterización técnica de los amueblamientos en parcela se realizó mediante un estudio en campo de las 26 parcelas que forman la Zona de Simulación. De los hidrantes se anotó el caudal nominal y la presión de funcionamiento. En el caso de que el hidrante fuera compartido, se determinaron las parcelas que se regaban de él. Sobre las coberturas totales de aspersion, se anotó el marco y el número total de aspersores por parcela. En cuanto a los aspersores, se determinó el modelo, el tamaño de las boquillas y su altura de colocación respecto al suelo. Con el caudal del hidrante y el número total de aspersores se estimó el número de sectores por parcela.

## III.2. ANÁLISIS DEL USO DE AGUA EN LA COMUNIDAD DE REGANTES DE MONTESNEGROS EN 2004

### III.2.1. Caracterización del uso del agua

La caracterización de los usos de agua se ha realizado con la información recogida en la base de datos de gestión de la Comunidad de Regantes en la campaña 2004. La CR de Montesnegros, como la gran mayoría de las comunidades del sistema de riego del Alto Aragón, utiliza el programa ADOR (Playán y *col.*, 2007) para gestionar administrativa y físicamente el reparto de agua a las diferentes unidades de riego de la comunidad. La base de datos ADOR permite obtener datos precisos sobre consumos de agua de cada una de las parcelas catastrales de la comunidad. Además, de acuerdo a la ley de aguas, permite distinguir entre usos agrícolas, ganaderos, industriales y urbanos. Así, el proceso de gestión requiere que en cada parcela catastral estén identificados los usos de agua que se producen.

En cada parcela es posible que existan varios usos más de los tres tipos restantes, y también es posible que en una parcela se declaren varios usos agrarios. Esto se hace si se realizan varios cultivos, hay distintos sistemas de riego, o la parcela se riega por distintos puntos, por ejemplo. La comunidad debe de identificar cada uso del agua, ligarlo a una de sus parcelas y relacionarlo con los usuarios. De esta manera se conoce el propietario de cada parcela y el arrendatario de cada uso del agua (si es distinto del propietario). A efectos de facturación, cada uso del agua está relacionado con una persona que paga el volumen de agua usada y otra (que puede ser la misma) que paga los gastos generales. Esta organización de la base de datos permite obtener para cada uso el consumo de agua de la campaña de riego del 2004 en  $\text{m}^{-3} \text{ha}^{-1}$ .

### III.2.2. Determinación de la productividad del agua basada en el margen bruto y en el margen neto de los cultivos

La determinación de la productividad del agua basada en el margen bruto de los cultivos más relevantes de la zona se realiza en dos fases. La primera fase consiste en determinar el margen bruto de los cultivos según se ha descrito en el apartado III.1.1.3. La segunda fase consiste en determinar el consumo de agua de cada uso, obtenido de la base

de datos ADOR de la CRM, tal y como se ha descrito en el apartado anterior. La productividad del agua basada en el margen bruto ( $WP_{MB}$ ) se determina como el ratio entre el margen bruto del cultivo y la cantidad de agua consumida durante la campaña agrícola y se expresa en  $\text{€ m}^{-3}$ . La ecuación III.8 representa la  $WP_{MB}$ .

$$WP_{MB} = \frac{\text{Margen bruto}}{\text{Agua de riego}} \quad [\text{III.9}]$$

La productividad del agua también puede expresarse en términos de margen neto ( $WP_{MN}$ ), considerando en el cálculo del margen del cultivo los costes de amortización de los equipamientos de riego. La Ecuación III.9 representa la  $WP_{MN}$ .

$$WP_{MN} = \frac{\text{Margen neto}}{\text{Agua de riego}} \quad [\text{III.10}]$$

### III.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO BALÍSTICO DE RIEGO POR ASPERSIÓN

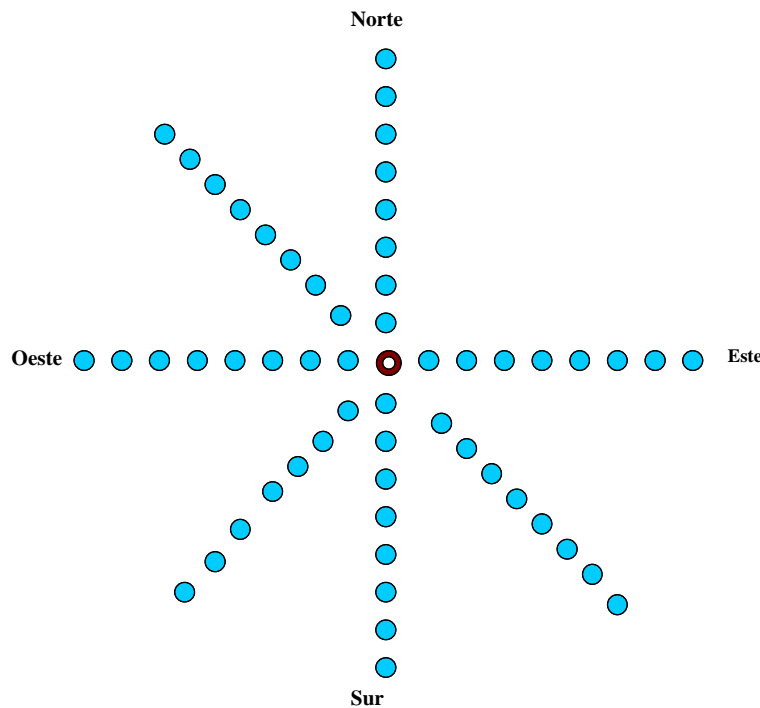
#### III.3.1. Evaluación de la distribución de agua en un aspersor aislado

El objetivo de este apartado es determinar el patrón radial de aplicación de agua de un aspersor. El aspersor utilizado en esta evaluación es el usado mayoritariamente en la zona de estudio. Se trata del modelo VYR35 del fabricante VYR S.A. (Burgos, España). El montaje experimental consistió en un aspersor aislado colocado en el centro de una red radial de pluviómetros distanciados entre sí 0,5 m, tal como se puede apreciar en la Figura III.4. Los pluviómetros cubrían siete radios. Los pluviómetros utilizados estaban contruidos en plástico transparente con una superficie de captación de  $200 \text{ mm}^2$ , provistos de soportes de plástico. Una vez sujetos al suelo la superficie de captación de los pluviómetros quedó a 40,0 cm sobre el suelo.

Se procedió a la evaluación del aspersor colocado a 2 m de altura sobre la superficie del terreno. La presión de funcionamiento evaluada fue de 350 kPa, y el aspersor estaba equipado con doble boquilla. El diámetro de la boquilla principal era de 4,8 mm y el diámetro de boquilla auxiliar de 2,4 mm, fresada. Se realizaron dos repeticiones en

condiciones de viento en calma ( $< 2 \text{ m s}^{-1}$ ). La duración de los ensayos fue de dos horas, lo que se consideró un tiempo suficiente para obtener resultados precisos.

Las evaluaciones se realizaron siguiendo la metodología propuesta por Merrian y Keller, (1978), la norma ASAE S330.1 (1987) y las normas ISO 7749/1 (1995) y ISO 7749/2 (1990).

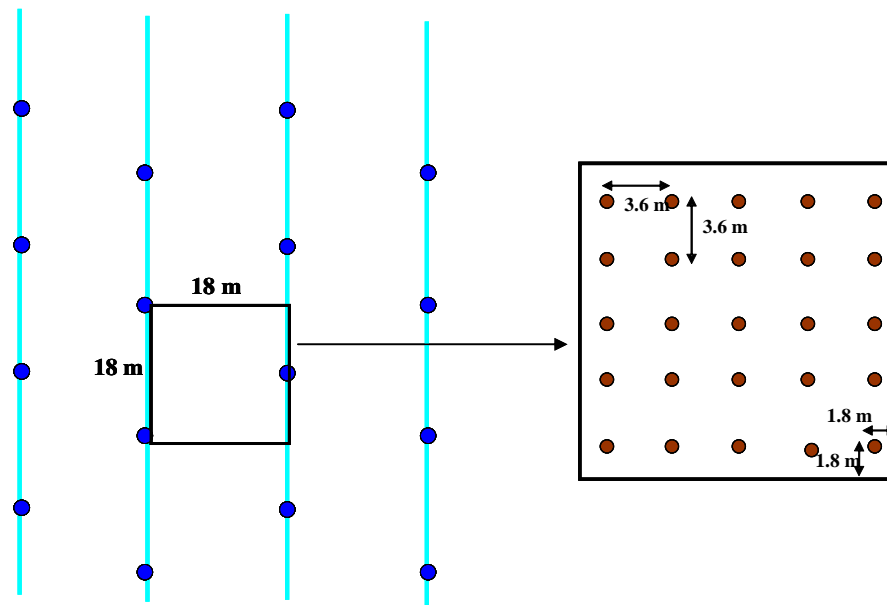


**Figura III.4.** Esquema de siete radios de pluviómetros y del aspersor evaluado. La figura no pretende ser una representación a escala, ya que en cada radio se instalaron 33 pluviómetros separados 0,5 m.

### III.3.2. Evaluación de la distribución de agua en una cobertura de riego por aspersión

La parcela donde se realizaron los ensayos contaba con una cobertura enterrada de aspersores dispuestos en un marco rectangular de 15,0 m entre líneas y 6,0 m entre aspersores de la misma línea. El marco de aspersión a evaluar experimentalmente era T 18 x 18, el característico de la zona de estudio. Para ello, se realizaron modificaciones en la cobertura original utilizando aspersores de tipo trineo para obtener el marco deseado. Se

cerraron dos de cada tres aspersores de la misma línea y con los trineos añadidos se consiguió replicar una cobertura triangular, tal como se indica en la Figura III.5.



**Figura III.5.** Esquema de la distribución de aspersores y pluviómetros en la parcela experimental.

Dentro del marco central de la cobertura se instalaron 25 pluviómetros similares a los empleados en el apartado anterior. Los pluviómetros se dispusieron siguiendo el esquema mostrado en la Figura III.5. De esta manera, los pluviómetros cubren representativamente el área del marco de aspersión que se encuentra totalmente solapado por la cobertura total.

Se realizaron los ensayos en cobertura tal y como muestra el esquema de la Figura III.5, 16 aspersores modelo VYR35 situados a una altura de 2 m sobre la superficie del terreno. En total, se realizaron 10 ensayos con velocidades de viento comprendidas entre  $0,9 \text{ m s}^{-1}$  y  $6,7 \text{ m s}^{-1}$ . Siete de estos ensayos sirvieron para calibrar el modelo de riego por aspersión y los tres restantes para validarlo. Para obtener el citado rango de velocidades de viento se utilizó el análisis estadístico de Faci y Tercero, (1991). Estos autores determinaron que las velocidades máximas del viento se producen en Zaragoza entre las 12:00 y las 15:00, y las mínimas entre las 06:00 y las 09:00. Así, se realizó una planificación de los ensayos de diferentes intensidades de viento a lo largo del día.

La duración de estos ensayos fue de tres horas durante los tres primeros ensayos. En los demás la duración se redujo a dos horas. La duración se ajustó para evitar variaciones importantes en la meteorología representativa del ensayo (la velocidad del viento), siempre que el volumen recogido en los pluviómetros permitiera una medida precisa.

Las evaluaciones se realizaron siguiendo la metodología propuesta por Merriam y Keller, (1978), la norma ASAE S330.1 (1987) y las normas ISO 7749/1 (1995) y ISO 7749/2 (1990).

### **III.3.3. Calibración y validación del modelo de riego por aspersión**

En este trabajo se utiliza el modelo de simulación de riego por aspersión ADOR-Aspersión (Dechmi y *col.*, 2004a; Playán y *col.*, 2006). Este modelo se basa en la teoría balística aplicada a las gotas que salen del aspersor, y sigue desarrollados anteriores (Dechmi, 2002). Una vez calibrado y validado el modelo permite estimar la distribución de agua en un marco de aspersión, para un determinado tipo de aspersor y boquillas y bajo unas condiciones técnicas y meteorológicas determinadas.

#### **III.3.3.1. Calibración del modelo para riego con aspersores aislados**

La curva radial de distribución pluviométrica obtenida en los ensayos del aspersor aislado es la base para la primera fase de calibración del modelo de simulación. Esta curva representa la dosis de riego aplicada frente a la distancia del pluviómetro al aspersor. Para caracterizar la pluviometría radial de cada ensayo se promediaron los resultados obtenidos en los siete radios experimentales.

Se realizaron simulaciones del riego del aspersor individual para combinaciones de valores de los dos parámetros de calibración:  $D_{50}$  y  $n$  (Li y Kawano, 1995). Estas dos variables caracterizan la distribución del diámetro de gotas emitidas por el aspersor, y en la actualidad no se pueden cuantificar de antemano de forma fiable. El rango de valores simulados fue de 0,0001 a 0,0029 para  $D_{50}$  (con un intervalo de 0,0001) y de 1,6 a 2,6 para  $n$  (con un intervalo de 0,05). Por lo tanto, se analizaron 29 casos para  $D_{50}$  y 21 casos para  $n$ , lo que arroja un total de 609 simulaciones en esta fase de calibración. El par de valores de

estas variables que produce un mejor ajuste de los datos experimentales será el elegido para simular el riego.

La comparación punto a punto entre los valores de la curva experimental y la curva simulada puede expresarse de forma numérica mediante índices de similitud. Los que se utilizaron en esa fase de calibración son la raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RMSE*) y el coeficiente de correlación (*r*). En este caso se buscan las curvas simuladas que cuando se comparan con las experimentales producen un *RMSE* mínimo (lo más cercano a 0) y un *r* máximo (lo más próximo a 1). Para considerar ambos parámetros en un solo índice se analizó el ratio entre *r* y *RMSE*. Los valores de los parámetros que maximizan este ratio, serán los seleccionados.

### **III.3.3.2. Calibración del modelo para riego en coberturas totales**

En total se hicieron 10 ensayos, que representan para las mismas condiciones técnicas antes mencionadas, diferentes condiciones meteorológicas. De ellos, siete se destinaron a la fase de calibración y los demás a la fase de validación. Cada uno de los ensayos nos proporciona la altura de agua recogida en los 25 pluviómetros de la cuadrícula situada en el triángulo que forman los tres aspersores centrales de la cobertura (Figura III.5).

Tal como se hizo en la primera fase de la calibración de la curva radial, las pluviometrías obtenidas con las simulaciones se compararon con las obtenidas en los ensayos mediante unos índices estadísticos. Los empleados en esta fase fueron el valor absoluto de la diferencia entre los coeficientes de uniformidad de Christiansen medido y simulado (*DifCU*), el coeficiente de correlación (*r*) y la Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (*RMSE*).

La evaluación y comparación de los resultados obtenidos, permitió seleccionar los parámetros *K1* y *K2* correctores del efecto del viento (Tarjuelo, 1995). Para la elección de los valores de *K1* y *K2*, se tuvo en cuenta principalmente el valor absoluto de la diferencia entre los *CU's* obtenidos de los experimentos, seguidos del ratio entre *r* y *RMSE*.

### III.3.4. Validación del modelo final

La última fase del proceso consiste en validar el modelo calibrado, para lo cual se utilizaron tres de las evaluaciones reservadas para este fin. En estas tres evaluaciones se compararon los resultados observados con los simulados mediante indicadores que permitieran establecer la adecuación de la capacidad predictiva del modelo ( $DifCU$ ,  $r$  y  $RMSE$ ).

### III.3.5. Elaboración del modelo final

Una vez calibrados los parámetros correctores del efecto del viento,  $K1$  y  $K2$ , se obtuvieron sus relaciones con la velocidad del viento para obtener ecuaciones predictivas. Estas ecuaciones se introdujeron en el modelo ADOR-Aspersión para poder simular el riego en todo el rango analizado de velocidades de viento.

## III.4. DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DEL RIEGO EN UNA COMUNIDAD DE REGANTES

### III.4.1. Descripción del modelo de gestión de riego colectivo

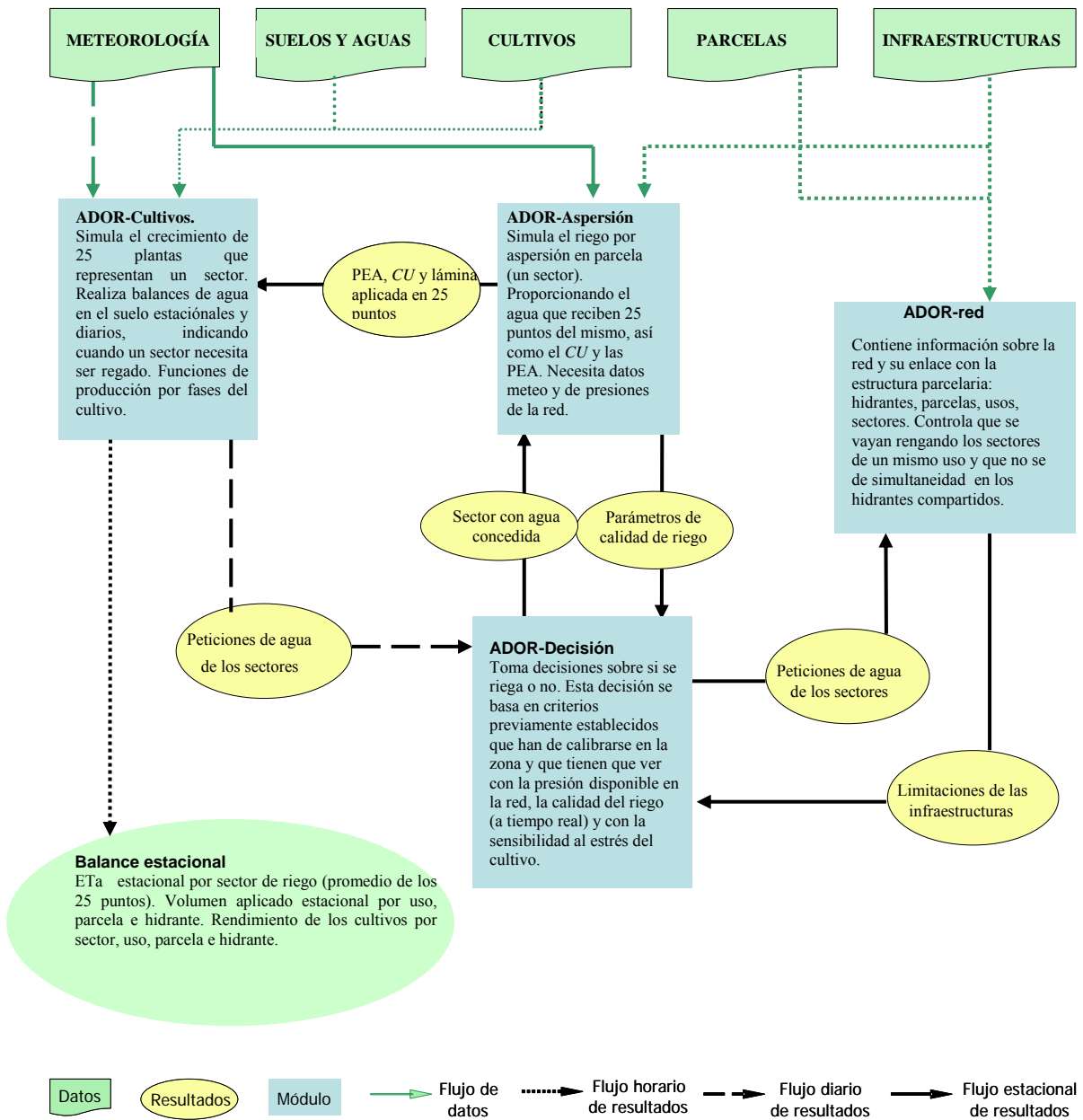
En el presente trabajo se describe el sistema ADOR-Simulación en su orientación para riego por aspersión, que permite la gestión del riego en una Comunidad de Regantes. El modelo está integrando por cuatro módulos de simulación, que reproducen el riego por aspersión, el crecimiento de los cultivos y el balance hídrico, el funcionamiento de las infraestructuras de riego y la toma de decisiones en el reparto de agua entre las parcelas. El funcionamiento conjunto de estos módulos en ADOR-Simulación se muestra de forma esquemática en la Figura [III.6].

