

METODOLOGÍA PARA LA REGULACIÓN DE LOS PULVERIZADORES HIDRÁULICOS DE BARRA EN TRAYECTORIAS CIRCULARES

Antonio Boné Garasa

Alfredo serreta olivan

Jesus Guillen Torres

Mariano Vidal Cortes

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de plaguicidas en las explotaciones agrícolas debe realizarse garantizando que la dosis de producto aplicada por unidad de superficie sea la necesaria. Para alcanza este objetivo se utilizan los equipos de aplicación de productos fitosanitarios conocidos como pulverizadores que se clasifican en diferentes tipologías en función del cultivo y tratamiento a realizar. En el caso concreto de cultivos extensivos, como los cereales de invierno, se utilizan, de forma mayoritaria, los pulverizadores hidráulicos de barra conocidos como pulverizadores para cultivos bajos.

Los pulverizadores hidráulicos para cultivos bajos constan de una barra sobre la que se ubican boquillas separadas entre sí una determinada distancia. La altura de las boquillas respecto al cultivo debe ser la adecuada para garantizar una distribución de producto uniforme.

Cuando la trayectoria seguida por el pulverizador durante el tratamiento es rectilínea, la superficie de suelo en la que cada boquilla distribuye el producto es similar. Sin embargo, esto no ocurre cuando la barra sufre variaciones horizontales de la velocidad (Lebeu et al., 2004) o cuando la trayectoria del equipo no es rectilínea, como es el caso de los contornos de la parcela donde, pueden quedar zonas sobretratadas o zonas sin tratar, especialmente en equipos con gran anchura de barra (Luck et al., 2010).

En el caso de que el equipo realice trayectorias circulares, como las realizadas en parcelas con sistemas de riego por pivots, la falta de uniformidad en los tratamientos químicos puede llegar a ser inadmisibile cuando el caudal aportado por todas las boquillas de la barra es el mismo. Esto es debido a que las boquillas de la parte exterior de la barra distribuyen el producto en una mayor área

que las de la parte interior. En este caso, las zonas afectadas por las boquillas exteriores reciben menos cantidad de producto por unidad de superficie, quedando parte de la parcela tratada por defecto. Por el contrario, en las zonas afectadas por las boquillas interiores se aplica más cantidad de producto por unidad de superficie, quedando tratadas por exceso. Sería por lo tanto interesante, para el caso de trayectorias circulares, disponer de equipos en los que el caudal de las boquillas no fuera constante para toda la barra de forma que las boquilla situadas en la parte interior aplicasen caudales menores que las situadas en la parte exterior. Esto se podría lograr controlando el caudal aportado por cada boquilla y modificándolo en función del radio de la trayectoria circular y de la velocidad de avance del equipo.

En este sentido, actualmente existen equipos con tecnología que garantiza que el caudal aplicado en las boquillas es proporcional a la velocidad de avance. Para ello la presión de trabajo del circuito hidráulico varía con la velocidad de avance. El inconveniente de estos sistemas es que todas las boquillas aportan el mismo caudal.

También existe tecnología para comandar específicamente cada boquilla con sistemas de apertura y cierre (Han et al. 2001; Shahembadi et al., 2008; Brown et al., 2008) que permiten la aplicación de dosis diferenciadas en superficie. Otra opción son válvulas capaces de regular individualmente el caudal de una boquilla o un tramo de boquillas mediante el control de la presión de trabajo de las mismas (Kunavut et al., 2000; Zhang et al., 2007). En este sentido, algunos fabricantes de equipos pulverizadores han implementado en sus equipos sistemas de control del flujo de producto basados en la utilización de electroválvulas. Sharda et al. (2010) evaluaron la influencia que la utilización de sistemas de control comerciales de corte y apertura de sectores tiene en la uniformidad de la presión en las boquillas de la barra de pulverización, encontrando diferencias entre sistemas de control individual de los sectores de la barra y sistemas de control individual de las boquillas de modo que ambos sistemas generaban errores de diferente magnitud.

Por otro lado, la combinación de tecnología GPS con sistemas de aplicación de dosis variables permite optimizar la aplicación de productos fitosanitarios. Al-Gaadi et al. (1999) diseñaron e

implementaron en una barra pulverizadora un sistema para la aplicación diferenciada de herbicida combinando en tiempo real información GIS con el posicionamiento del equipo de aplicación mediante GPS.

Las labores agrícolas realizadas siguiendo trayectorias circulares suelen utilizar la tecnología GPS para garantizar la realización de pasadas concéntricas. Esta tecnología, aplicada a los tractores agrícolas, permite conocer instantáneamente la velocidad de avance del equipo y la posición del mismo (Schueller et al., 1994; Gan-Mor et al., 2005). Su aplicabilidad para configurar rutas en trayectorias circulares es una realidad comercial y ha sido analizada en diferentes trabajos de investigación (Grisso et al., 2002; Grisso et al., 2004).

Combinando la información aportada por la tecnología GPS (velocidad y posición de la máquina) con sistemas de control del caudal aportado por las boquillas de la barra de pulverización se podría garantizar la aplicación de dosis superficiales uniformes.

En la actualidad en España existen un total de 3.357.970 ha de regadío, de las cuales 265.897 ha se riegan mediante sistemas automotrices Pivots. En Aragón la superficie regada por Pivot es de 32.623 ha (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, ESYRCE 2009)

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo han sido:

- Desarrollar una metodología de cálculo que permita estimar, para el caso de trayectorias circulares con pulverizadores hidráulicos de barra, el caudal a aportar por las boquillas de la barra para garantizar que la dosis de producto aplicada por unidad de superficie sea similar en toda la parcela.
- Analizar la uniformidad de la dosis superficial de producto en función del sistema de regulación utilizado en el equipo de aplicación: regulación de la presión de cada boquilla y regulación de la presión de cada sector de boquillas.
- Verificar la viabilidad de obtener el área tratada por una boquilla a través de una antena GPS ubicada en el centro de la barra utilizando como dato de validación el área medida por una antena GPS ubicada en la propia boquilla.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CÁLCULO DE LA UNIFORMIDAD DE LA DOSIS SUPERFICIAL APLICADA EN TRAYECTORIAS CIRCULARES

3.1.1. Cálculo del error en la dosis superficial aplicada

Los parámetros que condicionan la dosis aplicada por los pulverizadores hidráulicos en trayectorias rectilíneas se interrelacionan según la ecuación 1 (Weisser and Koch, 2002).

$$AV = \frac{n \times nfr \times 60}{0,1 \times n \times n_s \times s} \quad (1)$$

AV = dosis superficial (l/ha)
n = número de boquillas
nfr = caudal de boquilla (l/min)
n_s = separación entre boquillas (m)
s = velocidad de avance (km/h)

En base a la ecuación 1 se ha desarrollado una metodología de cálculo numérico para calcular la falta de uniformidad que se produce al utilizar los pulverizadores hidráulicos en trayectorias circulares.

3.1.2. Simulación del trabajo realizado con un pulverizador de anchura de barra 14,5 m

Como ejemplo práctico se ha analizado el porcentaje de variación de la dosis superficial aplicada con un pulverizador de anchura de barra 14,5 m equipado con 30 boquillas separadas entre sí 50 cm.

