



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTOR EN INGENIERÍA QUÍMICA

MODELO PREDICTIVO DE LA DERIVA DE PULVERIZACIÓN EN
APLICACIONES AGRÍCOLAS DE BOTALÓN

Carlos Alberto Renaudo

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2020



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTOR EN INGENIERÍA QUÍMICA

MODELO PREDICTIVO DE LA DERIVA DE PULVERIZACIÓN EN
APLICACIONES AGRÍCOLAS DE BOTALÓN

Carlos Alberto Renaudo

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2020

Prefacio

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Ingeniería Química, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en la Planta Piloto de Ingeniería Química, dependiente del Departamento de Ingeniería Química durante el período comprendido entre el 18 de agosto de 2015 y el 27 de febrero de 2020, bajo la dirección de la Doctora Verónica Bucalá y el Doctor Diego Esteban Bertin.

Carlos Alberto Renaudo

Bahía Blanca, 27 de febrero de 2020.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el / / , mereciendo la
calificación de ().

Agradecimientos

Sin la ayuda de las personas que me acompañaron durante el transcurso de estos años, no me hubiera sido posible realizar esta tesis. A esas personas les digo *gracias*.

A mis directores, agradezco la oportunidad que me dieron y la paciencia y los gestos que tuvieron. A Diego, le agradezco su capacidad para ayudarme a transformar en ideas aquellos desordenados conceptos que le llevaba a su oficina. A Verónica, le agradezco su visión, con la cual me ayudó a plantear nuevas preguntas y a valorar los logros conseguidos.

Agradezco a la Universidad Nacional del Sur y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, que brindaron los recursos necesarios para llevar a cabo esta tesis. También a la gente que conforma la Planta Piloto de Ingeniería Química, particularmente a las personas que conforman los grupos de Partículas y Reactores. En especial, por su repetida ayuda, agradezco a Fer y a Agus.

Le doy gracias a las personas con quien compartí y comparto almuerzos y oficina. En especial agradezco las charlas, las discusiones y por siempre tratar de buscar que yo vea el vaso medio lleno, incluso cuando estaba a la mitad.

Agradezco también a aquellas personas que, por sus gestos, hicieron que Bahía Blanca se sienta como un hogar. En especial a Anita, Claudia, Fiorella, Mariana, Paz y Yani, por la amistad, los mates y las comidas.

Le doy gracias a quienes conocí en los talleres de teatro, a esas personas que me mostraron que los logros son hechos colectivos.

También agradezco a quienes me acompañaron desde la distancia, en particular a Beto, Matu y Rosario, por encontrar siempre tiempo para juntarnos.

Y en especial agradezco a mi familia. A mis padres porque hicieron todo lo posible para que la educación sea parte de mi vida. A mi papá, por mostrarme que el esfuerzo importa y que nunca es tarde para animarse a cosas nuevas. A mi mamá, por haberme incentivado a leer y en especial por haberme regalado los libros de Jules Verne cuando era un niño. A mi tío Roberto, por dedicar esas tardes para mostrarme que detrás de las cosas hay un principio que las hace funcionar y que las fallas tienen causa y solución. A mi hermana, por ser el ejemplo que es, por mostrarme lo bueno que es animarse a defender nuestros derechos y porque sin su ayuda no habría podido estar en Bahía Blanca hoy.

Resumen

La actividad agrícola actual enfrenta diversos desafíos: existencia de una limitada área de cultivo, demanda creciente de producción debido al aumento de la población mundial, necesidad de adecuación a climas adversos, reposición de nutrientes por fertilización, control de plagas, entre otros. Algunos de estos desafíos se sobrellevan mediante la agricultura de precisión que está orientada a la aplicación de productos fitosanitarios de manera eficiente. Para ello, se introducen nuevas tecnologías asociadas a los productos y equipos que los aplican. La efectividad de los productos fitosanitarios depende fuertemente de la habilidad del aplicador para regular la pulverización con el propósito de que el producto alcance el sitio objetivo en la cantidad deseada. La pérdida de estos compuestos no depositados en el lugar deseado se denomina deriva y puede alcanzar hasta un 30% del producto aplicado. Su minimización es una preocupación creciente para asegurar la salud del operador, proteger el medio ambiente, lograr una eficiente protección de los cultivos y transformar la pulverización de fitosanitarios en una actividad sostenible. Por esta razón, el objetivo general de esta Tesis es desarrollar un modelo matemático validado capaz de predecir adecuadamente la deriva resultante de aplicaciones de fitosanitarios mediante pulverizadoras de botalón. Además de su capacidad predictiva, el modelo debe poseer las siguientes características principales: a) requerir un bajo tiempo de cómputo para su resolución, b) poseer un número mínimo de parámetros de ajuste y representar adecuadamente la deriva en ventanas operativas amplias y c) estar en función de variables de entrada de fácil medición o conocimiento (i.e., las habituales que manejan los aplicadores de fitosanitarios). Estas características permiten que el modelo pueda ser acoplado a máquinas pulverizadoras y proveer recomendaciones de operación o controlar variables en línea para minimizar la deriva.

En el Capítulo 1, se introducen conceptos acerca del proceso de pulverización de fitosanitarios mediante pulverizadoras de botalón y el panorama productivo nacional de maquinaria agrícola.

En el Capítulo 2 se describe el proceso de atomización y las boquillas generalmente utilizadas en la aplicación terrestre de productos fitosanitarios. Además, se desarrolla un modelo matemático que es capaz de predecir satisfactoriamente la distribución de tamaño de gotas atomizadas en boquillas de uso agrícola, utilizando variables de entrada que coinciden con las que el aplicador habitualmente selecciona.

Resumen

En el Capítulo 3 se realiza una revisión detallada de los modelos matemáticos disponibles en literatura a fin de comparar ventajas y desventajas de cada enfoque de modelado. Finalmente, se concluye acerca de la necesidad de desarrollar un nuevo modelo que mejore la relación entre nivel predictivo y costo computacional y que permita resolver de manera simultánea el proceso de atomización, desplazamiento, evaporación y deposición de las gotas.

En el Capítulo 4 se desarrolla un modelo matemático para predecir la deriva de pulverización correspondiente a una boquilla. El modelo se valida frente a datos experimentales de campo, sin necesidad de incorporar parámetros de ajuste. Posteriormente, se realiza un análisis de sensibilidad de variables ambientales y operativas sobre la deriva. Se observó que el uso de una velocidad media de viento basada en la población de gotas en vuelo reduce considerablemente la cantidad de cálculos sin perder precisión en el resultado.

En el Capítulo 5, se extiende el modelo matemático presentado en el capítulo anterior para ser aplicado a múltiples boquillas. Además, se incorporan efectos de dispersión de las gotas provocados por la turbulencia del aire ambiente. En este caso fue necesario realizar ajuste de dos parámetros vinculados a la dispersión. El modelo se validó frente a datos experimentales de campo reportados por diferentes autores. Una vez validado el modelo completo, se definieron curvas operativas para efectuar recomendaciones operacionales a los efectos de trabajar con deriva aceptable. Estas curvas ilustran cómo optimizar el proceso de pulverización agrícola por botallón, sugiriendo para ello cambios en las variables que conocen y manejan los aplicadores (condiciones ambientales, condiciones operativas y características asociadas a la pulverizadora).

Por último, en el Capítulo 6, se resumen los resultados más destacados y se presentan las futuras líneas de investigación que se llevarán a cabo para construir un prototipo a ser incorporado en pulverizadoras para brindar recomendaciones o controlar en línea la calidad de la aplicación.

Abstract

The current agricultural activity faces several challenges: existence of a limited area of cultivation, growing production demand due to the increase in the world population, need for adaptation to adverse climates, replacement of nutrients by fertilization, pest control, among others. Some of these challenges are overcome with precision agriculture, that is oriented towards the application of phytosanitary products efficiently. To this end, new technologies associated with the products and equipment that apply them are introduced. The effectiveness of phytosanitary products depends strongly on the applicator's ability to regulate spraying so that the product can reach the target site in the desired amount. The loss of the compounds that are not deposited in the desired place is called drift, and it can be up to 30% of the applied product. Its minimization is a growing concern to ensure the health of the operator, protect the environment, achieve efficient crop protection and transform the spraying of phytosanitary products into a sustainable activity. For this reason, the general objective of this thesis is to develop a validated mathematical model capable to adequately predict the drift resulting from phytosanitary applications using boom sprayers. In addition to its predictive capacity, the model must: a) require a low computation time for its resolution, b) have a minimum number of adjustment parameters and adequately predict the drift for wide operating windows and c) have as input data, variables of easy measurement or knowledge (i.e., the usual ones used by the pulverization operators). These features allow the model to be coupled to spray machines and provide operating recommendations or control variables online to minimize drift.

Chapter 1 presents concepts about the phytosanitary spraying process by boom sprayers and the state of the Argentinean agricultural machinery.

Chapter 2 describes the atomization process and the nozzles generally used in the terrestrial application of phytosanitary products. In addition, a mathematical model is developed that satisfactorily predicts the size distribution of drops atomized by agricultural nozzles, using input variables that match those that the applicator usually selects.

In Chapter 3, a detailed review of the mathematical models available in the literature is made in order to compare advantages and disadvantages of each modeling approach. Finally, it is concluded that there is need to develop a new model able to predict the pulverization quality, to have a low computational cost and to solve simultaneously the processes of atomization, displacement, evaporation and deposition of drops.