Cada parcela de riego de un cultivo está dividida en sectores de riego por aspersión, que se corresponden con la superficie que se riega simultáneamente, y por lo tanto es la unidad sobre la que se simula el riego. Independientemente de sus dimensiones, cada sector se caracteriza a través de una superficie igual a un único marco de aspersión. Esta superficie se divide a su vez en veinticinco subparcelas que son la unidad espacial sobre la que se simula el crecimiento de los cultivos, el balance hídrico y la altura de agua aplicada

con el riego. La escala temporal de simulación varía según los módulos, siendo semihoraria para reproducir el riego, diaria para analizar las necesidades de riego de los cultivos y el balance hídrico del suelo, y estacional para realizar los balances del ciclo de cultivo completo.

Una simplificación relevante que se ha adoptado en el modelo es que todos los aspersores de una determinada parcela de cultivo riegan con la misma presión. De esta manera, todos los aspersores de todos los sectores de la parcela distribuyen el agua de la misma manera. Esta simplificación desprecia el efecto de las variaciones de presión dentro de una red parcelaria debidas a las diferentes pérdidas de carga en las tuberías y a las diferencias en elevación del terreno. Esta simplificación puede resultar limitante en algunas zonas regables, pero se ha considerado adecuada para las condiciones de la zona de estudio y para los objetivos de la tesis.

La simulación del funcionamiento de las infraestructuras de riego se apoya en el caudal del hidrante y su situación de compartido o no compartido entre varios agricultores. El caudal del hidrante determina la superficie de los sectores y por lo tanto el número de sectores de cada parcela. Los hidrantes compartidos generan problemas de simultaneidad entre las parcelas que lo comparten y con frecuencia introducen ineficiencias en el aprovechamiento del tiempo de riego disponible.



**Figura III.6.** Descripción esquemática del ADOR-Simulación

Como ha señalado antes, ADOR-Simulación está compuesto por cuatro módulos que se describen a continuación:

### 1. ADOR-Aspersión (módulo de simulación de riego por aspersión):

El módulo ADOR-Aspersión ya ha sido presentado en el apartado 3 de material y métodos. En este trabajo, este módulo se ha sustituido por una base de datos producida a partir del modelo, en la que se han simulado diferentes condiciones meteorológicas, manteniendo constantes las condiciones técnicas. La cobertura simulada responde a un marco triangular de 18,0 m por 18,0 m con aspersores VYR35 equipados con doble boquilla (4,8 mm +2,4 mm), situados a 2,0 metros sobre el suelo y trabajando a una presión de 350 kPa. Las condiciones meteorológicas que se han simulado para preparar la base de datos son velocidades del viento entre 0 y 8 m s<sup>-1</sup>, cada 0,5 m s<sup>-1</sup>, direcciones del viento entre 0 y 360°, cada 5° y humedades relativas entre 30 y 100 %, cada 5 %. Los datos de entrada a la base de datos son la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento, estos datos nos proporcionan valores del agua aplicada en 25 puntos distribuidos uniformemente en una matriz dentro del marco de aspersión que representa a un sector de riego. También se obtienen la lámina media aplicada e índices de calidad del riego como el Coeficiente de Uniformidad, las Pérdidas por Evaporación y Arrastre y la Eficiencia Potencial del Cuarto Bajo, entre otros (Burt y col. 1997).

Cada vez que se precisan los resultados de la simulación de riego (frecuencia semihoraria), el modelo consulta la base de datos buscando los parámetros que más se ajusten a las condiciones meteorológicas actuales y de esa forma se obtienen los resultados del riego.

### 2. ADOR-Cultivos (módulo de simulación de cultivos):

El modelo ADOR-Cultivos ha sido descrito por Dechmi y col., (2004a). Este modelo analiza el efecto de la variabilidad en tiempo y espacio del agua aplicada con el riego en la producción de un cultivo. El módulo simula el descenso de producción en 25 puntos dentro de un marco de riego, coincidentes con los puntos en los que se determina la lámina de agua aplicada con el riego en ADOR-Aspersión. De esta manera, con la simulación del riego y del cultivo en un marco de riego, se representa la situación de uno de los sectores de riego que componen una parcela cultivada.

En su integración con el resto de módulos, con una periodicidad diaria, ADOR-Cultivos recibe el agua aplicada con el riego en los 25 puntos de cada marco de riego (obtenido en el caso de estudio de la disposición triangular de tres aspersores), calcula las necesidades hídricas diarias del cultivo y con la humedad del suelo realiza un balance hídrico en cada uno de los 25 puntos. Esta información sobre el estado hídrico de cada punto, del conjunto de cada marco de riego y de todas las parcelas de la Zona de Simulación se la pasa a ADOR-Decisión, modulo que evalúa si es el momento adecuado de regar cada parcela. La hipótesis principal es que la presión no varía con la demanda de agua.

### 3. ADOR-Red (módulo de simulación de infraestructuras de riego):

La simulación del funcionamiento de las infraestructuras de riego se realiza a través del módulo ADOR-Red. Este se limita a gestionar las relaciones entre los hidrantes y las parcelas, sin incluir en el estado actual del modelo la simulación hidráulica.

La gestión del riego de una colectividad introduce nuevas limitaciones respecto al riego de una finca en los criterios de decisión del riego. Las limitaciones derivan del estado hidráulico de la red y de su relación con la estructura parcelaria. Esta relación se produce a través de los hidrantes. Los hidrantes se diseñan por cuestiones económicas con un caudal de servicio reducido, lo que obliga a dividir la superficie regada en sectores de riego. Entre los hidrantes y los sectores se definen otra serie de elementos territoriales que participan en la gestión del riego. Estos elementos enumerados de menor a mayor tamaño son:

1. **Sector:** superficie de un mismo hidrante que se riega a la vez. Los sectores que se riegan desde un hidrante pueden pertenecer a uno o varios usos.
2. **Uso:** unidad de manejo del riego. Se define como la superficie que se riega de una misma toma o hidrante, es gestionada por un único agricultor y tiene un sólo cultivo. Puede estar formada por uno o varios sectores. Se define a través del cultivo realizado y de la finca a la que pertenece. El uso es así equivalente a lo que de una forma coloquial se denomina como parcela de riego.

3. **Finca:** unidad de manejo de un agricultor desde una mismo hidrante. Puede incluir uno o varios cultivos y se define a través de su superficie y de los usos que comprende.
4. **Hidrante:** elemento de la red a través del que se suministra el agua a las fincas con un caudal máximo y una presión de diseño. El hidrante es la unidad de gestión de la red. Un hidrante puede dar servicio a varias fincas, y en este caso se tratará de un hidrante compartido. Solo un sector del hidrante puede estar en riego, ya que los sectores generalmente están diseñados para demandar todo el caudal de servicio del hidrante.

Una finca que se riega a partir de un hidrante no compartido dispone de todos los días de la semana para programar el riego de sus usos. Sin embargo, si el hidrante está compartido entre dos o más fincas, los agricultores de la zona de estudio reparten los días de la semana proporcionalmente a la superficie de cada una de las fincas. En el módulo ADOR-Red, en cada hidrante compartido se asignan los días de la semana a cada una de las fincas de la misma manera que hacen los agricultores en la realidad. En periodos punta de necesidades de agua del cultivo, este rígido reparto de los días de la semana puede ocasionar problemas de estrés hídrico y repercutir directamente en el rendimiento del cultivo. Por lo tanto, la gestión de una zona regable sin las restricciones que imponen los hidrantes compartidos puede mejorar los rendimientos y la productividad del agua, sin necesitar de inversiones adicionales en infraestructuras.

Toda esta información sobre hidrantes, fincas, usos y sectores está disponible en las bases de datos del programa de gestión de la Comunidad de Regantes (ADOR-Gestión). Sin embargo, los datos disponibles en el programa de gestión de la CRM, han requerido un proceso de adaptación para poder ser utilizados en este módulo.

#### **4. ADOR-Decisión (módulo de simulación de toma de decisiones en la distribución de agua):**

El módulo ADOR-Decisión es el núcleo de ADOR-Simulación, ya que es el responsable de la toma de decisiones en la distribución del agua. En este trabajo se han elegido dos índices para decidir el momento adecuado del riego de un uso:

1) La Eficiencia Potencial del cuarto bajo considerando las pérdidas de evaporación y arrastre (PEA, %). Este término se representa como EPcb, se expresa como un porcentaje, y se deriva de la expresión propuesta por Merriam y Keller (1978) y de la actualización realizada por Burt y *col.* (1997). La expresión de este índice es:

$$EPcb = (100 - PEA) \left( \frac{\text{Dosis media de riego recibida en el 25\% de la zona regada que menos agua recibe}}{\text{Dosis media de riego recibida}} \right) \quad [III.11]$$

EPcb combina la eficiencia que tendría el riego si su objetivo fuera aplicar el agua recibida en el 25% de la superficie menos regada con la consideración de que las pérdidas por evaporación y arrastre no contribuyen a aliviar el estrés hídrico del cultivo. El uso de este índice permite caracterizar ambos aspectos a la misma vez. Valores altos de este índice quieren decir que si se riega en este momento el riego puede resultar muy eficiente, ya que habrá pocas pérdidas por evaporación y arrastre y además el riego será muy uniforme. Por ello el riego será potencialmente muy eficiente.

2) Los días de Estrés Equivalente, representados como DEE, y expresado en días.

$$DEE = \sum_{j=1}^{n^{\circ}\text{sectores}} \left( \frac{\sum_{i=1}^{25} \text{Déficit hídrico por encima del nivel que daña la producción del cultivo}}{25 * ETc \text{ diaria}} \right) \frac{1}{n^{\circ} \text{ de sectores}} \quad [III.12]$$

El parámetro DEE representa el grado de confort del cultivo de un uso. Por ello se calcula como el promedio de los 25 puntos de simulación dentro de cada sector de un uso. En cada punto se determina la diferencia entre el déficit actual del suelo y el umbral de déficit que limita la producción del cultivo (determinado por ADOR-Cultivo). Esta

diferencia (expresada en mm) se divide por la ETc diaria para estimar a cuántos días de ETc equivale el estrés del suelo. Valores altos de este índice quieren decir que el riego es muy necesario en esta parcela, porque el estrés está dañando al rendimiento desde hace bastante tiempo.

El valor umbral de estos índices que hace que el riego sea recomendable o no debe de ser calibrado en cada zona en función de su meteorología, de la sensibilidad al estrés de los cultivos más comunes, de las infraestructuras de red disponibles y del análisis económico del cultivo. Estos índices se ajustarán para operar bajo las mejores condiciones meteorológicas evitando que se produzcan mermas importantes en la producción. La combinación adecuada de ambos índices asegurará que se aplicarán los riegos con un mínimo de calidad y antes de que el daño al cultivo por estrés hídrico resulte antieconómico.

Para poder realizar las simulaciones con los diferentes módulos es necesario proporcionar al modelo una serie de datos sobre las características del medio natural de la zona, así como de sus infraestructuras de riego y su sistema de gestión. Estos datos se agrupan de la siguiente manera:

1. **Datos meteorológicos:** se deben proporcionar datos diarios de precipitación y evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), que serán utilizados por el módulo ADOR-Cultivos. Asimismo, se necesitan datos semihorarios sobre velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa para el módulo de riego (ADOR-Aspersión).
2. **Datos de suelos:** para poder realizar balances de agua en el suelo es necesario caracterizar algunas propiedades físicas de los suelos. Estas propiedades se deben definir para cada uno de los tipos de suelo que se distinguen en la zona de estudio. Los datos necesarios son: la profundidad del suelo, la capacidad de retención de agua disponible y el agotamiento inicial. En cuanto a la profundidad del suelo, se asignó a todos los suelos un valor de 1.0 m. En ensayos realizados en el valle medio del Ebro, Dechmi y *col.*, (2004b) encontraron que la variación de la humedad del suelo en un

cultivo de maíz regado por aspersión a partir de esa profundidad es muy poco relevante. El módulo que necesita este tipo de datos es ADOR-Cultivos.

3. **Datos de los cultivos:** El módulo ADOR-Cultivos integra una base de datos de cultivos, sus funciones de respuesta al déficit hídrico y la duración de su ciclo de desarrollo. Los datos que hay que proporcionar de forma local son el cultivo y la fecha de siembra.
4. **Relaciones entre hidrantes, fincas, usos y sectores:** de la estructura de la red se debe definir el caudal del hidrante, las fincas que riega, los usos y el número de sectores por uso. El módulo que necesita este tipo de información es ADOR-Red para poder gestionar el riego de los sectores, usos y fincas sin problemas operacionales de simultaneidad.

De una manera general ADOR-Simulación funciona de la manera siguiente:

- ✓ El módulo ADOR-Cultivos, con una frecuencia diaria, realiza los balances de agua en el suelo para cada uno de los 25 puntos de cada marco de riego que representan un sector. El cálculo se realiza para todos los sectores de cada uso, para todos los usos de las fincas y para todas las fincas de la zona simulada.
- ✓ Estos valores se evalúan en ADOR-Decisión, que calcula para cada uso el índice *DEE*. Cuando el valor de *DEE* iguala al máximo establecido en la zona se activa la necesidad de regar. En este momento se abre un ciclo semihorario para planificar los riegos.
- ✓ Antes de proceder al riego, se evalúa su calidad potencial mediante el parámetro *EPcb* procedente de ADOR-Aspersión. Si éste es superior o igual al establecido y hay disponibilidad en el hidrante (ADOR-Red), se procede a regar. Si *EPcb* es inferior al mínimo, se espera media hora y vuelve a evaluarse la calidad del riego. Este proceso sigue evaluándose con una frecuencia semihoraria hasta que, o se supera ese mínimo de *EPcb* establecido y se riega, o se actualiza el valor de *DEE* (al día siguiente). Si este valor de *DEE* actualizado supera el máximo establecido para la zona, se activa el riego del uso, independientemente de la calidad del mismo.

### III.4.2. Identificación de estrategias de gestión del riego en una parcela dimensionada para permitir una gestión avanzada

El objetivo de este apartado es optimizar los parámetros locales que deciden el momento adecuado para el riego y que forman parte del módulo de decisión, es decir, *DEE* y *EPcb*. Para ello, se eligieron dos parcelas tipo, una de maíz y otra de alfalfa de 25 ha cada una, alimentadas por sendos hidrantes de  $45 \text{ L s}^{-1}$ . Como se aprecia de las características de la parcela tipo elegida, el caudal ficticio continuo del hidrante que la sirve es elevado ( $1,8 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ) comparado con los caudales medios actuales de la comunidad de regantes de Montesnegros ( $1,0$  a  $1,2 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ). De esta forma la decisión de regar o no regar no estará supeditada a la capacidad de la red, sino a las condiciones meteorológicas y agronómicas. Es decir, qué valores de *DEE* y *EPcb* permiten mantener la producción del cultivo evitando los días de condiciones meteorológicas adversas para el riego por aspersión.

La identificación de los valores locales de los parámetros se ha realizado evaluando diferentes combinaciones de ambos parámetros. Para ello, se han elegido valores de 10, 50, 60, 70, 75 y 80 % para el parámetro *EPcb* y de 0,5, 0,75, 1 y 1,25 días para el parámetro *DEE*. El valor mínimo de *EPcb* evaluado, 10 %, se corresponde con una situación en que se aceptan riegos de baja calidad, mientras que el valor del 80 %, representa una situación en que solo se aceptan riegos de elevada calidad. El valor más elevado de *DEE* (1,25 días) representa el máximo nivel de estrés permitido, mientras que el valor mínimo (0,5 días), supone un menor nivel de estrés permitido. A excepción del caso de *EPcb* mínima (10%) que sólo se ha evaluado para un valor de *DEE* igual a 1 día, el resto de valores de *EPcb* se han combinado con todos los valores de *DEE* evaluados. Esto ha dado lugar a un total de 21 combinaciones de valores de *EPcb* y *DEE* o estrategias de control del riego: 10\_1; 50\_0,5; 50\_0,75; 50\_1; 50\_1,25; 60\_0,5; 60\_0,75; 60\_1; 60\_1,25; 70\_0,5; 70\_0,75; 70\_1; 70\_1,25; 75\_0,5; 75\_0,75; 75\_1; 75\_1,25; 80\_0,5; 80\_0,75; 80\_1; 80\_1,25.

La evaluación de las 21 estrategias de control del riego se ha realizado en términos de productividad en margen neto. De esta manera, la evaluación de las estrategias considera aspectos tan importantes como la producción del cultivo, los precios de productos e insumos, la amortización de los distintos tipos de redes de riego y el coste del agua de riego (que en la zona de simulación está dominado por el coste de la energía).

### **III.4.3. Efectos de las infraestructuras de riego sobre la productividad del agua en una parcela tipo para dos cultivos, maíz y alfalfa.**

El objetivo de este apartado es identificar el efecto de las infraestructuras de riego sobre la productividad del agua en la parcela tipo descrita anteriormente. La identificación se ha realizado para los dos cultivos más representativos de la comunidad de regantes de Montesnegros, maíz y alfalfa.

Se ha evaluado el efecto sobre la productividad del agua de diferentes tamaños de hidrante (correspondientes a diferentes caudales ficticios continuos,  $q_{fc}$ ) que sirven a la parcela tipo anteriormente descrita. El caudal ficticio continuo de diseño en la comunidad de regantes de Montesnegros se sitúa entre 1,0 y 1,2 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>. Para este trabajo se ha evaluado el efecto de cinco caudales ficticios continuos: 1,0; 1,2; 1,4; 1,6 y 1,8 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>. Estos valores cubren el amplio abanico de posibilidades que se encuentra en las redes de riego presurizadas diseñadas en el valle del Ebro.

El caudal del hidrante que da servicio a una parcela afecta a la sectorización de la misma, ya que determina el tamaño de los sectores. A mayor tamaño de sector, menor número de los mismos por unidad de superficie y menor tiempo de riego de la parcela.

El cálculo de la productividad del agua se ha realizado en términos de margen neto, calculado según se describe en el apartado III.2. Los costes de amortización para los diferentes tamaños de hidrantes se han obtenido de la expresión presentada por Zapata y col., (2007). En dicho trabajo se presenta, para una red presurizada similar a la de Montesnegros, una función que relaciona los costes de inversión con los tiempos de operación del hidrante. La Tabla [III.1] presenta el resultado de las relaciones para los caudales ficticios continuos estudiados.

**Tabla III.1.** Relaciones entre los caudales ficticios continuos, el tiempo de operación de la red y la amortización anual

$q_{fc}$ (L s <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> )	Tiempo operación de la red (%)	Amortización anual (€ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
1,0	100	363
1,1	75,0	393
1,2	66,7	405
1,4	58,3	420
1,6	50,0	438
1,8	44,4	452

Este análisis en términos de productividad del agua en margen neto se ha realizado para tres estrategias de gestión del riego:

1. **Estrategia Manual:** se corresponde con las pautas de riego de un agricultor que utiliza para sus programaciones semanales la información publicada por los servicios de Asesoramiento al Regante sobre necesidades hídricas de los cultivos. Para aplicar esta estrategia, se han utilizado las recomendaciones de los servicios de asesoramiento para realizar calendarios de riego fijos, en los que el riego de una remana repone las necesidades del cultivo en la semana anterior. De esta manera, el riego se realiza según estos calendarios sin tener en consideración ninguna otra variable. Se trata en suma de un calendario rígido que suministra las necesidades del cultivo. Tal como se sugiere la Oficina del Regante del Gobierno de Aragón, para realizar la programación se supuso una eficiencia de aplicación del 75 % y una eficiencia de la lluvia del 75%.
2. **Estrategia Central:** se basa en realizar una programación del riego automatizada que obedezca únicamente a las necesidades del cultivo sin considerar la calidad del riego. Esta estrategia se identifica con una exigencia de *EPcb* del 10 % (mínima calidad de riego requerida, que en la práctica no introduce restricciones) y *DEE* de 1,0 día como máximo. En esta estrategia es el modelo de simulación quien decide cuándo realizar cada riego en cada uso y sector, en función de cómo las necesidades de riego se van generando durante la campaña.

3. **Estrategia Central Avanzada:** se basa en exigir una calidad de riego elevada sin que el cultivo sufra una merma relevante de producción. El valor de los dos parámetros que definen esta estrategia se obtendrá del apartado previo (III.4.2). La simulación del riego de los cultivos se basa en umbrales predefinidos de los dos parámetros, de modo que se rechaza regar cuando las condiciones son desfavorable y se espera a que mejoren sin que se superen los días de estrés equivalente.

