

Calidad de pulverización para diferentes líquidos atomizables

Renaudo, Carlos ^{ab}; Herrera, Mildred ^b; Bertin, Diego ^{ab}; Bucalá, Verónica ^{ab}.

^a Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (UNS). Bahía Blanca, Argentina.

^b Planta Piloto de Ingeniería Química-PLAPIQUI (UNS-CONICET). Bahía Blanca, Argentina.

carenaudo@plapiqui.edu.ar

Resumen

La deriva en aplicaciones agrícolas terrestres representa un desafío clave por sus efectos negativos en el ambiente, la salud y la eficiencia del uso de agroquímicos. En este estudio se desarrolló una herramienta computacional que permite predecir la calidad de pulverización de diferentes formulaciones, considerando tanto la generación de gotas como su transporte en el ambiente.

Se evaluó el impacto de variables como la presión de trabajo, el tipo de boquilla y la inclusión de adyuvantes sobre la deriva, la evaporación de las gotas antes de depositarse y el tiempo necesario para completar la aplicación. Las simulaciones mostraron que la elección de la boquilla y la presión de trabajo son los factores que más afectan la calidad de la aplicación. En particular, aumentar la presión redujo el tamaño medio de las gotas, lo que generó un mayor porcentaje de evaporación y mayor deriva, especialmente a corta distancia (1 y 2 metros del botalón).

El efecto de los adyuvantes resultó dependiente del tipo de boquilla utilizada, pero en general tuvo menor influencia que las variables operativas. Estos resultados destacan la importancia de una selección adecuada de boquillas y presiones de trabajo para reducir pérdidas de producto y minimizar el impacto ambiental.

La herramienta desarrollada ofrece un enfoque práctico y eficiente para optimizar aplicaciones agrícolas, favoreciendo decisiones informadas orientadas a la sostenibilidad y la agricultura de precisión.

Palabras clave: Atomización, Dispersión de contaminantes, Deriva agrícola, Modelado multiescala, Adyuvantes.

Spray quality for different atomizable liquids

Abstract

Agrochemical spray drift in boom sprayers applications represents a key challenge due to its negative impacts on the environment, human health, and the efficiency of agrochemical use. In this study, a computational tool was developed to predict the spray quality of different formulations, taking into account both droplet generation and their transport in the environment.

The influence of operating pressure, nozzle type, and the use of adjuvants on spray drift, droplet evaporation prior to deposition, and application time were evaluated. Simulation results indicated that nozzle selection and operating pressure are the most influential factors affecting spray quality. Specifically, increasing the operating pressure led to smaller average droplet sizes, which in turn resulted in greater evaporation and increased drift, particularly at short distances (1–2 meters) from the boom.

The effect of adjuvants was found to depend on the used nozzle type. However, their influence was less significant than that produced by the operational variables. These findings highlight the importance of selecting appropriate nozzles and operating pressures to reduce product loss and minimize environmental impact.

The developed tool provides a practical and efficient approach to optimizing agricultural spray applications, supporting informed decision-making aimed at sustainability and precision agriculture.

Keywords: Atomization, Pollutant dispersion, Agricultural drift, Multi-scale modeling, Adjuvants.

1 Introducción

Durante la pulverización agrícola, la efectividad de un tratamiento fitosanitario no solo depende del producto elegido, la dosis aplicada o el momento oportuno de intervención, sino también de la calidad de la pulverización (Merani et al., 2021). El término “calidad de la pulverización” implica que las gotas atomizadas en las aplicaciones tengan un tamaño adecuado, lleguen al lugar correcto (e.g., hojas), no se pierdan por evaporación o escurrimiento, y se distribuyan de manera uniforme sobre el cultivo. Cuando estas condiciones se cumplen, se maximiza la eficacia del tratamiento y se minimizan las pérdidas, los impactos ambientales y los riesgos para la salud.

Más allá del impacto sobre la productividad, una pulverización eficiente cumple un rol clave en la mitigación de los riesgos ambientales y sanitarios asociados al uso de agroquímicos (Al Heidary et al., 2014; Renaudo, 2020). La aplicación inadecuada o excesiva de estos productos puede provocar la contaminación del suelo, el agua y el aire, afectar la biodiversidad y representar un riesgo para la salud humana y animal (Lebeau et al., 2011; Merani et al., 2021; Renaudo et al., 2023). En este escenario, las tecnologías que mejoran la precisión en la aplicación resultan esenciales para avanzar

hacia una agricultura más sustentable y responsable con el entorno (Matthews et al. 2014).