El objetivo ha sido aplicar una dosis superficial de 240 l/ha, regulando para ello la presión de trabajo de las boquillas a 2 bar con un caudal nominal de cada boquilla de 1,4 l/min. Para ello, en base a la ecuación 1 el tractor debe trabajar a una velocidad de 7 km/h.

Se ha considerado el equipo trabajando en una parcela circular de 160 m de radio y se ha desestimado el área circular constituida por círculo de radio 10 m, al ser una zona de difícil maniobra para la maquinaria agrícola.

3.1.3. Influencia de la anchura de trabajo en la variación de la dosis superficial aplicada

Se ha analizado teóricamente la variación de la dosis superficial aplicada por tres pulverizadores con anchuras de barra de 14,5 m, 24,5 m y 29,5 m (anchuras de trabajo de 15 m, 25 m y 30 m), con boquillas separadas 50 cm, trabajando en trayectorias circulares en dos parcelas con radio máximo de 160 m y 310 m respectivamente. En ambas parcelas se ha despreciado el área circular inicial correspondiente a un radio de 10 m a la hora de realizar el tratamiento. El radio de la superficie a tratar y las anchuras de trabajo han sido elegidas de forma que el número de trayectorias circulares a realizar por los equipos para aplicar el producto a toda la parcela fuera un número entero.

3.2. PROPUESTA DE REGULACIÓN DEL PULVERIZADOR PARA OBTENER DOSIS SUPERFICIALES UNIFORMES

3.2.1. Metodología para regular el flujo de cada boquilla

Conocida, para el caso de trayectorias circulares, la variación de la dosis superficial aplicada por cada boquilla en función de la posición del equipo (radio de la trayectoria circular) y de la posición de la boquilla en la barra, se ha desarrollado una metodología de cálculo para obtener la presión a la que debería trabajar cada boquilla para garantizar una dosis superficial uniforme. Dicha metodología se basa en el conocimiento instantáneo de la posición del equipo en la trayectoria circular (radio) y de la velocidad de trabajo, para lo cual se propone la utilización de tecnología GPS.

En base a dicha metodología se podrían implementar en el equipo sistemas de regulación de la presión para eliminar así la falta de homogeneidad en la dosis superficial aplicada por pulverizadores de barra cuando trabajan en trayectorias circulares. Lógicamente, esta solución requeriría del control individual de la presión de cada boquilla de la barra, lo cual encarecería los equipos y complicaría su manejo. Una solución alternativa sería el control de la presión de los sectores de la barra de pulverización agrupando así en cada sector un número determinado de

boquillas. Con esta solución se cometería un error en la dosis superficial de aplicación que sería menor cuanto menor fuese el número de boquillas del sector.

3.2.2. Simulación de la regulación del flujo de un pulverizador de anchura de barra 14,5 m

Como ejemplo práctico se ha analizado un pulverizador de anchura de barra de 14,5 m equipado con 30 boquillas separadas 50 cm. Se ha considerado una configuración de equipo para aplicar 240 l/ha de producto de forma que el caudal de cada boquilla a 2 bar de presión sería 1,4 l/min y la velocidad de avance del equipo de 7 km/h.

Considerando esta configuración se han analizado dos sistemas de regulación de la presión de trabajo: a) control de la presión de trabajo de cada sector de la barra considerando que está constituida por sectores de 5 boquillas (2,5 m de anchura); b) control individual de la presión de cada boquilla.

En el análisis se ha considerado una parcela circular de 160 m de radio en la que se han despreciado el área correspondiente al círculo formado por los 10 m iniciales de radio.

3.3. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE REGULACIÓN DEL PULVERIZADOR EN TIEMPO REAL EN PARCELA

Se ha utilizado en campo un pulverizador de 16,5 m de anchura de barra con 34 boquillas separadas 50 cm (anchura de trabajo 17 m) (fotos 1 y 2), suspendido a un tractor equipado con GPS John Deere AutoTrac Universal con corrección SF1 (± 33 cm de precisión). El sistema de autoguiado AutoTrac Universal fue configurado en campo para realizar pasadas concéntricas separadas entre sí 16,75 m. Se realizaron un total de ocho pasadas concéntricas en una finca equipada con un sistema de riego por aspersión mediante pívot. La superficie fue recorrida desde la parte exterior de la parcela hacia el interior, de modo que la trayectoria 1 fue la de mayor radio de trabajo y la trayectoria 8 la de menor radio de trabajo (figura 1).



Foto 1. Vista frontal del equipo pulverizador suspendido trabajando en trayectoria circular.



Foto 2. Vista lateral del equipo pulverizador suspendido.

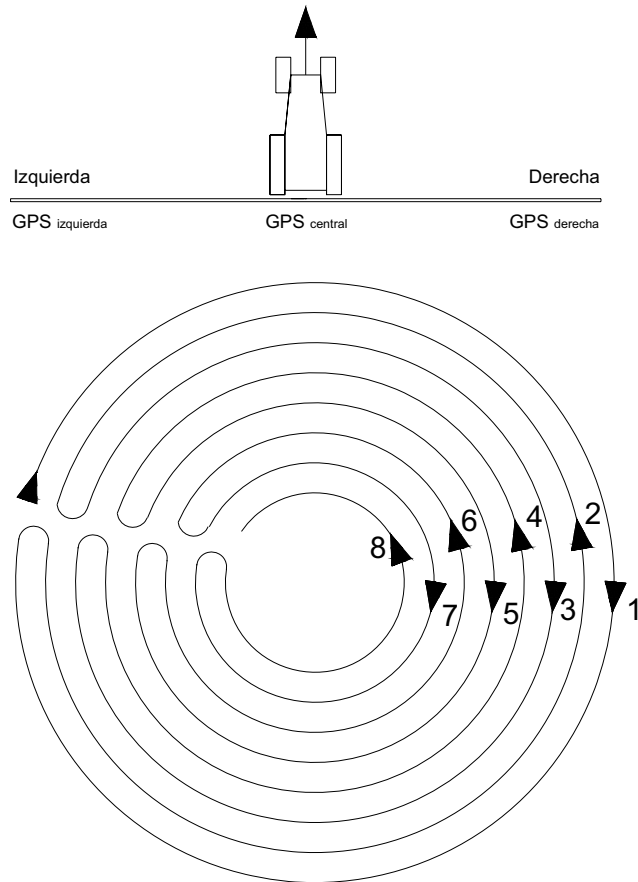


Figura 1. Ensayo realizado en una parcela realizando 8 trayectorias circulares con una barra de pulverización equipada con tres GPS con corrección RTK y un tractor con sistema de autoguiado comercial AutoTrac Universal configurado para realizar pasadas concéntricas a 16,75 m de distancia.

Adicionalmente, en la barra de pulverización se instalaron tres equipos GPS Leica 1200 con corrección RTK (precisión de ± 2 cm). Uno de los equipos se colocó en el centro de la barra (foto 3) y los otros dos en los extremos derecho e izquierdo de la misma (figura 1, foto 4). Los tres GPS de la barra fueron configurados para la toma de datos a una frecuencia de muestreo de 1 s.



Foto 3. GPS con corrección RTK ubicado en el centro de la barra pulverizadora.



Foto 4. GPS con corrección RTK ubicado en el extremo de la barra pulverizadora.