Abstract

In Chapter 4, a mathematical model is developed to predict the spray drift corresponding to a nozzle. The model is validated against experimental field data, without the need to incorporate adjustable parameters. Subsequently, a sensitivity analysis of environmental and operational variables on drift is performed. It was observed that the use of an averaged wind speed (based on the population of drops in flight) considerably reduces the computational time without losing precision.

In Chapter 5, the mathematical model presented in the previous chapter is extended to the pulverization with multiple nozzles. In addition, dispersion effects of the drops caused by the turbulence of the ambient air are also incorporated. In this case, it was necessary to adjust two parameters related to the dispersion. The model was validated against experimental field data reported by different authors. Once the complete model was validated, operational curves were defined to make operational recommendations to reduce the drift. These curves illustrate how to optimize the process of pulverization by boom sprayers, suggesting changes in the variables handled by the applicators (environmental conditions, operating conditions and characteristics associated with the sprayer).

Finally, in Chapter 6, the most outstanding results are summarized and the future research to build a prototype to be incorporated in boom sprayers is presented aiming to provide recommendations or control the pulverization quality in real time.

Índice

1	Capítulo 1: Introducción	1
1.1	Panorama productivo agrícola en Argentina	2
1.2	Protección de cultivos	3
1.3	Aplicación de fitosanitarios para protección de cultivos	4
1.4	Deriva	8
1.4.1	<i>Factores que afectan la deriva.</i>	9
1.5	Regulación	11
1.6	Mercado de máquinas pulverizadoras en Argentina	12
1.7	Motivación	13
1.8	Objetivos	14
2	Capítulo 2: Proceso de Atomización y Boquillas de Uso Agrícola	15
2.1	Boquillas de pulverización para aplicaciones agrícolas	16
2.1.1	<i>Clasificación de boquillas</i>	19
2.1.2	<i>Clasificación de tamaño de gotas</i>	22
2.2	Proceso de atomización	23
2.2.1	<i>Producción de gotas</i>	23
2.2.2	<i>Regímenes de flujo para boquillas</i>	23
2.3	Representación de DSDs	26
2.3.1	<i>Diámetros y Parámetros representativos de DSD</i>	30
2.3.2	<i>Métodos de medición de tamaño de gota</i>	31
2.4	Modelado matemático de DSDs	34
2.5	Modelo propuesto para describir la atomización	36
2.6	Conclusiones	41
3	Capítulo 3: Revisión de modelos matemáticos para predicción de deriva	43
3.1	Volumen pulverizado	43
3.2	Definición matemática de la deriva de pulverización	46
3.3	Obtención experimental de deriva de pulverización	47
3.3.1	<i>Medición de deriva en campo.</i>	47
3.3.2	<i>Medición de potencial de deriva en laboratorio (túnel de viento).</i>	49
3.3.3	<i>Medición de potencial de deriva en banco de pruebas</i>	49
3.4	Modelos Empíricos	50
3.5	Modelos Lagrangianos	53
3.6	Modelos CFD	57
3.7	Modelos de dispersión	58
3.8	Comparación de modelos	62
3.9	Conclusiones	66
4	Capítulo 4: Modelo de Deriva para una Boquilla	69
4.1	Distribución espacial de las gotas atomizadas	70

Índice

4.2	Función de distribución bivariable propuesta para describir la población de gotas atomizadas	72
4.3	Modelo matemático de la deriva de la solución pulverizada para una boquilla	74
4.3.1	<i>Disminución del diámetro de gota por evaporación</i>	78
4.3.2	<i>Evolución del diámetro de gota en función de la distancia vertical recorrida</i>	78
4.3.3	<i>Tiempo de deposición</i>	80
4.3.4	<i>Tiempo de respuesta</i>	80
4.3.5	<i>Diámetro crítico</i>	80
4.3.6	<i>Velocidad media de viento</i>	81
4.3.7	<i>Distancia de deposición de gotas</i>	84
4.3.8	<i>Función de distribución de gotas depositadas</i>	84
4.4	Modelo matemático de la deriva de la solución pulverizada para los no volátiles	86
4.5	Validación del modelo matemático	86
4.5.1	<i>Datos experimentales para la validación</i>	86
4.5.2	<i>Resultados de validación</i>	88
4.6	Estudio de las DSDs depositadas	91
4.7	Análisis de sensibilidad de la deriva	95
4.8	Conclusiones	96
5	Capítulo 5: Modelo de deriva para botallón	99
5.1	Deriva de pulverización para múltiples boquillas	99
5.2	Función de distribución de gotas depositadas considerando dispersión	101
5.2.1	<i>Función de dispersión</i>	101
5.2.2	<i>Función de distribución de volumen depositado de solución considerando dispersión</i>	104
5.2.3	<i>Función de distribución de gotas depositadas de no volátiles considerando dispersión</i>	104
5.2.4	<i>Módulo de dispersión</i>	105
5.3	Ajuste y validación del modelo matemático	105
5.3.1	<i>Ajuste y validación del modelo con datos de Nuyttens (2007)</i>	105
5.3.2	<i>Validación del modelo con datos de deriva de van de Zande et al. (2014)</i>	109
5.3.3	<i>Distribución de tamaño de gotas depositadas</i>	112
5.4	Resultados de simulación	114
5.4.1	<i>Influencia de la cantidad de boquillas sobre la deriva</i>	114
5.4.2	<i>Cobertura</i>	116
5.4.2	<i>Diagrama de recomendaciones de pulverización con baja deriva</i>	116
5.5	Conclusiones	123
6	Capítulo 6: Conclusiones generales y tareas futuras	125
7	Apéndice A	129
8	Nomenclatura	133
9	Bibliografía	139

Capítulo 1

Introducción

“Un scientifique dans son laboratoire est non seulement un technicien: il est aussi un enfant placé devant des phénomènes naturels qui l'impressionnent comme des contes de fées”. Marie Skłodowska-Curie

La actividad agrícola actual enfrenta diversos desafíos: existencia de una limitada área de cultivo, demanda creciente de producción debido al aumento de la población mundial, necesidad de adecuación a climas adversos, reposición de nutrientes por fertilización, control de plagas, etc. (Nuyttens, 2007; Ramankutty et al. 2018). Los desafíos se sobrellevan mediante la incorporación creciente de tecnología agrícola. Por ejemplo, para combatir la pérdida de cultivos debido a patógenos, plagas de insectos y a la competencia frente a malezas, una de las alternativas para maximizar la productividad se basa en el control químico mediante la pulverización de fitosanitarios (Krämer y Schirmer, 2007; Mateo-Sagasta et al., 2017; Reddy, 2016).

De acuerdo a la FAO (Mateo-Sagasta et al., 2017), en países en desarrollo es aún necesario que la protección de cultivos mediante fitosanitarios se desarrolle como una actividad sostenible. La efectividad de los productos fitosanitarios depende fuertemente de la habilidad del aplicador para regular la pulverización con el propósito de que el producto alcance el sitio objetivo en la cantidad deseada (Nuyttens et al., 2007b). La pérdida de estos compuestos no depositados en el lugar deseado se denomina deriva (International Organization for Standardization, 2005b). La minimización de la deriva es una preocupación creciente para asegurar la salud del operador, proteger el medio ambiente y lograr una eficiente protección de los cultivos.

Existen reportes en la literatura que indican que las pérdidas de fitosanitarios durante la aplicación agrícola pueden llegar hasta 30% o incluso más de un 50% del volumen aplicado (van den Berg et al., 1999). En este contexto, si no se aplican los fitosanitarios de manera correcta se puede reducir ampliamente la efectividad del tratamiento y causar importantes pérdidas económicas. A su vez, el producto que no llega al sitio objetivo puede depositarse en campos de otros propietarios, dañar cultivos cercanos, contaminar fuentes de agua, presentar riesgo a la salud humana y animal, entre otros efectos (Munjanja et al., 2019; Terziev y Petkova-Georgieva, 2019). Por estas razones, en las últimas décadas se han

realizado acciones para controlar la deriva de pulverización desde campos legislativos, comerciales y de investigación.

En 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Se trata de un plan de acción enfocado, entre otros puntos, a alcanzar la seguridad alimentaria, promover el crecimiento económico sostenido y adoptar medidas urgentes relacionadas con el cambio climático (Organización de las Naciones Unidas, 2015). Mediante este acuerdo, los países firmantes se comprometieron a incrementar las inversiones en infraestructura rural, investigación y desarrollo tecnológico agrícola a fin de asegurar la sostenibilidad de la producción de alimentos (Organización de las Naciones Unidas, 2015). En este contexto, la correcta aplicación de fitosanitarios para preservar la calidad y la sostenibilidad de la producción y evitar un impacto ambiental no deseado es un desafío de interés actual para los países con fuerte producción agrícola, en especial en los que están en vías de desarrollo (Mateo-Sagasta et al., 2017).

1.1 Panorama productivo agrícola en Argentina

Según datos del Censo Nacional Agropecuario realizado en 2018 (INDEC, 2020), para la producción de leguminosas (cultivos intensivos) fue necesario aplicar fitosanitarios en 1.3% de la superficie total tratada, representando unas 686.000 hectáreas. Cabe aclarar que, debido a que cada tratamiento suele realizarse más de una vez sobre un mismo lugar, la superficie total tratada con fitosanitarios puede ser mayor a la cultivada. En 2018, la producción de leguminosas fue aproximadamente 670.000 toneladas (Calzada y Treboux, 2019a). Por otro lado, para la producción de cereales y oleaginosas (cultivos extensivos), la superficie tratada con fitosanitarios en 2018 fue aproximadamente 43 millones de hectáreas (INDEC, 2020) y el volumen de producción alcanzó 146 millones de toneladas (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2019). Si bien la producción anual de leguminosas en Argentina es muy inferior a la de cereales y oleaginosas, los cultivos intensivos requieren un número de pulverizaciones de fitosanitario por año superior al de los extensivos. La pulverización puede realizarse de forma aérea o terrestre, en la Figura 1.1 se muestra una pulverizadora terrestre de botalón autopropulsada.

