



Efecto del viento en el flujo de aire de un pulverizador

Wind effect on the airflow of a spray

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}

^IMinisterio de Educación Superior (MES), Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba.

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

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

RESUMEN. La aspersión de plaguicidas mediante pulverizadores asistidos por aire fundamenta su eficacia en el flujo de aire, el cual transporta el plaguicida al árbol, teniendo en cuenta que la misma desarrolla su trabajo en diferentes sistemas ambientales de dirección y velocidad del viento. En el trabajo se estudió la interacción de la velocidad y dirección del viento con el flujo de aire mediante el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD). Los pulverizadores trabajan normalmente en condiciones ambientales donde la velocidad del viento alcanza hasta 5 m•s⁻¹, y el conocimiento de la aerodinámica del flujo de aire aportará elementos para la regulación correcta de estos en las diferentes condiciones de trabajo. En este trabajo se hace un análisis de la aerodinámica del flujo de aire del pulverizador antes de entrar al follaje de la planta para velocidades del viento de 0, 1, 3 y 5 m•s⁻¹ y en direcciones del viento con ángulos de 45°, 90°, 135° y 180°. Se tomó como maqueta experimental la distribución de velocidad del aire del pulverizador TEYME modelo ASS-800 empleado en plantaciones de frutales. El trabajo se realizó en un plano horizontal que pasa por el centro del ventilador para definir la variación de las características aerodinámicas del flujo de aire producido por el ventilador. Tanto la velocidad y dirección del viento cambió el centro del flujo hacia la dirección del viento y la velocidad máxima del flujo disminuyó con el aumento de la velocidad del viento, de 38,6 a 34,3 m•s⁻¹.

Palabras clave: pulverizador asistido por aire, velocidad del aire, modelación en ANSYS.

ABSTRACT. Pesticide spraying by air-assisted sprayers bases its efficiency in air flow, which carries the pesticide to the tree, keeping in mind that it carries out its work in different environmental management systems and wind speed. In this work the interaction of the wind speed and direction were studied with the air flow through the use of computational fluid dynamics (CFD). Sprayers normally work in environmental conditions where the wind speed reaches up to 5 m•s⁻¹, and the knowledge of the aerodynamics of the airflow will provide elements for proper regulation of these in different working conditions. This paper show an analysis of the aerodynamics of the airflow before entering the spray to the foliage of the plant for wind speeds of 0, 1, 3 and 5 m•s⁻¹ and wind directions at angles of 45°, 90°, 135° and 180°. The velocity distribution of the air spray TEYME ASS-800 model used in orchards is taken as experimental model. The work was done in a horizontal plane passing through the center of the fan to define the variation of the aerodynamic characteristics of the air flow produced by the fan. Both the speed and direction of wind changed the flow to the center of the wind direction and the maximum flow rate decreased with increasing wind speed of 38.6 to 34.3 m•s⁻¹.

Keywords: sprayer assisted by air, wind speed, ANSYS modeling.

INTRODUCCIÓN

Los pulverizadores asistidos por corriente de aire han sido los preferidos para el control fitosanitario en grandes extensiones de cultivos por su alta productividad, pero son los que más contaminan el ambiente producto de la deriva, el flujo de aire es el responsable de transportar las gotas al árbol por lo que los cambios de diseño, operación y calibración de pulverizadores son fundamentales para lograr la mayor efectividad de los mismos en las diferentes condiciones ambientales donde realizan su trabajo. Durante los últimos años se han desarrollado estudios del flujo de aire en pulverizadores asistidos por aire y varios investigadores como: Brazee *et al.* (1998),