Se ha analizado la concordancia entre las medidas aportadas por los tres sistemas GPS de la barra y por el GPS de autoguiado del tractor. Se ha analizado la viabilidad de utilizar esta tecnología para

regular en tiempo real la presión de trabajo de las diferentes boquillas de la barra (o de los diferentes sectores) en función de la posición (radio) del equipo en la trayectoria circular y de la velocidad de avance instantánea, ambas obtenidas a partir del GPS del tractor.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CÁLCULO DE LA UNIFORMIDAD DE LA DOSIS SUPERFICIAL APLICADA EN TRAYECTORIAS CIRCULARES

A continuación se describe la metodología desarrollada para calcular la dosis aplicada por un pulverizador trabajando en trayectorias circulares en función del radio de trabajo del pulverizador y de la boquilla seleccionada. Esta metodología ha sido desarrollada suponiendo una barra equipada con boquillas del mismo tipo de forma que el caudal aportado por cada boquilla de la barra es similar.

4.1.1. Cálculo del error en la dosis superficial aplicada

Se considera un pulverizador hidráulico con las siguientes características:

- Anchura de la barra de trabajo, como distancia medida entre la primera y la última boquilla (m) = B_w
- Número de boquillas = n
- Separación entre boquillas (m) = n_s

En base a la dosis de producto a aplicar (l/ha) y al tipo de boquillas a utilizar se configuran los siguientes parámetros de trabajo utilizando la ecuación 1:

- Velocidad de avance (km/h) = s
- Caudal nominal de la boquilla(l/min) para la presión nominal = nfr
- Presión nominal (bar) = p

La altura de la barra será aquella que garantiza la uniformidad del tratamiento en el plano de trabajo.

Suponiendo que el equipo está realizando una trayectoria circular con un radio de trabajo R_c (m) y considerando una boquilla cualquiera de la barra, la dosis por unidad de superficie para la zona tratada por dicha boquilla se obtendría con la siguiente metodología (figura 2):

Radio del eje del tractor al centro de la circunferencia i de la trayectoria circular considerada:

$$R_{ci} \text{ (m)}$$

Velocidad angular del tractor (ecuación 2)

$$w \text{ (rad/s)} = s \text{ (km/h)} / (3,6 * R_{ci}) \quad (2)$$

Ángulo recorrido por el tractor en la unidad de tiempo (ecuación 3):

$$\alpha \text{ (rad)} = w \text{ (rad/s)} * 1s \quad (3)$$

Distancia de la primera boquilla de la barra (boquilla más cercana al centro de la trayectoria circular) al centro de la circunferencia trazada por el tractor en la pasada i (ecuación 4):

$$R_{li} \text{ (m)} = R_{ci} - (Bw/2) \quad (4)$$

Posición de cada boquilla ($j = 1, 2, \dots, n$) medida desde el centro de la circunferencia (ecuación 5):

$$R_j \text{ (m)} = R_{li} + [(j-1) * n_s] \quad (5)$$

Área tratada por cada boquilla en la unidad de tiempo suponiendo una anchura de trabajo de cada boquilla de valor n_s (ecuación 6):

$$A_{nj} \text{ (m}^2\text{/s)} = \alpha/2 * [(R_j + n_s/2)^2 - (R_j - n_s/2)^2] \quad (6)$$

Dosis superficial (l/m^2) aplicada por cada boquilla (ecuación 7):

$$AV_{nj} \text{ (l/m}^2\text{)} = nfr / A_{nj} \quad (7)$$

Dosis superficial (l/m^2) aplicada por la boquilla central de la barra (ecuación 8):

$$AV_{nc} \text{ (l/m}^2\text{)} = nfr / [\alpha/2 * [(R_{ci} + n_s/2)^2 - (R_{ci} - n_s/2)^2]] \quad (8)$$

Suponiendo que se pretende realizar un tratamiento mediante trayectorias circulares concéntricas, para una misma superficie tratada, la dosis superficial aplicada dependerá de la anchura de trabajo del equipo.

Conocida la anchura de trabajo del equipo a utilizar y, fijada una dosis de aplicación como objetivo, se puede calcular la variación superficial de la dosis aplicada para las diferentes zonas del área circular a tratar. Para ello a partir de los datos de las ecuaciones 7 y 8 se desarrolla la ecuación 9 que permite obtener la variación porcentual de la dosis superficial aplicada por cada boquilla:

$$\Delta V (\%) = ((AV_{nj} - AV_{nc}) / AV_{nc}) * 100 \quad (9)$$

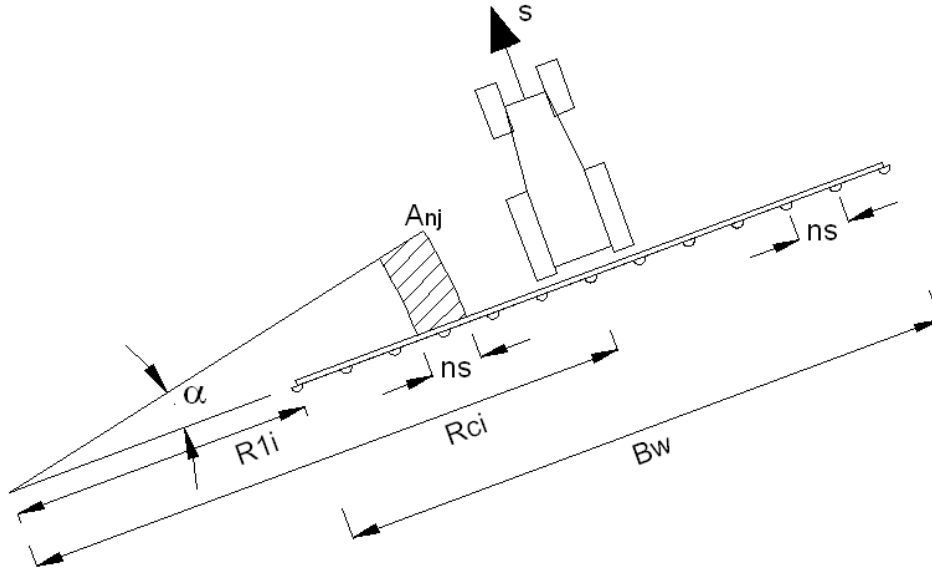


Figura 2. Parámetros de trabajo de un pulverizador de barra realizando una trayectoria circular. R_{ci} = radio del eje del tractor al centro de la circunferencia i de la trayectoria circular considerada. R_{1i} = distancia de la primera boquilla de la barra al centro de la circunferencia trazada por el tractor en la pasada i . B_w = anchura de la barra. n_s = separación entre boquillas. α = ángulo recorrido por el tractor por unidad de tiempo. s = velocidad de avance del tractor. A_{nj} = Área tratada por la boquilla j en la unidad de tiempo suponiendo una anchura de trabajo de cada boquilla de valor n_s y una velocidad lineal de avance del tractor s .

4.1.2. Simulación del trabajo realizado con un pulverizador de anchura de barra 14,5 m

Desarrollando la metodología de cálculo expuesta anteriormente para cada uno de los radios R_{ci} de las diferentes trayectorias circulares necesarias para tratar la parcela se obtendría, utilizando la ecuación 6, la superficie tratada por cada boquilla de la barra (figura 3) y, utilizando la ecuación 7, la dosis de producto aplicada en cada una de esas superficies (figura 4).

