

# Desempeño operacional de las boquillas hidráulicas JA-1 y JA-2 utilizadas en pulverizadores hidroneumáticos

## *Operational Performance of JA-1 and JA-2 Hydraulic Nozzles Used in Hydropneumatic Sprayers*

 Mario Ignacio Herrera-Prat<sup>1\*</sup>,  Armando García de la Figal-Costales<sup>1</sup>,  
 Héctor de las Cuevas-Milán<sup>1</sup> and  Arlenes Sena-Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Agraria de La Habana, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.  
E-mail: [areloy@unah.edu.cu](mailto:areloy@unah.edu.cu), [cuevasm@nauta.cu](mailto:cuevasm@nauta.cu), [arlenes@unah.edu.cu](mailto:arlenes@unah.edu.cu)

\*Autor para correspondencia: Mario Ignacio Herrera-Prat, e-mail: [marioignacio@unah.edu.cu](mailto:marioignacio@unah.edu.cu)

**RESUMEN:** Las boquillas aspersoras hidráulicas son muy importantes en los pulverizadores hidroneumáticos y son las principales encargadas de dividir el líquido en gotas. Este trabajo tiene como objetivo estudiar el desempeño operativo de dos tipos de boquillas de chorro cónico, a cuatro presiones de trabajo. Se evaluaron el caudal de la tobera y la influencia de la presión en el coeficiente de descarga. Las boquillas aspersoras JA-1 y JA-2 mostraron caudales, estadísticamente iguales a los proporcionados por el fabricante. El coeficiente de descarga de los dos juegos de toberas fue inferior al valor propuesto para los orificios de flujo turbulento, siendo valores inferiores para la serie con menor diámetro de orificio. La distribución volumétrica varía en dependencia del caudal y presión nominal. Para establecer parámetros de trabajo en los equipos de pulverización, es fundamental conocer las características de las boquillas pulverizadoras y su estado de funcionamiento.

**Palabras clave:** chorro cónico, tecnología de aplicación, pesticidas, caudal.

**ABSTRACT:** Hydraulic spray nozzles are very important in hydropneumatic sprayers and are primarily responsible for dividing the liquid into droplets. This study evaluates the operational performance of two types of conical jet nozzles at four operating pressures. The nozzle flow rate and the influence of pressure on the discharge coefficient were evaluated. Spray nozzles JA-1 and JA-2 showed flow rates statistically equal to those provided by the manufacturer. The discharge coefficient of both nozzle sets was lower than the value proposed for turbulent flow orifices, with lower values for the series with the smaller orifice diameter. Volumetric distribution varies depending on the flow rate and nominal pressure. To establish operating parameters for spraying equipment, it is essential to understand the characteristics of the spray nozzles and their operating status.

**Keywords:** Conical Jet, Application Technology, Pesticides, Flow Rate.

## INTRODUCCIÓN

La tecnología de aplicación de fitosanitarios ha experimentado avances significativos en las últimas décadas, impulsados por la necesidad de optimizar la eficiencia agronómica y reducir el impacto ambiental (Rodríguez, 2005). Sin embargo, persisten desafíos críticos, como la aplicación ineficiente de pesticidas, que puede resultar en una deposición inadecuada del principio activo ya sea por exceso, aumentando el riesgo de contaminación, o por defecto, comprometiendo el control de plagas (Ferguson *et al.*, 2018). Esta problemática deriva, en gran medida, de un enfoque desequilibrado que prioriza la selección del producto químico sobre la técnica

de aplicación, a pesar de que esta última determina hasta el 70% del éxito del tratamiento (Garcerá *et al.*, 2017). En un contexto global que exige sostenibilidad, con regulaciones más estrictas (ej. European Union Directive 2019/782 (2019) y consumidores demandando alimentos con menores residuos, la pulverización de precisión se ha vuelto indispensable. Aquí, el tamaño de las gotas emerge como un factor clave: influye directamente en la cobertura foliar, la deriva y la retención del producto (Butler *et al.*, 2020). Tecnologías como la pulverización asistida por sensores y boquillas anti-deriva (ej. de aire inducido) buscan optimizar este parámetro, pero su eficacia depende de una calibración rigurosa basada en evidencia (Grella *et al.*, 2017).

Recibido: 15/01/2025

Aceptado: 08/05/2025

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

**Contribución de los autores:** **Conceptualización:** M. Herrera. **Curación de datos:** M. Herrera. **Análisis formal:** M. Herrera, A. García de la Figal. **Investigación:** M. Herrera, A. García de la Figal, H. de las Cuevas, A. Sena. **Metodología:** M. Herrera. **Supervisión:** M. Herrera, A. García de la Figal. **Validación:** M. Herrera, H. de las Cuevas. **Visualización:** M. Herrera, H. de las Cuevas. **Redacción - borrador original:** M. Herrera, H. de las Cuevas, A. Sena. **Redacción - revisión y edición:** M. Herrera, A. García de la Figal.