Walklate. (1992), Foqué *et al.* (2012), Cross *et al.* (2001) y Delele *et al.* (2007) han sembrado pautas en el tema buscando alcanzar la mayor eficacia en la utilización de estos equipos. Para garantizar la protección eficiente de los cultivos y la protección del medio ambiente se requiere estudiar a fondo el flujo de aire de los rociadores en su interacción con la atmósfera, con vistas a mejorar el diseño, la calibración y los parámetros de operación (Herrera *et al.*, 2012); Walklate *et al.*, 1996). Los estudios de flujo en este tipo de aplicaciones se realizan con experimentos de campo a gran escala que son caros y difíciles de realizar y se introducen incertidumbres debidas a la

variabilidad de las condiciones ambientales. La dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha convertido en una manera práctica de aportar al diseño del pulverizador y a los parámetros de operación y se han realizado trabajos que corroboran el empleo de esta técnica de una manera controlada (Tsay *et al.* 2004; Han *et al.*, 2014; Herrera *et al.*, 2006; Herrera *et al.*, 2014). El desarrollo del flujo de aire de los pulverizadores ha sido descrito por ambas correlaciones semi-empíricas y una completa solución de las leyes fundamentales de conservación, autores como Abramovich (1963), Walklate *et al.* (1996) y Delele *et al.* (2005) han desarrollado modelos.

Estudios realizados por Herrera *et al.* (2006) se analizó el efecto de la velocidad de traslación del pulverizador en el flujo de aire en el proceso de trabajo, utilizando el plano horizontal del flujo de aire y se auxilia de herramientas de modelación por computadora en ANSYS, se compara el flujo de aire con el pulverizador sin movimiento y este a diferentes velocidades de traslación, pero no se incluyen el efecto de las condiciones ambientales del viento en dirección y velocidad. En este trabajo se estudia la interacción del flujo de aire del pulverizador con la velocidad y dirección del viento, los pulverizadores trabajan normalmente en condiciones ambientales donde la velocidad del viento alcanza hasta 5 m s⁻¹, por lo que es necesario estudiar su efecto en el flujo de aire y así poder tener elementos para la regulación correcta de estos equipos en diferentes condiciones ambientales. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo de CFD flujo de aire de atomizadores asistidas por aire a partir de la integración de modelos de flujo de aire validados anteriormente por Herrera *et al.* (2006) y los modelos de flujo de aire atmosféricos teniendo en cuenta el efecto de la velocidad del viento y su dirección. En este artículo se utilizan parámetros de la velocidad del aire y geometría de ventiladores utilizados en pulverizadores comerciales. En el estudio se analiza el flujo del pulverizador sometido a velocidades de viento de 1, 3 y 5 m·s⁻¹ en dirección de 90° con respecto al movimiento del flujo y el efecto de la dirección del viento con ángulos de 45°, 90°, 135° y 180°, además se analiza en condiciones del viento de velocidad cero. Se utilizó como maqueta experimental la distribución de velocidad del aire del pulverizador TEYME modelo ASS-800 empleado en plantaciones de frutales en Cuba. El trabajo se realizó en un plano horizontal que pasa por el centro del ventilador para definir la variación de las características aerodinámicas del flujo de aire en esta zona de flujo. El modelo resultante se puede utilizar para mejorar las características de diseño y la calibración de los parámetros de funcionamiento de los pulverizadores para una mejor eficiencia y menor impacto ambiental.

MÉTODOS

En el trabajo se utilizó el pulverizador integral TEYME modelo ASS800 asistido por aire con un ventilador de flujo axial “VL-765” de 750 mm de diámetro y un canal de salida de 115 o 135 mm de anchos a seleccionar. Los datos de velocidad del aire a la salida del ventilador para la modelación en computadora del flujo fueron obtenidos del trabajo de Herrera *et al.* (2013), estas investigaciones se realizaron en la Empresa de Cítricos Victoria de Girón en la provincia de Matanzas. Las mediciones se realizaron en un local techado con paredes laterales a 15 m de distancia del pulverizador, en el local de mediciones se controló continuamente la temperatura y la humedad mediante equipo marca HOMIS modelo Termometer y la velocidad

del aire ambiental con un anemómetro de paletas marca KESTREL 1000, con rango de medición de 0,3 a 40 m s⁻¹ y con un error de ± 3% en la lectura. Para medir la velocidad del aire se utilizó un tubo “Pitot” conectado a un manómetro diferencial que utiliza alcohol como líquido manométrico, obteniéndose el valor de la presión dinámica en cada punto. El pulverizador se trabajó con un tractor a un régimen de 540 rpm y genera un caudal de aire de 22,37 m³·s⁻¹.