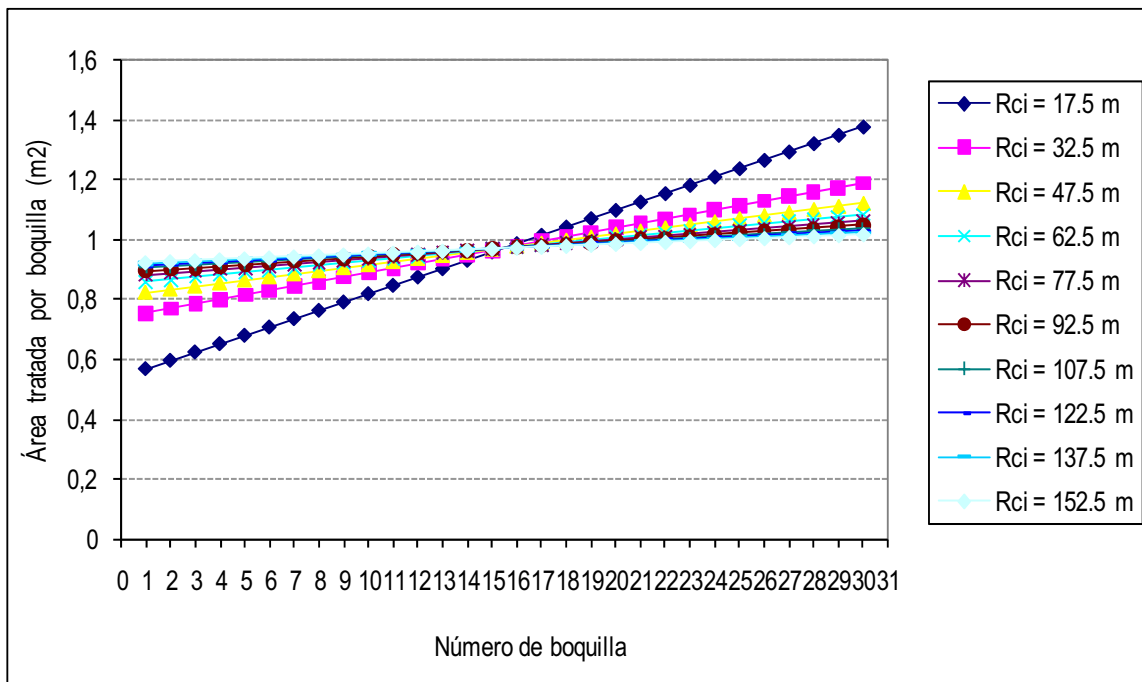


Figura 3. Área (m²) tratada por cada boquilla de una barra de pulverización de 14,5 m de anchura con 30 boquillas separadas 50 cm, en función del radio de la trayectoria circular (Rci). Boquilla 1 = boquilla interior; Boquilla 30 = boquilla exterior.

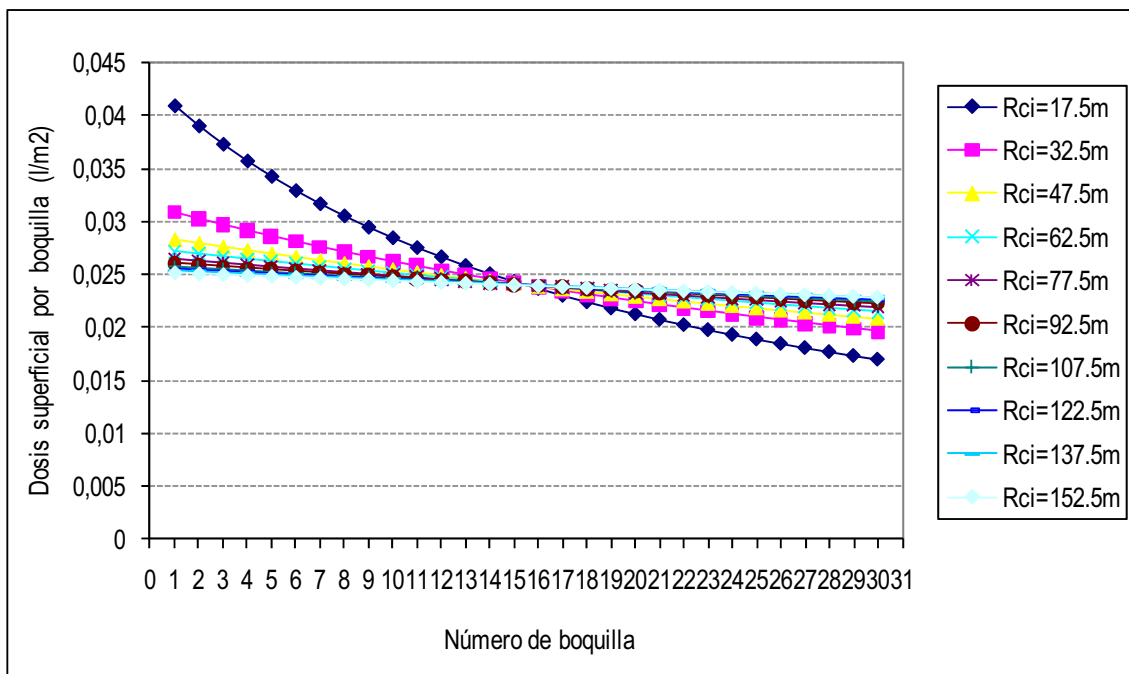


Figura 4. Dosis superficial (l/m²) aplicada por cada boquilla de una barra de pulverización de 14,5 m de anchura con 30 boquillas separadas 50 cm, en función del radio de la trayectoria circular (Rci). Boquilla 1 = boquilla interior; Boquilla 30 = boquilla exterior.

La superficie teórica en la que se debería distribuir el caudal de cada boquilla sería la correspondiente a la de una boquilla situada en el centro de la barra. Como se observa en la figura 3 el punto central de la barra es el punto de intersección común a todas las trayectorias circulares consideradas. Del mismo modo la dosis superficial teórica a aplicar por todas las boquillas por unidad de superficie sería la correspondiente a la boquilla situada en el centro de la barra que sería común a todas las boquillas en el caso de el equipo estuviese trabajando en trayectoria rectilínea. En la figura 4 se observa como dicha dosis se reduce en las boquillas exteriores y se incrementa en las boquillas interiores, siendo este hecho más importante en las trayectorias circulares de menor radio de trabajo.

4.1.3. Influencia de la anchura de trabajo en la variación de la dosis superficial aplicada

Los resultados de aplicar la ecuación 9 a dos parcelas circulares de 160 m y 310 m de radio, utilizando tres equipos con anchura de barra 14,5 m, 24,5 m y 29,5 m (anchuras de trabajo de 15 m, 25 m y 30 m), se recogen en las figuras 5 y 6. Las figuras 5 y 6 representan, para cada anchura de barra y tamaño de parcela, el porcentaje de superficie en el que la dosis superficial aplicada ha superado diferentes valores de variación porcentual de la dosis superficial nominal a aplicar como objetivo del tratamiento (l/m^2). Cuanto menor es la anchura de trabajo mayor es la homogeneidad del tratamiento mientras que en equipos con grandes anchuras de trabajo la dosis aplicada por unidad de superficie tiene una mayor variabilidad. Este hecho adquiere más importancia en parcelas de menor superficie.

