

Análisis de los costes de aplicación del agua con equipos pivote

M. Valiente Gómez
 J. M. Tarjuelo Martín-Benito
 M. Moreno Hidalgo
 J. Montero Martínez
*Centro Regional de Estudios del Agua.
 Universidad de Castilla-La Mancha*

Los equipos pivote se utilizan ampliamente, tanto en España como en muchos otros países, donde el riego es fundamental para la producción de los cultivos. El objetivo de este trabajo ha sido analizar los principales factores que influyen en los costes de aplicación del agua con estos equipos, tales como: el tamaño del equipo, el diámetro de tubería, el tipo y la presión de trabajo del emisor, la dotación del equipo, la eficiencia de riego, el precio del agua y el precio de la energía.

Se han estudiado diferentes variables tales como: tipos de emisores, presiones de funcionamiento, solapamiento entre emisores, alturas respecto al suelo, tamaños de boquillas, etc. (Duke *et al.* (1991), Montero *et al.* (1997), Faci *et al.* (2001), Montero *et al.* (2003), Sourell *et al.* (2003), Playán *et al.* (2004), Tarjuelo (2005).

En un equipo pivote, el consumo energético debido a las pérdidas de carga por fricción es mayor que en un lateral de avance frontal. Por este motivo, el diseño económico de un pivote

requiere el uso de un lateral multidiámetro (Keller y Bliesner, 1990). Valiantzas (2005) ha presentado soluciones analíticas para el análisis hidráulico de pivotes multidiámetro, mostrándonos la presión en cabecera, así como su evolución a lo largo del lateral multidiámetro. Las ecuaciones propuestas simplifican importantes aplicaciones prácticas, tales como el diseño económico de pivotes, en donde se incluye el coste del lateral y de la energía (Valiantzas y Dercas, 2004).

EL ANÁLISIS DE LOS COSTES

Los costes de aplicación del agua con equipos pivote, ex-

presados como coste total anual por unidad de superficie (C_T , en $\text{€}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$), se han determinado como la suma de: coste de inversión (C_a), coste energético (C_e), coste del propio agua (C_w) y coste de mantenimiento de los equipos (C_m).

$$C_T = C_a + C_e + C_w + C_m$$

Se han estudiado tamaños de parcela regada de 1 a 190 ha, utilizando cuatro diámetros de tubería (127 mm (5"), 168.3 mm (6 5/8"), 219 mm (8 5/8") and 254 mm (10")), tres tipos de emisores (Spray, Rotator y Wobbler), y considerando valores de efi-

ciencia de riego de 0.70, 0.75, 0.80, 0.85 y 0.90, dotaciones de 1.00, 1.25 y 1.50 $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$, precios del agua de 0.03, 0.06, 0.09 y 0.12 $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$ y precios de la energía eléctrica de 0.05, 0.10 y 0.15 $\text{€}\cdot\text{kW}\cdot\text{h}^{-1}$. (Valiente, 2009).

Combinando la metodología anterior con la desarrollada por Valiantzas y Dercas (2004, 2005), se ha realizado el diseño económico del pivote multidiámetro (Valiente, 2010).

Para estudiar la influencia de cada una de las variables sobre el coste de aplicación del agua de riego se ha considerado el siguiente escenario de referencia para los distintos parámetros:

| | |
|--|--|
| Dotación | 1.25 $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ |
| Eficiencia de aplicación del agua | 80% |
| Precio del agua | 0.06 $\text{€}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| Precio de la energía | 0.1 $\text{€}\cdot\text{kW}\cdot\text{h}^{-1}$ |
| Necesidades netas de riego anuales (N_n) | 7000 $\text{m}^3\cdot\text{año}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ |
| Necesidades netas de riego diarias para el periodo crítico $N_{n\text{max}}$ | 7.63 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ |

(Datos representativos para el cultivo del maíz en la zona de Albacete)



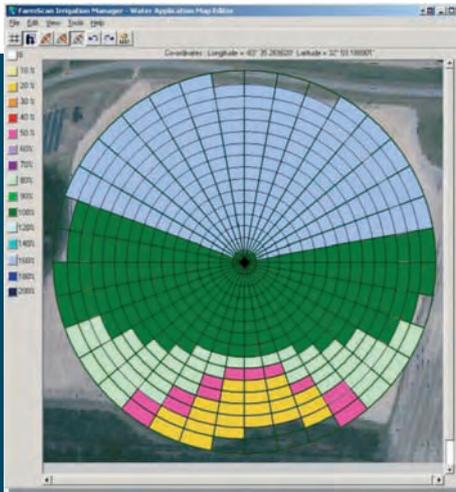


Figura 1. Mapa de aplicación de agua de una parcela regada con un equipo pivote dotado de un controlador de dosis de riego variable.

