

Modelación de la corriente de aire en el plano vertical del pulverizador agrícola Hatsuta

Modelling of the air current in the vertical plane of Hatsuta agricultural sprayer

Dr.C. Mario Ignacio Herrera Prat^{I✉}, Dr.C. Armando Eloy García de la Figal Costales^{II}, M.Sc. Héctor de las Cuevas Milán^{II}, D.S. Mauri Martins Teixeira^{III}

^I Ministerio de Educación Superior (MES), Plaza, La Habana, Cuba.

^{II} Universidad Agraria de La Habana (UNAH), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{III} Universidade Federal de Viçosa (UFV), MG. Brasil.

RESUMEN. El uso adecuado de la corriente de aire en los pulverizadores agrícolas, constituye una preocupación constante del agricultor y los profesionales de la Ingeniería Agrícola. La deriva producida por estos equipos afecta a la salud humana y al medio ambiente por la contaminación, además de los daños económicos que representan para el agricultor. En el trabajo se estudia la corriente de aire en el plano vertical del pulverizador Hatsuta utilizando la modelación mediante la técnica de dinámica de los fluidos computarizada. En la modelación se utilizó el paquete de fluidos FLUENT del software ANSYS 16.0. Los resultados de la modelación se analizan y comparan con mediciones experimentales de la velocidad del aire realizadas a este pulverizador en el plano objeto de estudio. Se llega a la conclusión que con la modelación del flujo del aire en CFD se puede predecir los estudios de la corriente de aire en el plano vertical de pulverizadores agrícolas con un 0,97 a 0,99 de precisión.

Palabras clave: flujo, dinámica de los fluidos, pulverizadores.

ABSTRACT. The proper use of the air stream in agricultural sprays is a constant concern of the farmer and the professionals of the Agricultural Engineering. The drift produced by this equipment affects human health and the environment by pollution, in addition to the economic damages they represent to the farmer. In the work, the airflow in the vertical plane of the Hatsuta-420, spray studied using the modelling by means of the computerized fluid design technique. In the modelling, the FLUENT fluid package of ANSYS 16.0 software used. The results of the modeling are analyzed and compared with experimental measurements of the air velocity made to this sprayer in the plane under study. It is concluded that with the modeling of air flow in CFD, the airflow studies in the vertical plane of agricultural sprayers with the 0.97 to 0.99 accuracy can be predicted.

Keywords: flow, fluid dynamics, sprayers.

✉ Autor para correspondencia: Mario Ignacio Herrera Prat. E-mail: herrera@mes.gob.cu

Recibido: 23/06/2017

Aceptado: 14/03/2018

INTRODUCCIÓN

Para garantizar la protección eficiente de los cultivos con el mínimo daño al medio ambiente y a la salud humana, se necesita conocer la naturaleza de la aerodinámica de la corriente de aire en los pulverizadores agrícolas. Muchos agricultores e investigadores dedican esfuerzos al conocimiento de la corriente de aire y se han pronunciado al respecto ([Walklate, 1992](#); [Walklate et al., 1996](#); [Cross et al., 2003](#); [Delele et al., 2007](#)). Sin embargo el estudio de estos fenómenos de flujo se ha realizado en túneles y en laboratorios a gran escala, donde se introducen errores de medición por las condiciones ambientales o estructuras del mismo laboratorio. En los últimos años la dinámica de fluidos computacional (CFD) ha sido empleada en los sistemas de producción agrícola según [Bartzanas et al. \(2013\)](#), marcando un camino para el conocimiento de la aerodinámica de los fluidos ([Tsay et al., 2004](#); [Herrera et al., 2014](#)). En el caso de los pulverizadores agrícolas con los modelos, se logra describir el comportamiento de la corriente de aire en diferentes regímenes de trabajo, y así poder lograr mejores diseños y controlar el efecto de la deriva de plaguicida en los tratamientos de arbustos fundamentalmente ([Fujimoto et al., 2016](#)). Diversos investigadores han estudiado la modelación de la corriente aire en pulverizadores agrícolas y han determinado relaciones entre sus parámetros y la calidad de la aspersión ([Herrera et al., 2005](#); [Han et al., 2014](#); [Salcedo et al., 2015](#); [Duga et al., 2017](#)). La originalidad del trabajo radica en lograr un modelo que describa con el mínimo de error la corriente de aire en el plano vertical de un pulverizador agrícola para arbustos.