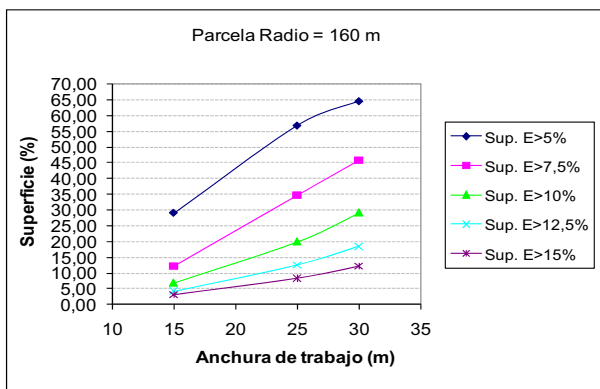


Figura 5. Porcentaje de superficie con errores en la dosis superficial aplicada superiores al 5 %, 7,5 %, 10 %, 12,5 % y 15 % para el caso de tres equipos de anchura de trabajo 15, 25 y 30 m realizando tratamiento en trayectorias circulares en una parcela circular de 160 m de radio a una velocidad de avance de 7 km/h y caudal nominal en boquillas de 1,4 l/min.

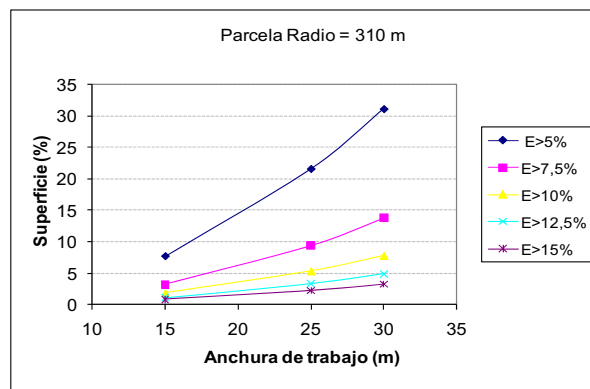


Figura 6. Porcentaje de superficie con errores en la dosis superficial aplicada superiores al 5 %, 7,5 %, 10 %, 12,5 % y 15 % para el caso de tres equipos de anchura de trabajo 15, 25 y 30 m realizando tratamiento en trayectorias circulares en una parcela circular de 310 m de radio a una velocidad de avance de 7 km/h y caudal nominal en boquillas de 1,4 l/min.

La tabla 1 detalla la relación entre superficies afectadas y dosis aplicadas para las dos parcelas circulares consideradas (160 y 310 m) y los tres equipos de trabajo.

Es importante recordar que, a pesar de que en la mayoría de los países avanzados se está regulando por ley la inspección técnica de los equipos de aplicación (Ozkan, 1999; Gil 2007), en muchos casos dicha legislación permite valores de variación de presión y caudal en boquillas de hasta el 10%. En el caso de trayectorias circulares a este error se sumaría el asociado a la realización de dichas trayectorias que, como muestran las figuras 5 y 6, puede llegar a ser muy significativo.

Tabla 1. Superficies (ha) con errores en la dosis superficial al aplicada superiores al 5 %, 7,5%, 10 %, 12,5 % y 15 % para el caso de tres equipos de anchura de trabajo 15, 25 y 30 m realizando tratamiento en trayectorias circulares en dos parcelas circulares de 160 m y 310 m de radio a una velocidad de avance de 7 km/h y caudal nominal en boquillas de 1,4 l/min.

Dosis a aplicar: 240 l/ha	Radio de parcela: 160 m 8,06 ha consideradas			Radio de parcela: 310 m 30,25 ha consideradas		
	15 m	25 m	30 m	15 m	25 m	30 m
Error > 5% (< 228 l/ha; > 252 l/ha)	2,5	4,7	5,2	2,5	6,8	9,7
Error > 7,5% (< 222 l/ha; > 258 l/ha)	1,1	3,0	3,8	1,1	3,0	4,3
Error > 10% (< 216 l/ha; > 264 l/ha)	0,6	1,7	2,4	0,6	1,7	2,4
Error > 12,5% (< 210 l/ha; > 270 l/ha)	0,4	1,1	1,5	0,4	1,1	1,5
Error > 15% (< 204 l/ha; > 276 l/ha)	0,2	0,7	1,0	0,2	0,7	1,0

Con la metodología desarrollada, conocida la parcela a tratar y el equipo disponible, se puede determinar de forma precisa la variación de la dosis con respecto a la establecida como consigna, mediante el cálculo de la dosis aplicada por cada boquilla en la superficie tratada en sus diferentes trayectorias circulares concéntricas.

4.2. PROPUESTA DE REGULACIÓN DEL PULVERIZADOR PARA OBTENER DOSIS SUPERFICIALES UNIFORMES

4.2.1. Metodología para regular el flujo de cada boquilla

Una vez calculado el error cometido en los tratamientos circulares realizados con caudal constante en todas las boquillas, se ha calculado la presión a la que habría que regular cada boquilla para conseguir que la dosis superficial aplicada fuera homogénea. Así, conociendo de forma instantánea la posición del equipo en la trayectoria circular (radio) y la velocidad de avance, se puede obtener el área recorrida por cada boquilla en la unidad de tiempo (A_{nj} , ecuación 6) y la dosis a aplicar que equivale a la de la boquilla que ocuparía la posición central de la barra (AV_{nc} , ecuación 8). Con estos valores se calcula el caudal necesario en cada boquilla para aplicar la misma dosis superficial en la parcela (q_{2j} , ecuación 10).

$$q_{2j} \text{ (l/s)} = A_{nj} * AV_{nc} \quad (10)$$

Conocido el caudal a aportar por cada boquilla en función de la posición de la máquina y de su velocidad de avance, se puede obtener la presión a la que debe trabajar cada boquilla para aportar dicho caudal utilizando la ecuación 11.

$$p_{2j} \text{ (bar)} = p * (q_{2j} / nfr) ^2 \quad (11)$$

En base a este desarrollo se podrían establecer sistemas de regulación de la presión individualizados para cada una de las boquillas de los equipos de forma que se eliminase la falta de

homogeneidad en los tratamientos en trayectorias circulares con barras pulverizadoras. Esto se traduciría en mejoras en los rendimientos de los cultivos y evitaría el solapamiento en la aplicación de productos químicos lo cual se traduce en un mejor balance económico de la explotación (Batte and Ehsani, 2006).

4.2.2. Simulación de la regulación del flujo de un pulverizador de anchura de barra 14,5 m

Control de sectores de boquillas. Si la barra de 14,5 m de anchura se sectoriza en tramos de 2,5 m con cinco boquillas por tramo, se puede regular la presión de trabajo de cada tramo de forma que las cinco boquillas trabajarían a la misma presión y por lo tanto aportarían el mismo caudal. La uniformidad del tratamiento aumentaría cuanto menor fuese el número de boquillas de cada sector. La presión de cada sector se puede regular utilizando las ecuaciones 10 y 11 de modo que la boquilla central de cada sección aplicaría la dosis nominal de referencia. En esta nueva situación, la variabilidad en la dosis superficial aplicada mejoraría notablemente como refleja la figura 7 donde la dosis superficial requerida ($0,024 \text{ l/m}^2$) varía entre $0,026 \text{ l/m}^2$ (+9,75%) y $0,022 \text{ l/m}^2$ (-8,16%) considerando la sección de barra más desfavorable que es la más cercana al centro de la trayectoria circular en el caso del menor radio de dicha trayectoria (17,5 m).