ÚLTIMOS AVANCES TECNOLÓGICOS EN EQUIPOS PIVOTE

- La sustitución de los aspersores de impacto por una nueva generación de emisores de baja presión, que ha permitido reducir los costes energéticos.
- El empleo de ruedas de alta flotabilidad y nuevas transmisiones, que han permitido solventar los problemas de atascos en suelos pesados, y mejorar la fiabilidad del sistema.

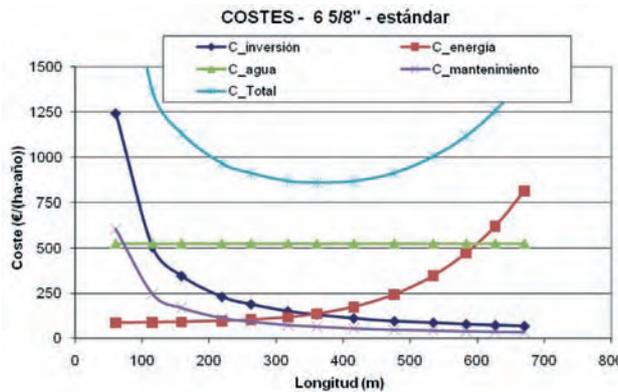
- El desarrollo de las nuevas tecnologías ha permitido manejar sistemas de control mucho más sofisticados que permiten el manejo de estas máquinas de riego a distancia, bien a través de telefonía móvil, PDA e incluso Internet.
- La combinación de un GPS con un controlador de riego más la nueva generación de emisores ha permitido desarrollar la técnica de la dosis de riego variable (ver Figura 1) atendiendo a diferentes criterios tales como: la textura del terreno, el tipo de cultivo, orografía, tasa de infiltración, estrés hídrico del cultivo, etc.

COSTE TOTAL SEGÚN EL TAMAÑO DEL EQUIPO

El **Gráfico 1** muestra la evolución de los costes anuales de inversión, energía, mantenimiento y del agua para un emisor tipo Spray montado sobre una tubería de 168.3 mm (6 5/8") bajo las condiciones del escenario de referencia ($E_a=0.8$; $N_{n\max}=7,63$ mm-día⁻¹; precio de la energía= 0.1 €·kW-1·h⁻¹, y precio del agua= 0.06 €/m³).

Como puede verse, el coste anual de inversión por unidad de superficie disminuye al aumentar el tamaño del equipo, y de la misma forma lo hace el coste de mantenimiento, ya que se ha considerado como un porcentaje del coste de inversión. El cos-

GRÁFICO 1 / Evolución de los costes anuales por unidad de superficie para un emisor tipo Spray sobre una tubería de 6 5/8"



te energético anual por unidad de superficie aumenta de forma exponencial con el tamaño de la máquina. El coste anual del agua permanece constante independientemente de la longitud de la máquina.

Para cada situación, hay pues un tamaño óptimo de equipo en el que el coste total de aplicación de agua por unidad de superficie se hace mínimo (**Gráfico 1**).

COSTE TOTAL SEGÚN EL TIPO DE EMISOR Y EL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA

En la **Tabla 1** se indica el tamaño óptimo del equipo pivote que minimiza el coste anual de aplicación de agua por unidad de superficie, para los cuatro diámetros de tuberías y los tres tipos de emisores. Como puede verse, el mínimo coste para las condi-

TABLA 1 / Longitud (L, en m) y superficie (S, en ha) óptima de pivote que minimiza el coste anual de aplicación del agua por unidad de superficie (C_T , en €·ha⁻¹·año⁻¹) para los cuatro diámetros de tuberías y los tres tipos de emisores, en las condiciones de referencia.

| Diámetro de tubería | Spray | | | Rotator | | | Wobbler | | |
|---------------------|-------|----|-------|---------|----|-------|---------|----|-------|
| | L | S | C_T | L | S | C_T | L | S | C_T |
| 5" | 315 | 31 | 908 | 315 | 31 | 882 | 315 | 31 | 876 |
| 6 5/8" | 361 | 41 | 858 | 361 | 41 | 839 | 361 | 41 | 832 |
| 8 5/8" | 485 | 74 | 833 | 485 | 74 | 812 | 485 | 74 | 804 |
| 10" | 562 | 99 | 842 | 562 | 99 | 821 | 562 | 99 | 813 |

ciones de referencia, se produce con una máquina de 485 m de longitud (74 ha regables), con tubería de 219.0 mm (8 5/8") y con emisor tipo Wobbler.