Los cultivos requieren un cuidado y atención para combatir las plagas y malezas, ya que las mismas pueden ocasionar que la productividad decaiga hasta un 50% (Zhu et al., 2004). Las campañas de pulverización aplicadas en cada ciclo productivo deben cumplir con parámetros de calidad y sostenibilidad para aumentar la producción. Sin embargo, en Argentina los procedimientos de pulverización aún no se han normalizado. Existe en general un manejo de fitosanitarios muy dependiente del operador, una limitada capacitación de los aplicadores y falta de herramientas de software de asistencia para las

aplicaciones. Planes de mejora relacionados con estas debilidades contribuirían a reducir el impacto ambiental y los costos operativos de la pulverización (Mateo-Sagasta et al., 2017).



Figura 1.1. Pulverizadora de botalón autopropulsada. Con permiso de Empresa Cuthill.
Fuente: <http://www.cuthill.com.ar/>

Actualmente, Argentina es el tercer país que más fitosanitarios usa en el mundo, detrás de Estados Unidos y Brasil (Filippini, 2016). En 20 años (de 1991 a 2012), el consumo de fitosanitarios en Argentina aumentó de 39 millones a 335 millones de litros por año (un incremento del 758%). Sin embargo, para el mismo período la superficie cultivada de cereales y oleaginosas sólo aumentó un 50% (Filippini, 2016). Esto indica que la aplicación de fitosanitarios por hectárea creció sustancialmente. Esta evidencia reafirma la necesidad de una agricultura sostenible, es decir, de una práctica agrícola que satisfaga la demanda de alimentos en forma económicamente viable y socialmente aceptable, sin comprometer al medio ambiente y la salud.

1.2 Protección de cultivos

Para combatir los organismos que amenazan la producción agrícola, existen diferentes métodos de prevención, de erradicación o de control (Zimdahl, 2018). La diferencia entre cada método reside en el momento de aplicación y el alcance del mismo. Se denomina prevención cuando se aplican medidas destinadas a evitar la introducción de una plaga en un sitio en el cual no está presente (Onorato y Tesouro, 2006). La erradicación, por otro lado, consiste en eliminar completamente una plaga existente en un área determinada. En general, la erradicación es difícil de lograr, ya que requiere acciones de múltiples actores y elevados costos. Por otro lado, los métodos de control tienen por objetivo atenuar los efectos de la plaga para disminuir el impacto de la misma sobre la producción. Estos métodos pueden ser culturales (e.g., rotación de cultivos, evitar cultivos en ciclos típicos de crecimiento de malezas), físicos (e.g., cobertura con materiales plásticos de cultivos

intensivos), biológicos (e.g., insectos que atacan malezas), mecánicos (e.g., labrado de la tierra) o químicos (e.g., aplicación de insecticidas) (Zimdahl, 2018).

Los productos químicos usados en la actividad agrícola suelen clasificarse en a) fertilizantes (usados para enriquecer el suelo con distintos nutrientes) y b) fitosanitarios (utilizados para minimizar o impedir el daño que las plagas o malezas puedan causar a los cultivos) (Gras y Unsworth, 2016). Los productos fitosanitarios incluyen herbicidas, insecticidas, fungicidas, entre otros. La protección de cultivos mediante productos químicos puede clasificarse en base al: a) modo de acción, b) método de aplicación y c) momento de su pulverización (Onorato y Tesouro, 2006). Si la acción del producto ocurre sobre un organismo específico, el fitosanitario es **selectivo**. En cambio, si la acción ocurre sobre todas las especies presentes con las que el producto tiene contacto, se trata de un fitosanitario **no selectivo**. Los productos que requieren que el vegetal los absorba para que ocurra la acción de control se denominan **sistémicos**. En cambio, aquellos productos que actúan en la zona donde hacen contacto se denominan **de contacto**. En lo referido al momento de aplicación, se clasifican como **pre-siembra**, **pre-emergencia** y **post-emergencia** si se aplican previo a la siembra, durante o luego de la siembra y luego de detectarse el organismo a controlar, respectivamente (Labrada et al., 1994). En general, para incrementar la acción del control químico es necesario conocer qué plaga se desea controlar, el momento conveniente a realizar la aplicación, el tipo y dosis de agroquímico y la forma de aplicación más conveniente. En caso de que exista más de un producto de protección de cultivos que cumpla con la acción de control, normalmente se elige aquel de menor costo por hectárea y de menor toxicidad por dosis (Maheshwari, 2010). El momento de aplicación es crítico debido a que las plagas pueden presentar grados de sensibilidad variables con el estadio de crecimiento de las mismas. Si la aplicación se realiza fuera del momento de máxima sensibilidad, la efectividad de la acción de control puede reducirse (Soloneski y Larramendy, 2011).

1.3 Aplicación de fitosanitarios para protección de cultivos

Los productos químicos empleados en la protección de cultivos son comúnmente aplicados como gotas generadas a través de sistemas de pulverización (van den Berg et al., 1999). Existe una amplia variedad de equipamiento para realizar esta atomización y su selección depende, entre otros aspectos, de la formulación del agroquímico, el organismo biológico a ser controlado, las condiciones ambientales y el tipo de cultivo (Balan et al., 2016). Las pulverizadoras terrestres por botalón son generalmente utilizadas en áreas cultivables grandes y pueden subclasificarse como pulverizadoras remolcadas, montadas o auto propulsadas en base al diseño de las mismas (Kim et al., 2017a; Santos, 2019). En la

Figura 1.2 se ilustran diferentes tipos de pulverizadoras terrestres. Estos equipos poseen una estructura horizontal sobre la cual están montadas las boquillas denominada botalón.

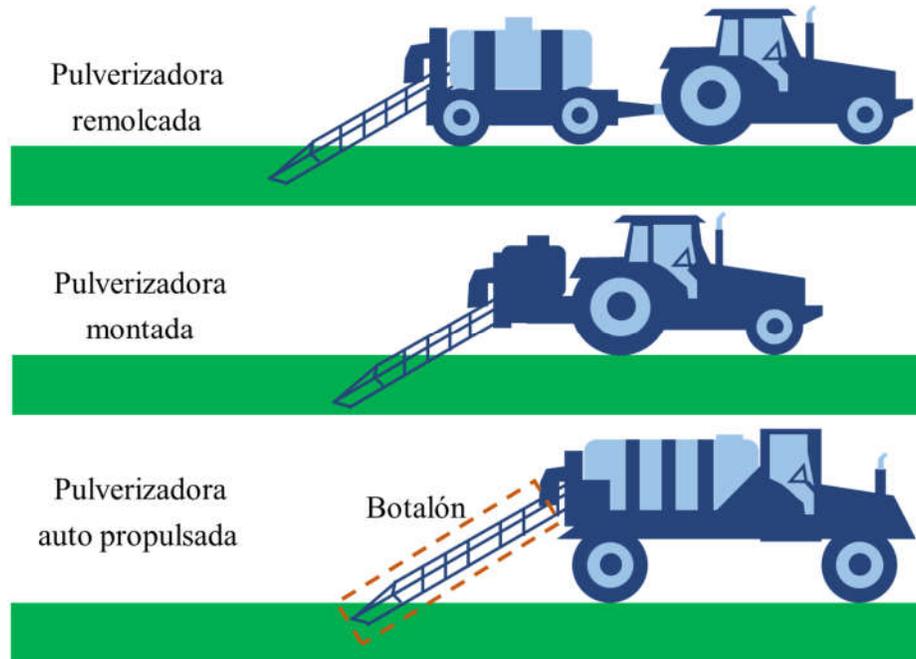


Figura 1.2. Esquemas de pulverizadoras remolcadas, montadas y autopropulsadas.

El amplio tamaño del botalón y la posibilidad de distribuir múltiples boquillas sobre el mismo permiten pulverizar productos fitosanitarios sobre una amplia área de aplicación (Alvarenga y da Cunha, 2010, Safari y Sharifnasab, 2010). Para proveer la presión requerida para atomizar la solución de fitosanitarios a través de las boquillas, las pulverizadoras por botalón poseen un circuito hidráulico. Un esquema simplificado del mismo se muestra en la Figura 1.3.

El tanque (T) contiene al caldo de pulverización a ser aplicado. Las pulverizadoras autopropulsadas poseen tanques de mayor volumen que las montadas o las remolcadas por tractor. La mayoría de las pulverizadoras modernas poseen tanques construidos de material resistente a la corrosión y un sistema de agitación en el fondo del tanque para mantener las formulaciones homogeneizadas (Onorato y Tesouro, 2006). Para evitar la formación de burbujas cuando el tanque se encuentre con poca cantidad de caldo, lo cual puede afectar la vida útil de la bomba (P), se recomienda el uso de agitación hidráulica provista por un reciclo del caudal de líquido.