Los adyuvantes desempeñan un papel destacado en la mejora de la calidad de la pulverización. Estos compuestos, añadidos a la mezcla de aplicación, modifican las propiedades fisicoquímicas del líquido (e.g., viscosidad, tensión superficial), permitiendo modificar la distribución de tamaños de las gotas pulverizadas y favoreciendo la humectación, el esparcimiento y la adherencia de las gotas sobre las superficies vegetales (Kooij et al., 2018; Sijs y Bonn, 2020; Sijs et al., 2023). Estas mejoras incrementan la efectividad del tratamiento, incluso a menores dosis, lo que contribuye a reducir el uso total de agroquímicos.

La deriva de pulverización, entendida como el desplazamiento no deseado de gotas fuera del área objetivo debido a factores ambientales y operativos, es una de las principales problemáticas actuales, tanto en Argentina como a nivel global (Lebeau et al., 2011; Al Heidary et al., 2014; Matthews et al. 2014). Por ello, el desarrollo de modelos y herramientas capaces de predecir y mitigar la deriva constituye un desafío clave para la agricultura moderna (Renaudo et al., 2022; Renaudo et al., 2023).

Este trabajo presenta una herramienta computacional que permite evaluar la calidad de la pulverización de distintos líquidos atomizables, integrando modelos matemáticos que consideran tanto la formación de gotas como su transporte en el ambiente. Con ello, se busca contribuir al desarrollo de estrategias de pulverización más eficientes y sostenibles en el marco de una agricultura de precisión.

2 Modelo matemático

A escala micro, se desarrolla un modelo de atomización para predecir la distribución inicial del tamaño de las gotas en función de las dimensiones de la boquilla y el caudal de aplicación, incorporando además los efectos de las propiedades fisicoquímicas del líquido, como la viscosidad y la tensión superficial, determinadas por las distintas formulaciones utilizadas. Este modelo fue calibrado a partir de datos experimentales obtenidos con el equipo Malvern Spraytec. A escala macro, se utiliza un modelo previamente reportado que, mediante un enfoque lagrangiano con dispersión gaussiana, permite analizar el transporte y la deposición de las gotas bajo la influencia de factores ambientales como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento. El modelo se utiliza para analizar el impacto de diferentes líquidos atomizables sobre la calidad de la pulverización agrícola.

2.1 Modelo de atomización

El modelo matemático de atomización está basado en las siguientes hipótesis:

- La longitud característica del orificio de la boquilla (b) es el eje menor de la abertura elíptica de la boquilla, que puede calcularse directamente a partir del área efectiva considerando una elipse con relación de aspecto 2/3 (Kooij et al., 2018).

- El diámetro en volumen medio de la distribución (d_{50}) varía en forma proporcional a $b^{1/3}$ (Post y Hewitt., 2018).
- La diferencia de presión efectiva que determina el tamaño de gota es $\Delta P_{ef} = C_D^2 \Delta P$, donde C_D es el coeficiente de arrastre y ΔP es la diferencia de presión aplicada (Sijs et al., 2023).
- El tamaño de las gotas varía con las propiedades del líquido atomizado a través del número adimensional de Ohnesorge (Lefebvre y McDonell, 2017).
- La tensión superficial que interviene en el número de Ohnesorge es la tensión superficial dinámica a tiempos bajos (Sijs y Bonn, 2020).
- Los diámetros característicos d_{10} y d_{90} varían en función del d_{50} , para obtener una visión más completa de la distribución.
- La distribución de tamaños de gotas se representa por la función upper-limit log-normal (Renaudo, 2020)
- El patrón de pulverización está definido únicamente por el tipo de boquilla y el ángulo de pulverización (Renaudo, 2020)

En función de las hipótesis mencionadas, para la distribución de tamaño se propone la siguiente ecuación para describir el diámetro medio de la distribución de gotas atomizadas para gotas de agua:

$$d_{50_{agua}} = CN_s^{\frac{1}{3}} \Delta P^{-c} \theta^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

donde N_s es el número de tamaño de boquilla, que indica el caudal en galones por minuto (gal/min) que entrega la boquilla a una presión estándar de 40 psi (que equivale aproximadamente a 2,76 bar y suele redondearse a 3 bar para simplificar). θ es el ángulo del líquido atomizado (expresado en grados). C y c son constantes empíricas que caracterizan a cada modelo de boquilla.

Cuando el líquido atomizado contiene adyuvantes, se propone la siguiente correlación:

$$d_{50} = d_{50_{agua}} [1 + R(Oh - Oh_{agua})] \quad (2)$$

donde Oh es el número de Ohnesorge de la solución y Oh_{agua} es el número de Ohnesorge para agua a idénticas condiciones de pulverización. R es una constante que depende del tipo de boquilla. El signo de R indica si d_{50} aumenta o disminuye con respecto al del agua. A partir de un análisis de resultados previos se consideraron los valores -15.6 y 44.7 para las boquillas Turbo TeeJet 110-02 y XR 110, respectivamente.