El punto seleccionado es el # 5 a la derecha de la salida del ventilador, la distribución de velocidades se muestra en la Tabla 1 tomado de Herrera *et al.* (2013), la velocidad promedio es de 36 m·s⁻¹ y el ancho de la salida es de 0,115 m.

TABLA 1. Distribución de velocidades del aire seleccionadas

Posición	a	b	c	d
Velocidad del aire en m·s ⁻¹	33,5	37,45	41,03	37,45

El análisis de CFD se realizó empleando el programa ANSYS 5.3, a través de la solución de las ecuaciones de momento y de continuidad que se aplican en la dinámica de un flujo de aire se obtienen los perfiles de velocidades y su distribución. La simulación se basa en la teoría del chorro plano libre, clasificado dentro de la categoría de los flujos que no circulan entre paredes rígidas y que sale de un orificio dentro de un ambiente en reposo o en movimiento descrita por Abramovich (1963). Trabajos realizados por Herrera *et al.* (2006) demostraron la adecuación de estos modelos a los resultados experimentales. El análisis de CFD se realiza a partir del perfil de velocidades del aire a la salida del difusor y la geometría de la salida del aire del ventilador. La modelación del flujo de aire del pulverizador se realiza en un plano horizontal de la corriente de aire que parte del centro del ventilador, en los resultados de la modelación se muestran los perfiles de velocidades que forman el flujo de aire. En el estudio se analiza el flujo del pulverizador sometido a velocidades de viento de 1, 3 y 5 m·s⁻¹ en dirección de 90° con respecto al movimiento del flujo y el efecto de la dirección del viento con ángulos de 45°, 90°, 135° y 180°, además se analiza en condiciones del viento de velocidad cero.

El dominio computacional donde se mueve el fluido para la modelación en CFD se tomó el diseñado en el trabajo de Herrera *et al.* (2014), en este elemento se realiza el enmallado que define los nodos para el desarrollo de las ecuaciones de Navier-Stokes por el método de elementos finitos y los perfiles de velocidad horizontal se modelaron hasta 2,4 m de distancia desde el origen del flujo. Para la solución del problema en el modelo se definió un enmallado con 924 nodos y 861 elementos.

Las ecuaciones diferenciales que sustentan la modelación para el movimiento en el plano son:

a) Ecuación de movimiento:

$$dv / dt + v (dv / dy) + w (dw / dz) = (F / \rho) \cdot (dt / dz) \quad (1)$$

b) Ecuación de continuidad:

$$(dv / dy) + (dw / dz) = \quad (2)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las velocidades del flujo de aire del pulverizador fueron tomadas en un plano horizontal que pasa por el centro

del ventilador y se desplaza hasta 2,4 m de distancia desde el origen del flujo.

En la Figura 1 se muestra el flujo de aire del pulverizador sometido un viento con dirección de 90° con respecto a éste, a velocidades de 1, 3 y 5 $m \cdot s^{-1}$, además se representa el flujo en aire tranquilo a modo de referencia. En el flujo se definen las distintas regiones de la corriente descritas por Abramovich (1963) para los flujos libre turbulento. El comportamiento del flujo sin velocidad del viento a la distancia de 2,4 de la salida, alcanza velocidades de 5 a 10 $m \cdot s^{-1}$ y el flujo se mantiene a medida que se aleja del origen sobre el eje que pasa por el centro de la salida del ventilador, ya a velocidades del viento de 1 $m \cdot s^{-1}$ este cambia su configuración no perdiendo en alcance pero si se desplaza del eje central a partir de los 0,60 m de la salida. Para velocidades de 3 y 5 $m \cdot s^{-1}$ se produce el mayor efecto sobre el flujo de desplazamiento del eje de este en la dirección del viento y se reduce su desarrollo sobre el eje de salida del ventilador a 1,5 y 1m de distancia respectivamente, afectando así el alcance de la misma, lo que no es recomendable el uso de pulverizadores con esta configuración a velocidades del viento mayor que 3 $m \cdot s^{-1}$.