#### **III.4.4. Análisis de la productividad del agua de la Zona de Simulación bajo distintas estrategias de gestión del riego**

El objetivo de este apartado es analizar la productividad del agua de una zona integrada por varias fincas e hidrantes bajo distintas estrategias de gestión de riego. Para ello se aplicó el modelo a la Zona de Simulación, descrita en el Apartado III.1.2. Las estrategias de gestión evaluadas se corresponden con las descritas en el apartado anterior (*Manual, Central y Central Avanzada*). Dado que en la Zona de Simulación hay hidrantes compartidos, también se presenta el análisis del efecto de los mismos sobre la productividad del agua. Para ello, se han estudiado otras dos estrategias más que representan la gestión de la zona sin hidrantes compartidos (SinHC).

La representación de la zona sin hidrantes compartidos se ha realizado manteniendo el mismo número de hidrantes y suponiendo que la superficie que riega cada uno es una finca única en la que se mantienen los diferentes usos. Estas estrategias se definen a continuación:

1. **Estrategia Central Sin Hidrantes Compartidos:** identificada como “*Central SinHC*”.
2. **Estrategia Central Avanzada Sin Hidrantes Compartidos:** identificada como “*Central Avanzada SinHC*”.

#### **III.4.5. Comparación entre los consumos de agua de la comunidad de regantes y los consumos simulados con el modelo de gestión**

Los consumos de agua reales se han obtenido a partir de la base de datos ADOR de la CRM del año 2004. Los consumos simulados se han obtenido con el modelo de simulación de gestión para la Zona de Simulación. Como ha sido señalado en el Apartado III.1 del Capítulo III, la comunidad de regantes de Montesnegros cubre una superficie total ( $S_{CRM}$ ) de 3.475 ha, mientras que la Zona de Simulación tiene una superficie de ( $S_{ZS}$ ) 113 ha. Los cultivos más representativos, tanto de la Zona de Simulación como de toda la comunidad, son el maíz y la alfalfa. Se presenta la comparación entre los consumos reales y los simulados en la Zona de Simulación. También se presentan datos de consumos medios por cultivo de toda la comunidad y se comparan con los consumos medios simulados por cultivo en la Zona de Simulación.

**CAPÍTULO IV:**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**



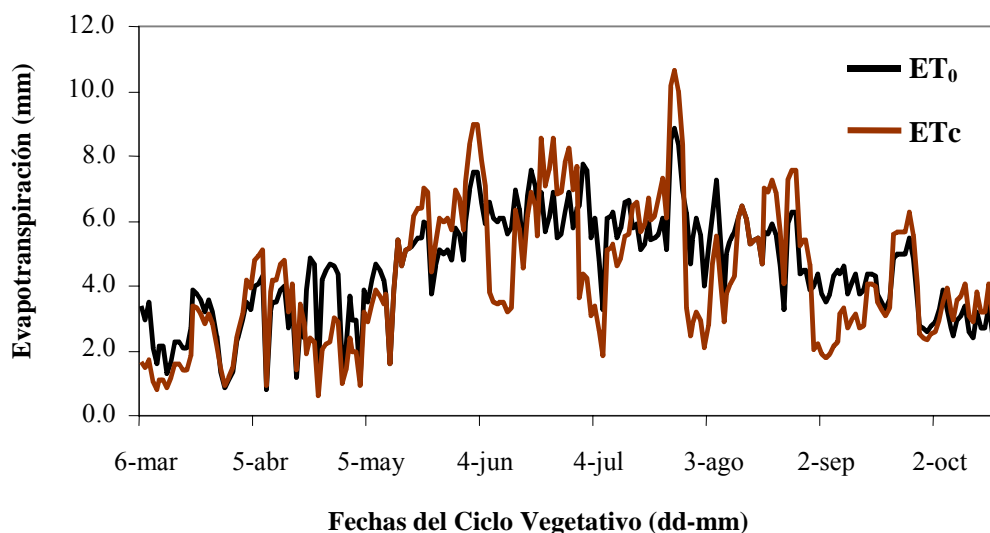
## IV. Resultados y discusión

### IV.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### IV.1.1. La comunidad de regantes de Montesnegros

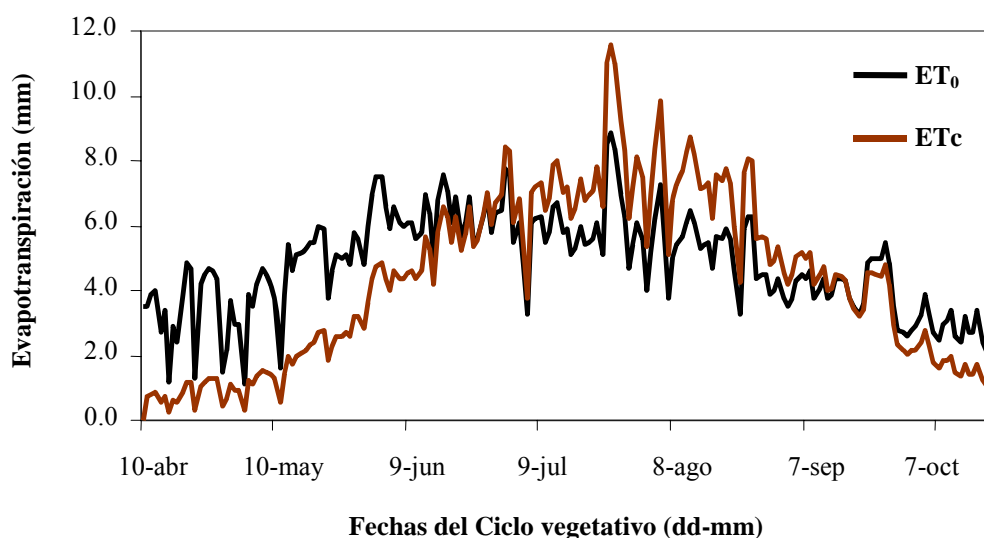
##### IV.1.1.1. Determinación de las necesidades de agua de los cultivos

Para poder caracterizar la gestión del agua en la comunidad de regantes de Montesnegros es preciso determinar las necesidades de agua de los cultivos. La Figura IV.1 muestra la evolución en el tiempo de la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ), junto a la de la evapotranspiración de la alfalfa ( $ET_c$ ). Esta última variable se utilizó para calcular las necesidades hídricas netas del cultivo (NHn) en la comunidad de regantes de Montesnegros. El ciclo vegetativo de la alfalfa en 2004 duró 33 semanas, desde la semana del 6 de marzo hasta la del 16 de octubre. Durante estas 33 semanas la  $ET_0$  acumulada de la CRM fue de 1.025,7 mm, siendo la evapotranspiración de la alfalfa de 971,4 mm. Teniendo en cuenta la precipitación recogida en esta campaña durante la temporada de riegos, las necesidades hídricas netas de la alfalfa fueron de 895,7 mm ( $8.957 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ).



**Figura IV.1.** Evapotranspiración del cultivo de la alfalfa ( $ET_c$ ) durante la campaña agrícola 2004 de la comunidad de regantes de Montesnegros calculada a partir de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ).

En el caso del maíz, tal y como se ha descrito en el apartado de material y métodos, los valores de los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) se han obtenido de forma local utilizando la metodología de la integral térmica (Figura IV.2). Como en el caso de la alfalfa, las necesidades hídricas netas han sido calculadas semanalmente. Durante la campaña de 2004, el ciclo vegetativo del maíz duró 25 semanas, desde la semana del 10 de abril hasta la del 16 de octubre. La Figura IV.3 muestra la evolución del  $K_c$  a lo largo del ciclo de cultivo del maíz en la comunidad de regantes de Montesnegros. Durante estas 25 semanas la  $ET_0$  acumulada de la CRM fue de 933,6 mm, siendo la evapotranspiración del maíz de 846,7 mm. Teniendo en cuenta la precipitación recogida en esta campaña durante la temporada de riegos, las necesidades hídricas netas del maíz fueron de 793,2 mm ( $7.932 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ).

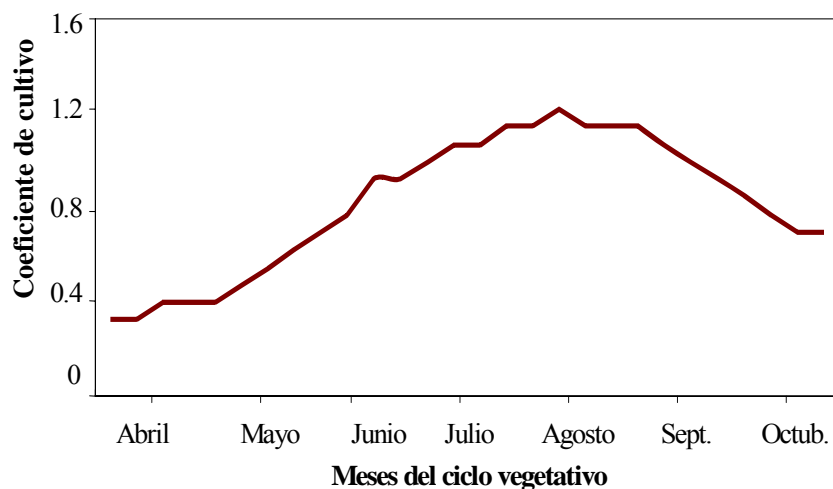


**Figura IV.2.** Evapotranspiración del cultivo de maíz ( $ET_c$ ) durante la campaña agrícola 2004 de la comunidad de regantes de Montesnegros calculada a partir de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ).

#### IV.1.1.2. Estimación del margen bruto de los cultivos

La estimación del margen bruto de los cultivos se ha realizado determinando los costes de producción para los cultivos más relevantes de la comunidad y el valor de la producción para los dos cultivos mayoritarios de la zona. Estos datos se presentan en la Tabla IV.1, de la que se desprende que los cultivos de alfalfa y maíz producen unos

márgenes brutos de 875,5 y 1.028,6 € ha<sup>-1</sup>, respectivamente. En el caso del maíz, los costes de producción son más altos que en la alfalfa. Sin embargo, este cultivo se ve favorecido por unos mayores ingresos y una ayuda compensatoria de la PAC. Así, en la campaña de 2004, el cultivo del maíz resultó 153,1 € ha<sup>-1</sup> más rentable que el de la alfalfa.



**Figura IV.3.** Esquema de la curva de  $K_c$  para el cultivo de maíz en la comunidad de regantes de los Montesnegros para la campaña agrícola de 2004.

**Tabla IV.1.** Ingresos y gastos resultantes de los cultivos de alfalfa y maíz en la comunidad de regantes de montesnegros durante la campaña agrícola de 2004.

	Concepto	Alfalfa (€ha <sup>-1</sup> )	Maíz (€ha <sup>-1</sup> )
<b>GASTOS</b>	Canon del agua	87,0	87,0
	Fertilizantes	75,0	220,0
	Mano de obra	18,0	70,0
	Fitosanitarios	18,0	120,0
	Semillas	48,0	200,0
	Maquinaria	50,0	120,0
	Alquiler de maquinaria	0,00	60,0
	Secado del grano	0,00	120,0
	Coste del agua	456,0	376,4
	<b>Total gastos</b>	<b>752,0</b>	<b>1.373,4</b>
<b>INGRESOS</b>	Ingresos por cosecha	1.627,5	1.932,0
	Ayuda directa	0,00	470,0
	<b>Total ingresos</b>	<b>1.627,5</b>	<b>2.402,0</b>
<b>MARGEN BRUTO</b>		<b>875,5</b>	<b>1.028,6</b>

La Tabla IV.2 presenta los márgenes brutos de las zonas regables de Montijo (Badajoz) y de la Margen Izquierda del Porma (León), según los resultados obtenidos por Navarro y *col.* (2006). Comparando estas dos zonas regables con Montesnegros, se observa que los márgenes brutos de Montesnegros y Montijo son muy similares para los dos cultivos analizados. Sin embargo, se observan claras diferencias entre la CRM y la zona de la Margen Izquierda del Porma, en la que los márgenes son muy superiores para ambos cultivos.

**Tabla IV.2.** Margen bruto de la alfalfa y maíz en las zonas regables del Montijo y la Margen Izquierda del Porma para

<b>Margen Bruto €ha<sup>-1</sup></b>		
<b>Zona regable</b>	<b>Alfalfa</b>	<b>Maíz</b>
<b>Montijo</b>	919	1.033
<b>Margen Izquierda del Porma</b>	1.521	1.273

#### **IV.1.2. La Zona de Simulación**

##### **IV.1.2.1. Caracterización de algunas propiedades físicas de los suelos**

En la Tabla IV.3 se presentan los resultados analíticos del muestreo de los suelos de la CRM. Los resultados de humedad del suelo están expresados en porcentaje gravimétrico. Las lluvias caídas días antes de hacer el muestreo, que se correspondieron con el comienzo de la campaña de riego en la comunidad, explican los elevados valores de la humedad inicial de los suelos. El promedio de la humedad gravimétrica del suelo fue del 20,4 %, oscilando entre un máximo de 25,3 % y un mínimo de 14,3 %.

En cuanto a la capacidad de campo, las parcelas presentan un promedio gravimétrico de 27,6 %, con un rango de variación entre 24,0 % y 31,2 %. El promedio de la humedad gravimétrica a Punto de Marchitez es de 16,4 %, con un mínimo del 12,0 % y un máximo del 20,2 %. El agotamiento inicial de los suelos fue el parámetro que mayor variación presentó en la zona, con un promedio del 63,5 % y una desviación estándar del 14,6 %. La capacidad de retención de agua disponible (CRAD) se calculó para una profundidad de suelo de 1,0 m, utilizando el valor medio de la densidad aparente obtenido

en las determinaciones ( $1,31 \text{ Mg m}^{-3}$ ). La CRAD presentó un valor medio de 146 mm. El valor máximo de CRAD se situó en 193 mm y el mínimo en 107 mm.

**Tabla IV.3.** *Características de los suelos de las parcelas de la comunidad de regantes de Montesnegros. Se presenta el código catastral de la parcela dentro del polígono 001 del municipio de Bujaraloz, las humedades gravimétricas inicial ( $\theta_i$ ), a capacidad de campo ( $\theta_{cc}$ ) y a punto de Marchitez ( $\theta_{PM}$ ), el agotamiento inicial del agua del suelo (AI) y la capacidad de retención de agua disponible (CRAD).*

Código identificador de la parcela	$\theta_i$ (%)	$\theta_{cc}$ (%)	$\theta_{PM}$ (%)	AI (%)	CRAD (mm)
9	20,4	26,6	15,8	57,5	142
11	21,9	26,6	17,7	52,3	126
15	20,0	26,2	14,2	51,3	153
16	20,7	27,2	16,6	61,0	142
17	15,5	24,8	13,0	79,2	142
18	21,8	28,1	18,1	62,9	133
19	24,8	30,7	20,2	56,4	146
20	21,7	28,2	17,8	62,9	138
21	21,9	27,6	19,0	66,1	115
22	25,3	29,1	19,6	40,3	127
23	18,5	25,6	13,2	57,2	148
24	19,8	27,3	16,5	69,5	141
25	18,9	30,0	15,3	75,6	193
26	19,9	28,6	14,5	61,7	172
27	22,9	29,5	18,5	60,7	146
28	18,5	26,3	16,8	81,2	128
29	21,0	29,6	18,3	76,4	147
30	22,0	31,2	17,8	68,6	173
31	21,6	25,4	17,6	48,7	107
32	22,7	26,0	13,4	26,2	146
33	18,5	28,8	16,2	81,8	148
34	23,5	29,2	18,4	53,1	142
35	14,3	24,0	12,0	80,6	135
36	19,3	25,4	14,3	54,7	154
38	17,6	26,5	13,6	68,9	171
45	17,5	29,5	16,9	95,0	169
<b>Promedio</b>	<b>20,4</b>	<b>27,6</b>	<b>16,4</b>	<b>63,5</b>	<b>146</b>

#### IV.1.2.2. Caracterización técnica de los amueblamientos en parcela

La Zona de Simulación cuenta con quince hidrantes, de los cuales nueve son compartidos. El sistema de riego que cubre toda la superficie es la cobertura total. La marca

comercial de los aspersores elegida por la mayoría de los agricultores es VYRSA. El modelo VYR35 equipa el 49 % de las parcelas, seguida por los modelos VYR60 y VYR70, que conjuntamente equipan el 35 % del total de las parcelas. El resto de las parcelas están equipadas con el modelos VYR36 (de material plástico) de VYRSA y el modelo 30C de SOMLO.

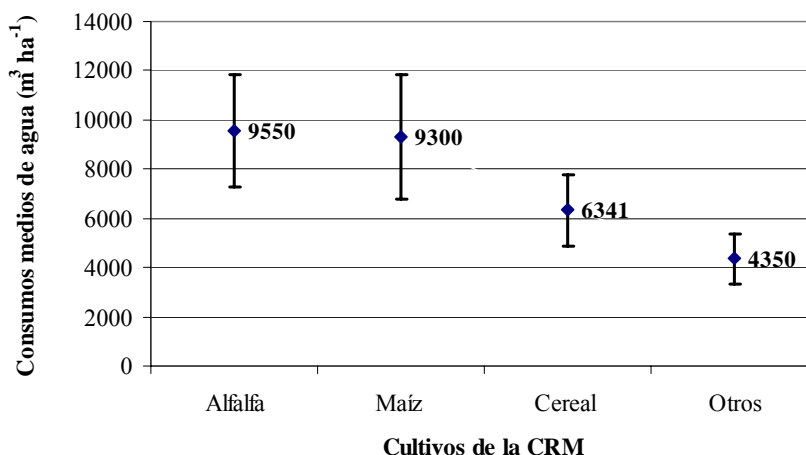
La presión de funcionamiento media de los aspersores en la CRM es de 350 kPa (Anadón, 2006). En cuanto a la sectorización, la mayoría de los sectores tienen entre 25 y 30 aspersores dispuestos en un marco Triangular 18 x 18. El caudal nominal de los hidrantes es de  $12 \text{ L s}^{-1}$ , salvo el hidrante B091 que tiene un caudal de  $30 \text{ L s}^{-1}$ . La mayoría de los agricultores (el 75,8 % de las parcelas) se decantan por una boquilla principal de 4,8 mm, a la que acompaña en todos los casos una boquilla auxiliar fresada de 2,4 mm.

## **IV.2. ANÁLISIS DEL USO DEL AGUA EN LA COMUNIDAD DE REGANTES DE MONTESNEGROS EN EL AÑO 2004**

### **IV.2.1. Uso del agua**

El análisis de la base de datos que genera el programa ADOR ha mostrado que además de usos agrícolas en la zona existen otros usos dedicados mayoritariamente a granjas. En este trabajo sólo se han analizado los datos referentes a los usos agrícolas. Los cultivos más representativos de la comunidad son la alfalfa (48 %), el maíz (41 %) y el cereal (4 %). Los demás cultivos representan el 7 % de la superficie total cultivada en la CRM.

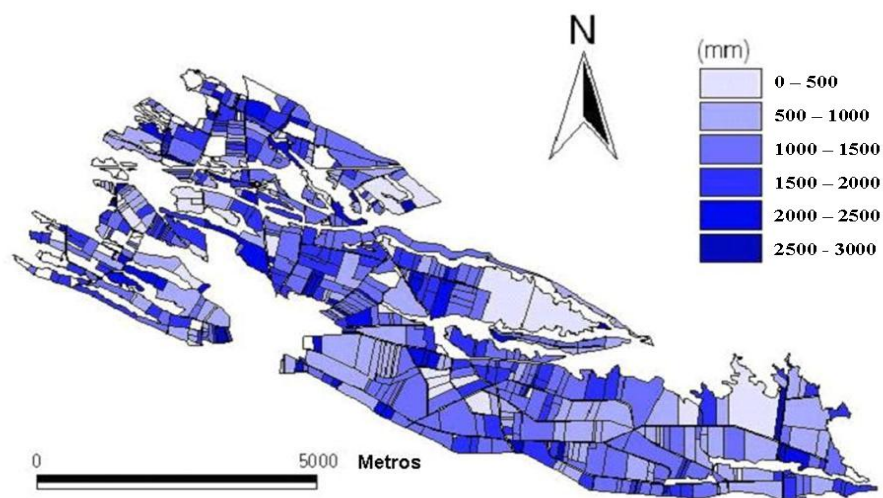
La Figura IV.4 presenta con un punto los consumos medios de los cultivos representativos de la CRM. Las barras representan  $\pm$  una desviación estándar de los datos. Se aprecia una mayor variación en las cantidades de agua aplicadas por hectárea en el cultivo del maíz y de la alfalfa (los cultivos de mayor demanda), mientras que en el caso del cereal y otros cultivos, las variaciones del agua aplicada son menores. Estas variaciones evidencian la variabilidad de las pautas de riego entre agricultores.