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 los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Las boquillas hidráulicas, ampliamente utilizadas en la agricultura convencional (85% de los equipos, según datos de la FAO (2021), son el componente central que define el espectro de gotas (Rodrigues, 2005). Estudios recientes demuestran que su desempeño está determinado por: características geométricas (ángulo de chorro, tipo de turbulencia inducida); condiciones operativas (presión, caudal, formulación del caldo); factores ambientales (viento, humedad relativa) (Nuyttens et al., 2023). En particular, las boquillas de cono hueco -recomendadas para insecticidas- generan un perfil de distribución heterogéneo, con mayor deposición en la periferia del chorro (Cunha et al., 2023). No obstante, su eficiencia depende críticamente de mantener presiones óptimas (200-1000 kPa) y de monitorear el coeficiente de descarga (Cd), cuyo valor ideal (0.611) asegura flujo turbulento y uniformidad (ISO 25358, 2023). Este trabajo evalúa el desempeño operativo de boquillas de cono hueco bajo distintas presiones, empleando metodologías trazables ASABE S572.1. (2023) para generar parámetros que optimicen: deposición objetivo ( $\geq 30$  impactos/cm<sup>2</sup> en folíolos, según criterios de la EPA); minimización de deriva (<10% de gotas <150  $\mu\text{m}$  en condiciones de viento  $\leq 10$  km/h); eficiencia económica (reducción de hasta 20% en uso de insumos; datos de Foquino et al. (2023). La integración de estos avances técnicos con prácticas agronómicas sostenibles no solo mejora la productividad, sino que también alinea la agricultura con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 12 y 15), reduciendo riesgos para operadores y ecosistemas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Mecanización Agrícola del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Federal de Viçosa, utilizando un banco de pruebas construido de acuerdo con la Norma ISO 5682/1 (1986), diseñado para determinar el caudal y la distribución volumétrica de las boquillas (Rodrigues et al., 2004). La presión hidráulica fue producida por una bomba de pistón, con un caudal máximo de 20 L min<sup>-1</sup> y una presión máxima de 500 kPa, y accionada por un motor eléctrico de 220 V con una potencia equivalente a 2,2 kW. El banco dispone de un sistema de regulación de presión y filtración del líquido.

La presión se midió con un manómetro Famagras calibrado, cuya capacidad nominal es de 1578,6 kPa y con una resolución de 19,73 kPa (Rodrigues et al., 2004).

La calibración se realizó utilizando un sistema de masa estándar para obtener la relación entre la presión indicada y real. El sistema estuvo compuesto por una bomba hidráulica, modelo PH-80, y un cilindro hidráulico de pistón hueco, modelo RCH-120, marca Enerpac. Este sistema se montó sobre una estructura de reacción equipada con una varilla metálica, para colocar masas en incrementos de aproximadamente 10 kg. Se realizaron tres cargas de aproximadamente 205 kg, con el objetivo de verificar la repetibilidad de las lecturas. Esto permitió obtener la curva de calibración del manómetro en estudio. El manómetro calibrado se fijó en el banco de pruebas, donde se realizó el estudio de las boquillas pulverizadoras. Se utilizaron boquillas cónicas fabricadas en cerámica, modelo JA-1 (1 mm de diámetro) y JA-2 (1,3 mm de diámetro), producidas por la empresa Jacto, recomendadas para trabajar preferentemente entre presiones de 414 a 1448 kPa en pulverizadores hidroneumáticos. Las características técnicas de flujo de las boquillas a evaluar se muestran en la Tabla 1.

Para el estudio del caudal se eligieron aleatoriamente 14 boquillas de la serie JA-1 y 14 de la serie JA-2, las cuales fueron evaluadas de forma individual. Las boquillas se colocaron en el banco de pruebas y se les colocó un tubo de plástico para dirigir el líquido rociado a un vaso recolector con una capacidad de 2000 mL y una precisión de 10 mL. Las evaluaciones se realizaron a cuatro presiones, la mínima y máxima recomendadas por el fabricante y dos intermedias, es decir 414, 620, 1034 y 1448 kPa. Cada medición se realizó durante 60 segundos, con cinco repeticiones. El análisis estadístico de los datos consistió en determinar la precisión de las mediciones, aplicando la prueba “t” de Student para una confiabilidad del 95%. Se utilizó la Ecuación 1 para determinar el error de medición del flujo. El error máximo permitido para este tipo de estudio fue del 5%. Para el error calculado inferior al límite establecido se aceptó el promedio como representativo de la muestra (Sánchez, 1988).

$$L = \frac{t^* DP}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

donde:

L = error absoluto, L;

t = valor “t” del estudiante;

DP = desviación estándar;

n = número de muestras.

