



## Influencia del número de boquillas sobre la deriva en pulverizaciones de botalón

Renaudo, C.A.<sup>a</sup>, Pintos, E.<sup>a</sup>, Bucalá, V.<sup>a</sup>, Bertin, D.<sup>a</sup>

a PLAPIQUI, Universidad Nacional del Sur, CONICET.

carenaudo@plapiqui.edu.ar

### Resumen

La aplicación de productos de protección de cultivos (PPC) mediante pulverización es una tarea crítica del ciclo productivo agrícola. Las pulverizadoras agrícolas terrestres cuentan con múltiples boquillas distribuidas a lo largo de un botalón. La longitud del botalón varía entre 10 y 30 m y las boquillas están separadas en distancias típicas de 0.5 m. En la pulverización con botalón, la dosis depositada de PPC depende de la contribución de las múltiples boquillas. A su vez, al realizar la aplicación una fracción de los productos aplicados son arrastrados por el viento fuera del área objetivo. A este fenómeno se lo conoce como deriva de pulverización.

En este trabajo, mediante simulaciones de un modelo matemático validado, se estudia la deriva de pulverización producida por un botalón ubicado a 0.5 m de altura, con boquillas Lurmark 31-03-F110 separadas en 0.5 m. En primer lugar, se analiza el aporte de cada boquilla sobre la deposición de las gotas a diferentes distancias del botalón. Luego, se explora el efecto de cambiar el número de boquillas sobre la deriva de pulverización. Además, se estudia el efecto de la velocidad del viento, altura de botalón y presión de pulverización sobre la deriva de pulverización para botalones con diferentes números de boquillas. Por último, se discuten los beneficios y limitaciones de simular un número de boquillas menor al real para representar correctamente el proceso de pulverización con un menor esfuerzo computacional.

### Abstract

The application of crop protection products (CPP) by spraying is a critical task in the agricultural production cycle. Boom sprayers have multiple nozzles distributed along a boom. Boom length varies between 10 and 30 m and the nozzles are typically spaced 0.5 m apart. In this spraying technology, the deposited dose of PPC depends on the contribution of the multiple nozzles. During application, a fraction of the applied products is carried outside from the target area by the wind. This phenomenon is known as spray drift.

In this work, by means of simulations of a validated mathematical model, the spray drift produced by a boom located at 0.5 m height, with Lurmark 31-03-F110 nozzles separated by 0.5 m, is studied. First, the contribution of each nozzle on droplet deposition at different distances from the boom is analyzed. Then, the effect of changing the number of nozzles on spray drift is explored. In addition, the effect of wind speed, boom height and spray pressure on spray drift for booms with different numbers of nozzles is studied. Finally, the benefits and limitations of simulating a number of nozzles smaller than the real one in order to correctly represent the spraying process with less computational effort are discussed.

**Palabras clave:** Pulverización agrícola, Botalón, Deriva, Modelado y simulación.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los desafíos actuales de la actividad agrícola es abastecer a una población creciente usando una superficie de cultivo limitada [1]. La

incorporación de diferentes tecnologías agrícolas permite superar este desafío de una forma sostenible. Dentro de estas tecnologías se encuentra el uso de productos de protección de



cultivos (PPC) mediante pulverizadoras de botalón. La aplicación de PPC permite controlar malezas, insectos y/o hongos a fin de maximizar la productividad [2]. Estos productos son generalmente aplicados como gotas generadas por sistemas de pulverización aéreos o terrestres [3].

Cuando estos productos son aplicados, pueden ocurrir pérdidas de hasta un 30% del volumen aplicado [3]. La deriva es una de las causas de estas pérdidas y se define como el proceso por el cual los PPC son arrastrados por el viento fuera del área objetivo [4]. El destino de los PPC arrastrados por el viento es importante ya que puede dañar cultivos vecinos, alcanzar zonas urbanas o contaminar fuentes de agua, entre otros [5]. La aplicación correcta de los PPC a fin de lograr producción de cultivos sostenible, evitando daños al ambiente y las personas es un desafío de interés actual para los países con elevada producción agrícola [2]. Es por esto por lo que en las últimas décadas se han realizado acciones legislativas, comerciales y de investigación a fin de controlar la deriva de pulverización.