El filtrado del caldo de pulverización es esencial para evitar el bloqueo de las boquillas durante la pulverización. Como indica la Figura 1.3, el filtro (F) se ubica inmediatamente antes de la bomba. Algunas pulverizadoras también incluyen un filtro a la entrada del

tanque y filtros individuales acoplados a cada boquilla (no mostrados en la Figura 1.3) (Onorato y Tesouro, 2006). Los filtros deben inspeccionarse y limpiarse regularmente, en lo posible considerando el material a pulverizar y las recomendaciones del fabricante (Gandolfo et al., 2013).

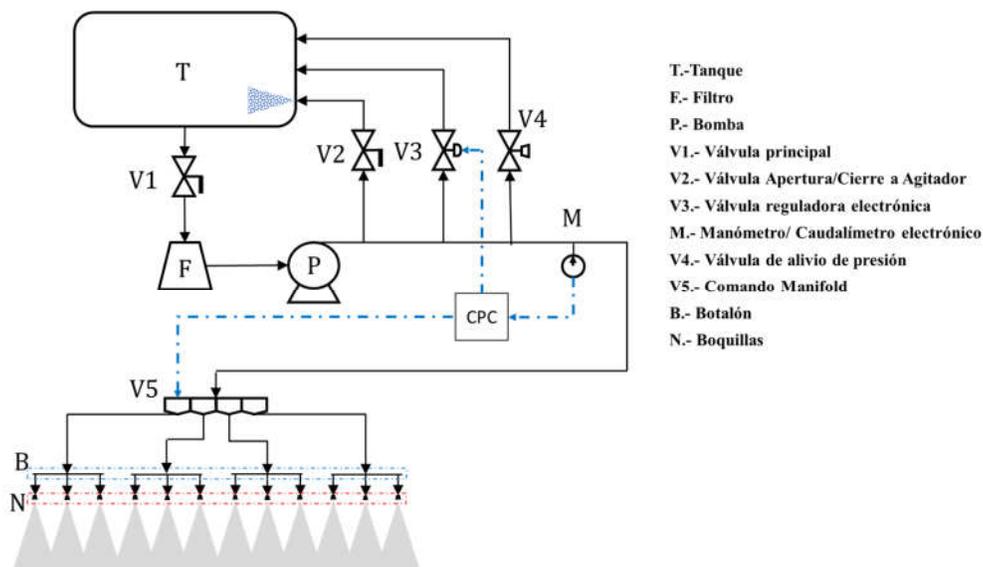


Figura 1.3. Diagrama general de circuito hidráulico de pulverización.

La bomba (P) entrega energía mecánica al circuito hidráulico para enviar el caldo de pulverización desde el tanque al botalón. En las pulverizadoras pueden usarse diferentes tipos de bombas. La selección de la bomba depende del volumen total a pulverizar, la presión requerida para las boquillas, la agitación del líquido en el fondo del tanque y las propiedades del caldo de pulverización (Hofman y Solseng, 2004). Las bombas más usadas en aplicaciones agrícolas son las centrífugas, de pistón, de diafragma y de rodillos.

La válvula principal (V1) habilita la circulación del caldo a pulverizar a través del sistema, la misma se ubica a la salida del tanque (T) previo al filtro (F). La válvula (V2) habilita el paso de líquido hacia el agitador hidráulico. Para controlar el caudal de líquido que fluye desde la bomba a las boquillas se utiliza una válvula de control electrónico (V3), la cual recibe las condiciones de operación del circuito principal de control (CPC). La válvula (V4) es una válvula de alivio de presión. Cuando la presión supera un valor deseado, la válvula V4 se abre y el exceso de líquido recircula hacia el fondo del tanque (Dickinson et al., 2007). V5 son válvulas de varias vías (manifold) que permiten habilitar secciones específicas del botalón (B), el control de las vías habilitadas se realiza mediante el CPC. Esto es útil cuando se está aplicando sobre los límites del terreno y una fracción del botalón no es requerida. La presión de pulverización o el caudal circulante se registra mediante

sensores electrónicos de presión o caudal (M). La información registrada por los sensores se envía al (CPC). Durante la operación, los manómetros pueden perder precisión por lo que es recomendable realizar calibraciones regularmente (Balestrini, 2006; Hofman y Solseng, 2004).

El botalón (B) está compuesto por una estructura metálica que se ubica paralela al terreno que soporta las barras de pulverización sobre las cuales están dispuestas las boquillas (N). Generalmente la longitud total del botalón es fija, oscilando entre 10 a 16 metros para equipos montados y puede alcanzar longitudes cercanas a los 30 metros para equipos autopropulsados (Onorato y Tesouro, 2006). Esta distancia es importante ya que en conjunto con el tiempo disponible de operación y la velocidad de avance de la pulverizadora permite calcular el área a tratar (Matthews et al., 2014). Durante la operación, debido al avance de la pulverizadora y a irregularidades en el terreno, ocurren movimientos en dirección vertical y horizontal del botalón que afectan la cobertura sobre el área tratada (Langenakens et al., 1999; Ooms et al., 2002). A fin de reducir estos movimientos, los botalones cuentan con sistemas de amortiguamiento (Anthonis et al., 2005; Tahmasebi et al. 2013).

En la Figura 1.3, las boquillas (N) pulverizan el fitosanitario sobre el área objetivo. Las mismas están distribuidas en el botalón (B) y se seleccionan en base a las necesidades de aplicación. El caldo de pulverización se acelera al circular a través de las boquillas, formando una capa líquida (boquillas de abanico plano) o un jet (boquillas de cono) en la salida de las mismas. La capa o el jet de líquido posteriormente se rompe generando gotas de diferentes tamaños que se mueven con diferentes direcciones y velocidades iniciales (Figura 1.4).

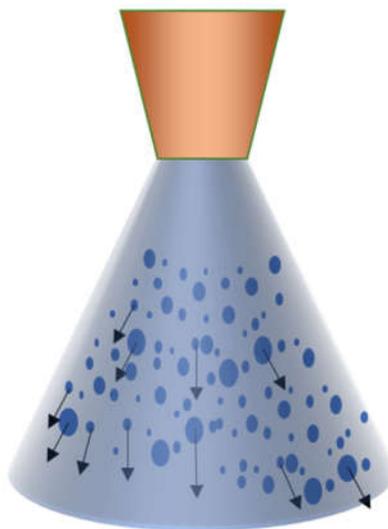


Figura 1.4 Esquema de la pulverización.

Capítulo 1

En relación a la composición del caldo, el solvente más comúnmente utilizado en las pulverizaciones agrícola es el agua. Aunque el agua presenta dos desventajas: alta tensión superficial (que provoca una baja superficie de contacto de las gotas depositadas sobre el sitio objetivo) y la gran volatilidad (las gotas se evaporan durante su vuelo), es muy usada debido a su disponibilidad y bajo costo (Etienot y Piazza, 2010). Los fitosanitarios pueden tener diferente grado de volatilidad. En relación a esta propiedad, en esta tesis, se llamarán “compuestos volátiles” y “compuestos no volátiles” a aquellos ingredientes activos cuya volatilidad es mucho mayor y menor a la del agua, respectivamente. En aquellas gotas en que el agua se evapora completamente durante el vuelo, los compuestos no volátiles presentes en ellas se convierten en contaminantes persistentes en la atmósfera (Harper, 2008).

1.4 Deriva

Existen reportes en la literatura que indican que las pérdidas de fitosanitarios durante la aplicación agrícola pueden llegar hasta 30% o incluso más de un 50% del volumen aplicado (van den Berg et al., 1999). Por esta razón, la aplicación mediante pulverización se considera un proceso de baja eficiencia (Courshee, 1960; Graham-Bryce, 1977; Masiá et al., 2012; Stephenson et al., 2006). Las pérdidas de fitosanitarios pueden deberse a: a) escurrimiento, b) volatilización y c) deriva de pulverización (Srivastava et al., 2009).

Las pérdidas por escurrimiento ocurren cuando el fitosanitario llega al objetivo pero no es absorbido por el mismo, sino que se desliza por la hoja y es depositado en el suelo. El escurrimiento puede alcanzar hasta un 30% del volumen aplicado. Existen múltiples causas para las pérdidas por escurrimiento, entre otras, las gotas: rebotan sobre las hojas, pasan entre las hojas hacia la superficie del suelo, y/o caen en hojas ya humedecidas con capacidad nula o baja de retención (Zimdahl, 2018). Los productos perdidos por escurrimiento pueden lixiviarse hacia aguas subterráneas provocando su contaminación (Rivero, 2012).

La volatilización se refiere a la pérdida de principios activos volátiles, los cuales se transforman en contaminantes presentes en la atmósfera.

De acuerdo a varias organizaciones internacionales (ISO: Organización Internacional para la Estandarización, EPA: la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y BCPC: Consejo Británico para la Protección de Cultivos), la deriva de pulverización es definida como el movimiento de las gotas a cualquier zona no objetivo causado por el viento o perturbaciones del aire (BCPC, 1986; EPA, 2001; International Organization for Standardization, 2008). La deriva de pulverización está vinculada a la tecnología y

condiciones operativas de pulverización, las condiciones ambientales, las propiedades del caldo a aplicar y la naturaleza del cultivo o suelo (Zhu et al., 1994).

En la Figura 1.5 se muestran pulverizaciones con distinto grado de deriva. Particularmente, en la Figura 1.5a se presenta un proceso de aplicación poco eficiente: la dispersión de la nube de gotas es un indicador cualitativo de la deriva que acompaña a la pulverización. En la Figura 1.5b se ha reducido la dispersión de la nube de pulverización mediante acciones correctivas realizadas por el operador.