**Tabla 1.** Caudal nominal de boquillas hidráulicas de cono vacío evaluadas Presión (kPa) Caudal nominal (L min<sup>-1</sup>) Boquilla JA-1 Boquilla JA-2 414 0,32 0,64 620 0,38 0,76 1034 0,50 1,00 1448 0,55 1,10, Fuente: Jacto S.A.

| Presión (kPa) | Caudal nominal (L min <sup>-1</sup> ) |               |
|---------------|---------------------------------------|---------------|
|               | Boquilla JA-1                         | Boquilla JA-2 |
| 414           | 0,32                                  | 0,64          |
| 620           | 0,38                                  | 0,76          |
| 1034          | 0,50                                  | 1,00          |
| 1448          | 0,55                                  | 1,10          |

A partir de la determinación del error absoluto se calculó el error porcentual referido a la media. Para realizar los cálculos se creó una tabla utilizando el programa “Excel”. Se realizó otro estudio para determinar el coeficiente de descarga (CD). Este coeficiente utiliza todos los factores que caracterizan la dinámica de descarga de una boquilla determinada (Rodrigues *et al.*, 2004). La velocidad del líquido al pasar por el orificio de la boquilla es fundamental en el proceso de pulverización.

Se puede calcular utilizando la Ecuación 2 (Srivastava *et al.*, 1993).

$$v_i = C_v \left[ 2 \frac{\Delta p}{\rho_1} \right]^n \quad (2)$$

donde:

$v_i$  = velocidad del líquido, m s<sup>-1</sup>;

$C_v$  = coeficiente de velocidad;

$\Delta p$  = presión total, Pa;

$n$  = coeficiente que depende del régimen de flujo y del tipo de emisor, para flujo turbulento equivale a 0,5;

$\rho_1$  = densidad del líquido, kg m<sup>-3</sup>.

El caudal proporcionado por la boquilla es otro factor importante y puede determinarse mediante la Ecuación 3 (Srivastava *et al.*, 1993).

$$Q = v * C_A * A \quad (3)$$

dónde:

$Q$  = caudal de la boquilla, m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>

$v$  = velocidad del chorro, m s<sup>-1</sup>;

$C_A$  = coeficiente de área;

$A$  = área del orificio de la boquilla, m<sup>2</sup>.

El coeficiente de área considera la contracción del líquido a su paso por el orificio. Combinando las ecuaciones 2 y 3, el flujo de la boquilla se puede escribir de acuerdo con la Ecuación 4 (Srivastava *et al.*, 1993).

$$Q = C_v \left[ 2 \frac{\Delta p}{\rho_1} \right]^{\frac{1}{2}} C_A * A \quad (4)$$

El coeficiente de descarga se puede calcular mediante la Ecuación 5, que finalmente permite determinar el caudal según la Ecuación 6.

$$C_D = C_v * C_A \quad (5)$$

$$Q = C_D * A (2gh)^{\frac{1}{2}} = C_D * A \left[ 2 \frac{\Delta p}{\rho_1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

El coeficiente de descarga depende del tamaño y diseño del orificio y representa la relación entre el flujo posible real y teórico. Por lo tanto, para una boquilla determinada, el flujo de líquido proporcionado por la boquilla está relacionado con la raíz cuadrada de la presión. La pendiente de esta recta será  $C_D A$ , a partir de la cual