Para disminuir la deriva debe conocerse como influye la tecnología utilizada y las condiciones de operación a las gotas atomizadas y cómo influyen las condiciones ambientales al movimiento de las gotas [6]. Dentro de la tecnología utilizada se encuentran las pulverizadoras de botalón. En estos equipos las boquillas de pulverización se encuentran distribuidas sobre el botalón espaciadas uniformemente. Botalones de mayor longitud permiten aplicar PPC sobre una mayor área de trabajo, reduciendo el tiempo necesario de pulverización [1,6]. Debido a esto, el PPC que se observa a una distancia puede haberse originado de cualquiera de las boquillas del botalón. Si se desea analizar la influencia del número de boquillas sobre la deriva mediante modelado matemático, es necesario considerar la contribución sobre la deriva de cada boquilla presente en el botalón.

En este trabajo se estudia la deriva producida por una pulverizadora de botalón mediante simulaciones realizadas utilizando un modelo matemático validado. El modelo está basado en primeros principios e incluye la disminución de tamaño de las gotas debido a evaporación y el arrastre de estas debido al viento. El sistema modelado es un botalón ubicado a 0.5 m de altura, con boquillas Lurmark 31-03-F110 separadas en 0.5 m. En primer lugar, se analiza el aporte de una

o más boquillas a diferentes distancias respecto al aporte del botalón completo. Luego se explora el efecto de cambiar el número de boquillas sobre la deriva de pulverización. Además, se estudia el efecto relativo de cambios en la velocidad de viento, la altura de botalón y la presión de pulverización sobre la deriva para una boquilla y botalón completo. Mediante las comparaciones anteriores, es posible discutir los beneficios y limitaciones de simular un número de boquillas menor al real a fin de representar el proceso con un menor costo computacional.

## DESARROLLO

### Modelo

Para las simulaciones se utilizó el modelo de deriva propuesto por Renaudo (2020) [7]. El mismo permite simular la generación y deposición de las gotas pulverizadas. Las hipótesis del modelo son las siguientes:

1. El proceso de atomización y deposición de gotas ocurre en estado estacionario.
2. La distribución de tamaño de gotas (DSD) se describe mediante una función log-normal upper-limit (LNUL).
3. La distribución de volumen teórico (DVT) de las gotas atomizadas en la dirección  $x$  se describe mediante una función de distribución normal.
4. La trayectoria inicial de una gota es independiente del diámetro de la misma
5. Solo es de interés obtener la distribución de gotas depositadas en la coordenada horizontal  $x$  para  $z = H$  (nivel del suelo).
6. Las gotas son esféricas, con densidad y viscosidad constantes.
7. La velocidad del viento se considera constante y unidimensional [8]. Debido a que existe un perfil de velocidad de viento en la dirección vertical [9], el valor constante se obtiene aplicando el teorema del valor medio a dicho perfil.
8. Ni bien abandonan la boquilla, la velocidad de las gotas en dirección vertical es igual a la terminal ( $v_T$ ) [8, 10].
9. La velocidad de las gotas en la dirección  $x$  es igual a la velocidad media del viento [10].
10. Las gotas se depositan ni bien alcanzan la superficie del suelo.
11. El ingrediente activo en se encuentra presente en las gotas en baja concentración [11].



12. Debido a que la concentración de fitosanitarios en el caldo de pulverización es muy baja, la cinética de evaporación de las gotas es similar a la del agua pura [11].
13. El terreno es plano y la densidad de malezas y cultivos es despreciable.

De acuerdo con las hipótesis 2 a 4 del modelo, el proceso de atomización queda descrito por dos distribuciones. La DSD está definida por la siguiente ecuación [12]:

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_{ul}} \frac{d_{max}}{d_0(d_{max}-d_0)} e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{\ln d_0 - \ln a_{ul}}{\ln \sigma_{ul}} \right]^2} \quad (1)$$

donde  $d_0$  es el diámetro inicial de gota atomizada, mientras que  $a_{ul}$  y  $\sigma_{ul}$  son parámetros de forma dispersión, respectivamente, y  $d_{max}$  es el máximo diámetro de la distribución. Estos parámetros dependen de la boquilla de pulverización utilizada y de la presión de trabajo.

La DVT representa la distribución de volumen depositado sin efectos de evaporación o viento en la dirección  $x$  cuando la boquilla se ubica a una distancia  $H$  del suelo:

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

donde la desviación estándar ( $\sigma_s$ ) depende únicamente de la boquilla y la altura de botalón y  $x_0$  es la distancia donde la gota se depositaría sin ser arrastrada por el viento al ser pulverizada desde la altura de botalón  $H$ .