Figura 1.5. Pulverización agrícola a) con deriva y b) deriva reducida mediante acciones correctivas (fotografía reproducida con permiso de Tom Wolf, Fuente: www.sprayers101.com).

1.4.1 Factores que afectan la deriva.

Durante una aplicación agrícola, las máquinas generalmente se desplazan a una velocidad entre 7 y 25 km/h, según el modelo y el estado del terreno, transmitiendo al equipo vibraciones que deben ser amortiguadas en el mayor grado posible para evitar que afecten la estabilidad del botalón (barra pulverizadora) (Lupea et al., 2009). Por esta razón, entre los factores principales que definen la calidad de una máquina pulverizadora se encuentran el diseño eficiente del sistema de suspensión y del equilibrio del botalón. A su vez, la deriva es un proceso complejo que depende de las condiciones de aplicación, del atomizador utilizado, de las propiedades fisicoquímicas del agroquímico, del tipo de cultivo y de las condiciones atmosféricas. La Tabla 1.1 resume los factores más relevantes que afectan la deriva de pulverización y describe los impactos que estos causan sobre la misma.

Debido a que una fracción de las gotas atomizadas no se deposita en el área objetivo, existe una necesidad creciente para diseñar sistemas y estrategias de aplicación que minimicen los riesgos ambientales (Gil et al., 2014; Zhang et al., 2018). En la Figura 1.6 se presentan los diferentes factores que, directa o indirectamente, intervienen en la deposición de las gotas. Las condiciones de operación que el aplicador puede manipular directamente,

las características del atomizador y las propiedades de la solución definen la distribución de tamaño y velocidad de las gotas que salen de cada boquilla (gotas iniciales atomizadas), las cuales, en conjunto con las condiciones ambientales y de suelo/cultivo, definen la trayectoria de las gotas y su deposición final.

Tabla 1.1 Factores que afectan la deriva de pulverización.

Variable	Impacto en la deriva	Referencias
Tensión superficial	Tensiones superficiales mayores producen gotas atomizadas de mayor tamaño, obteniendo una reducción en la deriva.	(Costa et al., 2017; Dombrowski y Fraser, 1954; Griesang et al., 2017;)
Viscosidad	Mayores viscosidades producen gotas atomizadas de mayor tamaño, obteniendo reducción en la deriva.	(Hilz y Vermeer, 2013; Oliveira et al., 2015; Spanoghe et al., 2006)
Densidad	Efecto despreciable sobre el tamaño de gota atomizada. Mayores densidades tienden a reducir la deriva debido a la acción de gravedad.	(Butler Ellis y Bradley, 2002)
Tipo de boquilla	Impacta el flujo de salida, la distribución de tamaño y la velocidad de las gotas atomizadas. Orificios de salida mayores producen mayores diámetros de gota que reducen la deriva.	(Al Heidary et al., 2014; Bueno et al., 2017; França et al., 2017; Gil et al., 2014; Hassen et al., 2014; Nuyttens et al., 2009b)
Presión de pulverización	Menores presiones de pulverización producen gotas atomizadas de mayor tamaño, lo que lleva a una reducción del riesgo de deriva.	(Costa et al., 2017; Ferguson et al., 2016; Gandolfo et al., 2014;)
Altura de botalón	Mayores alturas de botalón incrementan el tiempo de vuelo de las gotas, lo que produce un mayor riesgo de deriva.	(Arvidsson et al., 2011; Balsari et al., 2017; Hassen et al., 2014; Nuyttens et al., 2017)
Velocidad del viento	Mayores valores de velocidad de viento incrementan el riesgo de arrastre de las gotas, lo cual incrementa el riesgo de deriva.	(Al Heidary et al., 2014; Douzals y Al Heidary, 2014; Hassen et al., 2014)
Temperatura ambiente	Mayores valores de temperatura ambiente producen evaporaciones más rápidas, lo cual reduce el tamaño de las gotas en vuelo e incrementa el riesgo de deriva.	(Merrett, 1983; Nuyttens et al., 2006)
Humedad relativa	Menor humedad relativa incrementa la velocidad de evaporación, lo cual produce una reducción en el tamaño de gotas en vuelo y un incremento en el riesgo de deriva.	(Merrett, 1983; Nuyttens et al., 2006)

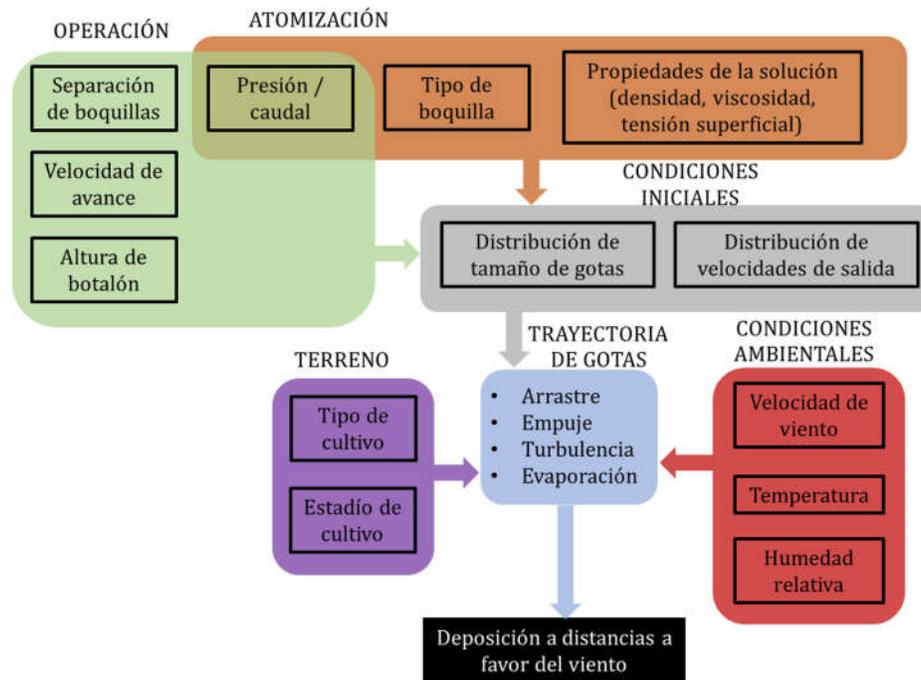


Figura 1.6. Factores que afectan la distancia a la cual se depositan las gotas atomizadas.

1.5 Regulación

Las pérdidas por deriva pueden dañar campos vecinos (Reddy et al., 2010) y áreas no objetivo sensibles (Kjær et al., 2006), contaminar cursos de agua (Felsot et al., 2011; Mottes et al., 2014), dañar la vida silvestre (Aktar et al., 2009; Maltby y Hills, 2008; Mottes et al., 2014) y potencialmente afectar la salud humana (Kim, K.H et al., 2017b). Debido a esto, en las últimas décadas se han realizado considerables esfuerzos para mejorar la tecnología de pulverización y para regular la aplicación de fitosanitarios (Felsot et al. 2010).

En la República Argentina, los tratados internacionales y la Constitución Nacional poseen mayor jerarquía que las leyes nacionales, provinciales y ordenanzas municipales. Las legislaciones de niveles inferiores deben respetar a las disposiciones de aquellas de más categoría. En el año 1994 se reconoció, mediante una reforma constitucional, el derecho de los habitantes a gozar de un ambiente sano y equilibrado, que debe ser preservado y las autoridades deben proporcionar herramientas para proteger ese derecho (F. A. y R. N, 2005). Debido a que la República Argentina es un estado federal compuesto por cuatro jurisdicciones (Nación, Provincias, Municipios y Ciudad Autónoma de Buenos Aires), las competencias que le corresponden a cada jurisdicción son diferentes. A la Nación, en materia ambiental, las normas que le corresponde dictar involucran los presupuestos mínimos de protección ambiental mientras que a las provincias les corresponde dictar normas complementarias que aseguren ese derecho ciudadano (F. A. y R. N, 2005). Este

deber de las provincias se refuerza mediante el artículo 124 de la Constitución Nacional, el cual establece que “corresponde a las provincias el dominio originado de los recursos naturales existentes en su territorio”.

En los últimos años, se han iniciado discusiones sobre un mayor control de la aplicación de productos fitosanitarios. En febrero de 2018, los ministerios de Ambiente y Desarrollo Sustentable y de Agroindustria de la Nación firmaron una normativa conjunta basada en las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) con el propósito de establecer un marco para profundizar el trabajo conjunto entre organismos nacionales y provinciales. El grupo de trabajo se conformó con representantes de los ministerios de Salud y de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (denominación anterior a 2018), Ambiente y Agroindustria y los Consejos Federales de Medio Ambiente (COFEMA) y el Agropecuario (CFA). Mediante esta resolución, se pretende fortalecer las políticas e instituciones agropecuarias nacionales para lograr una buena aplicación de fitosanitarios, y brindar un marco referencia para que cada provincia elabore reglamentaciones propias (Pilatti y Caruso, 2019).

1.6 Mercado de máquinas pulverizadoras en Argentina

En Argentina existen actualmente unas 15.000 máquinas pulverizadoras en funcionamiento. El 85% de los fitosanitarios se aplican con pulverizadoras autopropulsadas, en general mediante prestadores de servicio con más de una máquina. En la mayoría de los casos, cada pulverizadora trabaja entre 12.000 y 15.000 ha/año (Pereyra et al., 2008, Ministerio de Agroindustria, 2017).