El número de Ohnesorge se calcula de la siguiente manera:

$$Oh = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l b \sigma_d}} \quad (3)$$

μ_l y ρ_l corresponden a la viscosidad del líquido y σ_d es la tensión superficial dinámica a 1 segundo. b es la longitud característica de la boquilla:

$$b = \sqrt{\frac{2C_D A}{3\pi}} \quad (4)$$

donde A y C_D corresponden al área del orificio y al coeficiente de descarga de la boquilla, respectivamente. Con respecto a los coeficientes de descarga C_D , existen rangos de valores para diferentes tipos de boquillas. Para boquillas de abanico plano, los valores suelen ser cercanos a 0.9, variando entre 0.8 y 1. Para boquillas pre-orificio (e.g., Turbo TeeJet), se han reportado valores entre 0.65 a 0.75. Para boquillas con inducción de aire (e.g., Airmix) el rango de valores suele ser menor a 0.6. Para los coeficientes de descarga en el modelo de atomización propuesto, se utilizaron los valores 0.6 y 1 para las boquillas Turbo TeeJet 110-02 y XR 110-02 y 03, respectivamente.

A partir de valores experimentales, los diámetros característicos d_{90} y d_{10} se describen como:

$$d_{10} = 0.34d_{50} \quad (5)$$

$$d_{90} = 5.79d_{50}^{0.83} \quad (6)$$

Por medio de la función Upper-Limit log-normal (ULLN), se describe la distribución de tamaños de las gotas atomizadas:

$$f_d(d_0) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_{ul}} \frac{d_{max}}{d(d_{max} - d_0)} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(a_{ul}d) - \ln(d_{max} - d_0)}{\ln \sigma_{ul}} \right]^2} & d < d_{max} \\ 0 & d \geq d_{max} \end{cases} \quad (7)$$

donde σ_{ul} , d_{max} y a_{ul} son los parámetros de la función ULLN. d_0 es la variable independiente de la función, y corresponde al diámetro de gota atomizada. La Ecuación 7 representa una función densidad expresada en volumen.

Los parámetros de la función ULLN se relacionan con los diámetros característicos d_{10} , d_{50} y d_{90} mediante:

$$d_{max} = d_{50} \left(\frac{d_{50}(d_{10} + d_{90}) - 2d_{10}d_{90}}{d_{50}^2 - d_{10}d_{90}} \right) \quad (8)$$

$$\sigma_{ul} = \left[\left(\frac{d_{max} - d_{50}}{d_{max} - d_{90}} \right) \frac{d_{90}}{d_{50}} \right]^{0.7794} \quad (9)$$

$$a_{ul} = \frac{d_{max} - d_{50}}{d_{50}} \quad (10)$$

donde d_{10} , d_{50} y d_{90} pueden ser obtenidos a partir de las ecuaciones 5, 2 y 6, respectivamente.

La distribución espacial del patrón del spray se representa mediante una distribución normal (Ecuación 11), y representa la probabilidad en volumen de que las gotas, sin ser afectadas por el arrastre del viento, se depositen en una determinada distancia (x_0):

$$f_{x_0}(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_0}{\sigma_s} \right)^2 \right] \quad (11)$$

donde, para boquillas de abanico plano, la desviación estándar σ_s se obtiene satisfaciendo la siguiente ecuación (Mawer and Miller, 1989; Leunda et al., 1990):

$$f_{x_0} \left(\frac{H}{\tan \theta} \right) = f_{x_0} \left(-\frac{H}{\tan \theta} \right) = 1e^{-6} \quad (12)$$

donde H es la altura de botalón.

2.2 Modelo de deriva

Para predecir la deriva de las aplicaciones realizadas con pulverizadoras de botalón, se utilizó el modelo propuesto por Renaudo et al. (2022). Dicho modelo se basa en un enfoque híbrido, en el cual un modelo lagrangiano se acopla a un modelo de dispersión gaussiana con el fin de predecir la deriva de pulverización en aplicaciones terrestres con pulverizadoras de botalón. Este modelo fue seleccionado debido a que proporciona un enfoque continuo, eficiente y físicamente representativo para predecir la deriva de gotas, considerando evaporación, velocidad del viento, trayectoria de las gotas y dispersión vertical.

En el modelo se asume que las gotas descienden en régimen de Stokes, por lo que la velocidad de descenso se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$v_T = \frac{\Delta \rho g d^2}{18 \mu_g} \quad (13)$$

donde μ_g es la viscosidad del aire, $\Delta \rho$ es la diferencia de densidades entre la gota y el aire y g es la constante de la gravedad. d es el diámetro de la gota durante el vuelo, el cual se calcula de la siguiente manera (Lebeau et al., 2011):

$$d = \begin{cases} d_0 \left(1 - \frac{x/\bar{U}}{kd_0^2} \right) & x/\bar{U} < kd_0^2 \\ 0 & x/\bar{U} \geq kd_0^2 \end{cases} \quad (14)$$

donde k es una constante que representa la velocidad de evaporación de la gota y depende de las condiciones ambientales y del fluido. x/\bar{U} representa el tiempo de vuelo de la gota, donde x es la distancia en dirección del viento y \bar{U} es la velocidad promedio del viento. Expresada en unidades SI, la constante se calcula mediante la siguiente ecuación (Lebeau et al., 2011).

$$k = \frac{10^{12}}{\beta(T - T_{bh})} \quad (15)$$

donde T es la temperatura ambiente, T_{bh} la temperatura de bulbo húmedo y β es una constante que depende del fluido que compone la gota.