**Figura IV.4.** Consumo medio de agua de riego de los cultivos de la CRM en 2004. Para cada cultivo las barras representan  $\pm$  una desviación estándar.

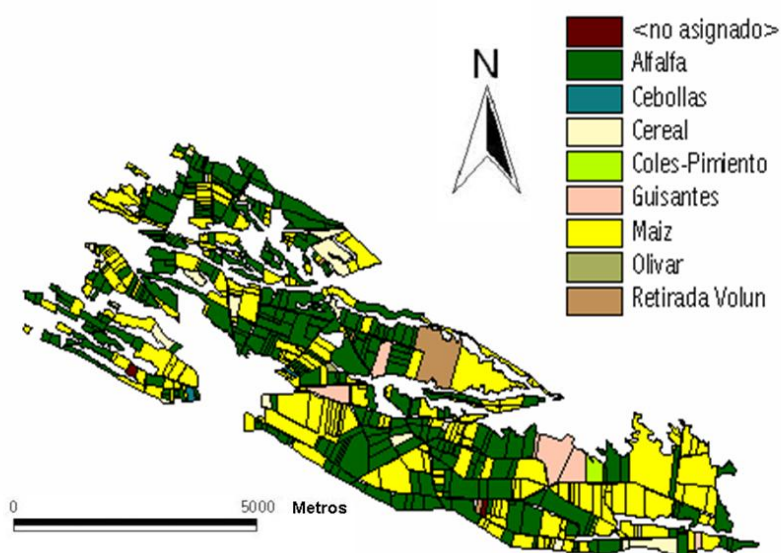
La Figura IV.5 presenta el mapa de consumos (mm) de cada parcela de la comunidad de regantes de Montesnegros en la campaña 2004. Las variaciones de los consumos fueron importantes incluso para parcelas del mismo cultivo. Así el consumo medio de las parcelas de alfalfa se situó entre un mínimo de  $6.028 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y un máximo de  $14.960 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , siendo el consumo medio de  $9.550 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y la desviación estándar  $2.270 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . En las parcelas de maíz el consumo se situó entre un mínimo de  $6.073 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y un máximo de  $14.903 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , siendo el consumo medio de  $9.300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y la desviación estándar de  $2.520 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

Esta variabilidad espacial del agua aplicada a los cultivos resulta elevada, pero es comparable a las observaciones previas de Dechmi y *col.*, (2003a). Estos autores presentaron un estudio del uso del agua en la CR de la Loma de Quinto de Ebro (LQD) durante tres campañas de riego. Esta zona presentó una variabilidad del agua aplicada entre parcelas muy similar a la CRM en el caso del maíz. Sin embargo la variabilidad entre parcelas de alfalfa resultó ser muy superior en LQD que en nuestra zona. La aplicación de riegos deficitarios en el cultivo de alfalfa fue una práctica muy común en la CR de la LQD. Sin embargo en nuestra zona la alfalfa se riega, en general, con el objetivo de satisfacer las necesidades del cultivo.



**Figura IV.5.** Mapa de los consumos de agua totales de la comunidad de regantes de Montesnegros durante la campaña agrícola de 2004.

La Figura IV.6 presenta el mapa de cultivos de la Comunidad de regantes. Si se compara esta figura con la IV.5 se comprueba que las parcelas de menor consumo se corresponden, en general, con cultivos de menor demanda hídrica, mientras que las parcelas con mayores consumos corresponden a los cultivos de alfalfa y maíz. Existen sin embargo claras excepciones a esta regla.



**Figura IV.6.** Mapa de los cultivos de la comunidad de regantes de Montesnegros durante la campaña agrícola de 2004.

### IV.2.2. Productividad del agua basada en el margen bruto de los cultivos

Considerando los costes e ingresos presentados en el capítulo de material y métodos (Sección III.2.2) se ha calculado el margen bruto para el maíz y la alfalfa en la zona. A partir de los volúmenes medios de agua determinados anteriormente se ha calculado la productividad media del agua basada en el margen bruto ( $WP_{MB}$ ). Los resultados de dichas productividades se presentan en la Tabla IV.4.

**Tabla IV.4.** *Productividad media del agua para los cultivos de alfalfa y maíz en la comunidad de regantes de Montesnegros durante la campaña agrícola 2004.*

Cultivo	Agua aplicada ( $m^3 ha^{-1}$ )	Margen bruto ( $€ha^{-1}$ )	$WP_{MB}$ ( $€m^{-3}$ )
Alfalfa	9.550	875,5	0,09
Maíz	9.300	1.028,6	0,11

Según la Tabla IV.4 la  $WP_{MB}$  de la alfalfa en el año 2004 fue inferior a la del maíz en aproximadamente  $0,02 € m^{-3}$ . Esto indica que, en promedio, el uso del agua para regar maíz fue más rentable que para regar alfalfa. A pesar de esta ligera diferencia a favor del maíz, la superficie dedicada a maíz (1.425 ha) fue ligeramente inferior que la dedicada a alfalfa (1.668 ha). Razones de tipo agronómico y socioeconómico (necesidades de rotación, demanda de mano de obra, mecanización y otras), parecen tener más peso que la productividad del agua en la decisión de los cultivos que realiza el agricultor.

Con un planteamiento parecido, Navarro y *col.*, (2006) realizaron un estudio económico en el que se compararon datos e indicadores económicos de maíz y alfalfa en la zona regable de Montijo (Badajoz) y en la Margen Izquierda del Porma (León). La metodología de cálculo de los márgenes brutos y productividades basada en la determinación de ingresos y gastos totales ha sido similar a la utilizada en este trabajo. La Tabla IV.5 presenta las productividades obtenidas por estos autores para maíz y alfalfa en las dos zonas estudiadas.

**Tabla IV.5.** Productividad del agua en Margen Bruto ( $WP_{MB}$ ) para los cultivos de maíz y alfalfa en las zonas regables de Montijo (Badajoz) y en la Margen Izquierda del Porma (León).

$WP_{MB}$ ( $\text{€m}^{-3}$ )		
Zona regable	Alfalfa	Maíz
Montijo	0,06	0,06
Margen Izquierda del Porma	0,16	0,10

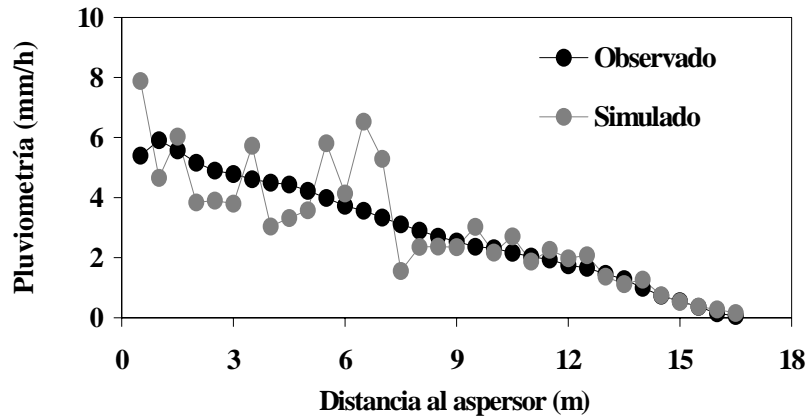
En la zona de Montijo, la productividad del agua es igual para los dos cultivos y muy inferior a la encontrada en la zona del Porma. En esta última zona, además, la productividad del agua presenta importantes diferencias entre los dos cultivos, resultando la alfalfa más rentable que el maíz ( $0,06 \text{ € m}^{-3}$ ). La zona de estudio de esta tesis presenta productividades intermedias entre las dos zonas estudiadas por Navarro y *col.*, (2006).

### IV.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE RIEGO POR ASPERSIÓN

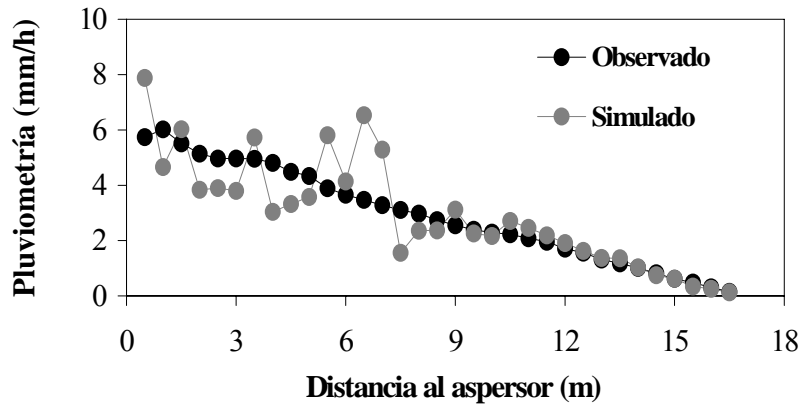
#### IV.3.1. Estimación de los parámetros $D_{50}$ y $n$

Las Figuras IV.7 y IV.8 presentan los patrones radiales de distribución de agua obtenidos en los dos experimentos (1 y 2) realizados en condiciones de bajo viento. Los resultados de los dos experimentos muestran una gran similitud, debido a que el viento es la principal fuente de variabilidad en este tipo de experimentos.

El análisis de los resultados de la simulación de los experimentos 1 y 2 mostró que los valores de los parámetros que optimizaban los parámetros de similitud entre observaciones y simulaciones eran  $D_{50} = 0,0019 \text{ m}$  y  $n = 2,3$ . Estos valores de los parámetros fueron tentativamente aceptados como resultado de la calibración. Los resultados de la simulación con estos parámetros se muestran en las anteriormente citadas Figuras IV.7 y IV.8, junto con los respectivos valores experimentales. En los dos casos se observan diferencias entre los patrones radiales observados y simulados. En las cercanías del aspersor es dónde se producen las diferencias más importantes.



**Figura IV.7.** Patrón radial de distribución de agua observado en el ensayo 1 y simulado con  $D_{50} = 0,0019\text{ m}$  y  $n = 2,3$  para el aspersor VYR35, equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm de diámetro y con una presión de funcionamiento de 350 kPa.



**Figura IV.8.** Patrón radial de distribución de agua observado en el ensayo 2 y simulado con  $D_{50} = 0,0019\text{ m}$  y  $n = 2,3$  para el aspersor VYR35, equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm de diámetro y con una presión de funcionamiento de 350 kPa.

Estas diferencias en la simulación del patrón radial fueron ya apuntadas en trabajos previos de calibración de modelos balísticos (Dechmi y col., 2004b; Playán y col., 2006). Al alejarse del aspersor las dos curvas mejoran su ajuste, y los resultados de la simulación se muestran más estables. La falta de similitud entre datos observados y simulados guarda relación con el número de diámetros diferentes que se vuelan en cada radio (180) y con el número total de radios en los que el modelo calcula el vuelo de las gotas (180). Aumentando estos valores se hubiera conseguido eliminar una parte de las oscilaciones

detectadas. Sin embargo, los valores utilizados son fruto de un compromiso entre la calidad de los resultados y el tiempo de simulación.

A la hora de seleccionar los valores óptimos de los parámetros de distribución del tamaño de gotas, se ha prestado atención además de a los parámetros numéricos de comparación, a la forma de la curva en su extremo final. Esto se ha hecho así ya que este extremo final representa una gran superficie de terreno y además la uniformidad de riego en cobertura total está muy influida por el alcance de los aspersores.

La Tabla IV.6 muestra un resumen de las variables meteorológicas registradas durante los diez ensayos en la cobertura de riego por aspersión.

**Tabla IV.6.** *Resumen de los valores de las variables meteorológicas y de la uniformidad de riego en los diez ensayos realizados en la cobertura de riego por aspersión.*

Ensayo	Velocidad del viento (m s <sup>-1</sup> )	Dirección viento (°)	Temperatura del aire (°C)	Humedad Relativa (%)	CU (%)
1	0,9	112,5	8,3	81,4	89,1
2	2,7	270,0	10,0	61,1	78,3
3	3,2	292,5	8,5	55,0	74,0
4	3,3	292,5	8,3	62,2	76,0
5	3,5	292,5	14,2	63,4	74,0
6	3,9	292,5	14,7	60,0	73,5
7	4,3	292,5	14,0	64,5	71,5
8	5,1	315,0	13,1	60,1	71,7
9	5,4	315,0	14,0	57,2	70,5
10	6,7	315,0	12,7	51,5	71,8

Utilizando los datos de pluviometría obtenida a partir de los ensayos en la cobertura de riego por aspersión y los valores de los parámetros  $D_{50}$  y  $n$  determinados en el apartado anterior, se simuló el experimento de riego en cobertura total con el viento más bajo de los disponibles (0,9 m s<sup>-1</sup>). En estas condiciones, los parámetros  $K1$  y  $K2$  deben adoptar valores muy cercanos a cero. Sin embargo, se observó que las diferencias entre los coeficientes de uniformidad experimental y simulada resultaron ser altas. Consecuentemente, se retomó la tarea de calibración de  $D_{50}$  y  $n$ , buscando valores de estos parámetros que reprodujeran eficazmente el patrón radial de distribución, pero que además produjeran mejores estimas

de la uniformidad de riego en cobertura en condiciones de vientos suaves. A partir de estas simulaciones se encontró que un valor de  $D_{50}$  de 0,0019 m y un valor de  $n$  de 1,8 cumplían los requisitos establecidos. En la Tabla IV.7 se presentan las distintas simulaciones utilizadas en el proceso de ajuste hasta llegar al resultado finalmente seleccionado.

**Tabla IV.7.** Valores del diámetro medio de las gotas de agua ( $D_{50}$ ) y el exponente adimensional ( $n$ ) obtenidos tras el proceso de ajuste de la uniformidad del riego.

$D_{50}$	$n$	CU simulado	CU experimental	RMSE	$r$
(m)	(-)	(%)	(%)	(mm h <sup>-1</sup> )	(-)
0,0019	2,0	85,5	89,0	1,53	0,79
0,0019	1,9	88,7	89,0	1,99	0,75
0,0019	1,8	92,1	89,0	1,68	0,77

De la Tabla IV.7 se desprende que un valor de  $n$  de 2,0 producía mejores parámetros de similitud con las observaciones de campo que el valor finalmente elegido. Sin embargo, el desarrollo del resto del proceso de calibración con estos parámetros dio peores resultados que con los valores  $D_{50} = 0,0019$  m y  $n = 1,8$ , por lo que éstos últimos fueron los valores finalmente adoptados.

### IV.3.2. Estimación de los parámetros $K1$ y $K2$

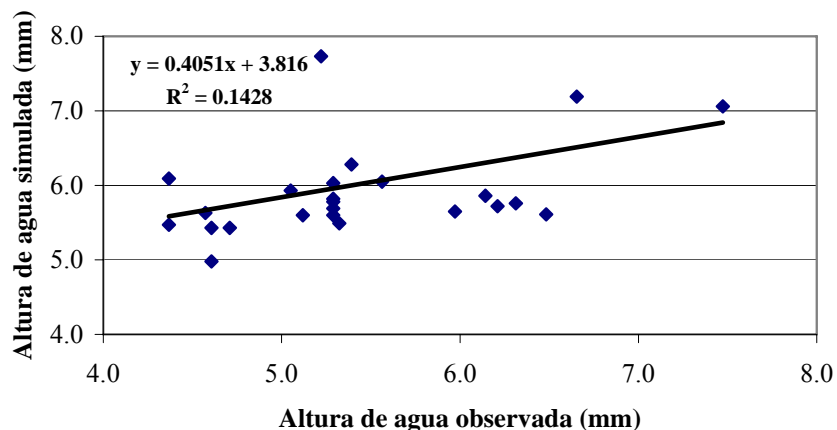
Después de fijar los valores de  $D_{50}$  y  $n$ , se procedió a simular los siete ensayos de cobertura de riego por aspersión reservados para la fase de calibración de  $K1$  y  $K2$ . Estos ensayos corresponden a los números 1, 2, 3, 4, 7, 9 y 10, según la numeración de la Tabla IV.6. La ejecución del modelo de simulación con los valores de los parámetros  $D_{50}$  y  $n$  elegidos en el apartado anterior de este capítulo y distintas combinaciones de los parámetros  $K1$  y  $K2$ , proporcionó para cada caso valores de  $CU$  simulados, de coeficientes de correlación entre dosis de riego observadas y simuladas y errores cuadráticos medios. A partir de estos resultados se determinaron los valores óptimos de  $K1$  y  $K2$  para cada uno de los ensayos. Los valores de  $K1$  y  $K2$  elegidos se presentan en la Tabla IV.8. En esta tabla también se presentan los estadísticos de los valores óptimos elegidos. Se aprecia que a medida que la velocidad del viento es mayor el valor del  $RMSE$  crece, mientras que los valores de las diferencias del  $CU$  se hacen en general más pequeñas. La correlación

presenta los valores máximos para valores de velocidad del viento intermedios, entre 2,7 y 4,0 m s<sup>-1</sup>.

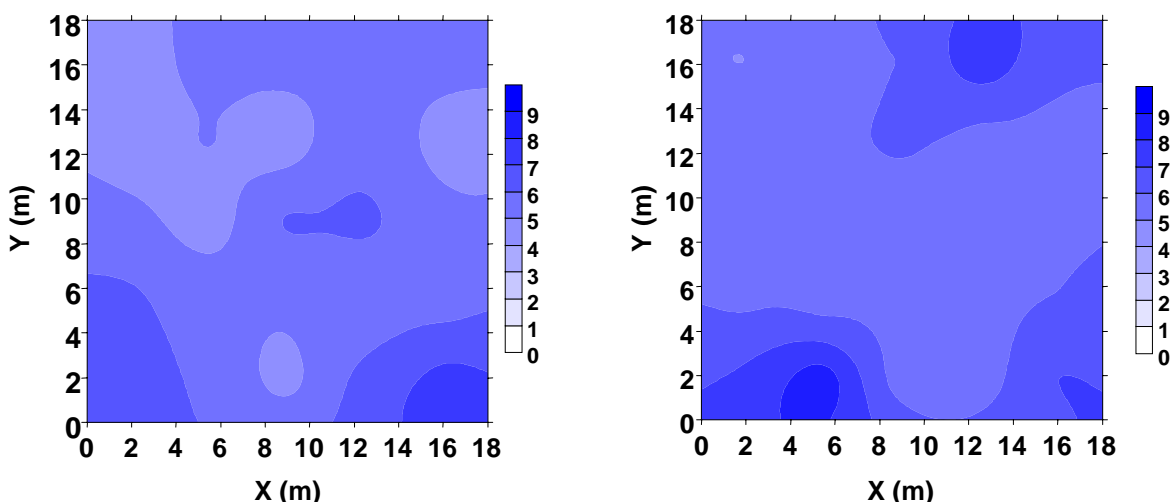
**Tabla IV.8.** *Valores óptimos de los parámetros K1 y K2 para cada experimento en cobertura total usados para la calibración, diferencia entre CU observado y simulado (DifCU), RMSE y r.*

Ensayo	Velocidad viento (m s <sup>-1</sup> )	K1 (-)	K2 (-)	DifCU (%)	RMSE (mm h <sup>-1</sup> )	r (-)
1	0,9	2,4	0,0	1,67	1,04	0,37
2	2,7	2,6	0,55	1,66	1,14	0,74
3	3,2	2,6	0,5	0,51	1,52	0,67
4	3,3	2,4	0,55	2,74	1,45	0,67
7	4,3	2,4	0,25	1,01	1,82	0,59
9	5,4	2,6	0,25	0,34	1,82	0,59
10	6,7	2,2	0,15	1,59	1,97	0,53

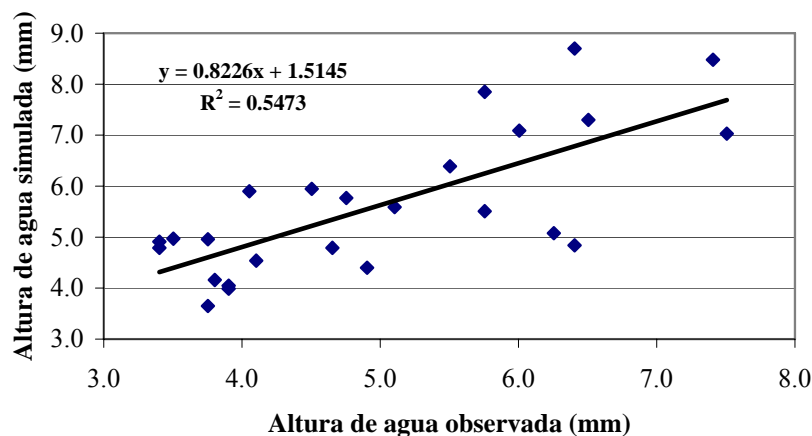
Los resultados de las simulaciones realizadas con los valores óptimos de *K1* y *K2* se han representado gráficamente de dos formas. La primera, mediante nubes de puntos de altura de agua observada frente a la simulada (mm); y la segunda, mediante mapas de isolíneas, que permiten apreciar la distribución de agua en tres dimensiones y por lo tanto estimar visualmente la uniformidad del riego. Estas figuras permiten realizar un análisis visual de los resultados estadísticos presentados en la tabla IV.8. Las siguientes Figuras IV.9, IV.10, IV.11, IV.12, IV.13 y IV.14 presentan estos resultados gráficos para los ensayos 1, 2 y 10, con velocidades de viento de 0,9, 2,7 y 6,7 m s<sup>-1</sup>, respectivamente.