En 2016, el mercado de nuevas pulverizadoras en Argentina fue de 860 equipos autopropulsados y 509 de arrastre, dando un total de 1.369 máquinas vendidas (Ministerio de Agroindustria, 2017). El precio promedio de una unidad en el tercer trimestre del 2017 fue de U\$S 120.000. Según datos de la empresa Maquinac de 2016 (www.maquinac.com), el mercado de pulverizadoras autopropulsadas se reparte entre 22 marcas, incluyendo 17 empresas nacionales y cinco multinacionales. En total, la oferta disponible llega a 65 modelos, de los cuales el 80% son equipos fabricados en el país. Existen 2 marcas principales que participan en el mercado de pulverizadoras autopropulsadas en Argentina: Metalfor S.A. y PLA S.A. La primera tiene sede en Marcos Juárez (Córdoba) y comercializa tanto pulverizadoras autopropulsadas como de arrastre. PLA S.A. se encuentra en Las Rosas (Santa Fe) y ofrece una amplia gama de pulverizadoras autopropulsadas al mercado local. En Argentina operan más de 15.000 máquinas pulverizadoras terrestres, de manera que el crecimiento anual de número de maquinarias es superior 8% anual.

La maquinaria agrícola argentina tiene una antigüedad media en años igual o inferior a la de los países desarrollados. Si bien la antigüedad del conjunto activo de pulverizadoras es relativamente baja comparándola con otros países, los equipos trabajan muchas más horas por campaña que en el resto del mundo (www.maquinac.com, 2014). Debido a que su uso medido en cantidad de horas está muy por encima de la media mundial, una cantidad importante de pulverizadoras están excesivamente utilizadas y gastadas en su estructura general, siendo ineficientes al momento de la aplicación de los fitosanitarios y peligrosas a la hora de circular por las rutas y caminos.

Según un informe realizado por el Ministerio de Agroindustria en 2017, esta pérdida de competitividad de las máquinas usadas restó capital de trabajo al fabricante de ventas directas y a las redes de concesionarios que se encuentran con muchas pulverizadoras usadas en sus playas sin posibilidades de venta. El Ministerio de Agroindustria impulsa el uso de la agricultura de precisión apuntando a recuperar mercados e internacionalizar empresas nacionales. Según datos de 2018, los sectores cerealero, oleaginoso y hortícola exportaron por 25.000 millones de dólares, representando un 70% de las exportaciones agroindustriales y un 40% del valor total (INDEC, 2020). Se estima, además, que el sector agroindustrial dio empleo directo a 886.000 personas en todo el país, sin contar trabajos indirectos ni servicios anexos a la actividad (Calzada y Treboux, 2019 b). Desde 2012, el Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva busca, desde las políticas gubernamentales, la incorporación sistemática de la ciencia y la tecnología a la actividad agropecuaria.

1.7 Motivación

Actualmente, las acciones correctivas para reducir la deriva son pos-pulverización. Personal técnico especializado suele asesorar a los aplicadores para evitar costosos procesos de prueba y error. Sin embargo, esta práctica requiere que el asesor viaje muchos kilómetros para asistir al aplicador, lo que eleva los costos de la consultoría y demora pulverizaciones en función de la disponibilidad del especialista. En este contexto, el modelado y simulación del proceso de pulverización y deposición del agroquímico pulverizado pueden brindar recomendaciones tendientes a la disminución de deriva, permitiendo:

- Implementar políticas de pulverización para minimizar el impacto ambiental y mejorar el rinde.
- Minimizar el volumen de fitosanitarios a utilizar (ahorro económico).
- Asesorar y entrenar aplicadores.

- Desarrollar nuevas plataformas tecnológicas portables aptas para integrarse en unidades de pulverización.

1.8 Objetivos

El objetivo general de esta Tesis Doctoral fue desarrollar y validar un modelo matemático para predecir la deriva de pulverización agrícola terrestre por botalón, con el propósito de que pueda ser utilizado en aplicaciones de campo.

El modelo matemático permite, en función de la información de entrada, calcular la distribución de tamaño de gotas, la superficie cubierta mediante la pulverización, los litros/ha depositados en el área objetivo y consecuentemente la deriva estimada. A partir de estos resultados, el modelo puede utilizarse en modo optimización para proveer nuevas condiciones operativas que minimicen la deriva dentro de los rangos factibles de operación.

El modelo matemático se diseñó para funcionar con bajo costo computacional, ya que se prevé incluirlo en un dispositivo apto para instalarse a bordo de vehículos de pulverización para controlar y optimizar en tiempo real la aplicación de fitosanitarios.

En este contexto los objetivos específicos de esta tesis fueron:

- Comprender la relación entre las variables de proceso (operativas, ambientales, características de boquillas, entre otras) y la deriva de pulverización.
- Desarrollar y validar un modelo matemático fenomenológico para predecir la deriva de pulverización.
- Establecer ventanas operativas tendientes a mejorar la calidad de pulverización, y a partir de ellas establecer recomendaciones de aplicación.

La presente Tesis Doctoral se enmarca dentro de un Proyecto más amplio tendiente a construir un dispositivo para predicción y control de deriva de pulverización. El modelo matemático desarrollado en esta Tesis será incorporado dentro del dispositivo. El prototipo a desarrollar se concebirá para que pueda ser adaptado a otros equipos de pulverización (tripulados y no tripulados, terrestres y aéreos). El prototipo se diseñará con el objeto de realizar recomendaciones en tiempo real para optimizar la calidad de pulverización.

Capítulo 2

Proceso de Atomización y Boquillas de Uso Agrícola

“La science, mon garçon, est faite d’erreurs, mais d’erreurs qu’il est bon de commettre, car elles mènent peu à peu à la vérité.” Jules Verne

El tamaño de gota es la variable fundamental que determina si la misma se depositará en el lugar deseado. Gotas muy pequeñas (menos de 50 micrones) penetran eficientemente en cultivos densos, siendo convenientes para la aplicación de insecticidas y fungicidas, gotas medianas (e.g., 250 μm) se depositan con facilidad en tallos y pastos cuando hay velocidades de viento moderadas, mientras que gotas grandes (e.g., 400 μm) se depositan de manera más eficiente en superficies grandes y planas, como las plantas de hoja ancha, y en campos de barbecho (Grasso et al., 2019). Así, cada fitosanitario tiene un rango de diámetros de gota recomendado, el cual es normalmente suministrado por los fabricantes.

Las boquillas son los componentes más importantes del equipo pulverizador (Masiá, y Cid, 2010). Una selección inadecuada de las mismas o el uso de boquillas en mal estado generalmente conduce a una disminución de los litros/ha efectivamente aplicados y puede llegar a ser necesario volver a pulverizar (Spraying Systems Co., 2004).

En el presente Capítulo se describen las boquillas empleadas en la pulverización agrícola, incluyendo las partes que las componen y los tipos de boquillas comúnmente utilizados. Además, se describen las clasificaciones de boquillas y gotas atomizadas propuestas por las normas ISO 10625:2005 y ASABE S572.1, respectivamente, las cuales son usadas por proveedores y aplicadores para caracterizar sistemas de pulverización. Se introducen conceptos fenomenológicos de atomización y se identifican los regímenes de flujo en que operan las boquillas de pulverización agrícolas. Además, se describen enfoques de modelado matemático para representar las distribuciones de tamaño de gota en boquillas de pulverización agrícola.

Para que la herramienta de simulación objeto de esta Tesis Doctoral describa adecuadamente el efecto de la presión de pulverización y el tipo de boquilla sobre la deriva, es necesario incluir un modelo que prediga la distribución de tamaño de gotas atomizadas por la boquilla. Por esta razón, al finalizar este Capítulo se detalla el modelo matemático

para predecir distribuciones de tamaño de gota, el cual será utilizado en los Capítulos 4 y 5 para generar información de entrada para el modelo de deriva.

2.1 Boquillas de pulverización para aplicaciones agrícolas

Varios tipos de boquillas de pulverización con diversos accesorios se encuentran disponibles comercialmente para realizar aplicaciones agrícolas (Grisso et al., 2019; Ozkan, 2016b, 2016a; Sumner, 2012; Wolf et al., 2002; Wolf y Slocombe, 2000). Cada boquilla es capaz de producir un caudal determinado, el cual es definido por su tipo y el rango de presión recomendado por el fabricante. La Figura 2.1 presenta una imagen de una boquilla de pulverización y los elementos asociados. La boquilla se coloca generalmente en el cuerpo, el cual puede ser una parte integral del botalón o un componente separado. La tapa usualmente se atornilla en el cuerpo, sujetando la boquilla. Dentro del cuerpo, suele incluirse una junta para evitar pérdidas de líquido y un filtro. En los botalones, es común encontrar cuerpos con múltiples boquillas, los cuales permiten el acoplamiento de muchas y eventualmente diferentes boquillas de pulverización.

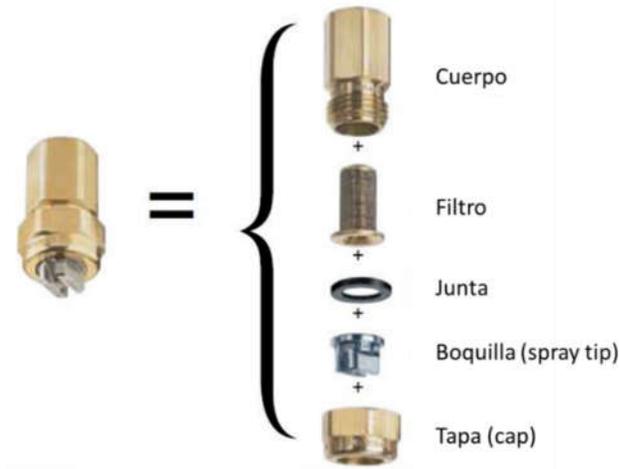


Figura 2.1. Partes de una boquilla de pulverización (Fuente: www.teejet.com).