A fin de que el modelo sea eficiente desde el punto de vista computacional, se analiza únicamente la trayectoria de aquellas gotas, dentro de la distribución inicial de tamaños, que son influenciadas por el viento y que logran depositarse en el suelo sin evaporarse completamente. En la Figura 1 se ilustra la división entre las distintas categorías de gotas. Por debajo del diámetro mínimo (d_{min}), las gotas se evaporan completamente antes de depositarse, por lo que se excluyen del análisis en el modelo de deposición por deriva. Por encima del diámetro crítico (d_{crit}), las gotas no ven afectada su trayectoria inicial por la dispersión o el arrastre del viento; por lo tanto, su deposición queda determinada solamente por el patrón inicial del spray atomizado. Las gotas que se encuentran entre los diámetros d_{min} y d_{crit} (i.e., que son influidas por el viento y la dispersión) son las que tienden a depositarse lejos de la boquilla porque son influidas por el viento y la dispersión (Renaudo et al., 2022).

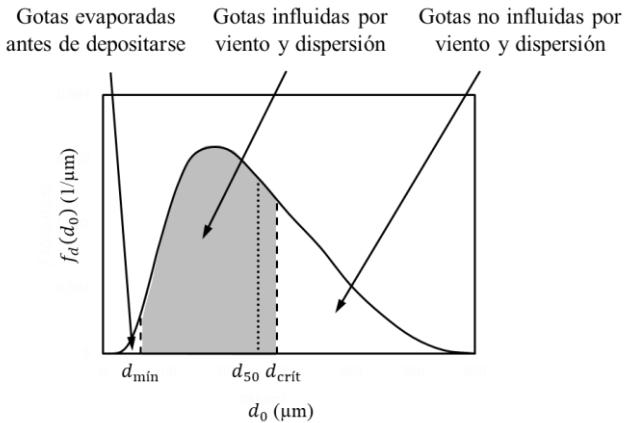


Fig. 1. Caracterización de gotas atomizadas sobre el modelo de deriva.

El diámetro mínimo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$d_{min} = \left(\frac{54\mu_g H}{k\Delta\rho g} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (16)$$

El diámetro crítico se calcula en base a la altura de pulverización, a las propiedades de la gota y la constante de evaporación:

$$d_{crit} = d_{min} \left[\frac{1}{1 - \left(1 - \frac{\rho_d}{18k\mu_g} \right)^3} \right]^{1/4} \quad (17)$$

Renaudo et al. (2022) y Lebeau et al. (2011), entre otros, consideraron que las gotas se mueven a igual velocidad que el viento en la dirección horizontal. En una atmósfera inestable, el perfil de velocidad de viento se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$U = U_0 \frac{\ln \left(\frac{(H - z) + \epsilon}{\epsilon} \right)}{\ln \left(\frac{H + \epsilon}{\epsilon} \right)} \quad (18)$$

donde ϵ es la rugosidad del terreno, U_0 es la velocidad del viento a la altura H y z es la altura a la que se calcula la velocidad de viento.

De acuerdo con la Ecuación 13, las gotas descienden a diferentes velocidades. Por lo tanto, en un mismo tiempo (o para una misma distancia horizontal analizada), las gotas se ven afectadas por diferentes velocidades del viento, calculadas mediante la Ecuación 18. A fin de reducir el costo computacional, se calcula una velocidad promedio del viento para todas las gotas atomizadas (\bar{U}), la cual depende de los datos iniciales de la población de gotas, de las condiciones ambientales y de la altura del botalón:

$$\bar{U} = \frac{\int_{d_{min}}^{d_{crit}} \int_{t_{resp}}^{t_{dep}} U f_d(d_0) dt dd_0}{\int_{d_{min}}^{d_{max}} \int_0^{t_{dep}} f_d(d_0) dt dd_0} \quad (19)$$

donde t_{dep} es el tiempo que tarda en depositarse una gota de tamaño d_0 y t_{resp} es el tiempo de respuesta de la misma. Para régimen de Stokes, el tiempo de respuesta se puede calcular mediante la ecuación (Fritsching, 2016):

$$t_{resp} = \frac{\rho_d d_0^2}{18 \mu_g} \quad (20)$$

El tiempo de deposición se obtiene de las ecuaciones 13 y 14:

$$t_{dep} = k d_0^2 \left[1 - \left(1 - \left(\frac{d_{min}}{d_0} \right)^4 \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (21)$$