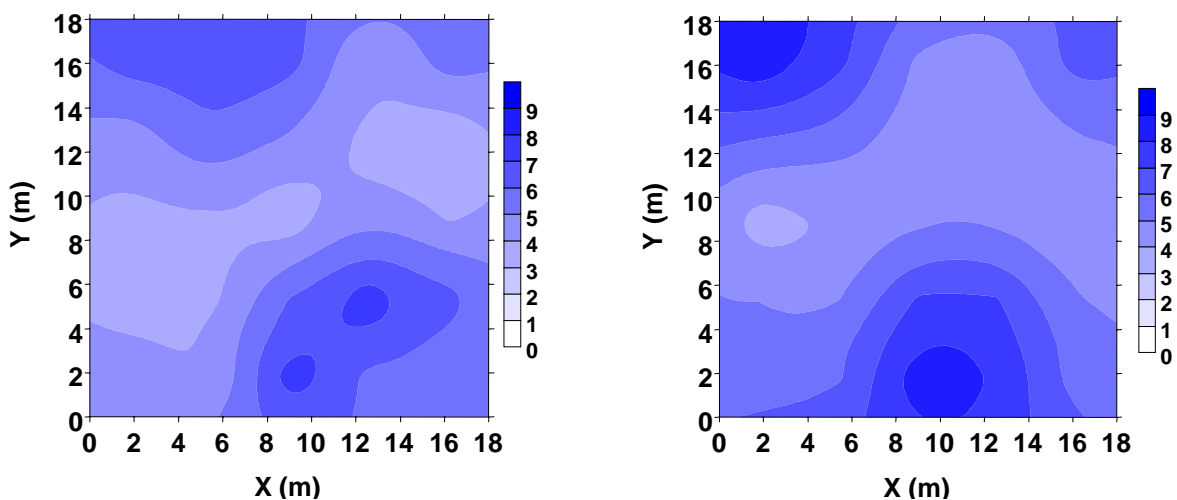
**Figura IV.9.** *Altura de agua simulada y observada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $0,9 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 1).*



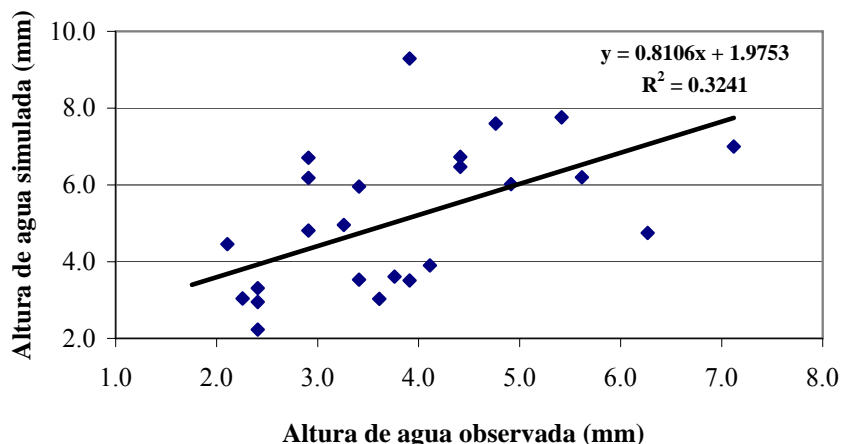
**Figura IV.10.** *Mapas de isolíneas de las dosis de riego ( $\text{mm h}^{-1}$ ) observadas (Izquierda) y simuladas (Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $0,9 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 1).*



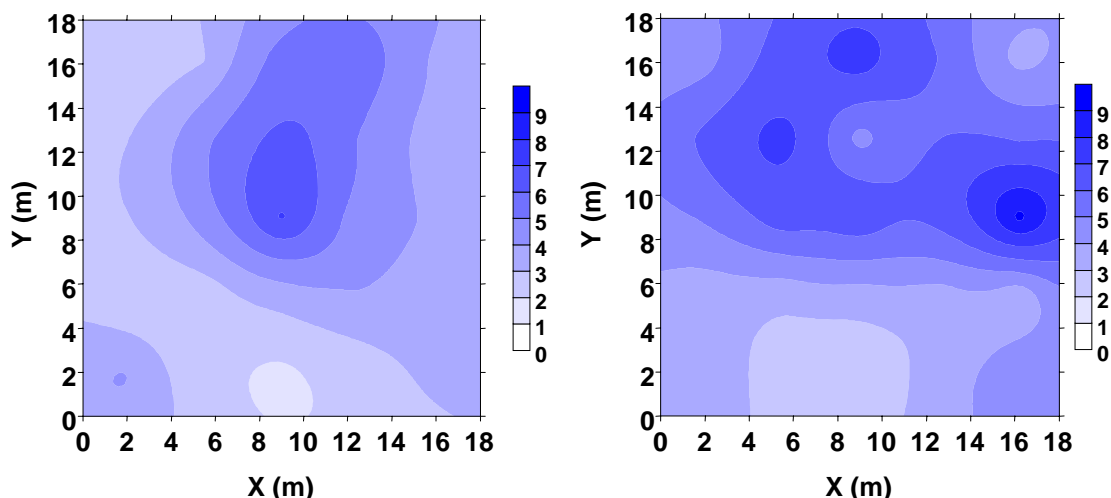
**Figura IV.11.** Alturas de agua simulada y observada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $2,7 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 2).



**Figura IV.12.** Mapas de isolíneas de las dosis de riego ( $\text{mm h}^{-1}$ ) observadas (Izquierda) y simuladas (Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $2,7 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 2).



**Figura IV.13.** Alturas de agua simulada y observada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $6,7 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 10).

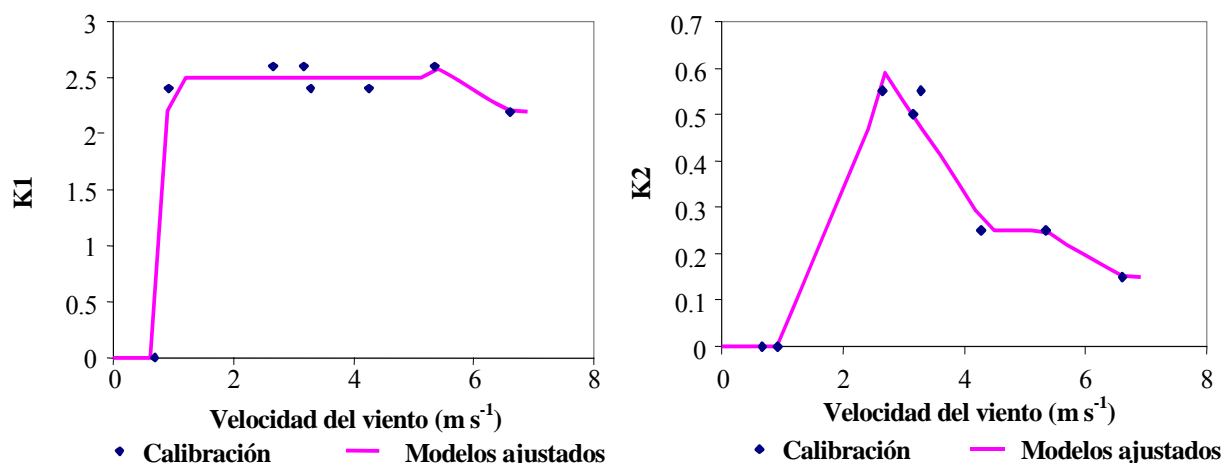


**Figura IV.14.** Mapas de isolíneas de las dosis de riego ( $\text{mm h}^{-1}$ ) observadas (Izquierda) y simuladas (Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $6,7 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 10).

Las anteriores tablas y figuras muestran que el modelo es capaz de reproducir con aproximación la distribución espacial del agua de riego resultante de distintas condiciones de viento en la cobertura total.

### IV.3.3. Validación del modelo de riego por aspersión

Es necesario establecer relaciones funcionales de los parámetros  $K1$  y  $K2$  con la velocidad del viento a partir de los resultados del proceso de calibración. Estas relaciones, que se introducirán posteriormente en el modelo de simulación, permitirán simular cualquier condición meteorológica del riego, siempre que se encuentre en el rango de las condiciones evaluadas. Las Figuras IV.15 (Izquierda) y IV.15 (Derecha) presentan los valores de  $K1$  y  $K2$  obtenidos de los ensayos de calibración en función del viento, así como los modelos funcionales propuestos. La Tabla IV.9 presenta las expresiones matemáticas utilizadas para construir los modelos.

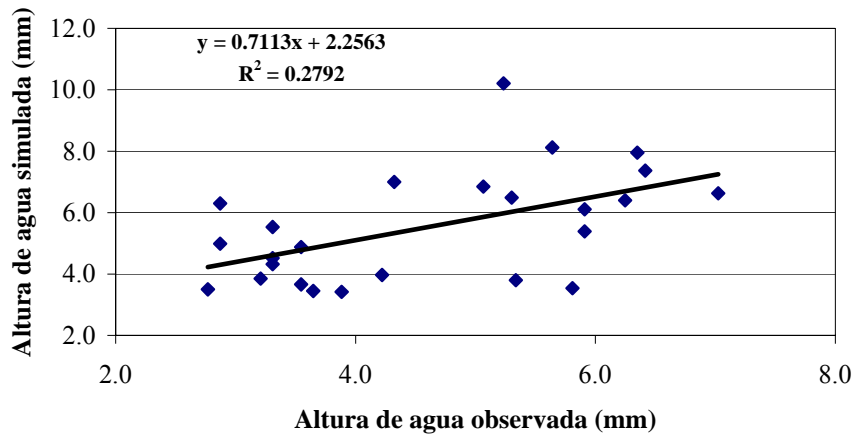


**Figuras IV.15.** Relaciones entre la velocidad del viento y los parámetros  $K1$  (izquierda) y  $K2$  (derecha) obtenidas a partir de los resultados obtenidos en el proceso de calibración. Se muestran los valores de los parámetros y la relación funcional propuesta para cada parámetro.

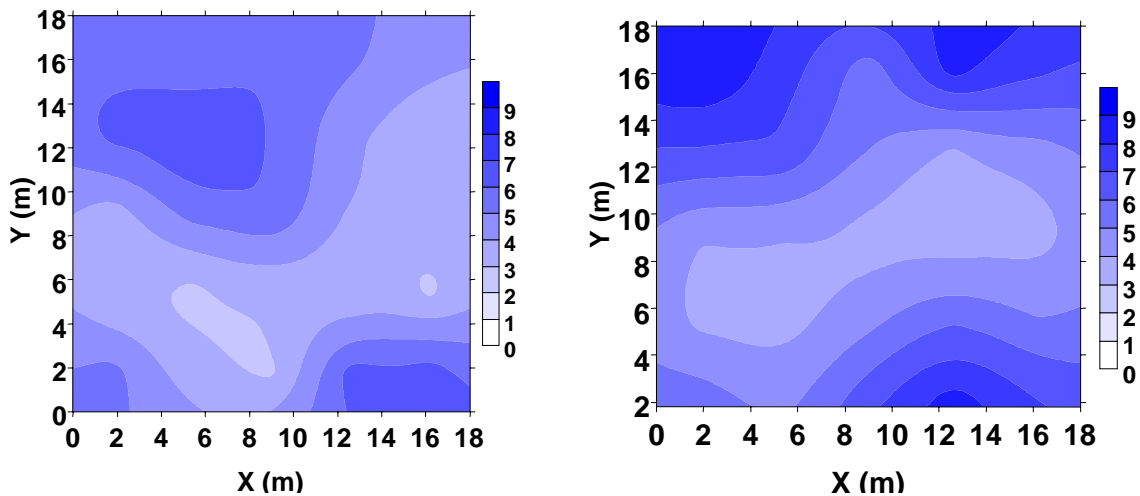
**Tabla IV.9.** Relaciones matemáticas usadas para describir los parámetros  $K1$  y  $K2$  en función del viento.

Rangos de viento ( $m s^{-1}$ )	$K1$	$K2$
$0 < VV \leq 0,7$	0	0
$0,7 < VV \leq 0,9$	$9,6 * VV - 6,432$	0
$0,9 < VV \leq 2,7$	2,5	$0,3161 * VV - 0,2908$
$2,7 < VV \leq 4,3$	2,5	$-0,1981 * VV + 1,1245$
$4,3 < VV \leq 5,3$	2,5	0,25
$5,3 < VV \leq 6,6$	$-0,3175 * VV + 4,2984$	$-0,0794 * VV + 0,6746$
$VV > 6,6$	2,2	0,15

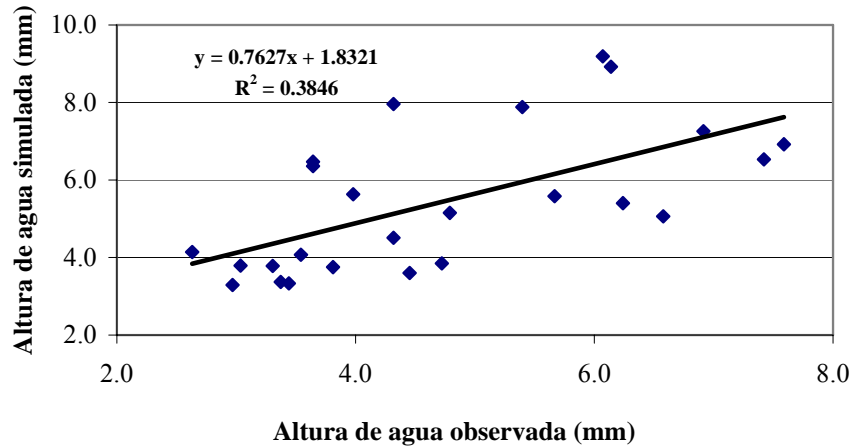
Con las expresiones de  $K1$  y  $K2$  en función del viento propuestas en la Tabla IV.9, se simularon los ensayos reservados para la validación del modelo. Estos ensayos corresponden a los numerados como 5, 6 y 8 en la Tabla IV.1. Las Figuras IV.16, IV.17, IV.18, IV.19, IV.20 y IV.21 muestran de forma gráfica la comparación entre los valores simulados y observados para los ensayos de validación.



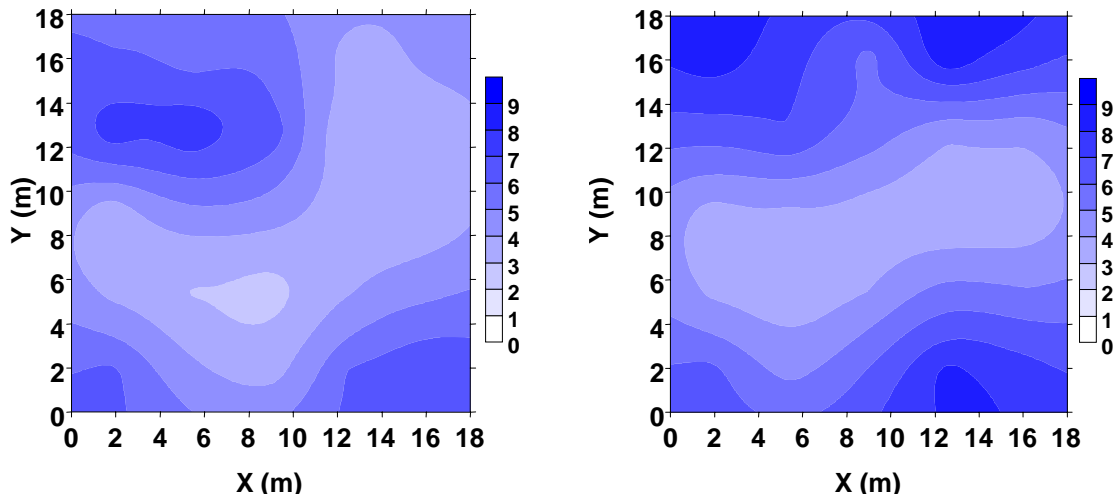
**Figura IV.16.** Alturas de agua observada y validada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $3,5 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 5).



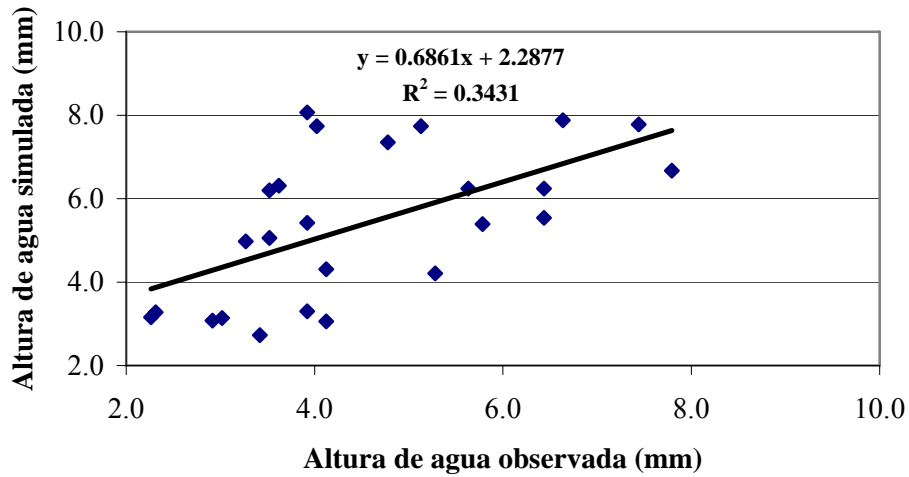
**Figura IV.17.** Mapas de isolíneas de las alturas de agua observadas(Izquierda) y simuladas(Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, trabajando a una presión de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $3,5 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 5).



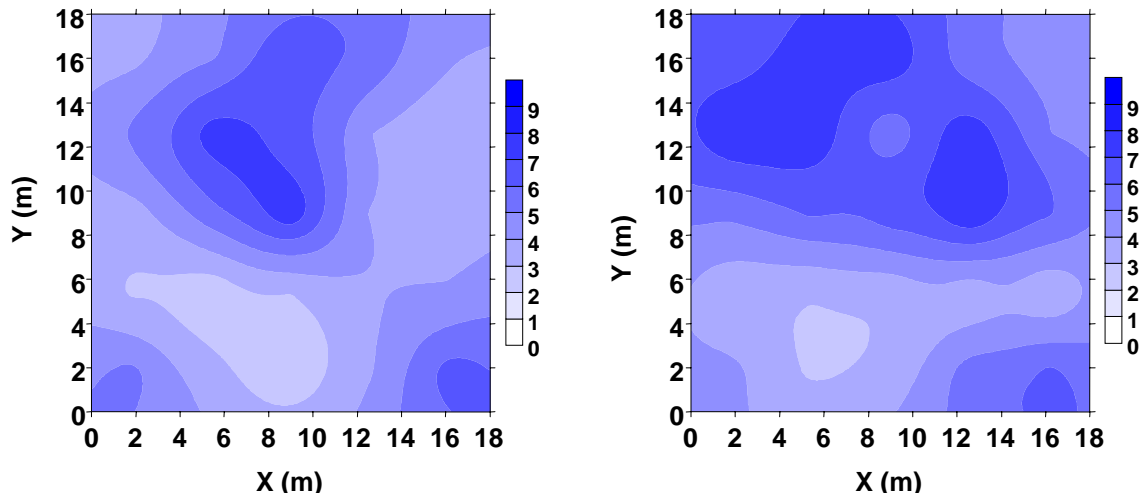
**Figura IV.18.** Alturas de agua observada y validada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $3,9 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 6).