La regulación de la presión de los sectores mejora notablemente la uniformidad de la dosis superficial aplicada. Este hecho, para un pulverizador de 14,5 m de anchura de barra, queda reflejado si se comparan las figuras 4 y 7.

La presión de regulación de una boquilla depende del radio de la trayectoria circular y de la posición de la boquilla en la barra. Por ejemplo, la máxima variación de presión (considerando una presión nominal de referencia de 2 bar) varía entre 0,815 bar (-59,26%) y 3,632 bar (+ 81,58%) cuando el radio de la trayectoria circular es 17,5 m (Figura 8).

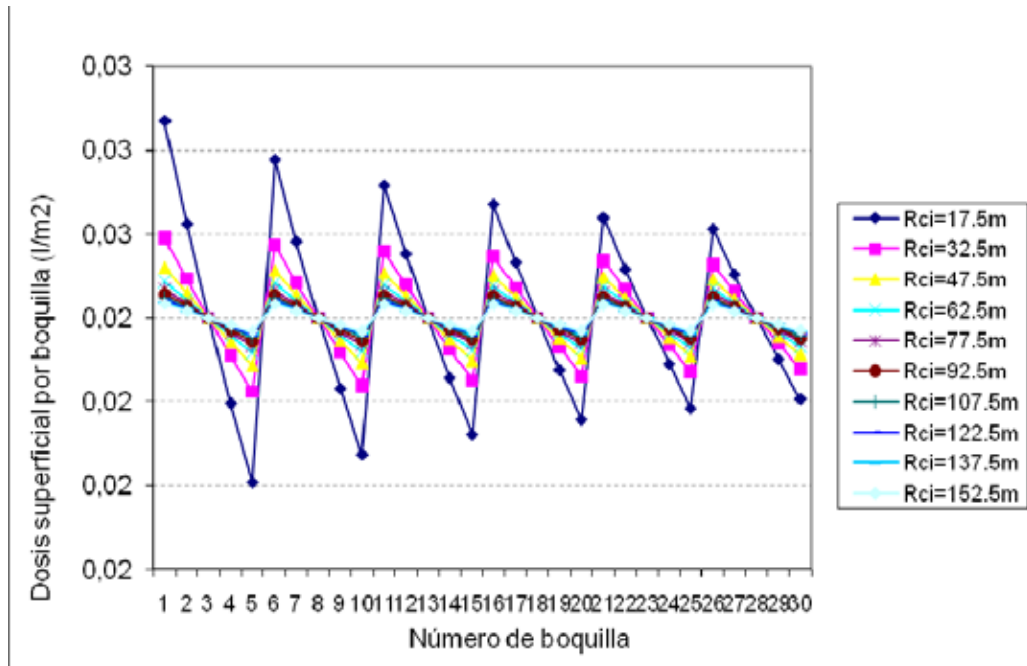


Figura 7. Dosis superficial aplicada por cada boquilla de una barra de 14,5 m de anchura con 30 boquillas separadas 50 cm en función del radio de la trayectoria circular (Rci). Boquilla 1 = boquilla interior; Boquilla 30 = boquilla exterior. La barra está dividida en 6 sectores de 5 boquillas cada uno. La presión de cada sector es regulada de forma que la boquilla central de dicho sector aplica la dosis superficial objetivo del tratamiento (0,024 l/m³).

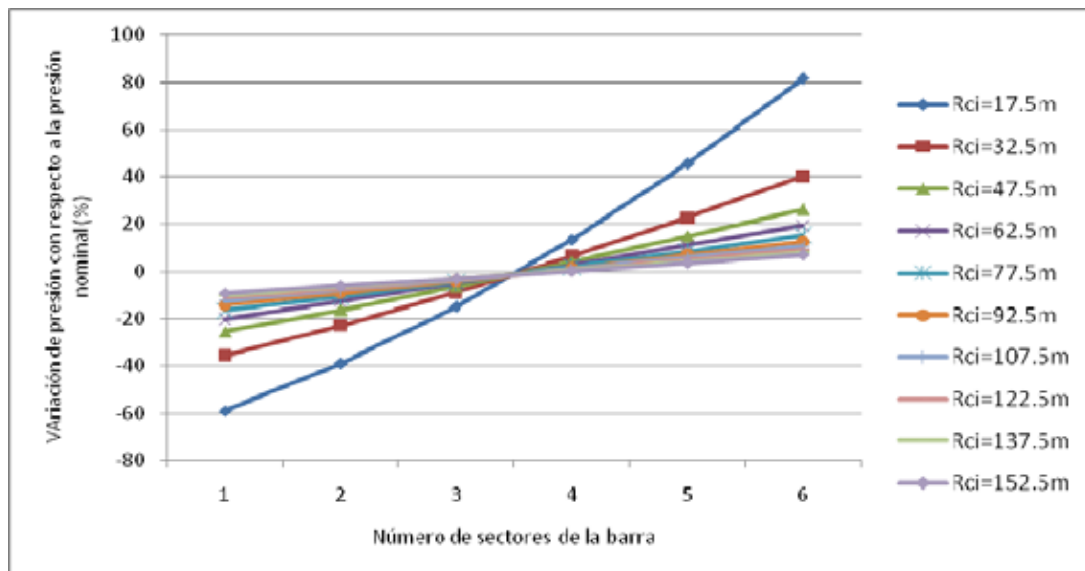


Figura 8. Porcentaje de variación de presión con respecto a la presión nominal considerando la regulación de presión de cada uno de los 6 sectores (5 boquillas por sector) de una barra de 14,5 m de anchura. Se ha considerado una parcela de 160 m de radio y una velocidad de trabajo de 7 km/h, con una presión nominal de referencia de 2 bar (caudal nominal por boquilla de 1,4 l/min).

Control individual de boquillas. El control individual del caudal aplicado por cada boquilla garantizaría una dosis superficial uniforme. Para ello, la presión de trabajo de la boquilla debe ser regulada en base a la ecuación 11. Considerando una presión nominal de 2 bar, la presión de las boquillas variaría entre 0,676 bar (-66,18 %) y 3,944 bar (+ 97,19 %) en el caso de la trayectoria circular de radio 17,5 m (Figura 9). La variación de presión se reduce drásticamente cuando el radio de la trayectoria circular aumenta. Por ejemplo, considerando un radio de 32,5 m las presiones de las boquillas varían entre 1,19 bar (-40,49 %) y 2,95 bar (+43,79 %). Estos rangos de variación de presión son acordes con los admitidos por la mayoría de las boquillas utilizadas en pulverizadores de barra.