Las ecuaciones anteriores permiten calcular la altura promedio de las gotas para las diferentes distancias horizontales a las cuales se analizará la deriva:

$$\bar{z} = \left(\frac{d_0}{d_{min}} \right)^4 H \left[1 - \left(1 - \frac{x - x_0}{U k d_0^2} \right)^3 \right] \quad (22)$$

La ecuación anterior permite calcular la dispersión vertical de las gotas en la atmósfera en función de la distancia horizontal:

$$f_{disp}(x) = \frac{v_T}{U} \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H-\bar{z})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (23)$$

donde σ_z es el coeficiente de dispersión y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_z = \sqrt{0.0076 \frac{(RH/100)^{-10/3}}{U} (x - x_0)^{0.85}} \quad (24)$$

donde RH es la humedad relativa del aire expresada en porcentaje.

Asumiendo que las distribuciones de tamaño de gotas atomizado, patrón de distribución de volumen atomizado y dispersión vertical son independientes:

$$f_{d,x_0,x} = f_d(d_0) f_{x_0}(x_0) f_{disp}(x) \quad (25)$$

Integrando en los valores iniciales correspondientes a la atomización, la distribución en volumen de producto pulverizado por una boquilla es:

$$f_x(x) = \int_{-H/\tan \theta}^{H/\tan \theta} \int_{d_{min}}^{d_{max}} f_{d_0}(d_0) f_{x_0}(x_0) f_{disp}(x) dd_0 dx_0 \quad (26)$$

Si hay N boquillas en el botalón separadas de forma equidistante a una distancia s , la distribución en volumen de producto pulverizado para el botalón completo es:

$$f_x^{boom}(x) = \sum_{i=1}^N f_x^i(x) = \sum_{i=1}^N f_x[x + (i-1)s] \quad (27)$$

Finalmente, la deriva de pulverización puede calcularse como:

$$Y(x) = s f_x^{boom}(x) \quad (28)$$

La Figura 2 describe el procedimiento de resolución para calcular la deriva de pulverización en aplicaciones agrícolas con pulverizadoras de botalón. A partir de la solución aplicada (ej. Harrier 0.24%), el tipo de boquilla (ej. Teejet XR-110-02), la presión de atomización (P) y la altura del botalón (H), se determinan la distribución de tamaños de gota y el patrón de pulverización. Estas variables, junto con las condiciones ambientales (viento, temperatura y humedad, especificadas como íconos en la figura) son las variables de entrada a al modelo de deriva. Este modelo que combina submodelos basados en primeros principios y relaciones empíricas, con el fin de simular el comportamiento de las gotas en vuelo. Finalmente, considerando el número de boquillas (#), su separación (s) y la velocidad de avance del equipo (V_A), se calcula la deriva total generada por el botalón, lo que permite optimizar la aplicación y minimizar el impacto ambiental. Los modelos fueron desarrollados en el lenguaje de programación Julia (v1.10.9), empleando los paquetes SpecialFunctions, Trapz, BasicInterpolators y Roots para la resolución numérica; DataFrames y XLSX para la gestión y almacenamiento de datos; y BenchmarkTools para el análisis del tiempo de ejecución. En promedio, el tiempo de resolución de los casos fue de aproximadamente 0,7 segundos, con un uso de memoria de 92 MiB.

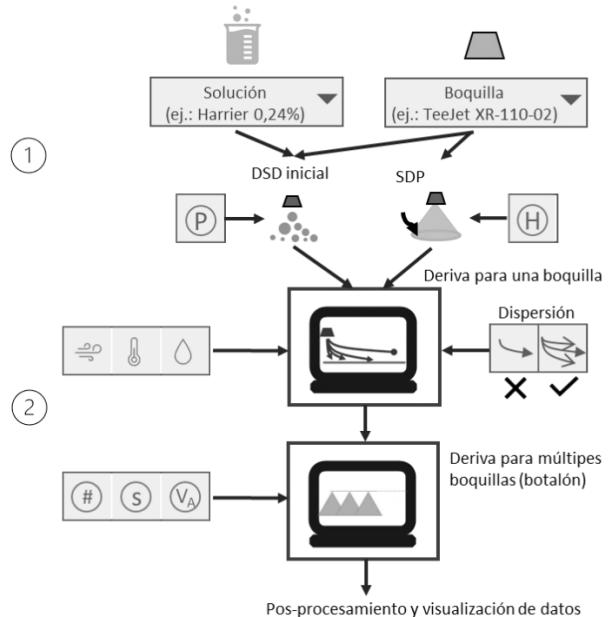


Fig. 2. Esquema de procedimiento de resolución para predecir la deriva en pulverizaciones de botalón para una **solución** definida, atomizada en una determinada **boquilla** a una presión **P** con un botalón que tiene **#** cantidad de boquillas separadas de forma equidistante a una distancia **s** y la pulverizadora avanza a una velocidad **V_A**.