En el trabajo se tiene como objetivo lograr un modelo mediante la dinámica de fluido computacional que pueda describir la corriente de aire del pulverizador Hatsuta en el plano vertical, donde se determina los vectores de velocidad del aire a una distancia de la salida del ventilador de 2,5 m y una altura similar.

MÉTODOS

Para la modelación se utilizó el paquete de fluidos FLUENT del software ANSYS 16.0. Los resultados de la modelación del flujo se comparan con mediciones experimentales en laboratorio realizadas al pulverizador a distancia de la salida del ventilador de 0,8, 1,6 y 2,4 m ([Rodrigues, 2005](#)).

En la realización de estos estudios se tomó como maqueta experimental el pulverizador marca HATSUTA modelo SS-420 ([Figura 1](#)), este equipo del tipo hidroneumático es considerado en la categoría de bajo caudal de aire y destinado a la aplicación de defensivos en plantaciones de café.



FIGURA 1. Pulverizador Hatsuta-420

En el trabajo se modela la corriente de aire del pulverizador por CFD en el plano vertical utilizando el paquete de fluidos FLUENT del software ANSYS 16.0, estos resultados son

comparados con datos de mediciones de laboratorio realizados al pulverizador referidos en el trabajo de [Rodrigues \(2005\)](#). El análisis de CFD se realiza a partir del perfil de velocidades del aire a la salida del difusor y la geometría del pulverizador Hatsuta, tomados del trabajo de [Herrera et al. \(2005\)](#). Para la corrida del programa se crea un dominio computacional, donde se mueve el fluido ([Figura 2](#)); en el dominio computacional se realiza el enmallado, definiéndose 6530 nodos y 6377 elementos para el desarrollo de las ecuaciones del programa. En el dominio computacional se coloca el ventilador del pulverizador axial con salida radial de diámetro 700 mm y las condiciones de velocidad inicial en la salida del ventilador, que en este caso, promedian 33 m/s. En las paredes laterales del dominio se considera la presión ambiental, ya que representa el aire tranquilo donde se inserta la corriente para que el flujo se desarrolle libremente. La densidad y viscosidad del aire se tomaron como $1,225 \text{ kg/m}^3$ y $1,7894 \text{ e}^{-5} \text{ kg/m-s}$ respectivamente. El modelo escogido para la corrida del programa es laminar viscoso con un criterio de convergencia de 1e^{-7} corriéndose 500 interacciones. Otros autores como [Salcedo et al. \(2015\)](#), utilizan en el plano los modelos con turbulencia ($k-\varepsilon$, SST $k-\omega$ y Reynolds Stress Model), considerando mejor ajuste, lo cual se debe a que introducen en la simulación, el árbol como área porosa y consideran la turbulencia del flujo.

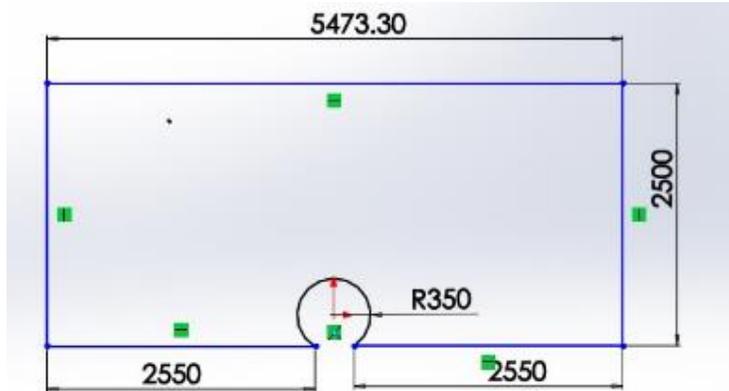


FIGURA 2. Dimensiones del dominio computacional en mm.