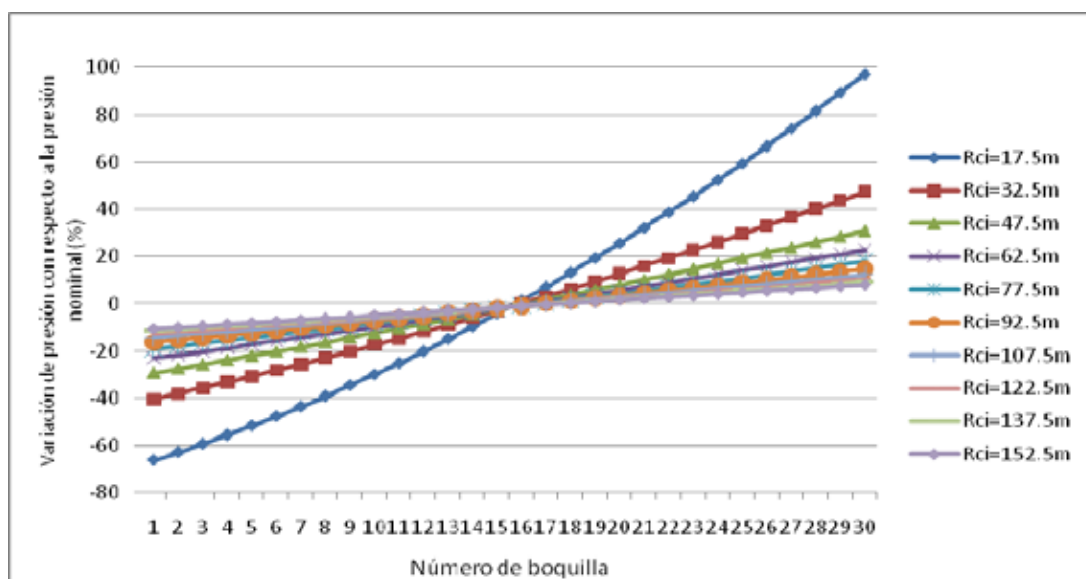


Figura 9. Porcentaje de variación de presión con respecto a la presión nominal considerando la regulación individual de presión de cada boquilla de una barra de 14,5 m de anchura. Se ha considerado una parcela de 160 m de radio y una velocidad de trabajo de 7 km/h, con una presión nominal de referencia de 2 bar (caudal nominal por boquilla de 1,4 l/min).

4.3. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE REGULACIÓN DEL PULVERIZADOR EN TIEMPO REAL EN PARCELA

Se ha analizado el error cometido por el sistema de autoguiado del tractor al realizar pasadas concéntricas. Para ello se ha comparado la distancia entre el eje del tractor en diferentes pasadas concéntricas obtenida a partir de los datos del GPS con corrección RTK ubicado en el centro de la barra de pulverización y se ha comparado con la distancia teórica a la que fue configurado el GPS para el autoguiado del tractor, establecida en 16,75 m (Figura 10).

El valor medio real de la distancia entre trayectorias circulares obtenido a partir de los datos del GPS central de la barra fue de 16,7247 m, con una desviación típica de 0,095 m y un rango de variación, mínimo-máximo de 16,54060 m – 16,81220 m. Si comparamos estos datos con la distancia programada en el sistema de autoguiado del tractor (16,75 m) se puede concluir que la calidad del trabajo realizado es válida. Además, los mayores errores, como muestra la figura 8, se produjeron en las pasadas 6 y 7 que fueron las más cercanas al centro de las trayectorias circulares (menor radio) y por lo tanto, en las que el solape entre pasadas afecta a una menor área de parcela. El sumatorio de todas las distancias concéntricas fue de 117,25 m para el caso teórico y de 117,07 m con los datos aportados por el GPS RTK ubicado en el centro de la barra.

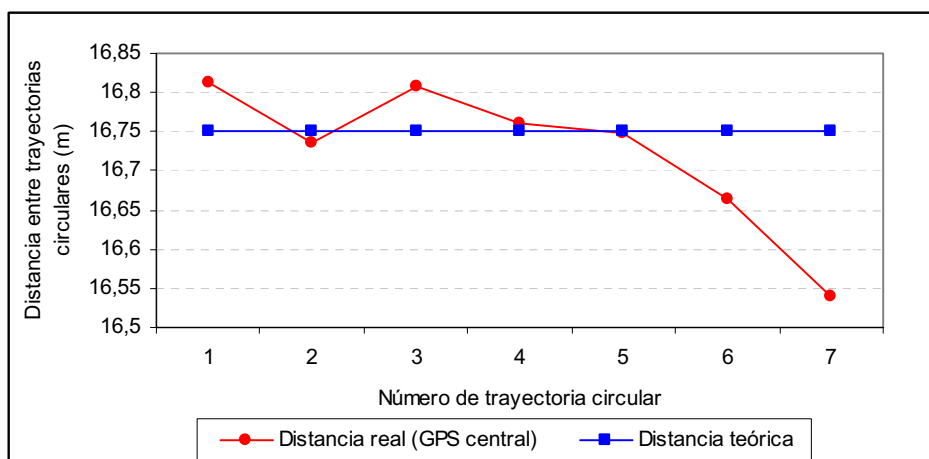


Figura 10. Distancia real entre pasadas concéntricas según datos de un GPS RTK ubicado en el centro de la barra de pulverización en comparación con la distancia teórica programada en el sistema de autoguiado del tractor equipado con un GPS John Deere AutoTrac Universal.

Por otro lado, para cada trayectoria circular, se ha calculado el radio del eje del tractor al centro de la circunferencia i (R_{ci}) y la velocidad de avance del tractor, en base a la información aportada por el GPS ubicado en la posición central de la barra. Con estos datos, conocida la anchura de la barra de pulverización (B_w) se ha estimado, utilizando la ecuación 6, la superficie tratada en la unidad de tiempo por dos boquillas situadas en la misma posición que los GPS izquierdo y derecho de la barra.

Tabla 2. Superficie tratada en la unidad de tiempo por las boquillas extremas de la barra calculada a partir de la información aportada por el GPS RTK ubicado en el centro de la barra y por los GPS RTK ubicados en los extremos derecho e izquierdo.

	Nº trayectoria circular	m ² /s estimados con GPS RTK central	m ² /s medidos con GPS RTK izquierdo	% variación
Boquilla situada en el extremo izquierdo de la barra de pulverización	1	1,046	1,045	-0,092
	2	0,944	0,945	0,066
	3	1,068	1,067	-0,013
	4	0,932	0,933	0,091
	5	1,093	1,092	-0,07
	6	0,901	0,902	0,104
	7	1,130	1,131	0,035
	8	0,832	0,832	-0,005
	Nº trayectoria circular	m ² /s estimados con GPS RTK central	m ² /s medidos con GPS RTK derecho	% variación
Boquilla situada en el extremo derecho de la barra de pulverización	1	0,945	0,945	0,005
	2	1,057	1,056	0,028
	3	0,941	0,942	-0,092
	4	1,077	1,077	0,029
	5	0,923	0,925	-0,195
	6	1,104	1,103	0,012
	7	0,876	0,877	-0,057
	8	1,168	1,169	-0,127

Para esas mismas boquillas, se ha calculado la superficie tratada en la unidad de tiempo a partir de los GPS ubicados en la posición izquierda y derecha de la barra. Los datos comparativos se muestran en la tabla 2. Como queda demostrado, los datos aportados por el GPS central de la barra (representados gráficamente en la figura 9) permiten estimar con gran exactitud los parámetros de trabajo de las boquillas extremas de la misma, siendo el error máximo porcentual de -0,195 % al

comparar el área real medida con el GPS ubicado sobre la propia boquilla con el área obtenida a partir del GPS ubicado en la parte central de la barra. Considerando esta información sería viable establecer un sistema de regulación de los parámetros de trabajo de las boquillas de la barra en tiempo real a partir de la información aportada por el GPS central de la barra, siendo el error cometido función de la precisión de dicho equipamiento GPS, que aún en el caso de no ser un sistema con corrección diferencial permitiría errores en torno a los 6 cm como muestra la figura 10.