3 Análisis de resultados

El modelo de atomización fue ajustado para 2 boquillas de pulverización comerciales (TeeJet XR-110-03 y TeeJet TT-110-02), 3 soluciones atomizadas (agua, agua + Silwet y agua + Harrier Bio) realizando la pulverización a 2 presiones de trabajo diferentes (2 y 4 bar). Se realizaron mediciones de las propiedades físicas de las soluciones pulverizadas utilizando un picnómetro de 25ml para la densidad, el viscosímetro IKA rotavisc lo-vi con el accesorio ELVAS para bajas viscosidades y el equipo OCA 15E (Dataphysics) para la tensión superficial dinámica y la cinética de evaporación. En la Tabla 1 se detallan los valores experimentales de las propiedades de las soluciones atomizadas.

Tabla 1. Propiedades de las soluciones atomizadas.

Propiedad	Agua	Silwet 0.075%v/v	Harrier Bio 0.15% v/v
Densidad (kg/m ³)	998	997	997
Viscosidad (Pa.s)	0.00101	0.00107	0.00104
Tensión superficial dinámica (N/m)	0.0724	0.02119	0.03523

Las mediciones de distribuciones de tamaño de gotas atomizadas fueron realizadas a través del equipo Malvern SprayTec en un laboratorio de temperatura controlada entre 22 y 24°C durante las mediciones y una distancia de 31cm entre la boquilla y el láser. En la Fig. 3 se muestra la comparación entre los valores experimentales de diámetro medio en volumen para todas las boquillas, presiones de trabajo y soluciones atomizadas y los calculados mediante las Ec. 1 y Ec. 2. Se observa un alto grado de correlación entre los datos experimentales y los datos simulados.

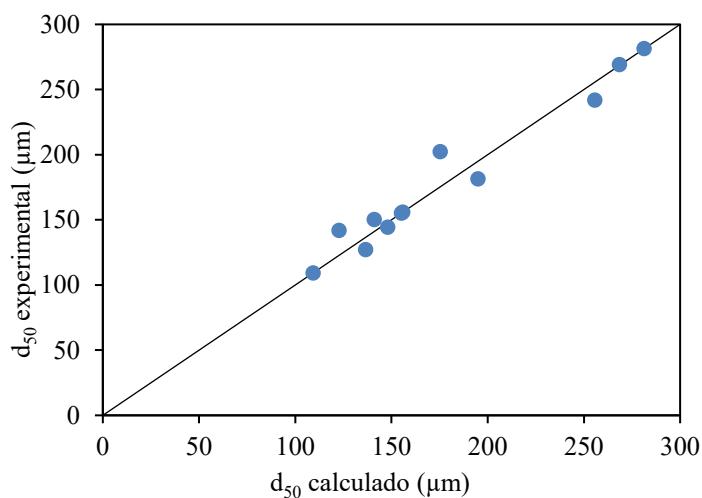
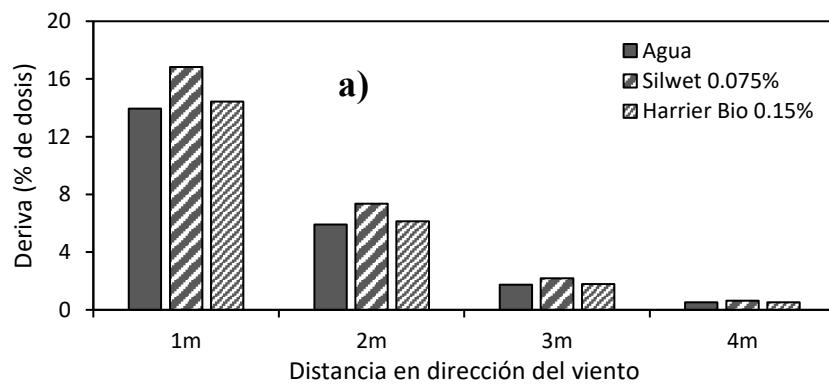


Fig. 3. Comparación de datos experimentales de diámetro medio en volumen de las distribuciones atomizadas frente a los datos calculados mediante Ec.1 y Ec.2.