Las mediciones experimentales de la velocidad del aire en el plano vertical, se obtuvieron del trabajo de [Rodrigues \(2005\)](#). Las mediciones se realizaron en un local techado con paredes laterales a 15 m de distancia del pulverizador. La temperatura y la humedad se midió con un equipo digital marca HOMIS con una exactitud de $0,1^\circ\text{C}$ y una resolución de $0,01^\circ\text{C}$ para la temperatura y la humedad relativa con una precisión de $\pm 3 \%$. La velocidad del aire ambiental se midió con un anemómetro de paletas marca KESTREL 1000, con un error de $\pm 3 \%$ en la lectura y resolución en la medición de la velocidad del aire de 0.1 m/s , con rango de medición de $0,3$ a 40 m/s . La velocidad en los puntos seleccionado de la corriente de aire se midió con un anemómetro con sensor de hilo caliente modelo AVT/65, con rango de medición de 0 a 50 m/s y una resolución de 0.1 m/s .

Como procesamiento estadístico se realizó un análisis de regresión entre los datos obtenidos de la simulación (CFD) y los datos medidos experimentalmente. Se determina el Coeficiente de Determinación, que da la proporción de variación de la variable Y (mediciones experimentalmente), que es explicada por la variable X (datos obtenidos por modelación CFD) que es la variable predictora o explicativa. Cuanto mayor sea el coeficiente de determinación, mejor será la predicción. Si llegara a ser igual a 1 la variable predictora explicaría TODA la variación de Y, y las predicciones NO tendrían error.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el gráfico de la [Figura 3](#) se muestra el resultado de la modelación del flujo de aire en el plano vertical, representada por de la velocidad del aire en el dominio computacional. En la salida del difusor del ventilador se producen los mayores valores de velocidad, en toda la periferia se producen valores entre 28 y 36 m/s, pero es significativo que en la parte inferior del difusor se produzcan velocidades en el rango de 43 a 50 m/s mucho mayor que a la de salida del ventilador. Esto se debe a que en los pulverizadores con ventiladores axiales y salida radial, la parte inferior de la salida del difusor dirigida hacia el suelo está cerrada y el flujo de aire de esta zona se ve obligado a salir por las áreas cercanas a la misma, produciendo un mayor valor de flujo y por consiguiente vectores de velocidad de aire con valores mayores. A la zona de velocidad periférica inicial le siguen zonas de velocidad que decrecen en magnitud pero ocupan mayor radio a medida que se alejan de la salida del difusor del ventilador, característica del desgaste de una corriente de aire libre turbulenta, hasta llegar a valores entre 0 y 7 m/s ([Abramovich et al., 1984](#)).

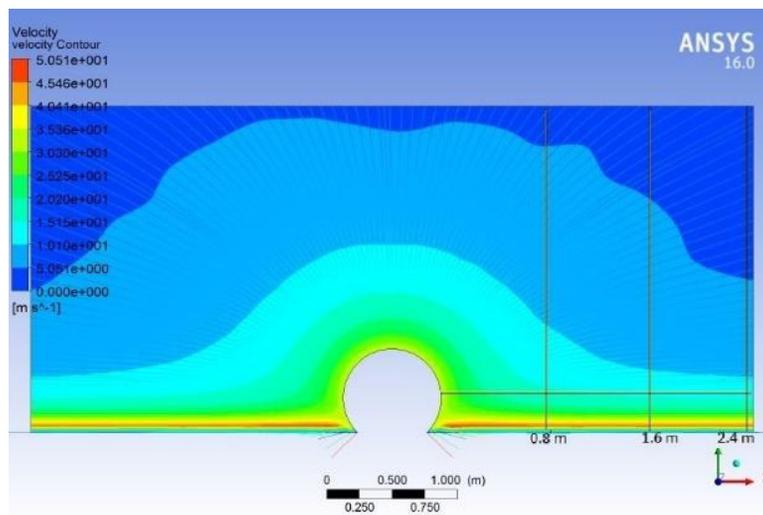


FIGURA 3. Flujo de aire modelado en el plano vertical del pulverizador Hatsuta-420 en función de la velocidad del aire.

En la [Figura 4](#) se muestran los gráficos de velocidad del aire según la altura y en el eje x las distancia de 0.8, 1.6 y 2.4 m de la salida del difusor del ventilador como lo señalan las líneas verticales en la [Figura 3](#).