En la Figura 2 se muestra la distribución de la velocidad del aire en el flujo para una dirección del viento de 90° con respecto al eje del flujo y velocidades del viento de 1, 3 y 5 $m \cdot s^{-1}$ y sin viento, el grafico se representa a una distancia del origen de 0,525 m, esta posición es antes de llegar la misma a alcanzar el follaje del árbol osea no se considera el efecto de este en el flujo. En el analisis se toma en cuenta la variacion en la posición del eje de máxima velocidad del flujo y la magnitud de ésta. Los perfiles de distribución de velocidades mostradas en la Figura 2, cumplen con el comportamiento del perfil de Schliting (1972) para determinar las velocidades en el desarrollo del espesor del flujo.

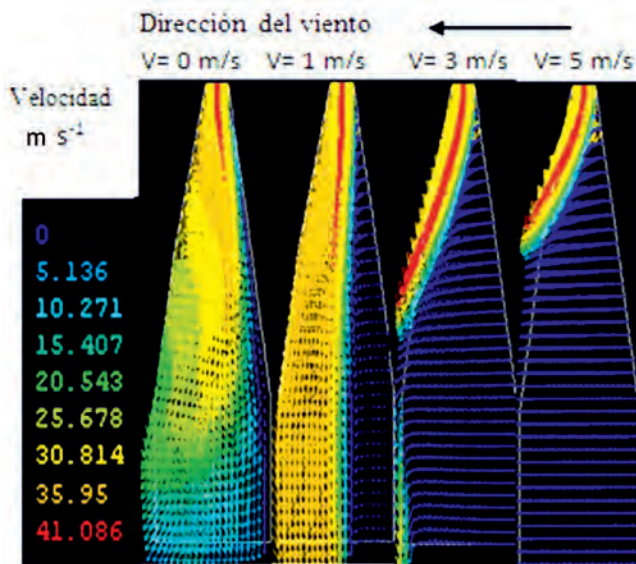


FIGURA 1. Flujo de aire del pulverizador con viento en dirección a 90° y velocidades de 1, 3 y 5 $m \cdot s^{-1}$.

El perfil del flujo del pulverizador con velocidad del viento cero tiene el eje de máxima velocidad desplazado a la izquierda 0,156 m con una velocidad máxima de 38,599 $m \cdot s^{-1}$. El flujo

de aire del pulverizador con la velocidad del viento de 1 $m \cdot s^{-1}$, desplaza el eje de máxima velocidad a la derecha 0,156 m y coincide con el eje que pasa por el centro del ventilador con una velocidad máxima de 38,575 $m \cdot s^{-1}$, a 3 $m \cdot s^{-1}$ se desvía 0,234 m a la derecha del eje con velocidad en el flujo de 38 $m \cdot s^{-1}$ y a 5 $m \cdot s^{-1}$ de velocidad del viento se desplaza a 0,358 m y es significativo en este caso que la velocidad máxima disminuye a 34 $m \cdot s^{-1}$. Con el aumento de la velocidad del viento de 1 hasta 5 $m \cdot s^{-1}$ el eje de máxima velocidad se desplaza a la derecha hasta 0,515 m y la velocidad máxima del flujo disminuye en 4,3 $m \cdot s^{-1}$, aunque en el caso de la velocidad del aire no es proporcional al aumento en la velocidad del viento.

La desviación del eje de máxima velocidad a la distancia de 0,525 m de distancia del origen del flujo es significativa a velocidades del viento de 3 y 5 $m \cdot s^{-1}$, esta trayectoria del flujo no permite la incidencia de este de forma perpendicular al follaje del árbol, lo que disminuye la penetración en este y aumenta la deriva, resultados similares han sido tratados por Endalew *et al.* (2010). El control de la velocidad y dirección del viento en las aplicaciones de plaguicidas es fundamental para lograr un trabajo eficiente con el pulverizador, ya que como se observa este afecta el desarrollo del flujo de aire.