**Figura IV.19.** Mapas de isolíneas de las alturas de agua observadas(Izquierda) y simuladas(Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, trabajando a una presión de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $3,9 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 6).



**Figura IV.20.** Alturas de agua observada y validada de la distribución de agua del aspersor VYR35 en cobertura de riego equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, con una presión de funcionamiento de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $5,1 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 8).



**Figura IV.21.** Mapas de isolíneas de las alturas de agua observadas(Izquierda) y simuladas(Derecha) para el aspersor VYR35 equipado con boquillas de 4,8 y 2,4 mm, trabajando a una presión de 350 kPa y bajo una velocidad de viento de  $5,1 \text{ ms}^{-1}$  (ensayo 8).

El análisis de las figuras anteriores permite concluir que el modelo de simulación tiene una capacidad predictiva relevante en términos de distribución espacial de la dosis de riego. La Tabla IV.10 presenta los resultados de los *CU*'s experimentales y los simulados,

siendo las diferencias del orden de un punto porcentual. Los valores de *RMSE* se mantienen inferiores a 1,0 mm h<sup>-1</sup> y los valores de *r* superan el valor de 0,5.

**Tabla IV.10.** *Coefficientes de uniformidad (CU) experimental y simulado, la diferencia entre ambos (DifCU), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación (r) de los tres ensayos utilizados para la validación del modelo de simulación.*

Nº Ensayo	Velocidad viento (m s <sup>-1</sup> )	CU Experimental (%)	CU Simulado (%)	DifCU (%)	RMSE (mm h <sup>-1</sup> )	r (-)
5	3,5	73,9	74,0	0,1	1,79	0,52
6	3,9	73,5	72,5	1,0	1,60	0,62
8	5,1	71,7	73,0	1,3	1,74	0,58

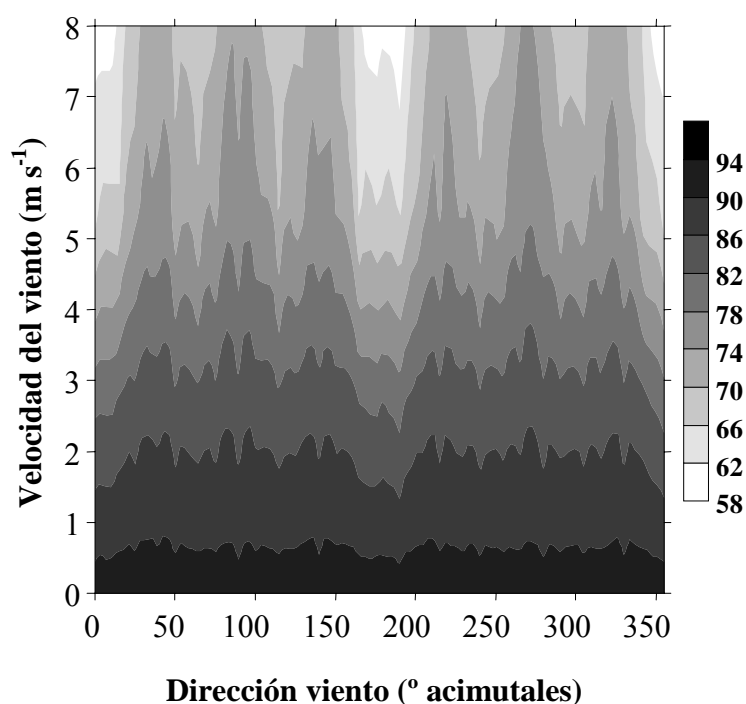
#### IV.3.4. Aplicación del modelo

Se realizaron simulaciones con el modelo ya calibrado y validado para el aspersor VYR35 en las mismas condiciones técnicas (tamaño de boquilla, presión de funcionamiento y marco de aspersión) para diferentes velocidades y direcciones del viento. El objetivo de esta fase fue determinar la calidad del riego y el patrón de distribución de agua en el marco de aspersión en función de la velocidad y dirección del viento. Así, se simularon velocidades de viento de 0 a 8 m s<sup>-1</sup> (con un incremento de 0,5 m s<sup>-1</sup>) y direcciones de viento de 0 a 360° (con un incremento de 5°). En la Figura IV.22 se presenta el coeficiente de uniformidad (*CU*) resultante de estas simulaciones. En la simulación la configuración de las líneas de aspersión es triangular con distancias de 18 x 18 m, estando las líneas de aspersión orientadas al Norte geográfico (Azimut 0°).

La representación del coeficiente de uniformidad en función de las velocidades y las direcciones muestra que para una velocidad del viento del orden de 1,0 m s<sup>-1</sup> el coeficiente de uniformidad permanece en el rango de 90-95 %. El aumento de la velocidad del viento produce una disminución del coeficiente de uniformidad, llegando a alcanzar valores del orden de 65 %, con velocidades de viento en torno a 8 m s<sup>-1</sup>. A una velocidad media de 4,0 m s<sup>-1</sup> el coeficiente de uniformidad alcanza valores de 78 %.

En esta figura IV.22 se advierten dos ejes de uniformidad baja, uno a 180° y el otro a 360°. Esto quiere decir que cuando el viento sopla en una dirección paralela a la línea de

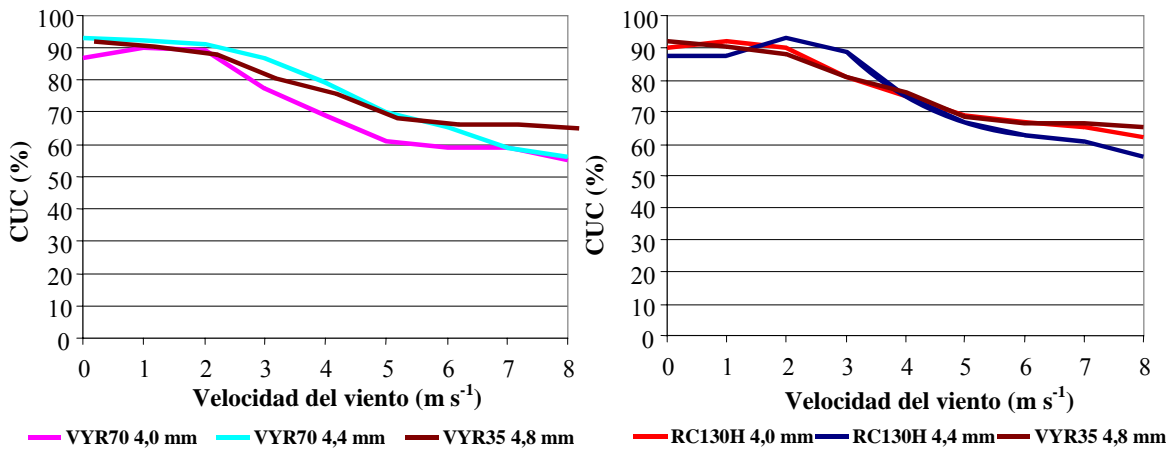
aspersores (dirección Norte o Sur), el coeficiente de uniformidad se ve más afectado y alcanza valores menores que para otras direcciones. Se advierten otros ejes de uniformidad baja cada  $60^\circ$  (lo que corresponde con la simetría de las posibles líneas de aspersión que pueden dibujarse en los marcos triangulares). A partir de esta Figura, se puede concluir que la orientación de las líneas de aspersores buscando ciertos ángulos respecto del viento dominante podría ayudar a mejorar la uniformidad en zonas en la que los vientos dominantes tienen una dirección predecible (como es el caso de la depresión central del Ebro).



**Figura IV.22.** Mapa de isolíneas del Coeficiente de uniformidad ( $CU$ ) en función de la velocidad y dirección del viento para el aspersor VYR35 equipado de boquilla principal de 4,8 mm boquilla auxiliar de 2,4 mm, trabajando a una presión de 350 kPa, con una disposición en campo en marco triangular de 18 x 18 m.

Playán y col., (2006) presentaron valores de  $CU$  para diferentes condiciones técnicas y meteorológicas de dos modelos de aspersor agrícola (RC130H y VYR70), equipados con boquillas principales de 4,0 y 4,4 mm. La Figura IV.23 presenta la evolución del  $CU$  en función del viento para los aspersores VYR70 y VYR35, figura izquierda y RC130H y VYR35, figura derecha. Las condiciones técnicas de los aspersores comparados difieren únicamente en el tamaño de boquilla principal, y se corresponden con una presión de

trabajo de 350 kPa, en una cobertura T 18 x 18 m. Comparado con el modelo VYR70 (figura izquierda), y en las condiciones técnicas de la comparación, el modelo VYR35 equipado con boquilla de 4,8 mm tiene un comportamiento intermedio entre el VYR70 con boquilla de 4,0 mm y 4,4 mm. Si bien, para vientos superiores a 5,0 m s<sup>-1</sup>, el descenso del CU es menor que en el caso del VYR70. La comparación del RC130H con el VYR35 (Figura Derecha), indica que el comportamiento del CU frente al viento es muy similar entre el VYR35 equipado con 4,8 mm y el RC130H equipado con 4,0 mm.



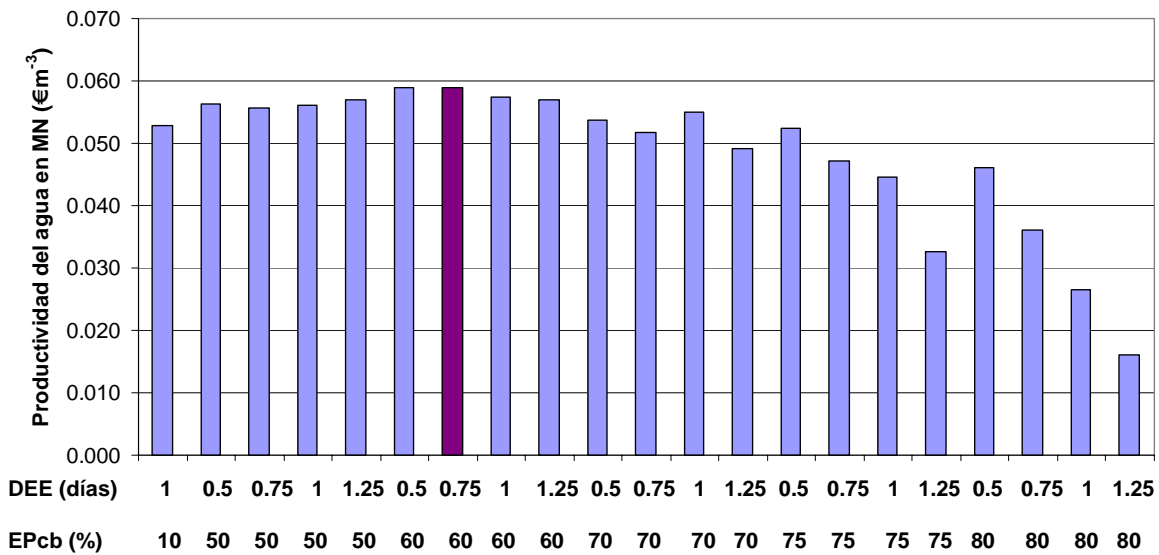
**Figura IV.23.** Relación entre el coeficiente de uniformidad (CU) y el viento para el modelo de aspersor VYR35 equipado con boquilla principal de 4,8 mm y para a) el modelo VYR70 equipado con dos tamaños de boquilla principal (4,0 y 4,4 mm) (Izquierda); y b) el modelo RC130H equipado con dos tamaños de boquilla principal (4,0 y 4,4 mm) (Derecha).

#### IV.4. DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE RIEGO (ADOR-CONTROL) EN UNA COMUNIDAD DE REGANTES

##### IV.4.1. Evaluación de estrategias de gestión del riego en una parcela dimensionada para permitir una gestión avanzada

Las Figuras IV.24 y IV.25 presentan, para las parcelas tipo de maíz y alfalfa, respectivamente, la productividad del agua expresada en margen neto (WP<sub>MN</sub>) para las diferentes estrategias de gestión analizadas. Las estrategias de gestión evaluadas se corresponden con las combinaciones de los valores de los parámetros DEE y EP<sub>cb</sub> propuestos en el capítulo de Material y Métodos. En el caso del maíz (Figura IV.24), la

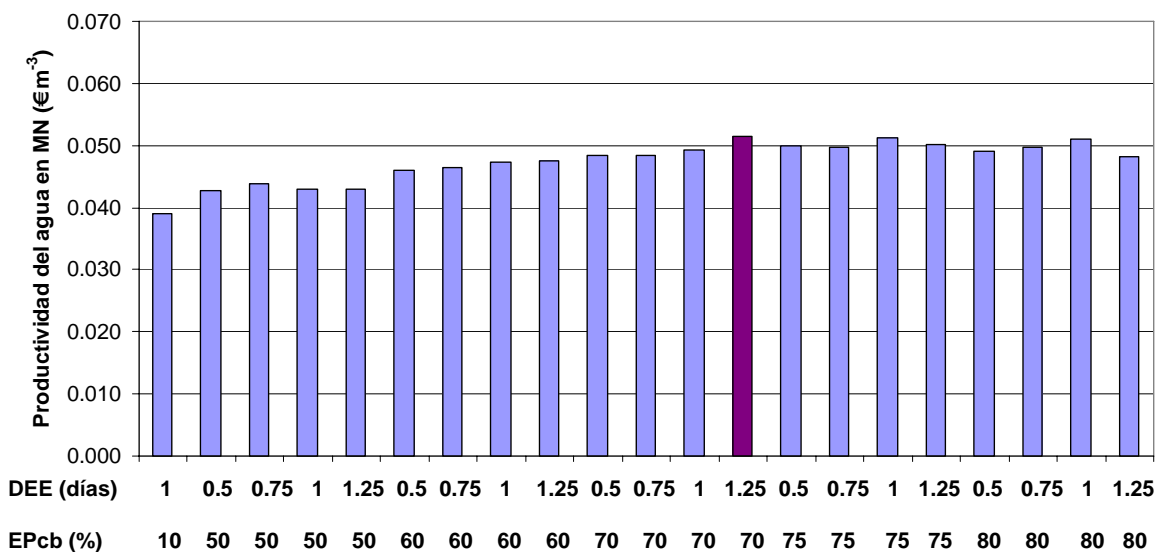
estrategia que proporciona los valores más elevados de productividad del agua (0,058 € m<sup>-3</sup>) presenta una combinación de valores de un *DEE* de 0,75 días y una *EPcb* de 60%. Valores de *DEE* superiores a 0,75 días provocan reducciones del rendimiento que no compensan el ahorro de agua. En el caso del maíz, la sensibilidad al estrés hídrico hace que los riegos deban darse siguiendo la evolución de las necesidades hídricas, con un retraso mínimo. Este criterio (*DEE*) parece resultar más restrictivo que el de la *EPcb*, ya que el programa encuentra que es mejor regar aunque la eficiencia potencial sea baja que esperar a que las condiciones meteorológicas mejoren. Esto está sin duda influido por las condiciones locales de meteorología y costes energéticos del agua, ya que regar con una baja eficiencia conlleva aplicar más agua para compensar las pérdidas durante el riego.



**Figura IV.24.** Estrategias de gestión de riego por aspersión basadas en la productividad del agua expresada en margen neto ( $WP_{MN}$ ) para el cultivo de maíz en la comunidad de regantes de Montesnegros para el año 2004 basadas en distintas combinaciones de *DEE* y *EPcb*.

En alfalfa (Figura IV.25), la combinación de valores de *DEE* y *EPcb* que maximiza la productividad del agua (0,051 € m<sup>-3</sup>) es de 1,25 días y 70 %, respectivamente. La alfalfa es un cultivo menos sensible que el maíz al estrés hídrico, por lo que resulta económicamente rentable esperar hasta que las condiciones ambientales para el riego sean adecuadas, sin que se produzcan reducciones importantes del rendimiento.

Según estos resultados, la estrategia de optimización de riego por aspersión en cobertura total depende claramente del cultivo. La gestión optimizada del riego de una zona requiere la determinación de los cultivos mayoritarios, así como la identificación de los parámetros de gestión óptimos de cada uno de ellos. La versión actual del modelo de simulación desarrollado en este trabajo no permite diferenciar estrategias entre cultivos. Es decir, el modelo sólo permite gestionar el riego de una zona con la definición de una estrategia única. En trabajos posteriores se abordará la posibilidad de gestionar el riego de cada cultivo de forma individualizada. La elección de una estrategia intermedia entre los dos cultivos mayoritarios produciría un importante descenso en la  $WP_{MN}$  del maíz.



**Figura IV.25.** Estrategias de gestión de riego por aspersión basadas en la productividad del agua margen neto para el cultivo de la alfalfa en la comunidad de regantes de Montesnegros para el año 2004.

La aplicación de la estrategia óptima del maíz da lugar a un  $WP_{MN}$  en la alfalfa de  $0,046 \text{ € m}^{-3}$ , que no difiere en gran medida de su productividad máxima ( $0,051 \text{ € m}^{-3}$ ). Por todo ello, resulta más adecuado seleccionar la estrategia que optimiza la  $WP_{MN}$  del maíz, definida por un  $DEE$  de 0,75 días y una  $EPcb$  de 60 %. Con esta elección nos situamos en una productividad del agua expresada en margen neto de  $0,058 \text{ € m}^{-3}$  para el maíz y de  $0,046 \text{ € m}^{-3}$  para la alfalfa.

Es preciso tener en cuenta que este análisis ha sido realizado para una parcela con un caudal ficticio continuo de  $1,4 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , muy elevado si se compara con la zona de estudio (entre  $1,0$  y  $1,2 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ). Sin embargo, este valor elevado del caudal ficticio continuo no resulta raro en los diseños de modernización de regadíos que se acometen en la actualidad en la depresión central del Ebro. Esta elevada capacidad del hidrante resulta necesaria para poder poner en práctica estrategias avanzadas de programación de riego en condiciones reales.

#### **IV.4.2. Efectos de las infraestructuras de riego sobre la productividad del agua en una parcela tipo para dos cultivos, maíz y alfalfa**

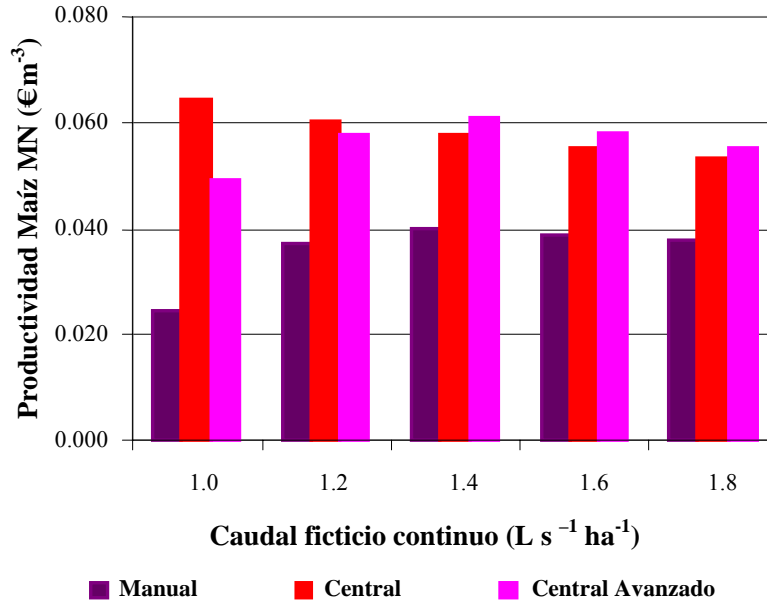
En este apartado se analiza el efecto de las infraestructuras de riego sobre la productividad del agua en una parcela tipo y para los dos cultivos más representativos de la CRM. Se han analizado cinco caudales ficticios continuos:  $1,0$ ,  $1,2$ ,  $1,4$ ,  $1,6$  y  $1,8 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , que representan para la parcela tipo de  $25 \text{ ha}$ , caudales de  $25$ ,  $30$ ,  $35$ ,  $40$  y  $45 \text{ L s}^{-1}$ , respectivamente. Estas diferentes configuraciones de la parcela se han gestionado bajo tres estrategias de riego que han sido definidas en el apartado III.4.3 de Materiales y Métodos. La primera, denominada *Manual*, representa lo que haría un agricultor que sigue las recomendaciones de riego dictadas por los Servicios de Asesoramiento al Regante y por lo tanto aplica una programación de riegos rígida. Tal como se ha descrito anteriormente al analizar las necesidades de agua y las dosis de riego en la CRM, esta estrategia representa un nivel de gestión muy superior a la práctica media de los agricultores de la zona. La segunda estrategia se ha denominado *Central*, y gestiona el riego atendiendo únicamente a las necesidades hídricas del cultivo, sin considerar la calidad del riego. Esta estrategia se ha definido por un  $DEE = 0,75$  día y una  $EPcb = 10 \%$ . Estos valores de los parámetros suponen que en la práctica se riega sin ninguna restricción de calidad del riego. La tercera y última estrategia, denominada *Central Avanzada*, representa una gestión optimizada que de acuerdo a los resultados del apartado anterior se corresponde con un  $DEE = 0,75$  y una  $EPcb = 60 \%$ .