El efecto de la solución atomizada sobre la deriva y la evaporación se analizó mediante el modelo de deriva (validado previamente con datos experimentales en Renaudo et al. (2023)). Durante todas las simulaciones se mantuvieron constantes las condiciones ambientales (Temperatura ambiente 18°C, Humedad relativa 68%, velocidad del viento a la altura del botalón igual a 7.2 km/h), configuración del botalón (54 boquillas, separación 50cm) y dosis aplicada (140lt/ha). Entre casos se realizaron variaciones de presión de trabajo (2 y 4 bar), boquilla (TeeJet XR 110-03 y TeeJet TT 110-02) y las soluciones pulverizadas nombradas anteriormente. En la Figura 4 se muestra la deriva a diferentes distancias en dirección del viento producida por la boquilla TeeJet TT 110-02 al operar a 2 bar (Fig. 4a) y 4 bar (Fig. 4b) para las diferentes soluciones. Al comparar ambas figuras, se observa en esta boquilla que el efecto de la presión es notablemente superior al efecto que se obtiene al cambiar de líquido pulverizado. Al duplicar la presión, la deriva en todas las distancias aumenta en más del doble, mientras que el cambio de líquido pulverizado genera cambios en el orden del 10%. Se observa a 2 bar que la solución que contiene Silwet es la que mayor deriva presenta en todas las distancias, mientras que a 4 bar, si bien las soluciones con Silwet y con Harrier Bio generan mayor deriva que al pulverizar solo agua, el efecto relativo sobre la deriva es menor.



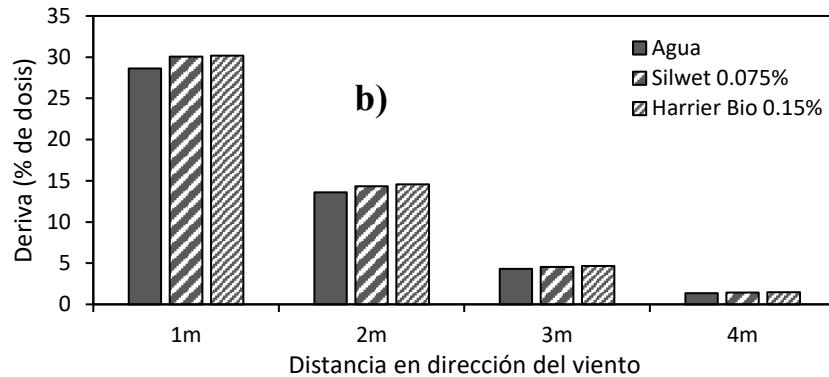
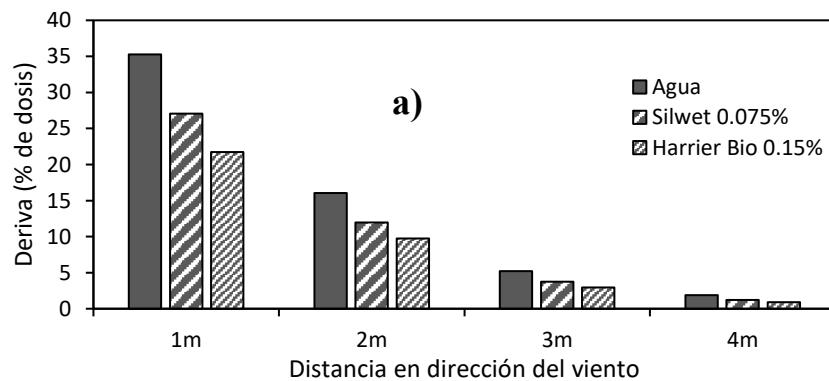


Fig. 4. Deriva de pulverización a 4 distancias en la dirección del viento producida por aplicaciones de soluciones de Agua, Silwet 0.075% y Harrier Bio 0.15% utilizando boquillas TeeJet TT-110-02 en 2 presiones de operación a) 2 bar y b) 4 bar.

La deriva producida por aplicaciones utilizando la boquilla TeeJet XR 110-03 se muestra en la Figura 5. A diferencia de lo observado para la boquilla TT, se observa que el agregado de los adyuvantes Silwet o Harrier Bio genera una reducción de la deriva en todas las distancias para ambas presiones. A su vez, se puede observar que modificar la solución en esta boquilla produce reducciones de deriva del mismo orden a trabajar a menores presiones de trabajo. Esto es importante ya que se podrían realizar a mayores presiones de operación, y por ende mayores velocidades de avance para mantener la dosis aplicada, reduciendo el tiempo total de pulverización necesario. Las atomizaciones realizadas en esta boquilla a diferentes presiones produjeron un mayor cambio en la distribución de tamaño de gotas que para la boquilla TT, en órdenes de magnitud similares al cambio de presión de operación.