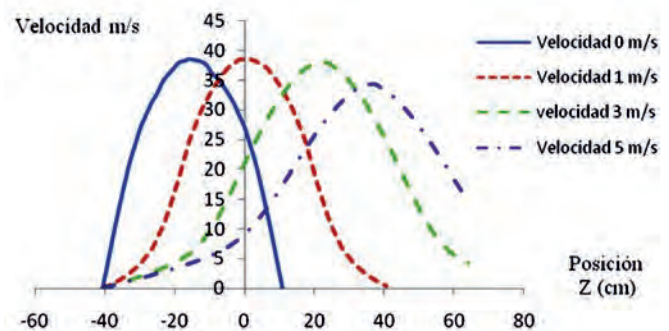


FIGURA 2. Distribución de la velocidad del aire en el flujo del pulverizador con el viento en dirección a 90° .

En la Figura 3 se muestra el efecto de la dirección del viento con ángulos de 45° , 90° , 135° y 180° con respecto a la dirección del flujo de aire del pulverizador a una velocidad del viento de 5 $m \cdot s^{-1}$. Al analizar el efecto de la dirección del viento a 45° , 90° y 135° en la Figura 3 se observa que la mayor desviación de la máxima velocidad del flujo en el eje central del ventilador se produce a 90° reduciendo a 1 m el flujo cercano al eje del ventilador, con 45° de dirección del viento el flujo se mantiene cercano al eje en 1,2 m y a 135° el flujo se mantiene cercano al eje hasta 1,6 m, en estos casos considerando 5 $m \cdot s^{-1}$ de velocidad del viento es cuestionable el trabajo del pulverizador en estas condiciones, ya que el flujo no penetra perpendicular al follaje del árbol al desviarse del eje que pasa por el centro del ventilador y no se logra la cobertura adecuada dentro del follaje del árbol.

En el caso que el viento se produce en un ángulo de 180° , el flujo se desarrolló hasta los 2,4 m de distancia del origen alcanzando velocidades de 5 a 10 $m \cdot s^{-1}$, en esta dirección el flujo del aire mantiene las características aerodinámicas que le proporcionan mayor alcance similar al desarrollo del flujo en aire tranquilo visto en la Figura 1.

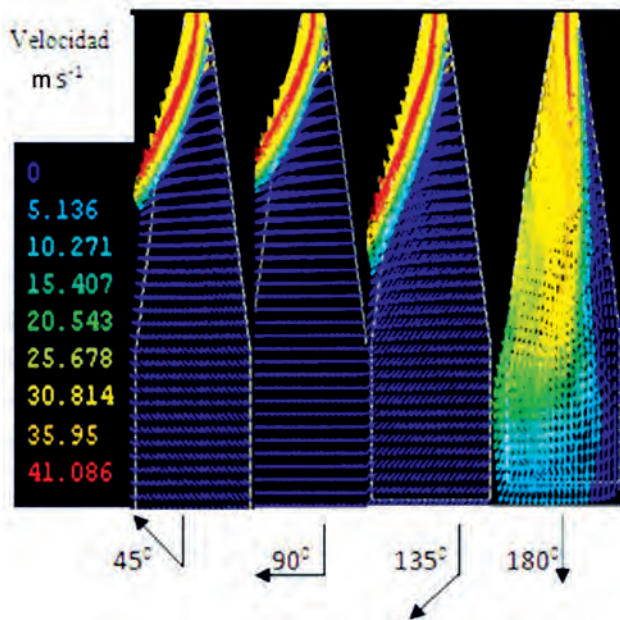


FIGURA 3. Flujo de aire del pulverizador con velocidad del viento 5 m·s⁻¹ y dirección de 45°, 90°, 135° y 180°.

En la Figura 4 se muestra la distribución de la velocidad del aire en el flujo para direcciones del viento con ángulos de 45°, 90°, 135° y 180° y velocidad del viento de 5 m·s⁻¹, el grafico se