A título de ejemplo, en el **Gráfico 2** se representa la evolución del coste total de aplicación de agua según el tamaño de la parcela regada, para los cuatro tipos de tuberías, con el emisor tipo Spray, y en las condiciones de referencia definidas anteriormente. Las curvas de costes para el

// EN UN EQUIPO PIVOTE, EL COSTE DE INVERSIÓN POR UNIDAD DE SUPERFICIE DECRECE AL AUMENTAR EL TAMAÑO DE LA MÁQUINA MIENTRAS QUE EL COSTE DE ENERGÍA CRECE AL HACERLO EL TAMAÑO DE ESTA //

emisor tipo Rotator y el tipo Wobbler son semejantes. Como puede observarse, las curvas del coste total tienen una tendencia parabólica, cuyas ramas van haciendo más abiertas conforme aumenta el tamaño de la máquina para los diferentes diámetros de tubería.

En la **Tabla 2** se resume el intervalo de longitudes y superficies regadas de mínimo coste para los cuatro diámetros de



GRÁFICO 2 / Evolución del coste total anual por unidad de superficie para los cuatro tipos de tubería, con un emisor tipo Spray

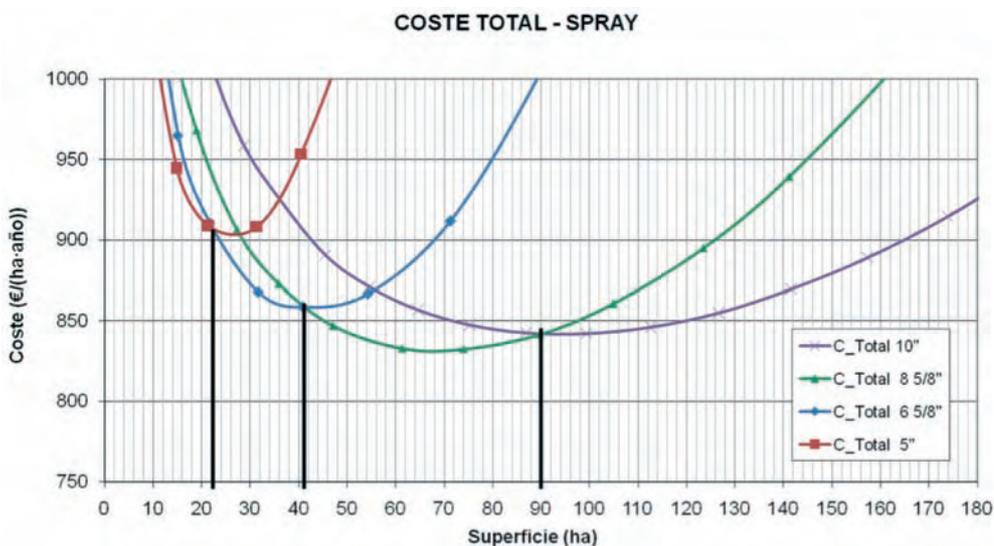


TABLA 2 / Rango de utilización de los equipos pivot (longitud y superficie regada) para los cuatro diámetros de tuberías y los tres tipos de emisores, y en las condiciones estándar definidas.

| Diámetro de tubería | Spray | | Rotator ≈ Wobbler | |
|---------------------|--------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | Longitud (m) | Superficie (ha) | Longitud (m) | Superficie (ha) |
| 1270 mm (5") | < 265 | < 22 | < 275 | < 24 |
| 168.3 mm (6 5/8") | 265 – 360 | 22 – 41 | 275 – 375 | 24 – 44 |
| 219.0 mm (8 5/8") | 360 – 535 | 41 – 90 | 375 – 555 | 44 – 97 |
| 254.0 mm (10") | > 535 | > 90 | > 555 | > 97 |

tuberías y los tres tipos de emisor, cuando las condiciones de trabajo son las de referencia.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS UTILIZANDO MÚLTIPLES DIÁMETROS

Para poner de manifiesto el posible ahorro en el coste de

aplicación de agua al utilizar múltiples diámetros en la tubería del pivot, en la **Tabla 3**, se muestra la longitud de equipo que hace mínimo el coste de aplicación del agua para cada uno de los diámetros estudiados y el posible ahorro al utilizar tuberías multidímetro, suponiendo que el equipo trabaja bajo

condiciones estándar, con un coste medio de la energía de 0.1 € kW-h⁻¹ y emisor tipo Spray.