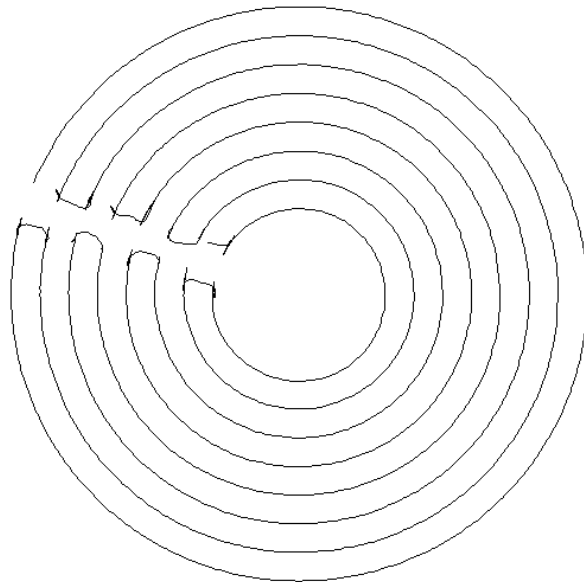


Figura 11. Datos aportados por el equipo GPS RTK ubicado en el centro de la barra de pulverización durante la realización de trayectorias circulares configuradas a 16,75 m de equidistancia con un sistema GPS John Deere AutoTrac Universal ubicado en el tractor.

5. CONCLUSIONES

Un pulverizador hidráulico de barra trabajando en trayectorias circulares aplica una dosis superficial de producto de manera no uniforme cuando la presión de trabajo es constante en toda la barra de boquillas, de modo que la dosis superficial es menor en la parte exterior de la barra y mayor en la parte interior. Este hecho se ve influenciado por la anchura de la barra de pulverización y el radio de la trayectoria circular seguida por el equipo. La dosis superficial aplicada presenta una gran variabilidad en equipos con anchuras de barra elevadas y en trayectorias circulares con radios pequeños.

Se ha desarrollado una metodología para obtener la presión de trabajo necesaria en cada boquilla, con el objetivo de aplicar dosis superficiales uniformes, en función del radio de la trayectoria circular seguida por el equipo. Esta metodología puede ser implementada en un equipo comercial utilizando tecnología GPS.

Se proponen dos alternativas para obtener dosis superficiales uniformes: la regulación de la presión de trabajo de cada boquilla y la regulación de la presión de trabajo de cada sector de boquillas. En el caso de regulación individual de la presión de cada boquilla se consigue una uniformidad total del tratamiento a costa de una mayor variabilidad en las presiones de trabajo de las boquillas. Considerando la regulación de sectores de boquillas la uniformidad del tratamiento aumenta cuanto menor es el número de boquillas de cada sector. En este caso, la variabilidad de presiones es menor que en la regulación individual de cada boquilla.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Gaadi, K. A., P. D. Ayers. 1999. Integrating GIS and GPS into a spatially variable rate herbicide application system. *Applied Eng. Agric.* 15(4): 255-262.
- Batte, M.T., M.R. Ehsani. 2006. The economics of precision guidance with auto-boom control for farmer-owned agricultural sprayers. *Computers and Electronics in Agriculture* 53: 28–44.
- Brown, D.L., D.K. Giles, M.M. Oliver, P. Klassen. 2008. Targeted spray technology to reduce pesticide in runoff from dormant orchards. *Crop Protection* 27: 545-552.
- Gan-Mor S., R. L. Clark, B. L. Upchurch. 2007. Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. *Computers and Electronics in Agriculture* 59: 31–38.
- Gil, E.2007. Inspection of sprayers in use: a european sustainable strategy to reduce pesticide use in fruit crops. *Applied Eng. Agric.* e 23(1): 49-56.
- Grisso, R. D., P. J. Jasa, and D. E. Rolofson. 2002. Analysis of traffic patterns and yield monitor data for field efficiency determination. *Applied Engineering in Agriculture* 18(2): 171–178.
- Grisso, R. D., M. F. Kocher, V. I. Adamchuk, P. J. Jasa, M. A. Schroeder. 2004. Field efficiency determination using traffic pattern indices. *Applied Eng. Agric.* 20(5): 563–572.
- Han, S., L. L. Hendrickson, B. Ni, Q. Zhang. 2001. Modification and testing of a commercial sprayer with PWM solenoids for precision spraying. *Applied Eng. Agric.* 17(5): 591-594.
- Kunavut, J., J. K. Schueller, P. A. C. Mason. 2000. Continuous control of a sprayer pinch valve. *Applied Eng. Agric.* 43(4): 829-837.
- Lebeau, F., L. El Bahir, M.F. Destain, M. Kinnaert, R. Hanus. 2004. Improvement of spray deposit homogeneity using a PVM spray controller to compensate horizontal boom speed variations. *Computers and Electronics in Agric* 43: 149-161.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, ESYRCE 2009 (encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos).

- Luck, J.D., S.K. Pitlaa, S.A. Shearera, T.G. Muellerb, C.R. Dillonc, J.P. Fultond and S.F. Higginsa. 2010. Potential for pesticide and nutrient savings via map-based automatic boom section control of spray nozzles. *Computers and Electronics in Agriculture* 70 (1): 19-26.
- Ozkan, E.1999. Recommendations for pesticide applicator training in USA based on licensing and training procedures in Western Europe. *Applied Eng. Agric.* 15(1): 25-30.
- Schuelle, J.K., M. Wanga. 1994. Spatially-variable fertilizer and pesticide application with GPS and DGPS. *Computers and Electronics in Agriculture* 11(1): 69-83.
- Shahemabadi, A.R., M.J. Moayed. 2008. An algorithm for pulsed activation of solenoid valves for variable rate application of agricultural chemicals. In *Proc. International Symposium on Information Technology 2008 – Cognitive informatics: bridging natural and artificial knowledge: 2261-2263*. Zaman H.B., T.M.T. Sembok, K. VanRijsbergen, L. Zadeh, P. Buza, T. Shih, M.N. Taib. eds.
- Sharda A., J.D. Luck, J.P. Fulton, S.A. Shearer, T.P. McDonald. 2010. Nozzle uniformity for agricultural sprayers operating under field operation when using automatic section technology. *2010 ASABE Annual International Meeting*. Pittsburgh, Pennsylvania. June 20 – June 23.
- Weisser, B., H. Koch. 2002. Expression of dose rate with respect to orchard sprayer function. *Aspects of Applied Biology* 66:353-358.
- Zhang, X., X. Hu, W. Mao. 2007. The Development of Intelligent Equipments about Precision Agriculture. ASABE Paper No. 073106. St. Joseph, Mich.: ASABE.