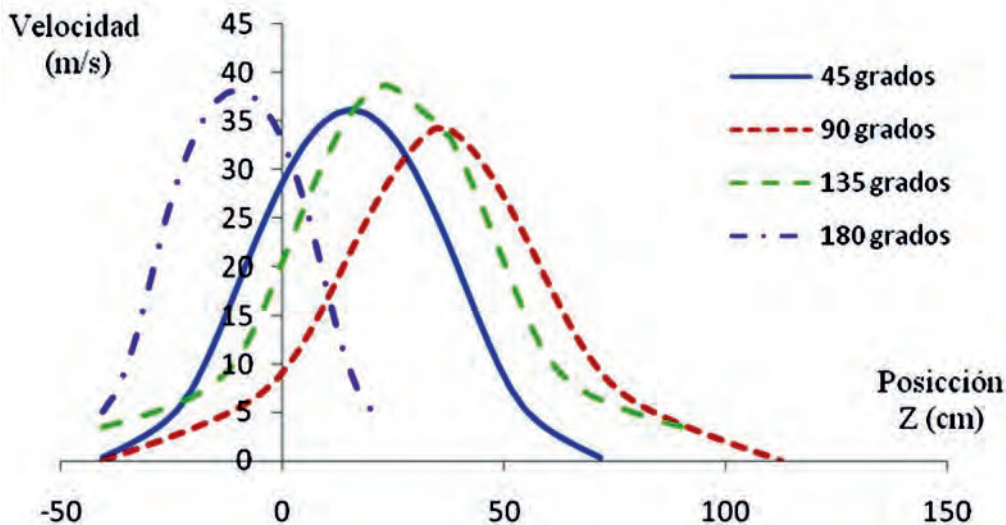


FIGURA 4. Distribución de la velocidad del aire en el flujo del pulverizador con el viento en diferentes direcciones.

CONCLUSIONES

- En este artículo se modela el flujo de un pulverizador asistido por aire y se estudia la zona cercana al origen de salida del aire. Se realiza un modelado clásico y se muestra el efecto de la dirección y velocidad del viento ambiental en el flujo del pulverizador. El efecto de la velocidad y dirección del viento en el flujo de aire se estudió a partir de los parámetros del pulverizador TEYME modelo ASS800 y se llegaron a resultados cualitativamente significativos. Todos los resultados de

representa a una distancia del origen de 0,525 m, posición esta antes de llegar al follaje del árbol. Los perfiles de distribución de velocidades mostradas en la Figura 4, cumplen con el comportamiento del perfil de Schliting (1972) para determinar las velocidades en el espesor del flujo. En la dirección del viento a 180°, de cierta manera el flujo de aire se beneficia al mantener el valor máximo de velocidad 38,14 m·s⁻¹ y se desvía del centro del eje 0,11 cm a la izquierda, lo que hace que el flujo del pulverizador se desarrolle sobre el eje que pasa por el centro de la salida del ventilador, entrando de forma perpendicular al follaje beneficiando la penetración en este.

La dirección del viento que mas afecta el flujo de aire del pulverizador es la de 90° con respecto a la dirección de este, como se observa en la figura se desvía 0,359 m a la derecha del eje que pasa por el centro de la salida de flujo del ventilador y la velocidad máxima disminuye en 4,28 m·s⁻¹ con respecto al efecto de la dirección a 180°; en el caso de 45° el flujo se desvía 0,187 m y disminuye su valor máximo de velocidad en 2,78 m·s⁻¹. Con el viento en dirección de 135° la velocidad mayor en el flujo es de 38,6 m·s⁻¹ y se desvía 0,234 m a la derecha del eje. En general no existe un comportamiento proporcional con el comportamiento del aumento en el ángulo de la dirección del viento pero si es significativo la variación a 90° y la limitación del uso del pulverizador en estas condiciones ambientales.