Debido a que ambas distribuciones son independientes, se pueden expresar como una función densidad bi-variable:

$$f_{d\alpha}(d_0, x_0) = f_d(d_0) f_{x_0}(x_0) \quad (3)$$

De acuerdo a las hipótesis 11 y 12, el cambio de diámetro de las gotas en vuelo se calcula mediante la siguiente ecuación [8]:

$$d = d_0 \left( 1 - \frac{t}{k d_0^2} \right) \quad (4)$$

donde  $t$  es el tiempo de vuelo de la gota y,  $k = \beta / (T - T_{bh})$ .  $\beta$  es una constante igual a  $80 \times 10^{-12} \frac{S^{\circ}C}{m^2}$  [8] y  $T$  y  $T_{bh}$  son la temperatura ambiente y la de bulbo húmedo, respectivamente.

La velocidad de las gotas en la dirección vertical es igual a la terminal durante todo el vuelo (hipótesis 8). En base a la definición de velocidad terminal en régimen de Stokes de una partícula esférica y a la ecuación 4 se obtiene la posición de las gotas en base al tamaño de gota en vuelo:

$$z = -k d_0 \frac{(\rho_d - \rho_g)g}{54\mu_g} (d^3 - d_0^3) \quad (5)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\mu_g$  la viscosidad del aire y  $\rho_d$  y  $\rho_g$  las densidades del líquido pulverizado y del aire, respectivamente.

Cuando la distancia vertical recorrida  $z$  es igual a la altura de botalón ( $H$ ) se obtiene el diámetro al que gotas de tamaño inicial  $d_0$  se depositan.

$$d_{dep} = d_0 \left( 1 - \frac{54\mu_g H}{k d_0^4 (\rho_d - \rho_g)g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Igualando  $d_{dep}$  a 0 es posible calcular el mínimo diámetro de gota inicial que llegará a depositarse en las condiciones del caso.

$$d_{min} = \left( \frac{54\mu_g H}{k(\rho_d - \rho_g)g} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

Reemplazando este diámetro en la ecuación 4 se calcula el tiempo de deposición para cualquier tamaño inicial de gota:

$$t_{dep} = k d_0^2 \left( 1 - \frac{d_{dep}}{d_0} \right) \quad (8)$$

El tiempo de respuesta de una gota en régimen de Stokes se define como:

$$t_{resp} = \frac{\rho_d d_0^2}{18\mu_g} \quad (9)$$

Gotas con un tiempo de respuesta mayor al tiempo de deposición no verán su trayectoria afectada por el viento. Existe entonces un diámetro inicial crítico ( $d_{crit}$ ) para el cual el tiempo de respuesta y el que tarda en depositarse son iguales:

$$d_{crit} = \left[ \frac{54\mu_g H}{k(\rho_d - \rho_g)g} \frac{1}{1 - \left( 1 - \frac{\rho_d}{k 18\mu_g} \right)^3} \right]^{1/4} \quad (10)$$

De acuerdo a las hipótesis 7 y 9, la velocidad de las gotas en la dirección del viento (dirección  $x$ ) es constante e igual a la velocidad del viento. El perfil de velocidad de viento en la dirección  $z$  para terrenos planos puede asumirse logarítmico y se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$U = U_0 \frac{\ln \left( \frac{(H-z)+\epsilon}{\epsilon} \right)}{\ln \left( \frac{H+\epsilon}{\epsilon} \right)} \quad (11)$$

donde  $U_0$  es la velocidad del viento a la altura de botalón  $H$  y  $\epsilon$  es la rugosidad del terreno. Para campos sin cultivo se puede asumir una rugosidad igual a 0.09m [8, 13].

A fin de obtener un valor constante de la velocidad, se calcula la velocidad promedio en vuelo de la población completa mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{U} = \frac{\int_{d_{min}}^{d_{crit}} \int_{t_{resp}}^{t_{dep}} U f_d(d_0) dt dd_0}{\int_{d_{min}}^{d_{crit}} \int_{t_{resp}}^{t_{dep}} f_d(d_0) dt dd_0} \quad (12)$$

La distancia de deposición de las gotas se calcula como:

$$x_{dep} = x_0 + \bar{U} t_{dep} \quad (13)$$

Como  $\bar{U}$  es constante y  $t_{dep}$  es función del diámetro inicial de gotas y no de  $x_0$ ,  $\partial x_0 / \partial x_{dep} =$



1. Realizando un cambio de variables en la ecuación 3 se obtiene la distribución de volumen depositado:

$$f_{d,x_{dep}}(d_0, x_{dep}) = f_d(d_0) f_{x_0}(x_0[x_{dep}]) \quad (14)$$

donde  $x_0[x_{dep}] = x_{dep} - \bar{U}t_{dep}$ .