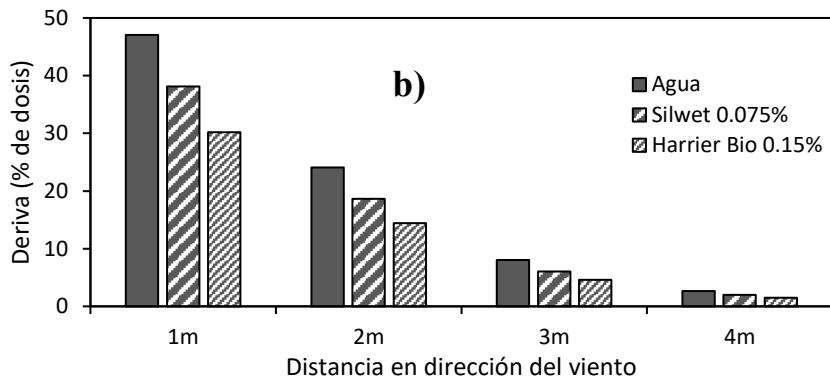


Fig. 5. Deriva de pulverización a 4 distancias en la dirección del viento producida por aplicaciones de soluciones de Agua, Silwet 0.075% y Harrier Bio 0.15% utilizando boquillas TeeJet XR-110-03 a 2 presiones de operación: a) 2 bar y b) 4 bar.

Comparando las Fig. 4 y 5, se puede observar que la boquilla TT, diseñada para reducir la deriva, produce el efecto esperado de diseño.

Respecto al efecto del cambio de boquilla, presión de trabajo y solución atomizada, se observó de las simulaciones que la presión de atomización es el factor dominante sobre la misma. Si bien el cambio de boquilla y solución atomizada modificó la fracción evaporada, los cambios fueron siempre menores al 30%, mientras que duplicar la presión de trabajo generó cambios superiores al 100%.

4 Conclusiones

El modelo desarrollado ha permitido analizar el efecto de la presión, boquilla utilizada y solución atomizada sobre la distribución de tamaños de gotas atomizadas y la deriva producida por aplicaciones de botalón. De las simulaciones se ha observado que la presión de atomización es el factor que más influye sobre la deriva y evaporación de las soluciones pulverizadas bajo las condiciones ambientales fijadas de viento, temperatura y humedad. Si bien cambiar la boquilla, entre las 2 analizadas, y la solución atomizada tiene un impacto significativo, el efecto es menos pronunciado en comparación con los cambios en la presión. Se observó también que el efecto producido por el cambio de solución depende de la boquilla utilizada.

Referencias

- Al Heidary, M., Douzals, J. P., Sinfort, C., & Vallet, A. (2014). Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: A literature review. *Crop protection*, 63, 120-130.
- Fritsching, U. (Ed.). (2016). Process-spray: functional particles produced in spray processes. Springer.

- Kooij, S., Sijs, R., Denn, M. M., Villermaux, E., & Bonn, D. (2018). What Determines the Drop Size in Sprays? *Phys. Rev. X*, 8(3), 31019. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.8.031019>
- Lebeau, F., Verstraete, A., Stainier, C., & Destain, M. F. (2011). RTDrift: A real time model for estimating spray drift from ground applications. *Comput. Electron. Agric.*, 77(2), 161–174. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.04.009>
- Lefebvre, A. H., & McDonell, V. G. (2017). Atomization and sprays. Taylor & Francis, CRC Press.
- Leunda, P., Debouche, C., & Caussin, R. (1990). Predicting the transverse volume distribution under an agricultural spray boom. *Crop protection*, 9(2), 111-114.
- Mawer, C. J., & Miller, P. C. H. (1989). Effect of roll angle and nozzle spray pattern on the uniformity of spray volume distribution below a boom. *Crop Protection*, 8(3), 217-222.
- Matthews, G., Bateman, R., & Miller, P. (2014). Pesticide application methods. John Wiley & Sons.
- Merani, Victor Hugo, Guilino, Facundo, Ponce, Mariano, Vázquez, Juan Manuel, Larriveu, Luciano, Giambelluca, Ana Laura, Plarz, Pedro, Tour, Santiago, & Mur, Matilde. (2021). Pulverizaciones agrícolas: comparación de metodologías para su evaluación. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 37(3), 325-337.
- Post, S. L., & Hewitt, A. J. (2018). Flat-Fan Spray Atomization Model. *Trans. ASABE*, 61(4), 1249–1256. <https://doi.org/10.13031/trans.12572>
- Renaudo, C. A. (2020). Modelo predictivo de la deriva de pulverización en aplicaciones agrícolas de botalón. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Sur.
- Renaudo, C. A., Bertin, D. E., & Bucalá, V. (2022). A coupled atomization-spray drift model as online support tool for boom spray applications. *Precision Agriculture*, 23(6), 2345-2371.
- Renaudo, C. A., Bertin, D. E., & Bucalá, V. (2023). A hybrid Lagrangian-dispersion model for spray drift prediction applied to horizontal boom sprayers. *Journal of Aerosol Science*, 173, 106210.
- Sijs, R., Kooij, S., & Bonn, D. (2023). Droplet size from Venturi air induction spray nozzles. *Experiments in fluids*, 64(2), 43.
- Sijs, R., & Bonn, D. (2020). The effect of adjuvants on spray droplet size from hydraulic nozzles. *Pest Management Science*, 76(10), 3487-3494.