este estudio mostraron que la velocidad máxima del flujo disminuyó con el aumento de la velocidad del viento, de 38,6 a 34,3 m·s⁻¹ a la distancia de 0,525 m del origen de salida del flujo. Tanto la velocidad y dirección del viento cambió el centro del flujo hacia la dirección del viento. Este cambio también fue mayor para las más altas velocidades de 3 a 5 m·s⁻¹ y direcciones del viento de 45°, 90° y 135°. Tal modelo puede ser una fuente confiable de información para los cambios de diseño, operación y calibración de pulverizadores asistidos por aire y puede ser enfoque alternativo para predecir la deriva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOVICH, G.N.: *The Theory of Turbulent jets*, Fitzmatgiz, 1960, English translation, edited by L. H. Schindel. M.I.T. Press, USA, pp. 1-671, 1963.
- BRAZEE, R. D.; FOX, DI PRINZIO, A.; BEHMER, S.; GIULIETTI, L.; MAGDALENA, J.C.: "Pérdidas provocadas por pulverizadores hidroneumáticos en fruticultura", *Memorias de Ingeniería Rural y Mecanización Agraria en el Ámbito Latinoamericano*, 115pp., Editorial Board, La Plata, Argentina, 1998.
- 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: 1. Effects of spray liquid flow rate", *Crop Protection*, ISSN-0261-2194 20 (1), 13–30. 2001.
- DELELE, M.A., DE MOOR, A., SONCK, B., RAMON, H., NICOLAÏ, B.M., VERBOVEN, P.: "Modelling and validation of the air flow generated by a cross flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed", *Biosystems Engineering*, ISSN-1537-5110, 92 (2), 165–174. 2005.
- ENDALEW, A.M.; DEBAER, C.; RUTTEN, N.; VERCAMMEN, J.; DELELE, M.A.; RAMON, H.; NICOLAÏ, B.M.; VERBOVEN, P.: "A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow" [on line], *Computers and Electronics in Agriculture*, ISSN-0168-1699, DOI-10.1016/j.compag.2009.11.005, 71 (2): 128-136, May, 2010.
- FOQUÉ, D.; PIETERS, J.G.; NUYTENS, D.: "Spray deposition and distribution in a bay laurel crop as affected by nozzle type, air assistance and spray direction when using vertical spray booms" [on line], *Crop Protection*, ISSN-0261-2194, DOI-10.1016/j.cropro.2012.05.020, 41 (0): 77-87, November, 2012.
- HAN, F.; WANG, D.; JIANG, J.; ZHU, X.: "Modeling the influence of forced ventilation on the dispersion of droplets ejected from road header-mounted external sprayer" [on line], *International Journal of Mining Science and Technology*, ISSN-2095-2686, DOI-10.1016/j.ijmst.2013.12.022, 24 (1): 129-135, January, 2014.
- HERRERA, M.I.; A. GARCÍA DE LA FIGAL; E. RAMOS; M. TEXEIRA: "Simulación mediante la dinámica de fluidos por computadora del efecto de la velocidad del viento en el desempeño de los pulverizadores agrícolas de ventilador", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN-1010-2760, 21 (1): 19-25, 2012.
- HERRERA, M.I.; A. GARCÍA DE LA FIGAL; H. DE LAS CUEVAS MILÁN: "Análisis de la aerodinámica del ventilador del pulverizador ASS-800 empleado en frutales", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN-1010-2760, 22 (4): 15-19, 2013.
- HERRERA, M.I.; A. GARCÍA DE LA FIGAL; H. DE LAS CUEVAS MILÁN; M. TEXEIRA: "Evaluación mediante la Dinámica de los Fluidos por Computadora (CFD) de la corriente de aire del pulverizador agrícola ASS-800", *Revistas Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN-1010-2760, 23 (2): 5-10, mayo de 2014.
- HERRERA, M.I.; M. M. TEXEIRA; G. J. RODRÍGUEZ; H. DE LAS CUEVAS: "Modelación mediante la dinámica de fluidos computacional de la corriente de aire de un pulverizador", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN-1010-2760, 15 (1): 17-18, 2006.
- SCHLITING, h.: *Teoría de la capa limite*, 68pp., Versión en español de la 5ta Edición. Ed. Mc Graw-Hill, 1972.
- TSAY J R; L-S LIANG AND L-H LU: "Evaluation of an Air-Assisted Boom Spraying System under a No-Canopy Condition Using CFD Simulation", *Transactions of the ASAE*, ISSN-0001-2351, 47 (6): 2004.
- WALKLATE, P.J.: "A simulation study of pesticide drift from an air-assisted orchard sprayer" [on line], *Journal of Agricultural Engineering Research*, ISSN-0021-8634, DOI-10.1016/0021-8634 (92)80042-Q, 51 (0): 263-283, January, 1992.
- 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*, ISSN-0021-8634, 63 (4), 365–377. 1996.

Recibido: 27/05/2014.

Aprobado: 09/12/2014.

Publicado: 28/01/2015.