La ecuación 14 describe la probabilidad en volumen de encontrar una gota depositada cuyo diámetro inicial ( $d_0$ ) a una dada distancia en dirección del viento ( $x_0$ ). Integrando esa ecuación en todo diámetro que puede depositarse se obtiene la función de distribución de volumen de PPC depositado en función de la distancia:

$$f_{x_{dep}}(x_{dep}) = \int_{d_{min}}^{d_{max}} f_{d,x_{dep}}(d_0, x_{dep}) dd_0 \quad (15)$$

En base a la ecuación 15, asumiendo que la dirección de avance es perpendicular a la del viento, se calcula la deriva de un botalón de N boquillas mediante la siguiente expresión [7]:

$$Y(x_{dep}) = s \sum_{i=1}^N f_{x_{dep}}(x_{dep} + (i-1)s) \quad (16)$$

donde  $s$  es la separación entre las boquillas en el botalón y se calcula mediante la siguiente ecuación [6]:

$$s = \frac{Q_{pulv}}{F_{pulv} v_{maq}} \quad (17)$$

donde  $Q_{pulv}$  es el caudal pulverizado de una boquilla de pulverización,  $F_{pulv}$  es la dosis aplicada expresada en volumen pulverizado por unidad de área cubierta, y  $v_{maq}$  es la velocidad de avance de la pulverizadora [6]. El caudal pulverizado se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{pulv} = C_d A_{past} \left( \frac{2P_{pulv}}{\rho_d} \right)^{1/2} \quad (18)$$

donde  $P_{pulv}$  es la presión de pulverización,  $C_d$  es el coeficiente de descarga de la boquilla y  $A_{past}$  es el área

## Resultados

El modelo matemático fue implementado en Python 3.9. Se definió un caso base del cual había datos de literatura disponibles para comparar. El sistema modelado es una pulverizadora de botalón con 54 boquillas Lurmark 31-03-F110 espaciadas en 0.5m. Posteriormente se realizó un análisis de sensibilidad sobre el porcentaje de deriva al variar condiciones distintas variables de proceso. En la Tabla 1 se reportan las diferentes variables necesarias para resolver el modelo en el caso base y en los casos utilizados para el análisis de sensibilidad. Las condiciones descritas en todos los casos y el equipo de pulverización utilizado se corresponden con casos de medición de deriva en campo reportados en literatura [1].

Las propiedades físicas de la mezcla a pulverizar corresponden a agua de la canilla.

Tabla 1: Datos de entrada para los diferentes casos.

Caso	Base	+33% P	+33% U	+50% H
$\bar{U}$ (m/s)	0,77	0,8	1,3	0,77
$T$ (°C)	20	20	20	20
$T_{bh}$ (°C)	17,1	17,7	17,1	17,1
$H$ (m)	0,5	0,5	0,5	0,75
$P_{pulv}$ (bar)	3	4,5	3	3
$\sigma_s$ (m)	0,13	0,13	0,13	0,19
$d_{max}$ (µm)	643	562	643	643
$a_{ul}$	1,36	1,36	1,36	1,36
$\sigma_{ul}$	2,51	2,51	2,51	2,51

Definiendo a  $x_{dep} = 0$  como la posición de la última boquilla del botalón respecto al viento, se calculó la deriva depositada ( $Y$ ) a 2 distancias de deposición (1 y 5m) para sistemas con diferente número de boquillas del botalón. En la Figura 1 se muestra la deriva para botalones cuyo número de boquillas varía de 1 a 2. Se observa que el volumen depositado por botalones de diferente número de boquilla varía dependiendo de la distancia observada de deposición. A  $x_{dep} = 1m$  se observa una pendiente más pronunciada entre el cambio de deriva y el número de boquillas, mientras que a  $x_{dep} = 5m$  la relación tiende a ser más lineal. Esto implica que el impacto relativo de un aumento en el número de boquillas en  $x_{dep} = 5m$  cuando  $N > 10$ , es mayor que en  $x_{dep} = 1m$  y un comportamiento opuesto para  $N < 10$ . Igualmente, se observa que, sin importar la distancia, aún las últimas boquillas del botalón contribuyen a la deriva sin importar la distancia.