Los resultados indican que conforme aumenta el diámetro, la longitud de pivot que minimiza el coste de aplicación del agua crece, pasando de los 290 m para la tubería de 127.0 mm (5"), hasta los 550 m para la de 254.0

TABLA 3 / Longitud de equipo que hace mínimo el coste de aplicación de agua bajo condiciones estándar, con emisor tipo Spray, para cada diámetro de tubería, y posible ahorro al utilizar tuberías multidímetro

| Diámetro | Longitud (m) | CTOT (€/ha y año) | CTA (€/m³) | Ahorro estimado (%) |
|--------------|--------------|-------------------|------------|---------------------|
| 5" | 292.64 | 904 | 0.12910450 | |
| Multidímetro | 292.64 | 885 | 0.12642420 | -2.12% |
| 6 5/8" | 375.95 | 860 | 0.12282905 | |
| Multidímetro | 375.95 | 846 | 0.12086960 | -1.62% |
| 8 5/8" | 478.26 | 830 | 0.11859565 | |
| Multidímetro | 478.26 | 830 | 0.11851753 | -0.07% |
| 10" | 556.28 | 839 | 0.11978596 | |
| Multidímetro | 556.28 | 839 | 0.11847896 | -1.10% |

mm (10"). Los ahorros conseguidos con la solución de diámetro múltiple son mayores en los diámetros pequeños, donde superan el 2%, siendo éstos despreciables en la tubería de 219.0 mm (8 5/8").

En el **Gráfico 3** se representa la variación del coste total de aplicación del agua (€ ha⁻¹.año⁻¹) con la superficie regada cuando se utilizan diámetros individuales en la tubería del pivot, junto con la opción de utilizar múltiples diámetros. En todos los casos se obtiene que la opción de diámetro múltiple consigue unos costes totales menores o iguales que la opción de diámetro único.

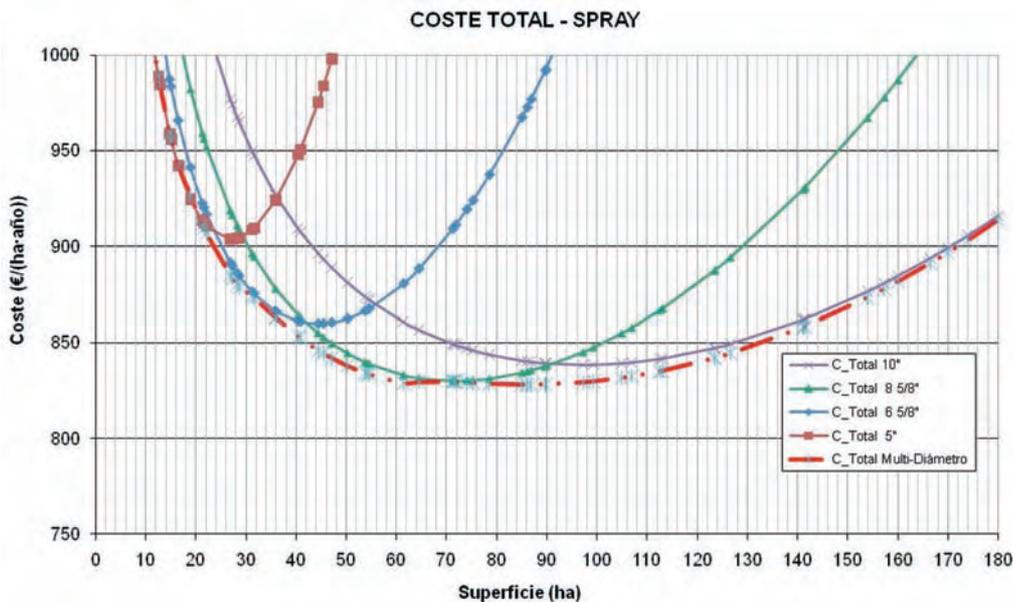
La línea discontinua representa la envolvente de mínimo coste de aplicación de agua, pudiendo observarse para cada superficie regada el ahorro potencial que podría obtenerse con la opción de diámetro múltiple frente a diámetro único en la tubería del pivot.