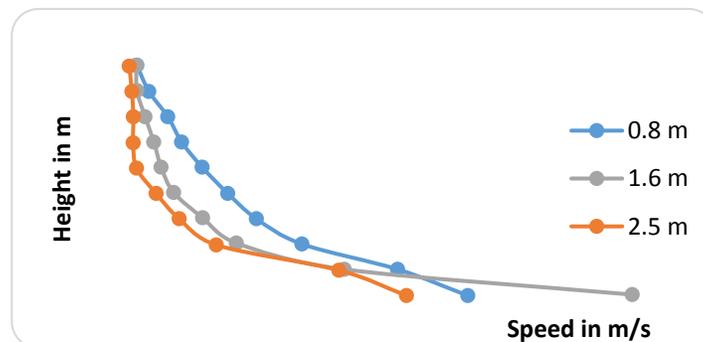


FIGURA 4. Velocidad del aire según la altura a diferentes distancias del ventilador del pulverizador Hatsuta

En la [Figura 4](#) se observan los tres curvas para las diferentes distancias estudiadas, mostrando un decrecimiento de la magnitud de la velocidad del aire a medida que aumenta la altura, igualmente decrece la velocidad con el aumento de la distancia en el plano horizontal de 0,8 a 2,4 m. La curva referida a la altura a la distancia del ventilador de 0,8 m se muestra con menos pendiente que las de 1,6 y 2,4 m de distancia del ventilador. En el caso que se utilice en una plantación de café, teniendo en cuenta el marco de siembra y el diámetro de la copa, el contacto del flujo con el arbusto estaría aproximadamente a la distancia de 0,8 m del ventilador, respondiendo a la curva de mayores valores de velocidad según la altura.

En la [Tabla 1](#) se presentan los resultados del análisis de regresión entre los datos determinados experimentalmente y los obtenidos en el modelo por CFD para las tres distancias a la salida seleccionadas en el plano vertical.

TABLA 1. Resultados del análisis de regresión

Distance from the Exit in m	Equation	R ²
0.8	$y = 0.973 x + 0.502$	0.996
1.6	$y = 1.546 x + 2.09$	0.992
2.4	$y = 0.497 x + 1.652$	0.976

En las [Figuras 5, 6 y 7](#) se realiza la comparación de los resultados de la modelación con los datos obtenidos en el laboratorio para cada distancia de la salida del ventilador, para su análisis. En la [Figura 5](#) se compara la velocidad del aire de la variante modelada contra la experimental a la distancia de 0,8 m del ventilador. Se observa un comportamiento similar de la velocidad determinada en el laboratorio con respecto a los resultados del modelo. Los resultados del análisis de regresión para esta variante se observan en la [Tabla 1](#) donde se muestra la ecuación de ajuste y un valor del coeficiente de determinación de 0,9969, lo que corrobora que mediante la modelación es válido poder predecir la velocidad en la corriente de aire de los pulverizadores.

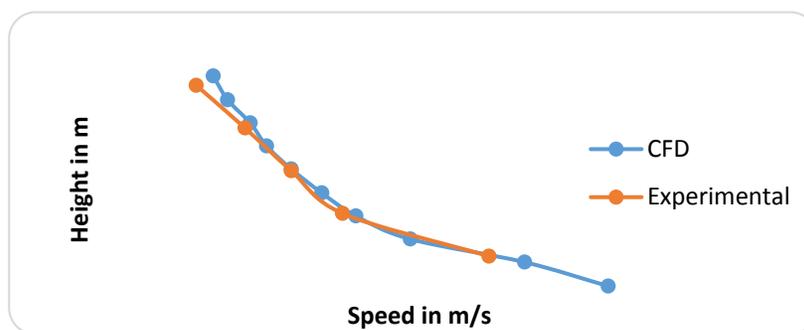


FIGURA 5. Velocidad del aire según la altura a 0.8 m de distancia de salida del ventilador.

En la [Figura 6](#) se observan las curvas de velocidad a 1,6 m de distancia de la salida del ventilador en el plano horizontal, en este caso la curva de los datos de laboratorio mantiene la misma tendencia que los datos resultantes de la modelación, pero con valores de velocidad ligeramente menores. El análisis de regresión de esta variante se observan en la [Tabla 1](#), donde se muestra la ecuación y un valor del coeficiente de determinación de 0,9929, aunque este menor que el obtenido a la distancia de 0,8 m se considera un valor de buena correlación entre los resultados experimentales y los modelados.