se podrá determinar el coeficiente de descarga ( $C_D$ ). El valor del coeficiente de descarga ( $C_D$ ) debe ser cercano a 0,611, valor utilizado para orificios con flujo turbulento (Srivastava *et al.*, 1993).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las mediciones de caudal se realizaron con un error inferior al 1% en todos los casos, quedando por debajo del límite máximo del 5% propuesto por Sánchez (1988). Con estos valores, el caudal medio calculado se puede considerar representativo de la muestra. La boquilla JA-1 presentó un caudal promedio de 0,297 L min<sup>-1</sup> a una presión de 414 kPa, alcanzando 0,574 L min<sup>-1</sup> a una presión de 1447 kPa (Figura 1), caudales similares a los propuestos por el fabricante. La boquilla JA-2 presentó un caudal promedio de 0,575 L min<sup>-1</sup> a la presión más baja y 1,146 L min<sup>-1</sup> a la más alta. El JA-2 presentó el doble de caudal que el JA-1 a la misma presión, característica que permitirá obtener diferentes caudales al momento de calibrar el equipo. El análisis comparativo entre los valores de caudal obtenidos y el proporcionado por el fabricante se realizó mediante el método estadístico L&O (Leite y Oliveira, 2002). Otro análisis se realizó aplicando la prueba “F” de Fischer y el comportamiento de los residuos analizados mediante la prueba “T”. También se realizó un análisis del coeficiente de correlación. Con estos tres análisis se puede considerar que los valores obtenidos experimentalmente son estadísticamente similares a los proporcionados por el fabricante con un 1% de significancia. Los resultados experimentales confirman que los caudales medidos en ambas boquillas (JA-1 y JA-2) no presentan diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0.01$ ) respecto a los valores proporcionados por el fabricante, lo que valida la fiabilidad de las especificaciones técnicas bajo condiciones controladas. Este hallazgo es consistente con estudios previos según la norma ISO 5682-1 (2022) sobre calibración de boquillas hidráulicas.

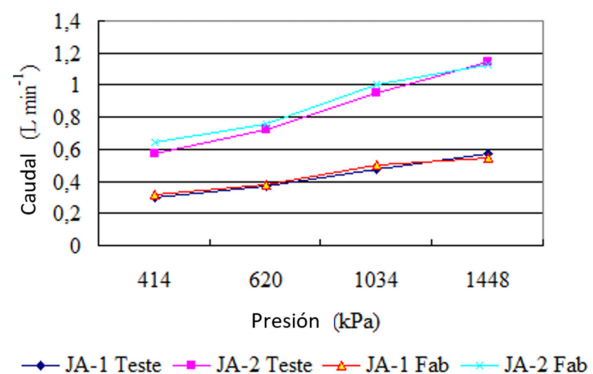
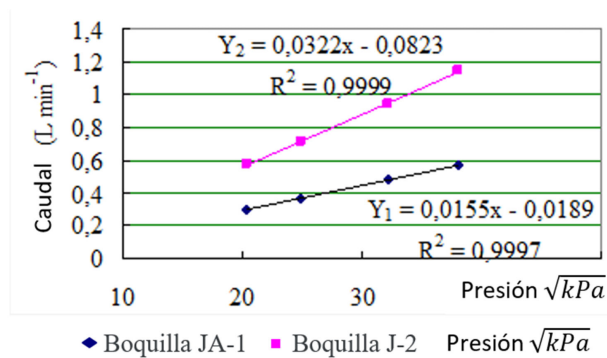


Figura 1. Caudales de boquilla proporcionados por el fabricante y obtenidos en laboratorio, para cuatro presiones de trabajo.

La Figura 2 muestra las curvas de flujo en función de la raíz cuadrada de la presión para los datos experimentales.

Se puede observar que el desempeño de cada boquilla está representado por la ecuación de ajuste utilizada para determinar el coeficiente de descarga.



**Figura 2.** Curvas de flujo en función de la raíz cuadrada de la presión para los datos experimentales.

Se puede observar que el desempeño de cada boquilla está representado por la ecuación de ajuste utilizada para determinar el coeficiente de descarga. El coeficiente de descarga calculado con los valores de la **Figura 2** fue de 0,232 para la boquilla JA-1 y de 0,286 para la boquilla JA-2. Estos promedios son considerablemente menores que 0,611, que se acepta para orificios de flujo turbulento. **Srivastava et al. (1993)** obtuvo un  $C_D$  equivalente a 0,274 para boquillas con 2,39 mm de diámetro. Los valores de  $C_D$  (0,233 para JA-1 y 0,286 para JA-2) son notablemente inferiores al valor teórico de 0,611 para flujo turbulento según **Srivastava et al. (1993)**, lo que sugiere: pérdidas energéticas por diseño geométrico del orificio o efectos de cavitación e implicaciones prácticas para alcanzar caudales objetivo, se requieren presiones más altas, incrementando el riesgo de deriva ( $\geq 15\%$  de gotas  $< 150 \mu m$  a  $> 1000 kPa$ , según **ASABE S572.1. (2023)**.