La Figura 2.2 muestra un cuerpo para 5 boquillas. Como se indica en la Figura, sólo una de ellas se encuentra activa durante la pulverización. Con la rotación del cuerpo móvil, es posible habilitar la boquilla deseada. Este tipo de cuerpo tiene la ventaja de permitir, en forma rápida y sencilla, el uso de la boquilla más adecuada para una aplicación en particular.



Figura 2.2 Cuerpo con múltiples boquillas en un botalón (fotografía reproducida con permiso de Agritotal, Fuente: www.agritotal.com).

A pesar de que existe una gran variedad de boquillas de uso agrícola, los diversos tipos pueden clasificarse de acuerdo a la atomización que producen: abanico plano, cono sólido y cono hueco (Grisso et al., 2019). En la Tabla 2.1 se resumen las características principales de cada tipo de boquilla.

Tabla 2.1 Boquillas comúnmente utilizadas en pulverizadoras terrestres de botalón.

Tipo de boquilla	Abanico plano	Cono sólido	Cono hueco
Vista esquemática			
Aplicación	General (ASABE, 2009)	Herbicidas incorporados al suelo (ASABE, 2009)	Fungicidas e insecticidas (ASABE, 2009)
Rango de presiones (kPa)	200 - 400 (Johnson y Swetnam, 1996)	100 - 275 (Giles y Comino, 1990; Johnson y Swetnam, 1996)	275 - 700 (Slocombe y Sharda, 2015)

Las boquillas de abanico plano son las más comúnmente utilizadas para aplicaciones de pesticidas en pulverizadoras de botalón (Egel y Harmon, 2001). En estas boquillas, al salir la solución a pulverizar por el orificio de salida se forma una capa líquida de la cual se

Capítulo 2

desprenden gotas. El líquido atomizado presenta una distribución de tamaño de gotas (*droplet size distribution*, o DSD) y un ángulo característico (θ en las vistas esquemáticas de la Tabla 2.1) formado por las trayectorias de las gotas. Las gotas poseen velocidades iniciales específicas que dependen de la boquilla y de las condiciones de operación seleccionadas (Altimira et al., 2009; Zhou et al., 1996). Normalmente, las boquillas de abanico plano operan entre 200 y 400 kPa, siendo el rango ideal de 200 a 700 kPa (Johnson y Swetnam, 1996).

Existen a su vez una variedad de subtipos de boquillas de abanico plano, las que principalmente difieren en el patrón espacial del aerosol formado, en el rango de presiones a usar y en características constructivas que modifican la DSD. Las boquillas con inducción de aire son cada vez más utilizadas por los aplicadores a fin de reducir la deriva. Son boquillas de abanico plano que cuentan con una sección interna de Venturi que produce presión negativa para succionar aire a través de orificios laterales (Wolf et al., 2002). Para un determinado caudal, el aire se mezcla con el líquido a pulverizar para generar gotas de mayor tamaño que las obtenidas usando boquillas convencionales (Slocombe y Sharda, 2015). Otra boquilla de abanico plano comúnmente utilizada para reducir la deriva es la de pre-orificio, en la cual se reduce internamente la presión de atomización mediante la presencia de un orificio previo al de salida de la boquilla. De esta forma, las gotas producidas por estas boquillas poseen tamaños mayores y velocidades menores que las resultantes de una atomización en una boquilla de abanico plano convencional (Grisso et al., 2019; Ozkan, 2016a; Wilson et al., 2008).

Las boquillas de cono sólido producen tamaños grandes y uniformes de gota, siendo una buena opción cuando se requiere pulverizar un elevado volumen (Langenakens et al., 1999; Onorato y Tesouro, 2006).

Por su parte, las boquillas de cono hueco son comúnmente utilizadas para aplicar funguicidas e insecticidas donde se requiere penetración al follaje y/o cobertura completa de la hoja (Douzals y Chalendar, 2015; Egel y Harmon, 2001; Hollyer et al., 2014; Torrent et al., 2017). Debido a que las gotas producidas en las boquillas de cono hueco son de menor tamaño que en los otros tipos, la pulverización producida presenta alto potencial de deriva (De Luca y Vallet, 2008).

Cuando el líquido abandona la boquilla, puede ocurrir abrasión o corrosión en el orificio de salida. Estos fenómenos pueden modificar el caudal pulverizado respecto al provisto por los fabricantes (Slocombe y Sharda, 2015). A pesar de esto, los cuerpos de la mayoría de las boquillas son fabricadas de plástico debido al bajo costo para reemplazarlas

(Matthews, 1982). Sin embargo, pueden encontrarse en el mercado cabezales de plástico, cerámica, acero inoxidable o cobre (Sumner, 2012).

Si bien el desgaste de las boquillas está fuertemente ligado al tipo de material utilizado, existen otros factores que contribuyen al deterioro de las piezas, entre ellos (Grisso, 2013; Hewitt, 1998; Sumner, 2012; Wolf et al., 2002):

- Naturaleza química de los productos químicos pulverizados
- Presión de trabajo
- Dimensiones del orificio de la boquilla
- Filtración inadecuada

El desgaste de la boquilla puede ocasionar notables desviaciones en el caudal y en la distribución, impactando negativamente sobre el tratamiento aplicado. Por lo tanto, un control regular de las boquillas y su constante sustitución garantizan no sólo tratamientos excelentes, sino un notable ahorro económico. El desgaste de las boquillas no es fácil de identificar ya que no causa variaciones evidentes a simple vista en la forma del chorro.

Por lo general, se recomienda sustituir las boquillas cuando el caudal pulverizado difiere en más del 10% del caudal nominal, lo cual es suficiente para que no se garantice la cobertura y el rendimiento esperados (Spraying Systems Co., 2004). Para prolongar la vida útil de las boquillas, se debe prever su enjuague y el lavado completo del circuito de distribución al finalizar las operaciones. Esta práctica permite reducir al mínimo el riesgo de incrustaciones y obstrucciones (Onorato y Tesouro, 2006). Para el lavado, se aconseja utilizar detergentes compatibles con el material de la boquilla (el eventual uso de un cepillo puede facilitar la eliminación de la obstrucción, así como un simple chorro contracorriente de aire comprimido).

2.1.1 Clasificación de boquillas

Debido a la variedad de boquillas existentes, se han desarrollado estándares internacionales a fin de clasificar los modelos existentes para aplicaciones agrícolas de acuerdo a las propiedades de la pulverización (BCPC, 1986; EPA, 2001; International Organization for Standardization, 2005a). Particularmente la norma ISO 10625:2005, tal como se puede observar en Tabla 2.2, asigna a cada boquilla un código de color y uno numérico basado en el caudal de agua (medido en galones por minuto, GPM) producido al operar a 300 kPa.

El caudal volumétrico producido por cada boquilla puede calcularse como (Post et al., 2017):

$$Q_{pulv} = C_d A_b \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_l}} \quad (2.1)$$

donde C_d es el coeficiente de descarga de la boquilla, A_b es el área del orificio, ΔP es la caída de presión a través de la boquilla y ρ_l la densidad del líquido.

Tabla 2.2 Clasificación ISO (ISO 10625:2005) para boquillas.

Código de color	Código numérico	Caudal de agua a 300 kPa	
		(GPM)	(L/min)
Naranja	01	0,1	0,4
Verde	015	0,15	0,6
Amarillo	02	0,2	0,8
Violeta suave	025	0,25	1
Azul	03	0,3	1,2
Rojo	04	0,4	1,6
Marrón	05	0,5	2
Gris	06	0,6	2,4
Blanco	08	0,8	3,2

Post et al. (2017) analizaron los coeficientes de arrastre disponibles en literatura y valores experimentales obtenidos para boquillas utilizadas en pulverización agrícola. Para boquillas de abanico plano, los autores reportaron valores cercanos a 0,9 para el coeficiente de descarga (Sayinci, 2015; Zhou et al., 1996; Post et al., 2017). Sayinci (2015) observó que el coeficiente de descarga de boquillas de abanico plano se incrementó desde 0,88 a 0,96 en boquillas cuyo código numérico fue de 015 a 03. Post et al. (2017) no observaron un comportamiento dependiente entre el código numérico y el coeficiente de descarga para boquillas pre-orificio y boquillas con inducción de aire. Los valores de coeficientes de descarga reportados se encuentran en el rango de 0,65 a 0,75 para boquillas pre-orificio mientras que para boquillas con inducción de aire el rango obtenido de mediciones fue 0,56 a 0,61 (Post et al., 2017).

Si se considera despreciable la dependencia del coeficiente de descarga con el caudal y utilizando la densidad de agua, la Ecuación 2.1 y la Tabla 2.2 permiten calcular los valores de $C_d A_b$ (Tabla 2.3). La diferencia de coeficiente de descarga para cada tipo de boquilla produce diferencias en las velocidades medias de salida del líquido. Por ejemplo, para una boquilla cuya clasificación de color es Rojo, al pulverizar a 300 kPa la velocidad media de salida será 22,8 m/s para una boquilla de abanico plano estándar. En cambio, para la misma clasificación de color y presión de pulverización, los valores de velocidad serán de 19,6 y 13,2 ms⁻¹ para boquillas pre-orificio y de inducción, respectivamente.