En la Figura 2 se compara la deriva de pulverización para diferentes distancias de deposición obtenida mediante simulación para un sistema de una única boquilla frente a un botalón de 30 boquillas. Se observa que la presencia de múltiples boquillas desplaza la curva hacia valores de deriva superiores. En particular, para  $x_{dep} = 1m$  la deriva aumenta desde 5% en un sistema de 1 boquilla hasta aproximadamente 14% en el botalón. El desplazamiento de la curva ocurre debido a la sumatoria de la Ecuación 16. Se observa además diferencia en las pendientes de las curvas, en particular en la zona de 1 a 6 metros. Este cambio no es necesariamente proporcional, sino que es dependiente de valores de la curva de una boquilla en diferentes



distancias. Debido a esto, si es necesario conocer el valor absoluto de la deriva, se debe simular el botalón completo para no subestimar las pérdidas.

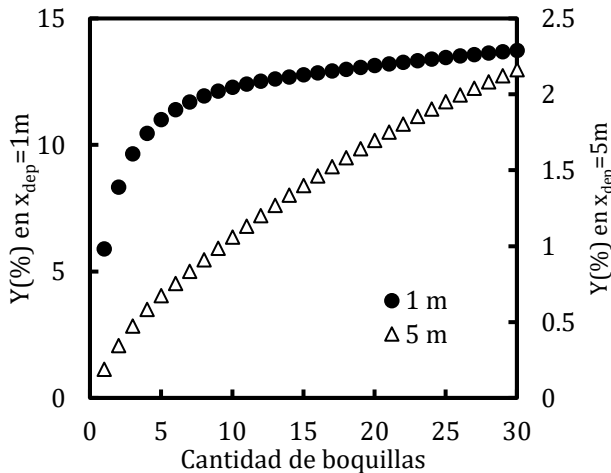


Figura 1: Deriva de pulverización para distancias de deposición de 1 y 5 m en función del número de boquillas.

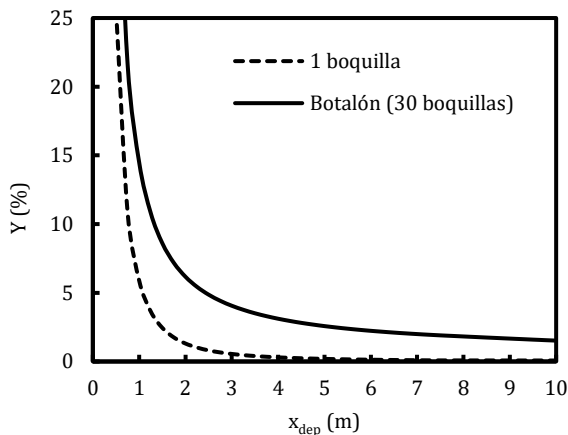


Figura 2: Deriva de pulverización para  $N=1$  y  $N=30$ .

Se estudió además la calidad de la predicción de la influencia de variables de proceso en la deriva simulando tanto una boquilla única como también botalón completo ( $N = 54$ ). Para esto, se realizaron simulaciones con incrementos de 33% en la presión de pulverización, 50% en la altura de botalón y 33% en la velocidad media de viento como se muestra en la Tabla 1. De las simulaciones se registró la variación de deriva a  $x_{dep} = 5$  m del caso base respecto a los 3 casos y los resultados fueron comparados frente a la variación reportada por Nuyttens [1].

En la Figura 3 se muestran los cambios relativos de deriva frente a cambios de variables de proceso para el caso experimental y para los

casos simulados. Tanto al simular una única boquilla como al simular botalón completo, se observa una tendencia en la sensibilidad de la deriva frente a cambios en las variables de proceso que coincide con los valores experimentales. Además, los resultados de una boquilla son bastante similares a los de botalón completo. Simular una boquilla es atractivo si los recursos computacionales son limitados ya que reduce considerablemente la cantidad de cálculos.

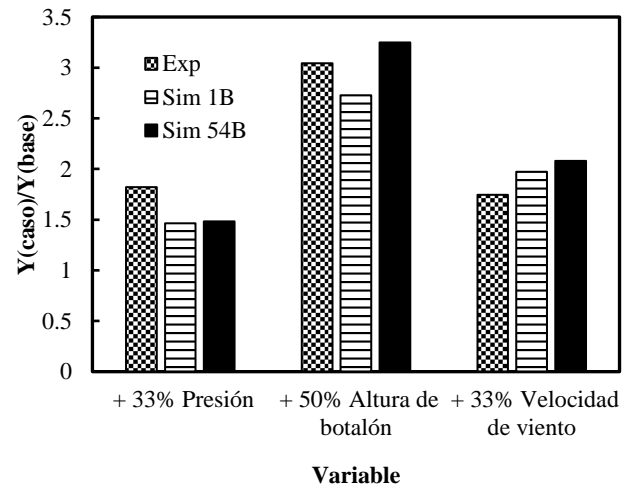


Figura 3: Cambios en la deriva debido a cambios en la presión, altura de botalón y velocidad del viento.