La Figura IV.26 muestra los resultados de las simulaciones realizadas para el cultivo de maíz. Se observa que el valor de la productividad del agua ( $WP_{MN}$ ) de la estrategia *Manual* aumenta con el tamaño del hidrante hasta un caudal ficticio continuo ( $q_{fc}$ ) de

$1,4 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ . En redes con hidrantes dimensionados más generosamente la productividad de la estrategia *Manual* decrece porque el incremento de las amortizaciones no es compensado por la mejor calidad del riego.

En consecuencia, en redes operando bajo las condiciones de la depresión central del Ebro, en las que el manejo del riego se realiza siguiendo la estrategia que hemos llamado *Manual* (gestionada por los agricultores de forma individual), el dimensionamiento de los hidrantes que optimiza la productividad del agua ( $WP_{MN}$ ) se corresponde con un  $q_{fc}$  de  $1,4 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ . Con la estrategia *Central*  $WP_{MN}$  decrece al aumentar el caudal ficticio continuo del hidrante. Resulta curioso que el valor más elevado de  $WP_{MN}$  ( $0,064 \text{ € m}^{-3}$ ) se obtenga para el caso de la red con el dimensionamiento más pequeño de los estudiados (caudal ficticio continuo de  $1,0 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ) con la estrategia *Central*. Estos resultados indican que en las condiciones locales los costes de ejecutar una red de mayor tamaño superan a los beneficios que se obtienen de un riego más flexible. Ante estos resultados, parece necesario analizar el efecto de los costes en otras condiciones agronómicas, meteorológicas y de costes de amortización de los sistemas de riego.

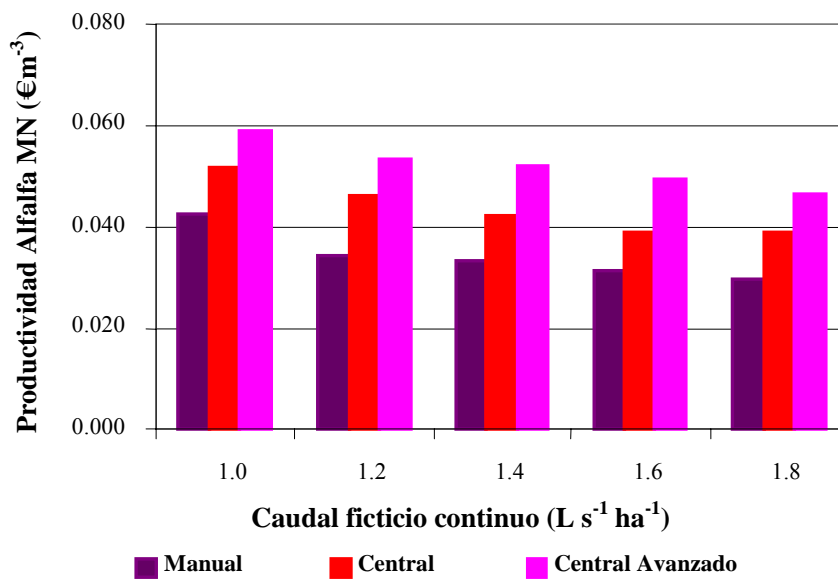
La productividad del agua de la estrategia *Central Avanzada* crece con el incremento del tamaño de la red hasta alcanzar un máximo cuando el  $q_{fc}$  es de  $1,4 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  ( $0,0612 \text{ € m}^{-3}$ ), valor que disminuye posteriormente al aumentar la capacidad de los hidrantes.



**Figura IV.26.** Productividad del agua basada en el margen neto ( $WP_{MN}$ ) en función del caudal ficticio continuo para el cultivo del maíz durante la campaña agrícola 2004 en la comunidad de regantes de Montesnegros.

En cuanto a la comparación entre estrategias, hasta un caudal ficticio continuo de  $1,2 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , la estrategia *Central* es muy superior a la *Manual* y en menor medida a la estrategia *Central Avanzada*. Es a partir de un caudal ficticio continuo de  $1,4 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , cuando la estrategia *Central Avanzada* consigue mejores productividades que el resto de estrategias. Esta clasificación se mantiene para el resto de tamaños de hidrante analizados. La mayor productividad alcanzada con la estrategia *Central Avanzada*,  $0,0612 \text{ € m}^{-3}$ , se consigue con un tamaño de hidrante de  $1,4 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ .

La Figura IV.27 presenta los resultados para la parcela tipo de alfalfa. En este cultivo las mayores productividades se obtienen con la red de menor tamaño para las tres estrategias de gestión analizadas. Por lo tanto, para el riego de alfalfa, la inversión en redes con hidrantes de mayor dimensionamiento no es rentable bajo ninguna de las estrategias analizadas. Es relevante señalar que la estrategia *Central Avanzada* es la más rentable en cualquiera de las situaciones de tamaños de red analizadas. La diferencia en productividad del agua entre una estrategia *Manual* y una *Central Avanzada* se sitúa en torno  $0,02 \text{ € m}^{-3}$  para cualquiera de las redes analizadas.



**Figura IV.27.** Productividad del agua basada en el margen neto en función del caudal ficticio continuo para el cultivo de la alfalfa durante la campaña agrícola 2004 en la comunidad de regantes de Montesnegros.

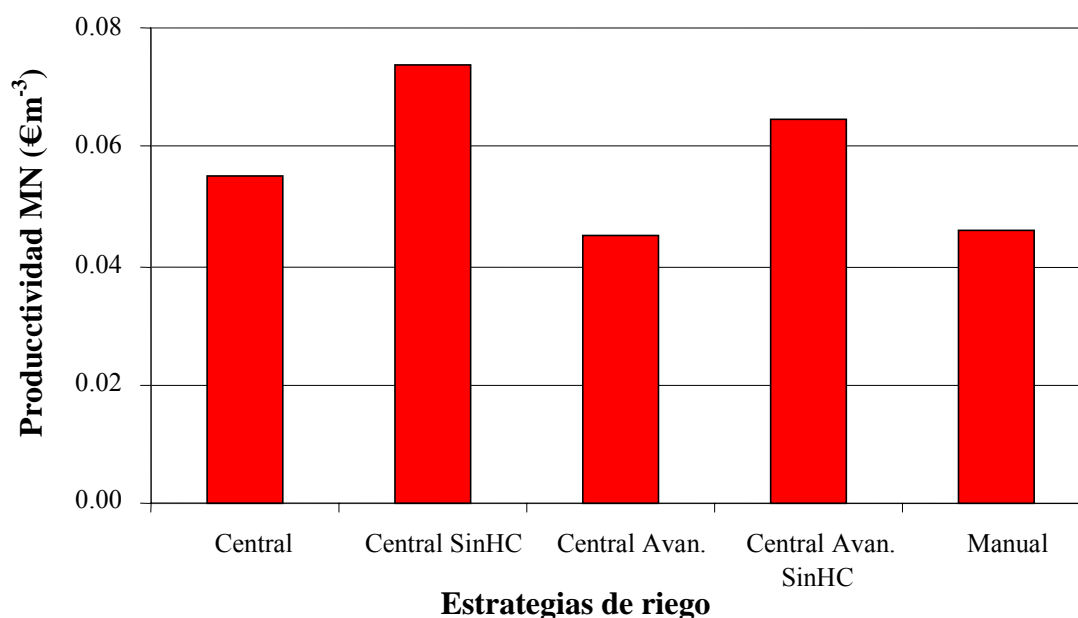
#### IV.4.3. Productividad del agua de la Zona de Simulación bajo distintas estrategias de gestión del riego

Se aborda en este apartado la gestión conjunta de la Zona de Simulación, formada por 26 parcelas catastrales, regadas por 15 hidrantes, que ocupan una superficie total de 113 ha. Las simulaciones se realizaron con los cultivos llevados a cabo en cada parcela en 2004 (maíz o alfalfa). El análisis se ha realizado en términos de Productividad del agua basada en el margen neto para las cinco estrategias definidas en el apartado de Material y Métodos.

La Figura IV.28 presenta los resultados para el caso del maíz, cultivo presente en 78,5 ha de la zona. Entre las estrategias *Central*, *Central Avanzada* y *Manual*, la *Central* es la que mejores resultados aporta (0,055 € m<sup>-3</sup>), siendo la productividad de las otras dos estrategias similares (0,045 € m<sup>-3</sup>). Comparando estos resultados con los del análisis del tamaño de los hidrantes, la Zona de Simulación presenta hidrantes de dimensionamiento muy ajustado.

Esto explica el hecho de que la estrategia *Central* resulte más productiva respecto al agua que la *Central Avanzada*. Esta situación se da en el caso de hidrantes con un  $q_{fc}$  de 1,0

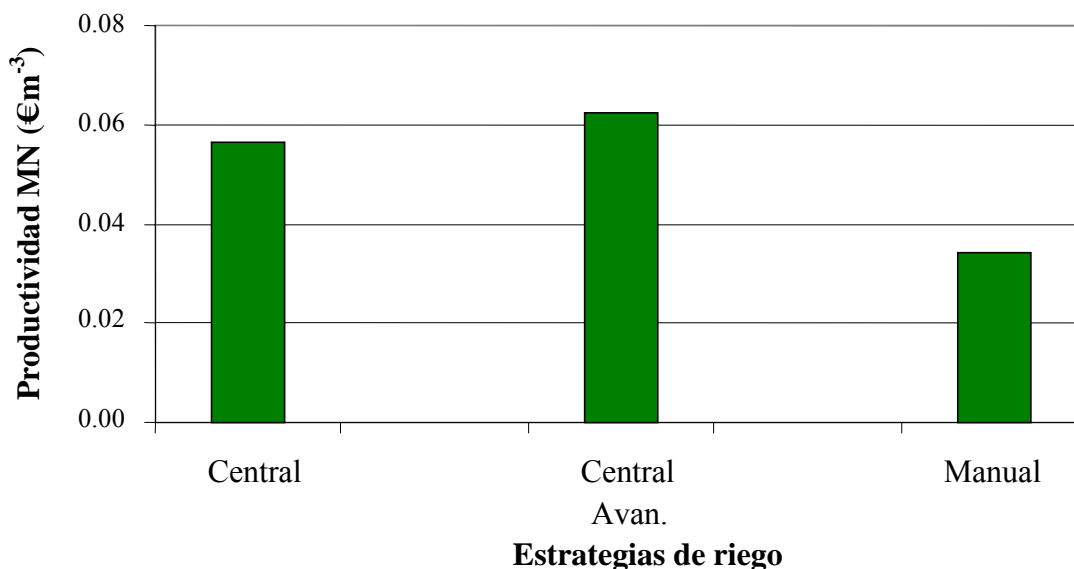
$L s^{-1} ha^{-1}$ . La gestión de los riegos sin considerar los hidrantes compartidos, *Central SinHC* o *Central Avanzada SinHC*, mejora de forma muy importante la productividad del agua. El valor de productividad más elevado lo proporciona la estrategia *Central SinHC* ( $0,074 \text{ € m}^{-3}$ ), seguida de la *Central Avanzada SinHC* ( $0,065 \text{ € m}^{-3}$ ). Estas estrategias, que podrán llevarse a cabo si se implementan en la práctica herramientas de riego centralizado como la desarrollada en este trabajo, representan unos niveles de gestión muy elevados. Niveles de gestión que para la Zona de Simulación proporcionan un incremento medio en la productividad del agua de  $0,03 \text{ € m}^{-3}$  sobre la estrategia *Manual* en el cultivo de maíz. Es preciso recordar que la estrategia *Manual* ya representa una mejora sustancial sobre la situación actual.



**Figura IV.28.** Productividad del agua de la Zona de Simulación basada en el margen neto del cultivo de maíz en función de distintas estrategias de riego para la compañía agrícola 2004 en la comunidad de regantes de Montesnegros.

La Figura IV.29 presenta la productividad del agua para el cultivo de la alfalfa en la Zona de Simulación. En este caso no se presenta el análisis de las estrategias sin hidrantes compartidos (*Central SinHC* y *Central Avanzada SinHC*), ya que en la Zona de Simulación no había hidrantes compartidos de alfalfa y las productividades de estas estrategias no

diferirán de las *Central* y *Central Avanzada*, respectivamente. Para la alfalfa, la estrategia *Central Avanzada* da lugar a la mayor productividad del agua ( $0,062 \text{ € m}^{-3}$ ), seguida por la estrategia *Central* ( $0,056 \text{ € m}^{-3}$ ) y por la *Manual* ( $0,034 \text{ € m}^{-3}$ ). La diferencia entre una estrategia *Manual*, que corresponde con el manejo que realiza un agricultor, y la mejor estrategia (la *Central Avanzada*) es muy importante, ya que casi se duplica la productividad del agua en términos de Margen Neto.



**Figura IV.29.** Productividad del agua de la zona de simulación basada en el margen neto del cultivo de la alfalfa en función de distintas estrategias de riego para la compañía agrícola 2004 en la comunidad de regantes de Montesnegros.

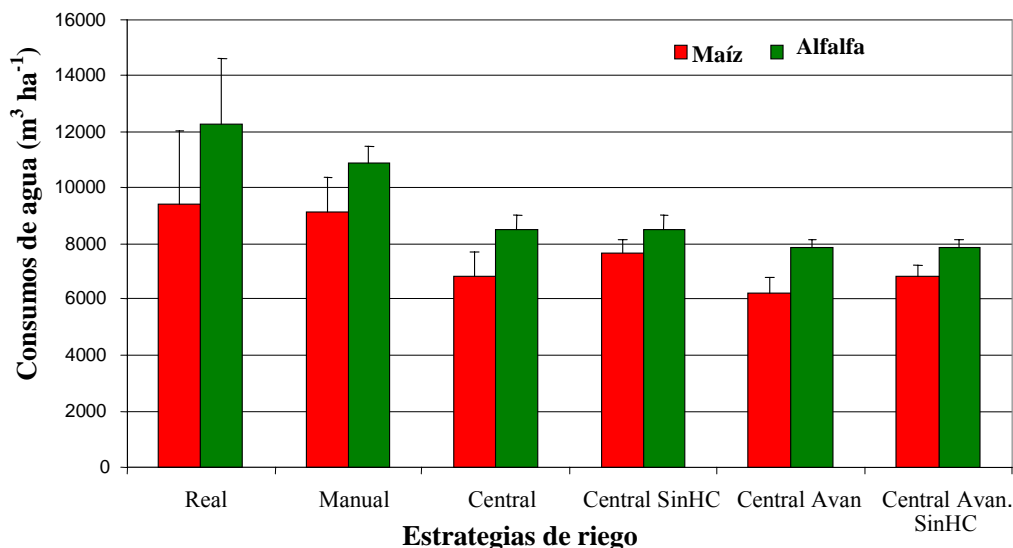
Se ha comentado anteriormente la imposibilidad con la versión actual de ADOR-Simulación de realizar una gestión individualizada para cada cultivo. Por lo tanto la estrategia de riego en la zona debe de ser única. Tras el análisis de los resultados de la productividad del agua en ambos cultivos parece razonable que la estrategia más adecuada que maximice la productividad del agua sea la estrategia *Central SinHC*. Esta estrategia nos proporcionará una productividad de  $0,074 \text{ € m}^{-3}$ , para el caso del maíz y de  $0,056 \text{ € m}^{-3}$ , para el caso de la alfalfa.

#### IV.4.4. Comparación entre los consumos de agua de la Comunidad de Regantes y los consumos simulados con el modelo de gestión

La Figura IV.30 presenta el análisis de los consumos de agua ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) simulados y observados para los dos cultivos mayoritarios de la Zona de Simulación. En la figura también se presenta la desviación estándar de los valores medios presentados. Los consumos observados se presentan como la estrategia Real y los consumos simulados se presentan para las cinco estrategias simuladas. El consumo medio real del maíz ( $9.386 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) es muy similar al consumo simulado en la estrategia *Manual* ( $9.134 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ ). Esto indica que – en promedio – los agricultores de la zona aplican cantidades de agua similares a las indicadas por los Servicios de Asesoramiento al Regante. Sin embargo, en el caso de la alfalfa, estas recomendaciones son menos seguidas por los agricultores, ya que los volúmenes reales aplicados ( $12.270 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) son superiores a los aplicados con la estrategia *Manual* ( $10.865 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ ).

Hay que comentar, sin embargo, que comparando los consumos medios Reales de toda la CRM con los de la Zona de Simulación, para el maíz, los valores son muy parecidos ( $9.386 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$  en la Zona de Simulación y  $9.300 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$  en toda la CRM). Sin embargo, en la alfalfa, el consumo medio de la Zona de Simulación ( $12.270 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) es muy superior al consumo medio de toda la CRM ( $9.550 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ ). Estos datos indican que a pesar de que en la Zona de Simulación la media de aplicación del riego difiere claramente de las recomendaciones de los Servicios de Asesoramiento al Regante, la media de toda la CRM sí resulta similar a estas recomendaciones.

Las estrategias *Central Avanzada* y *Central Avanzada SinHC* son las que menores volúmenes de agua aplican, ya que son las que mayores exigencias tienen en cuanto a calidad del riego. Sin embargo, tal y como se ha visto en el apartado anterior, estas estrategias no son las más rentables en la zona en términos de productividad del agua en Margen Neto. La estrategia *Central SinHC* es la que mayor rentabilidad tiene en la zona y representa, además, un importante ahorro de agua comparada con la situación Real ( $1.714 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$  y  $3.739 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ , para el maíz y la alfalfa, respectivamente).



**Figura IV.30.** Consumos de agua medios y sus desviaciones estándar para las estrategias de riego real y las cinco simuladas en la Zona de Simulación de la CRM.

Los consumos reales presentan una gran variación entre parcelas, indicando que las pautas de riego del agricultor son muy diversas. En el caso del maíz, la desviación estándar de los consumos reales es de  $2.664 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , siendo para la alfalfa de  $2.338 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . En el caso de las estrategias simuladas, las variaciones entre parcelas se reducen significativamente y se deben únicamente a las diferencias entre parcelas (características del suelo, dimensiones del hidrante que le sirve y su disponibilidad), eliminando las variaciones debidas a las pautas individuales de los agricultores.

Para terminar, es preciso hacer notar que los resultados aquí presentados son representativos de la campaña de 2004 y de unas condiciones agronómicas, meteorológicas y de costes determinadas, Será preciso analizar un buen número de condiciones diversas para determinar la utilidad de las estrategias de riego aquí presentadas. Las circunstancias cambiantes de los cultivos, su producción, valor y necesidades de agua, tanto en el espacio como en el tiempo, permiten vislumbrar la necesidad de contar con módulos de programación automática versátiles, flexibles y capaces de usar estrategias diferentes en cada parcela de la comunidad, atendiendo a sus circunstancias específicas.