## CONCLUSIONES

- Los resultados experimentales confirman que los caudales medidos en ambas boquillas (JA-1 y JA-2) no presentan diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,01$ ) respecto a los valores proporcionados por el fabricante, lo que valida la fiabilidad de las especificaciones técnicas bajo condiciones controladas.
- Los valores de  $C_D$  (0,233 para JA-1 y 0,286 para JA-2) son notablemente inferiores al valor teórico de 0,611 para flujo turbulento, lo que implica pérdidas energéticas por diseño geométrico del orificio o efectos de cavitación e implicaciones prácticas para alcanzar caudales ya que se requieren presiones más altas, incrementando el riesgo de deriva.
- Se determinaron las curvas de calibración específicas para boquillas JA-1/JA-2, ausentes en literatura técnica estos sirven de criterios para selección de boquillas y de base para optimizar pulverizadores hidroneumáticos mediante ajuste de presión de las boquillas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASABE S572.1.: Spray nozzle classification by droplet spectra. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). 2023.
- BUTLER. E.M.; TUCK. C.; MILLER. P.: “The effect of some adjuvants on sprays produced by agricultural flat fan nozzles”. *Crop protection*. 127: 104962. 2020. ISSN: 0261-2194.
- CUNHA. J.P.A.R.; ALVARENGA. C.B.; TEIXEIRA. M.M.: “Spray drift reduction with air induction nozzles: A review”. *Agronomy*. 13(2): 456. 2023.
- EUROPEAN UNION DIRECTIVE 2019/782.: Sustainable use of pesticides. Inst. Official Journal of the European Union. 2019.
- FAO: Guidelines for pesticide application techniques in agriculture. Inst. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Italy. 2021.
- FERGUSON. C.J.; CHECHETTO. R.; ADKINS. S.W.; HEWITT. J.A.; CHAUHAN. S.B.; KRUGER. R.G.; O’DONNELL. C.C.: “Effect of spray droplet size on herbicide efficacy on four winter annual grasses”. *Crop Protection*. 112: 118-124. 2018. ISSN: 0261-2194.
- FOQUINO. L.E.S.; CUNHA. J.P.A.R.; FERREIRA. M.C.: “Optimization of pesticide application rates in soybean: A cost-benefit analysis”. *Journal of Agricultural Engineering*. 54(1): 78-89. 2023.
- GARCERÁ. C.; FONTE. A.; MOLTÓ. E.; CHUECA. P.: “Sustainable use of pesticide applications in citrus: A support tool for volume rate adjustment”. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 14(7): 715. 2017. ISSN: 1660-4601.
- GRELLA. M.; GALLART. M.; MARUCCO. P.; BALSARI. P.; GIL. E.: “Ground deposition and airborne spray drift assessment in vineyard and orchard: The influence of environmental variables and sprayer settings”. *Sustainability*. 9(5): 728. 2017. ISSN: 2071-1050.
- ISO 5682/1: Equipment for crop protection - Spraying equipment - Part 2. Inst. International Organization for Standardization (ISO). Geneva. Geneva. 5 p. 1986.
- ISO 5682-1: Métodos de prueba para pulverizadores. Inst. International Organization for Standardization (ISO). Geneva. Genova. 2022.
- ISO 25358: Crop protection equipment - Droplet size measurement - Terminology and standardised methodologies. Inst. International Organization for Standardization (ISO). Geneva. 2023.
- LEITE. H.G.; OLIVEIRA. F.T.: “Statistical procedure to test the identity of analytical methods”. *Communications in Soil Science and plant Analysis*. New York. 7 e 8: 1-23. 2002.
- NUYTTENS. D.; DE SCHAMPHELEIRE. M.; BAETENS. K.; SONCK. B.: “Effect of nozzle type and pressure on spray droplet characteristics”. *Biosystems Engineering*. 225: 1-12. 2023.
- RODRIGUES. G.J.: Critérios rastreáveis na aplicação de inseticida no controle do bicho mineiro do caféiro.

- Universidade Federal de Viçosa. Tese (Doutorado em Mecanização Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. MG. Brasil. 108 p. 2005.
- RODRIGUES. G.J.; TEIXEIRA. M.M.; FERREIRA. L.R.; FERNANDES. H.C.; HERRERA. P.M.: “Avaliação de um conjunto de bicos para uso em uma barra para aplicação de herbicidas em lavouras de café em formação”. Revista Ciências Técnicas Agropecuárias. 13(2): 17-21. 2004. ISSN: 1010-2760.
- SÁNCHEZ. D.P.R.: Estadística modelos y métodos. Ed. Alianza. Editorial AS. Madrid. España. 402 p. 1988.
- SRIVASTAVA. A.K.; GOERING. C.E.; ROHRBACH. R.P.; BUCKMASTER. D.R.: Engineering principles of agricultural machines. Inst. American society of agricultural engineers (ASAE) St. Joseph. Mich. USA. 265-324 p. publisher: American society of agricultural engineers St. Joseph. Mich. 1993.