## CONCLUSIONES

La deriva de pulverización es un fenómeno complejo que depende de múltiples factores. En el trabajo se presentó un modelo de predicción de deriva para botalón completo que permite analizar la influencia del número de boquillas respecto a la deriva. Adicionalmente, el modelo incluye efectos de evaporación, arrastre y considera una velocidad de viento representativa del movimiento de las gotas del spray.

Del análisis del impacto del número de boquillas en el proceso de pulverización, se observó que el efecto relativo sobre la deriva del número de boquillas utilizadas es dependiente de la distancia de deposición. A distancias cercanas al valor 0 de deposición, simular 10 boquillas puede ser adecuado para obtener resultados absolutos de deriva, mientras que a distancias mayores (ej. 5 metros) es necesario simular el botalón completo ya que las boquillas aportan valores absolutos de deriva similares. Es importante que cambios en las condiciones ambientales pueden afectar la influencia del número de boquillas a diferentes distancias y eso no fue analizado en este trabajo.

Se observó que al simular una única boquilla, la deriva absoluta predicha es considerablemente menor a la obtenida al simular botalón completo. Esto se debe a la naturaleza del proceso de deposición al existir diferentes puntos de orígenes de pulverización. Se observó que la pendiente de la curva de una boquilla y la de botalón completo no es la misma multiplicada por una constante.

Se realizó un análisis de sensibilidad de cambios relativos de la deriva a diferentes variables de proceso comparando con un caso base. Los resultados de la simulación presentaron una buena correspondencia con datos experimentales de literatura tanto para la simulación de una boquilla como para botalón completo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional del Sur (UNS) por el soporte financiero.

## REFERENCIAS

- [1] Nuyttens, D. (2007). Drift from field crop sprayers: The influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means. Katholieke Universiteit Leuven.
- [2] Mateo-Sagasta, J.; Zadeh, S. M.; Turrall, H. & Burke, J. (2017). *Water pollution from agriculture: a global review. Executive summary*. FAO Colombo. Rome, Italy. International Water Management Institute (IWMI). CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE). Sri Lanka
- [3] van den Berg, F., Kubiak, R.; Benjey, W. G.; et al. (1999). Emission of Pesticides into the Air. *Water, Air, Soil Pollut.*, 115(1), 195–218.
- [4] International Organization for Standardization. (2005). *ISO 22866,2005: Equipment for crop protection -- Methods for field measurement of spray drift*. International Organization for Standardization
- [5] Galon, L.; Bragagnolo, L.; Korf, E.P.; et al. (2021) *Mobility and environmental monitoring of pesticides in the atmosphere — a review*. *Environ Sci Pollut Res* 28, 32236–32255.
- [6] Onorato, A.; Tesouro, O. (2006) *Pulverizaciones Agrícolas Terrestres*. 1ª Ed., INTA, Buenos Aires.
- [7] Renaudo, C.A. (2020) *Modelo predictivo de la deriva de pulverización en aplicaciones agrícolas de botalón*. Universidad Nacional del Sur, Argentina.
- [8] Lebeau, F.; Verstraete, A.; Stainier, C.; Destain, M. F. (2011) *RTDrift: A real time model for estimating spray drift from ground applications*. *Computers and Electronics in Agriculture*. 77(2), 161–174.
- [9] Richards, P. J., & Norris, S. E. (2011). *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4), 257-266.
- [10] Løfstrøm, P.; Bruus, M.; Andersen, H. V.; et al. (2013) *The OML-SprayDrift model for predicting pesticide drift and deposition from ground boom sprayers*. *Journal of Pesticide Science*. D12-064.
- [11] Teske, M. E.; Thistle, H. W.; Riley, C. M.; Hewitt, A. J. (2016) *Initial laboratory measurements of the evaporation rate of droplets inside a spray cloud*. *Transactions of the ASABE*. 59(2), 487-493.
- [12] Mugele, R. A., & Evans, H. D. (1951). *Droplet Size Distribution in Sprays*. *Ind. Eng. Chem.*, 43(6), 1317–1324.
- [13] Tieleman, H. W. (2003). *Roughness estimation for wind-load simulation experiments*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(9), 1163-1173.