**CAPÍTULO V:**  
**CONCLUSIONES**



## V. Conclusiones

La mejora de la gestión del riego contribuye de forma importante a la sostenibilidad económica, social y medioambiental de las zonas regables. En este trabajo se presenta una herramienta de simulación que permite analizar y poner en marcha estrategias que optimicen la gestión del riego por aspersión, tanto a escala de parcela como de zona regable. A continuación se enumeran las conclusiones específicas que se derivan de este trabajo:

1. La comunidad de regantes de Montesnegros presenta una alternativa de cultivos basada en cultivos extensivos de regadío, preferentemente maíz (41 %) y alfalfa (48 %). La cobertura total enterrada, sistema de riego predominante, presenta unas características técnicas muy homogéneas en toda la comunidad (marcos triangulares 18 x 18 m, aspersor de impacto de doble boquilla modelo VYR 35, colocado a 2 m del suelo y presión media de trabajo de 350 kPa). Los consumos medios de agua en la zona en el año de estudio (2004) se situaron en 9.300 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para el maíz y 9.550 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para la alfalfa, con importantes variaciones entre parcelas.
2. La productividad del agua en términos de margen bruto de los cultivos más importantes de la CRM resultó ser de 0,09 € m<sup>-3</sup> para la alfalfa y 0,11 € m<sup>-3</sup> para el maíz. Estos valores resultan similares a los que se han obtenido en zonas de clima y tecnología de riego similares.
3. La caracterización del funcionamiento del aspersor VYR 35 en las condiciones técnicas y meteorológicas más comunes de la zona de estudio ha permitido calibrar y validar el modelo de simulación de riego por aspersión en parcela, ADOR-Aspersión (Playán y col., 2006), para dicho material de riego, con una fiabilidad aceptable (diferencias entre *CU* simulado y observado inferiores al 2% y *RMSE* inferiores a 2 mm h<sup>-1</sup>). Las mejores predicciones del modelo (mejores estadísticos) se dan para velocidades del viento intermedias, de entre 2,5 y 4,0 m s<sup>-1</sup>.

4. La herramienta desarrollada en este trabajo “ADOR-Simulación”, aporta como novedades respecto a los trabajos desarrollados en esta línea por el grupo, la posibilidad de gestionar el riego de más de un sector de riego, introduciendo las limitaciones que supone para el sector formar parte de una parcela que a su vez está integrada en una red colectiva presurizada. La herramienta de simulación permite considerar las restricciones introducidas por los hidrantes compartidos.
5. El modelo introduce un módulo que toma las decisiones de regar o no regar “ADOR-Decisión” y que, según los resultados obtenidos en el trabajo, debe de ser calibrado para las condiciones locales de cada zona regable para producir resultados óptimos. La estrategia de control que optimiza la productividad del agua ha resultado ser dependiente de la meteorología local, de los cultivos y su contexto económico y de las dimensiones de la red de riego.
6. El análisis del riego de una parcela tipo de 25 ha regada desde un hidrante de  $45 \text{ L s}^{-1}$  ha permitido calibrar los parámetros de gestión avanzada para las condiciones de la CRM en el año 2004. Estos parámetros son los días de estrés equivalente (*DEE*) y la eficiencia potencial del cuarto bajo (*EPcb*). Para aplicar un riego se exige que su *EPcb* sea superior al nivel de referencia. En caso contrario, se espera a aplicar el riego hasta que las condiciones meteorológicas mejoren (el viento disminuya). Cuando el estrés de la parcela, expresado en términos de *DEE*, supera el nivel de referencia, el riego se aplica independientemente de las condiciones meteorológicas. Los valores óptimos para el maíz fueron de *DEE* = 0,75 días y *EPcb* = 60 %. En el caso de la alfalfa, se seleccionaron los valores *DEE* = 1,25 días y *EPcb* = 70 %.
7. El análisis del riego centralizado en la parcela tipo con diferentes capacidades de hidrante (con caudales ficticios continuos de  $1,0$  a  $1,8 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ) puso de relieve que la estrategia de riego *Central* (gestionado colectivamente) supera claramente en productividad del agua expresada en términos de margen neto a la estrategia basada en el riego manual (gestionado por cada agricultor siguiendo puntualmente los dictados del Servicio de Asesoramiento al Regante). La estrategia *Central Avanzada* (orientada a la búsqueda de riegos de alta eficiencia) superó a la *Central* en Alfalfa

- en todos los casos y en maíz para caudales ficticios continuos superiores a  $1,4 \text{ L s}^{-1}\text{ha}^{-1}$ .
8. La aplicación de ADOR-Simulación para gestionar el riego de la Zona de Simulación (una zona de 113 ha de la CRM) ha puesto de manifiesto la utilidad de la herramienta informática para mejorar la productividad del agua en condiciones reales. Los consumos de agua medios de la estrategia simulada *Manual* resultaron ser similares a los consumos reales medios de la zona. La estrategia *Central* resultó ser la mejor en términos de  $WP_{MN}$  para el maíz ( $0,055 \text{ € m}^{-3}$ ), suponiendo un incremento respecto a la estrategia *Manual* de  $0,010 \text{ € m}^{-3}$ . En el caso de la alfalfa, la estrategia más exigente, *Central Avanzada*, resultó ser la más productiva ( $0,064 \text{ € m}^{-3}$ ), incrementando la  $WP_{MN}$  en  $0,028 \text{ € m}^{-3}$  respecto a la estrategia *Manual*.
  9. ADOR-Simulación permite, además, la gestión del riego de una zona regable sin considerar sus hidrantes compartidos (manteniendo la superficie regada por los mismos), lo que incrementa de forma importante la productividad del agua. La gestión del riego del maíz en la Zona de Simulación mediante una estrategia *Central Sin Hidrantes Compartidos* dio lugar a una mejora en la productividad del agua de  $0,020 \text{ € m}^{-3}$  respecto de la estrategia *Central*. Esta opción sólo es posible en la práctica si se implementa una gestión centralizada del riego, tarea que es posible con ADOR-Simulación.
  10. Los consumos reales presentan una gran variación entre parcelas, indicando que las pautas de riego del agricultor son muy diversas. En el caso del maíz, la desviación estándar de los consumos reales es de  $2.664 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , siendo para la alfalfa de  $2.338 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . En el caso de las estrategias simuladas, las variaciones entre parcelas de un mismo cultivo se reducen significativamente y se deben únicamente a las diferencias en las características del suelo y en la dimensión y disponibilidad del hidrante. Las estrategias simuladas eliminan las variaciones debidas a las pautas individuales de los agricultores.



**CAPÍTULO VI:**  
**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



**VI. Referencias bibliografía**

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper 56, Rome, Italy.
- American Society of Agricultural Engineers Standard: ASAE S330.1 (1987). Procedure for sprinkler distribution testing for research purposes. En: ASAE Standards 1.987. ASAE. St. Joseph. MI 49085 p. 487-489.
- Anadón, H.R. (2006). Efecto de factores técnicos y de manejo en el desarrollo de los riegos por aspersión en el Valle medio del Ebro. Proyecto fin de carrera nº H.204.17. Escuela Universitaria Politécnica La Almunia de Doña Godina. Zaragoza.
- Augier, P. (1996). Contribution à l'étude et à la modélisation mécaniste-statistique de la distribution spatiale des apports d'eau sous un canon d'irrigation: application à la caractérisation des effets du vent sous l'uniformité d'arrosage. Thèse ENGREF (Montpellier), CEMAGREF (France).
- Bandara, K.M.P.S. (2003). Monitoring irrigation performance in Sri Lanka with high-frequency satellite measurements during the dry season. *Agric. Wat. Manage.* 58, 159-170.
- Basset, D.L. y Fritzsimmmons, D.W. (1976). Simulating overland flow in border irrigation. *Trans ASAE*, 666-671.
- Bremond, B. y Molle, B. (1995). Characterization of rainfall under center pivot: influence of measuring procedure. *J. Irrig. Drain. Eng.* 121(5), 347-353.
- Bruckler, L., Lafolie, F., Ruy, S., Granier, J. y Baudequin, D. (2000). Modelling the agriculture and environmental consequences of non-uniform irrigation on a corn crop. 1. Water balance and yield. *Agronomy* 20, 609-624.
- Burt, C. M., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., Solomon, K. H., Bliesner, R. D., Hardy, L. A., Howell, T. A. y Eisenhauer, D. E. 1997, Irrigation performance measures: efficiency and uniformity: *J. Irrig. Drain. Div., ASCE*, v. 123, p. 423-442.
- Carrión, P., Tarjuelo, J.M. y Montero, J. (2001). SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation: I. Description of the model. *Irrig. Sci.* 2001 (20), 73-84.
- Cavero, J., Farré, I., Debaeke, P. y Faci, J.M. (2000). Simulation of maize yield under water stress with the EPIC phase and CROPWAT models. *Agron. J.* 92(4), 679-690.
- Cavero, J., Playán, E., Zapata, N. y Faci, J.M. (2001). Simulation of maize grain yield variability within a surface-irrigated field. *Agron. J.*, 93(4), 773-782.

- Clemmens, A.J. (1979). Verification of the zero-inertia model for border irrigation. Trans. ASAE, 1306-1309.
- Clemmens, A.J. y Detrick, A.R. (1994). Irrigation techniques and evaluations. En: Adv. Series in agricultural sciences, K.K. Tanji, B., (Eds.). Sprinkler-verlag, Berlin., 64-103.
- Dagan, G. y Bresler, E. (1988). Variability of yield of an irrigated crop and its causes 3. Numerical simulation and field results. Water Resour. Res. 24, 395-401.
- de Juan, J.A., Ortega, J.F. y Tarjuelo, J.M., 2003. Sistemas de cultivo. Evaluación de itinerarios técnicos. Mundiprensa, Madrid. 835 pp.
- Dechmi, F. (2002). Water management in sprinkler irrigation systems in the Ebro valley: current situation and scenario simulations. Tesis de Doctorado, Universitat de Lleida. 207 pp.
- Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M. y Tejero, M. (2003a). Analysis of an irrigation district in north-eastern Spain: I: Characterisation and water use assessment. Agric. Wat. Manage., 61:75-92.
- Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M., Tejero, M. y Bercero, A. (2003b). Analysis of an irrigation district in northeaster Spain: II: irrigation evaluation, simulation and scheduling. Agric. Wat. Manage. 61, 93-109.
- Dechmi, F., Playán, E., Cavero, J., Martínez-Cob, A. y Faci, J.M. (2004a). "A coupled crop and solid ser sprinkler simulation model: I. Model development." Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 130(6), 499-510.
- Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M. y Tejero, M. (2004b). Analysis of an irrigation district in north-eastern Spain: I. Characterisation and water use assessment. Agric. Wat. Manage. 61, 86-87.
- Detrick, A.R., Clyma, W. y Palmer, J.D. (1989). A management improvement process to effectively change irrigated agriculture. En: Planning for water shortages. Water reallocations and transfers. Drought management, J. Schaack, Wilson, D.S., Anderson, S.S., (Eds.). Boise (EE.UU.) pp 45-58.
- Del Campo, A. (2003) "Las comunidades de regantes de España y su Federación Nacional" Federación Nacional de Comunidades de Regantes, FENACORE. <http://agroforestal.geoscopio.com/empresas/fenacore/>
- Faci, I. y Bercero, A. (1991). Efecto del viento en la uniformidad y en las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersion. Inv. Agr.: Prod. Prot. Veg. 6(2), 171-182.

- Faci, J.M., Bensaci, A., Slatni, A. y Playán, E. (2000). A case study for irrigation modernisation: I. Characterisation of the district and analysis of water delivery records. *Agric. Wat. Manage.* 42(2000):313-334.
- F.A.O. (2003). *World agriculture: towards 2015/2030. An FAO perspective.* Ed. Jelle Bruinsma. FAO-Earthscan Publications Ltd. Londres (Reino Unido). 432 pp.
- Fereres, E. (1995). Situación y perspectivas de la investigación en riegos en España. *Fronteras de la Ciencia y la Tecnología*, 8,32-34.
- Forteza del Rey, V. (2002). El plan nacional de regadíos. *Agricultura*. 842, 554-556.
- Frenken, K. (2000). Water resources assessment systems. Land and resources information systems for food security in SADC countries. *Proceedings of a workshop, Harare, Zimbabwe, World Soil Resources Reports.* 89, 15-19.
- Fukui, Y., Nakanishi, K. y Okamura, S. (1980). Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity. *Irrig. Science.* 2, 23-32.
- Gallagher, J.N. (1979). Field studies of cereal leaf growth. *J. Exp. Bot.*, 20 (117), 625-636.
- George, B.A., Shende, S.A. y Raghuvanshi, N.S. (2000). Development and testing of an irrigation scheduling model. *Agric. Wat. Manag.* 2000. 46(2), 121-136.
- Hermann, D.F. (1990). Center pivot design and evaluation. *Proc. of the third Nat. Irrigation Symp. Phoenix, Ariz, St Joseph, Mich. A.S.A.E.*, 564-570.
- Hills, D. y Gu, Y. 1989. Sprinkler volume mean droplet size of water sprayed nozzle. *Trans. ASAE.* 32(2): 471-476.
- International organization for standardization. *Agricultural irrigation equipment – Rotating sprinklers. Part 1: Design and operational requirements. Norma internacional ISO 7749/1. 1.995. 2a ed. Genève ISO. 1.995.*
- International organization for standardisation. *Agricultural irrigation equipment – Rotating sprinklers. Part 2: Uniformity of distribution and test methods. Norma internacional ISO 7749/2. 1.990. 1a ed. Genève ISO. 1.990.*
- Kincaid, D.C., Solmon K.H. y Opliphant, J.C. (1996). Drop size distributions for irrigation sprinklers. *Trans. ASAE*, 39(3), 839-845.
- Li, J. y Kawano, H. (1995). Simulating water-drop movement from noncircular sprinkler nozzles. *J. Irrig. Drain. Eng.* 121(2), 152-158.
- Lorite, I.J., Mateos, L. y Fereres, E. (2004). Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment. II. Variability among crops and farmers. *Irrig. Sci.* 23, 85–92.

- Losada, A. (1994). Eficiencia técnica en la utilización del agua de riego. *Revista de Estudios Agrosociales*, 167, 131-154.
- M.A.P.A. (2005). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación. Análisis de la economía de los sistemas de producción. Resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas de Aragón en 2004.
- Mateos, L., López-Cortijo, I. y Sagardoy, J.A. (2002). SIMIS: the FAO decision support system for irrigation scheme management. *Agric. Wat. Manage.*, 56, 193-206.
- Merriam, J.L. y Keller, J. (1978). *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Utah State University, Logan, Utah. 271 pp.
- Montero, J. (1999). Análisis de la distribución de agua en riego por aspersión estacionario. Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión SIRIAS. Tesis doctoral. ETSIA-Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, Spain.
- Montero, J., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M. y Honrubia, F.T. (1997). Análisis de las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión. XV congreso nacional de riegos. Lleida., 177-152.
- Montero, J., Tarjuelo, J.M. y Carrión, P. (2001). SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation: II. Calibration and validation of the model. *Irrig. Sci.* 20, 85-98.
- Navarro, M. (2002). Los nuevos regadíos en el Plan Nacional de Regadíos. *Agricultura*, 842,574-577.
- Navarro C. de Sobregrau, M., Marín Lázaro, R., Castillo García, F. J. y González, F. J. (2006). Comparación de datos e indicadores económicos de maíz y alfalfa en la zona regable de Montijo (Badajoz) y de la Margen Izquierda del Porma (León). XXIV Congreso Nacional de Regadíos. (Lugo). 199-200 pp.
- Or, D. y Hanks, R.J. (1992). Soil water and crop yield spatial variability induced by irrigation non-uniformity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 226-233.
- Playán, E., Slatni, A., Castillo, R. y Faci, J.M. (2000). A case study for irrigation modernization: II. Scenario Analysis. *Agric. Wat. Manage.*, 42, 335-354.
- Playán, E. y Castillo, R. (2001). Modernización de regadíos en Aragón: más vueltas sobre el tema. En: XIX Congreso Nacional de Riegos, Asociación Española de Riegos y Drenajes. Zaragoza.
- Playán, E. y Mateos, L. (2006). Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agriculture Water Management*. 80, 100-116.

- Playán, E., Zapata N., Faci J.M., Tolosa D., Lacueva J.L., Pelegrín R., Salvador R., Sanchez, I. y Lafita A.. (2006). Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agriculture water management*. 84 (1-2): 89-100.
- Playán, E., Cavero, J., Mantero, I., Salvador, R., Lecina, S., Faci, J.M., Andrés, J., Salvador G. Cardeña, Ramón, S., Lacueva, J.L., Tejero, M., Ferri, J. y Martínez-Cob A. (2007). A database program for enhancing irrigation district management in the Ebro Valley (Spain). *Agric. Wat. Manage*, 87(2):209-216.
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero de Laburu, C. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid (España). 849 pp.
- Ray, S.S., Dadhwal, V.K. y Navalgund, R.R. (2002). Performance evaluation of an irrigation command area using remote sensing: a case study of Mahi Command, Gujarat, India. *Agric. Wat. Manage.*, 56, 81-91.
- Richard, P.J. y Weatherhead, E.K. (1993). Prediction of raingun application patterns in windy conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 54, 281-291.
- Sánchez-Marcos, I., Zapata, N., Martínez-Cob A. (2005). Variabilidad espacial del viento en la C.R. Montesnegros (Huesca, Zaragoza). XXIII Congreso Nacional de Riego y Drenaje. AERYD. Elche.
- Seginer, I. (1965). Tangential velocity of sprinkler drops. *Trans. ASAE*. 8(1), 90-93.
- Seginer, I., Nir, D. y Von Bernuth, R.D. (1991). Simulation of wind-distorted sprinkler patterns. *J. Irrig. Drain. Eng.* 117(2), 285-305.
- Singh, R., Kroes, J.G., van Dam, J.C. y Feddes, R.A. (2006). Distributed ecohydrological modelling to evaluate the performance of irrigation system in Sirsa district, India I. Current water management and its productivity. *Journal of Hydrology* 329: 692-713.
- Smith, M., (1993). *CropWat*, programa de ordenador para planificar y mejorar el riego. Estudio FAO de riego y drenaje número 46, Rome.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil survey manual*. United States Department of Agriculture. Handbook No. 18. Washington, D. C. (EE.UU.).
- Stern, J. y Bresler, E. (1983). No uniform sprinkler irrigation and crop yield. *Irrig. Sci.* 4, 17-29.
- Stewart, J.L. (1977). Conservation irrigation of field crops-drought-year strategy. *California Agriculture* 31 (4): 6-9.
- Strelkoff, T. (1970). Numerical solution of the Saint-Venant equations. *ASAE J. Hydr. Div.*, 96(HY1)223-252.

- Tarjuelo, J.M. (1995). El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, Spain, 491 pp.
- Tarjuelo, J.M., Carrión, P. y Valiente, M. (1994). Simulación de la distribución del riego por aspersión en condiciones de viento. *Inv. Agr.: Prod Prot. Veg.*, 9(2), 255-271.
- Von Bernuth, R. D. (1988). Effect of trajectory angle on performance of sprinklers in wind. *J. Irrig. Drain Eng.* 114, 579-587.
- Von Bernuth, R.D. y Gilley, J.R. (1984). Sprinkler droplet size distribution estimation from single leg test data. *Trans. ASAE.* 27(5), 1435-1441.
- Von Bernuth, R.D. y Seginer, I. (1990). Wind considerations in sprinkler systems design. *Visions of the future. ASAE. Third National Irrigation Symposium.* 334-339.
- Vories, E.D. y Von Bernuth, R.D., y Mickelson, R.H. (1987). Simulating sprinkler performance in wind. *J. Irrig. Drain. Eng.* 113(1), 119-130.
- Walker, S.H. (1999). More from less-better water management: issues and future policy. *Agri. Wat. Manage.* 40, 135-138.
- Walker, W.R. y Skogerboe, G.V. (1987). *Surface irrigation. Theory and practice.* Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey (EE.UU.). 386 pp.
- Zapata, N. y Playán, E. (2000). Simulating elevation and infiltration in level-basin irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 126(2), 78-84.
- Zapata, N., Playán, E. y Faci, J.M. (2000). Elevation and infiltration on a level basin: II. Impact on soil water and corn yield. *Irrig. Sci.*, 19(4), 165-173.
- Zapata, N., Playán, E., Martínez-Cob, A., Sánchez, I., Faci, J.M. y Lecina, S. (2007). From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas. *Agric. Wat. Manage*, 87(2):187-199.