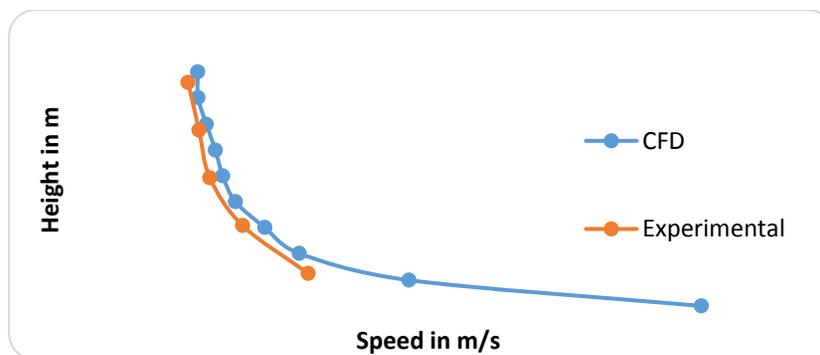


FIGURA 6. Velocidad del aire según la altura a 1,6 m de distancia de la salida del ventilador.

En la [Figura 7](#) se muestra la comparación entre los datos experimentales y modelados a la distancia de 2,5 m de la salida del ventilador, al igual que en el caso anterior se mantiene la tendencia de las curvas pero con valores de velocidad menores en el caso de la experimental. El análisis estadístico realizado considerando el proceso lineal se muestra en la [Tabla 1](#), en la misma se observa un coeficiente de determinación de 0,9766, aunque menor que los anteriores mantienen valores altos de ajuste. Por otro lado se observa a medida que aumenta la distancia a la salida del ventilador el coeficiente de determinación disminuye aunque se mantiene por encima del 0,97.

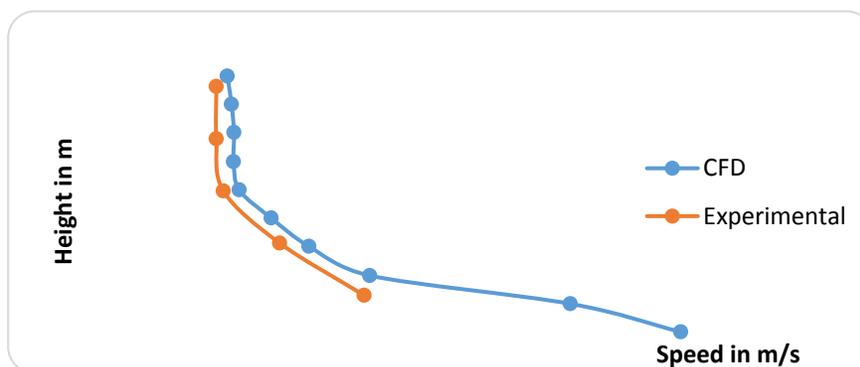


FIGURA 7. Velocidad del aire según la altura a 2,4 m de distancia del ventilador.

En general a las tres distancias donde se analizó la velocidad del aire en la corriente se obtuvo un buen ajuste con los resultados experimentales, expresado por los resultados del coeficiente de determinación con errores menores del 1% para las distancias a la salida de 0,8 y 1,6, y menor de 3% a la distancia de 2,4 m, lo que valida el uso del modelo, similares resultados en la validación de modelos con la dinámica de fluidos computarizada en 2D fueron reportados por [Salcedo et al. \(2015\)](#).

CONCLUSIONES

Los resultados del análisis corroboraron que existe correlación entre los datos del laboratorio y los resultantes del modelo con valores de R^2 de 0,9969, 0,9929 y 0,9766, por lo que el modelo estudiado es válido para el estudio del flujo de aire del pulverizador en el plano vertical.