INFLUENCIA DE LA DOTACIÓN DEL EQUIPO Y LA EFICIENCIA DE RIEGO

Para estudiar la influencia de la dotación del equipo y de la eficiencia de riego sobre el coste de aplicación de agua se ha considerado el emisor tipo Spray, con un diámetro de tubería de 168.3 mm (6 5/8"), con diferentes dotaciones (1.0, 1.25 y 1.5 l·s⁻¹.ha⁻¹) y eficiencias de riego (de 0.7 hasta 0.9) (**Gráfico 4**).

Como puede verse, hasta los 350 m de longitud de máquina, los costes son similares para las tres dotaciones consideradas (diferencias de costes inferiores al 1%), incrementándose las diferencias para mayores longitudes. Pasar de una dotación de 1.0 a 1.5 l·s⁻¹.ha⁻¹ en el rango de utilización de la tubería de 168.3 mm (6 5/8") supondría un incremento máximo de coste del 3%, pero se dispondría de un equipo con una mayor capacidad de descarga para zonas áridas o cultivos con mayores necesidades de riego.

GRÁFICO 3 / Variación del coste total de aplicación del agua (€ ha⁻¹ año⁻¹) con la superficie regada cuando se utilizan diámetros individuales en la tubería del pivot, frente a la opción de utilizar múltiples diámetros.



Como puede verse en el **Gráfico 4**, la variación de eficiencia de aplicación del agua tiene una mayor repercusión en el coste de aplicación de agua que la dotación de la máquina. En el rango de utilización del diámetro 168.3 mm (6 5/8”), mejorar ligeramente la eficiencia de riego, pasando de 0.8 a 0.85 conduce a un ahorro entre el 4 y 5% en el coste de aplicación de agua. Los ahorros son ligeramente mayores cuanto mayor es el tamaño del equipo pivot.

INFLUENCIA DEL PRECIO DE LA ENERGÍA Y DEL PRECIO DEL AGUA

Para estudiar esta influencia se ha utilizado el diámetro de tu-

// EL COSTE DE APLICACIÓN DE AGUA ES MÁS SENSIBLE A LA EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE RIEGO Y AL PRECIO DEL AGUA, QUE A LA DOTACIÓN DEL EQUIPO, AL PRECIO DE LA ENERGÍA O AL TIPO DE EMISOR UTILIZADO //

bería 168.3 mm (6 5/8”), con un emisor tipo Spray, y se han determinado los costes de aplicación del agua considerando diferentes combinaciones de precio del agua (entre 0,03 y 0,12 €·m⁻³) y de la energía (entre 0,05 y 0,15 €·kW·h⁻¹). Los resultados se muestran en la **Figura 6**, donde se puede observar la mayor influencia del precio de agua que el precio de la energía sobre los costes de aplicación de

agua con el sistema de riego. Los resultados (**Gráfico 5**) indican que para un mismo precio de la energía, pasar de un precio del agua de 0,03 a 0,09 (€ m⁻³) (un 300%), incrementa el coste anual de aplicación del agua en un 80-90% en el rango de utilización de la tubería de 168.3 mm (6 5/8”) (entre 265 y 360 m de longitud). De forma análoga, para un mismo precio del agua, y en el mismo rango de utilización de la tu-

bería de 168.3 mm (6 5/8”), incrementar el coste de la energía de 0,05 a 0,15 (€·kW·h⁻¹) (un 300%), supone solo un incremento del coste anual de aplicación del agua de un 10-18%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