En los resultados del modelo, la velocidad del aire en el centro de la salida del ventilador disminuye con el aumento de la distancia a este de 43 a 7,2 m/s y en la zona inferior de la salida se reportan velocidades de 43 a 50 m/s característica de los ventiladores axiales con salida radial utilizados en pulverizadores agrícolas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOVICH, G.N.; GIRSHOVICH, T.A.; KRASHENINNIKOV, S.I.; SEKUNDOV, A.N.; SMIRNOVA, I.P.: “The theory of turbulent jets”, *Moscow Izdatel Nauka*, 1984.
- BARTZANAS, T.; KACIRA, M.; ZHU, H.; KARMAKAR, S.; TAMIMI, E.; KATSOUULAS, N.; LEE, I.B.; KITTAS, C.: “Computational fluid dynamics applications to improve crop production systems”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 93: 151–167, 2013.
- CROSS, J.V.; WALKLATE, P.J.; MURRAY, R.A.; RICHARDSON, G.M.: “Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 3. Effects of air volumetric flow rate”, *Crop protection*, 22(2): 381–394, 2003, ISSN: 0261-2194.
- DELELE, M.A.; JAEKEN, P.; DEBAER, C.; BAETENS, K.; ENDALEW, A.M.; RAMON, H.; NICOLAÏ, B.M.; VERBOVEN, P.: “CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 55(1): 16–27, 2007, ISSN: 0168-1699, DOI: 10.1016/j.compag.2006.11.002.
- DUGA, A.T.; DELELE, M.A.; RUYSEN, K.; DEKEYSER, D.; NUYTTENS, D.; BYLEMANS, D.; NICOLAÏ, B.M.; VERBOVEN, P.: “Development and validation of a 3D CFD model of drift and its application to air-assisted orchard sprayers”, *Biosystems Engineering*, 154: 62–75, 2017, ISSN: 1537-5110, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.010.
- FUJIMOTO, A.; SATOW, T.; KISHIMOTO, T.: “Simulation of spray distribution with boom sprayer considering effect of wind for agricultural cloud computing analysis”, *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 9(4): 305–310, 2016.
- HAN, F.; WANG, D.; JIANG, J.; ZHU, X.: “Modeling the influence of forced ventilation on the dispersion of droplets ejected from roadheader-mounted external sprayer”, *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(1): 129–135, 2014, ISSN: 2095-2686, DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.12.022.
- HERRERA, P.M.I.; GARCÍA DE LA FIGAL COSTALES, A.E.; DE LAS CUEVAS MILÁN, H.; MARTINS TEIXEIRA, M.: “Evaluación mediante la Dinámica de los Fluidos por Computadora (CFD) de la corriente de aire del pulverizador agrícola ASS-800”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(2): 5–10, 2014, ISSN: 2071-0054.
- HERRERA, P.M.I.; MARTINS TEIXEIRA, M.; RODRIGUES, G.J.; DE LAS CUEVAS MILÁN, H.R.: “Aerodinámica del ventilador axial del pulverizador Hatsuta-420 empleado en frutales”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 14(3), 2005, ISSN: 2071-0054.
- RODRIGUES, G.J.: *Critérios rastreáveis na aplicação de inseticida no controle do bicho mineiro do cafeeiro. 2005. 108 f*, Tese (Doutorado em Mecanização Agrícola)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.[Links], PhD Thesis, 2005.
- SALCEDO, R.; GRANELL, R.; PALAU, G.; VALLET, A.; GARCERÁ, C.; CHUECA, P.; MOLTÓ, E.: “Design and validation of a 2D CFD model of the airflow produced by an airblast sprayer during pesticide treatments of citrus”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 116: 150–161, 2015, ISSN: 0168-1699, DOI: 10.1016/j.compag.2015.06.005.
- TSAY, J.-R.; LIANG, L.-S.; LU, L.-H.: “Evaluation of an air-assisted boom spraying system under a no-canopy condition using CFD simulation”, *Transactions of the ASAE*, 47(6): 1887, 2004.

WALKLATE, P.J.: “A simulation study of pesticide drift from an air-assisted orchard sprayer”, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 51: 263–283, 1992, ISSN: 0021-8634, DOI: 10.1016/0021-8634 (92)80042-Q.

WALKLATE, P.J.; WEINER, K.-L.; PARKIN, C.S.: “Analysis of and experimental measurements made on a moving air-assisted sprayer with two-dimensional air-jets penetrating a uniform crop canopy”, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(4): 365–377, 1996, ISSN: 0021-8634.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)