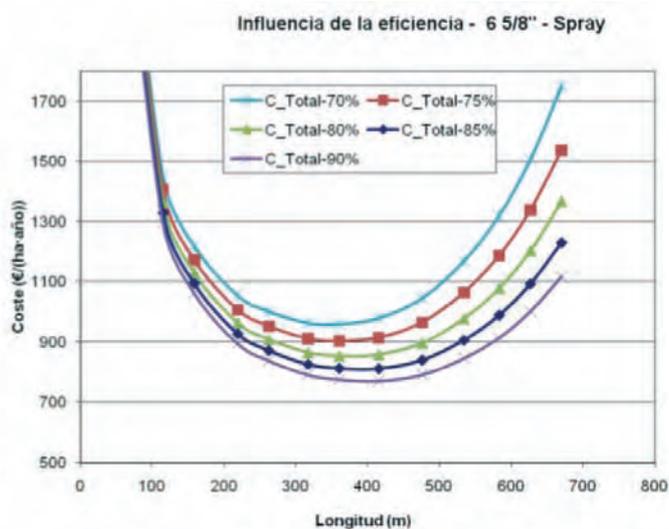
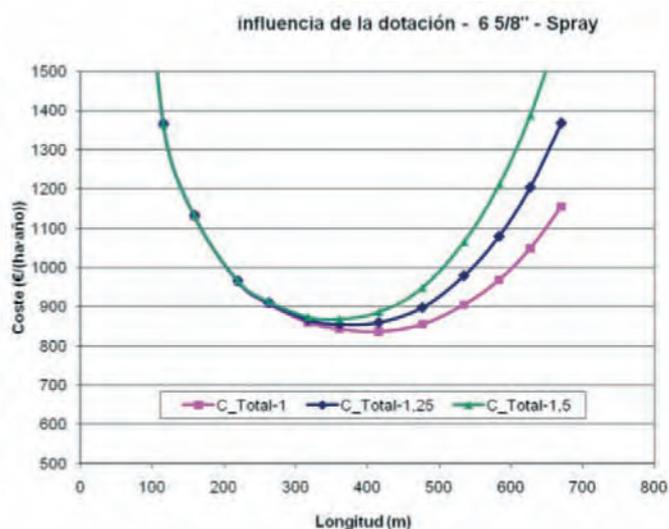
- El coste de inversión por unidad de longitud de equipo decrece al aumentar el tamaño de éste, según una ley potencial para los distintos diámetros de tubería estudiados, no existiendo diferencias apreciables de este coste para los distintos tipos de emisores considerados.
- En un equipo pivote, el coste de inversión por unidad de superficie decrece al aumentar el tamaño de la máquina mientras que el coste de energía crece al hacerlo el tamaño de esta. Por eso, para cada diámetro de tubería, hay un tamaño óptimo de equipo pivot en el que el coste total de aplicación de agua, incluyendo el coste de inversión, energía, mantenimiento y el propio coste del agua de riego, se hace mínimo.
- Se han determinado los intervalos de longitudes, y por tanto de superficies regada, en los que se recomienda utilizar cada diámetro de tubería para conseguir el coste anual mínimo de aplicación de agua.
- El coste de aplicación de agua con equipos pivot es bastante sensible a la eficiencia de aplicación de riego y al precio del agua, y en mucha menor medida a la dotación del equi-

FUTUROLIVA
 DEL 27 AL 30 DE MAYO EN EL RECINTO FERIAL
www.futurolivabaeza.com

6ª
 FERIA
 DEL OLIVAR
 BAEZA
 2010



GRÁFICO 4 / Evolución del coste total anual de aplicación de agua por unidad de superficie con un emisor tipo Spray y tubería de 168.3 mm (6 5/8"), para diferentes dotaciones (a la izquierda) y eficiencias de aplicación de agua (a la derecha).



po, al precio de la energía o al tipo de emisor utilizado. Por eso se puede recomendar la utilización de emisores tipo Rotator o Wobbler más que los tipo Spray si se tiene en cuenta que estos últimos consiguen menor uniformidad de aplicación de agua, con mayores pérdidas por evaporación y arrastre.



Emisor tipo spray

A esto puede añadirse además la mayor probabilidad de obstrucciones con partículas arrastradas por el agua de riego, y sobre todo la materia orgánica (Ortiz *et al.* 2010).

tradas por el agua de riego, y sobre todo la materia orgánica (Ortiz *et al.* 2010).

- El equipo pivote para el que se ha obtenido el menor coste anual de aplicación de agua por unidad de superficie es una máquina de 485 m de longitud (74 ha), con tubería de 219.0 mm (8 5/8") y con emisor tipo Wobbler o Rotator. Esto pone de manifiesto que el uso generalizado de la tubería 6 5/8" para superficies entre 35 y 70 ha no es siempre acertado.
- La solución de poner múltiples diámetros en la tubería del pivote reduce el coste de aplicación de agua de riego, aunque la reducción no es muy grande

con respecto al mínimo obtenido con diámetro único.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a la CICYT, por la financiación del proyecto nacional (AGL2007-66716-C03-03), en el que se ha desarrollado este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Queda a disposición del lector en los siguientes correos electrónicos: Manuel.Valiente@uclm.es y redaccion@editorialagricola.com.

GRÁFICO 5 / Influencia del precio del agua (a la izquierda) y de la energía (a la derecha) sobre el coste anual de aplicación de agua por unidad de superficie regada utilizando tubería de 168.3 mm (6 5/8") y emisor Spray