Tabla 2.3 Valores de $C_d A_b$ para boquillas de diferente caudal a 300 kPa.

Código de Color	$C_d A_b$ (10^{-6} m^2)
Naranja	0,272
Verde	0,408
Amarillo	0,544
Violeta Claro	0,680
Azul	0,816
Rojo	1,09
Marrón	1,36
Gris	1,63
Blanco	2,18

Para cada código de color y basado en los datos de la Tabla 2.3, la Figura 2.3 muestra el caudal volumétrico en función de caídas de presión típicas usadas en aplicaciones agrícolas. Se observa que cada boquilla, a medida que se incrementa la presión, puede proveer caudales dentro de determinados rangos. Por lo tanto, si se requieren cambios considerables en el caudal, es necesario cambiar la boquilla.

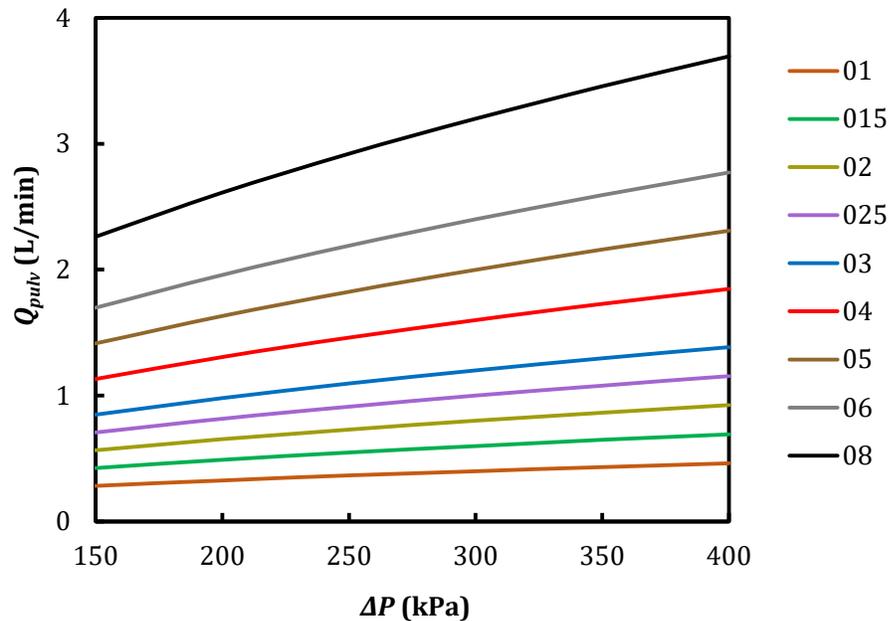


Figura 2.3. Caudal pulverizado de agua esperado en función de la presión para diferentes boquillas que cumplen con la norma ISO 10625:2005.

Usualmente, el tipo y ángulo del cono de atomización se encuentran en bajo relieve en la boquilla. Por ejemplo, en la Figura 2.4a se presenta una boquilla de abanico plano marca Hypro de color amarillo. El código 80-02 indica que el ángulo es 80° y que la boquilla es 02 según la clasificación ISO (ISO 10625:2005) (Tabla 2.2). La Figura 2.4b muestra la boquilla AirMix 110-03, la cual es una boquilla con inducción de aire de abanico plano de plástico que produce una atomización con ángulo de 110° . Además, según su código (03) y

los datos de la Tabla 2.2, la boquilla provee un caudal de 1,2 L/min cuando la presión de operación es 300 kPa.



Figura 2.4. Boquillas de pulverización agrícolas a) de abanico plano Hypro 80-02 y b) con inducción de aire AirMix 110-03.

2.1.2 Clasificación de tamaño de gotas

La Sociedad Americana de ingenieros agrícolas y biológicos (ASABE) desarrolló la clasificación estándar ASABE S572.1 (Tabla 2.4), la cual busca que los aplicadores reporten e interpreten la calidad de aplicación en función del diámetro medio en volumen (D_{V50}).

Tabla 2.4 Clasificación de tamaño de gotas ASABE S572.1.

D_{V50} (μm)	Clasificación ASABE S-572.1	Código de Color
<60	Extremadamente finas (XF)	Púrpura
60-105	Muy finas (VF)	Rojo
106-235	Finas (F)	Naranja
236-340	Medias (M)	Amarillo
341-403	Gruesas (C)	Azul
404-502	Muy Gruesas (VC)	Verde
503-665	Extremadamente Gruesas (XC)	Blanco
>665	Ultra Gruesas (UC)	Negro

A modo de ejemplo, y de acuerdo con la norma ASABE S572, una DSD cuyo D_{V50} es 490 μm , de acuerdo a la Tabla 2.4 correspondería tamaño de gotas muy gruesas (VC).

2.2 Proceso de atomización

2.2.1 Producción de gotas

La atomización es el proceso mediante el cual una capa o un chorro de líquido que emerge de una boquilla se rompe formando partículas de líquido de forma esférica o semi esférica a las que se denominan gotas (Amaveda, H. 2003; Lefebvre y McDonell, 2017). Al conjunto de gotas resultantes de la atomización que se mueven de forma controlada se lo denomina aerosol. En la Figura 2.5 se presenta un esquema del proceso de atomización.

Al salir de la boquilla, el líquido se encuentra bajo los efectos combinados de fuerzas cohesivas, que tratan de mantener el fluido en equilibrio y fuerzas disruptivas, que inducen inestabilidades en la estructura del flujo. Si la intensidad de las inestabilidades es mayor que la de los efectos cohesivos, se genera el rompimiento del flujo de líquido en estructuras de menor tamaño (Ding et al., 2016; Dumouchel, 2008; Lefebvre y McDonell, 2017; Payri et al., 2011; Salvador et al., 2016). En general, se considera que la formación de las gotas se puede describir como dos mecanismos que ocurren en serie: a) atomización primaria, en la que se forman gotas relativamente grandes al desprenderse de los ligamentos que salen de la boquilla (Moreira y Oliveira Panaño, 2011), y b) atomización secundaria, donde las gotas originales se rompen en gotas de menor tamaño (Pimentel, 2006; Ramamurthi y Tharakan, 1998). Entre la atomización primaria y secundaria existe una etapa de deformación de las gotas formadas en la atomización primaria.

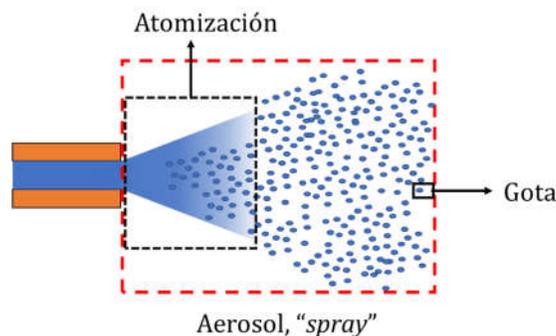


Figura 2.5. Esquema de producción de gotas.

2.2.2 Regímenes de flujo para boquillas

Debido a que la atomización primaria se produce cuando el líquido sale del canal de la boquilla, ésta puede ocurrir de diferentes maneras de acuerdo al tipo de boquilla y a la velocidad de circulación del líquido en ella.

Capítulo 2

Si se comienza con una velocidad de inyección de líquido muy baja, y se la aumenta progresivamente, se encuentran los siguientes regímenes en el flujo que ocurre inmediatamente a la salida de la boquilla (Heister, 2011):

- *Goteo (Dripping)*: a velocidades de inyección muy bajas, el líquido sale de la boquilla principalmente por aceleración gravitacional. El tamaño de las gotas es del orden del diámetro de la boquilla.
- *Rayleigh*: Si se aumenta la velocidad de líquido, las fuerzas capilares dominan la atomización. El tamaño de las gotas es también del orden del diámetro de la boquilla.
- *Flujo inducido por el viento (Wind-induced Flow)*: A mayores velocidades de inyección de líquido, las interacciones aerodinámicas con el gas ambiente provocan inestabilidades sobre la superficie del líquido. Se observan dos regímenes mientras aumenta la velocidad de inyección de líquido. En la etapa de velocidades más bajas, las gotas poseen diámetros más pequeños que el diámetro de la boquilla, aunque el orden es similar. A esta etapa se la denomina primer flujo inducido por el viento (“1° wind induced”). A medida que aumenta la velocidad de inyección las gotas comienzan a tener tamaños mucho menores al diámetro de la boquilla. Esta etapa se denomina segundo flujo inducido por el viento (“2° wind induced”).
- *Atomización (Atomization)*: Si se incrementa aún más la velocidad de salida del líquido se forma un aerosol. Las gotas son mucho más pequeñas que el diámetro de la boquilla y que las producidas en los otros regímenes.

La Figura 2.6a muestra los regímenes para velocidades crecientes a partir del tipo Rayleigh. En esta Figura, l representa la longitud característica del orificio de salida de la boquilla (el diámetro para un orificio circular) y v la velocidad relativa del fluido respecto a la del medio. La Figura 2.6b describe la fuerza dominante en cada régimen de flujo.

Para definir el paso de un régimen a otro se utilizan números adimensionales que correlacionan propiedades de fluido y flujo. El número de Reynolds (Re) correlaciona las fuerzas inerciales y las viscosas (Ecuación 2.2), el número de Weber (We) las fuerzas inerciales con la tensión superficial (Ecuaciones 2.3 y 2.4 para el líquido y el gas, respectivamente) y el número de Ohnesorge (Oh) las fuerzas viscosas con la tensión superficial (Ecuación 2.5).

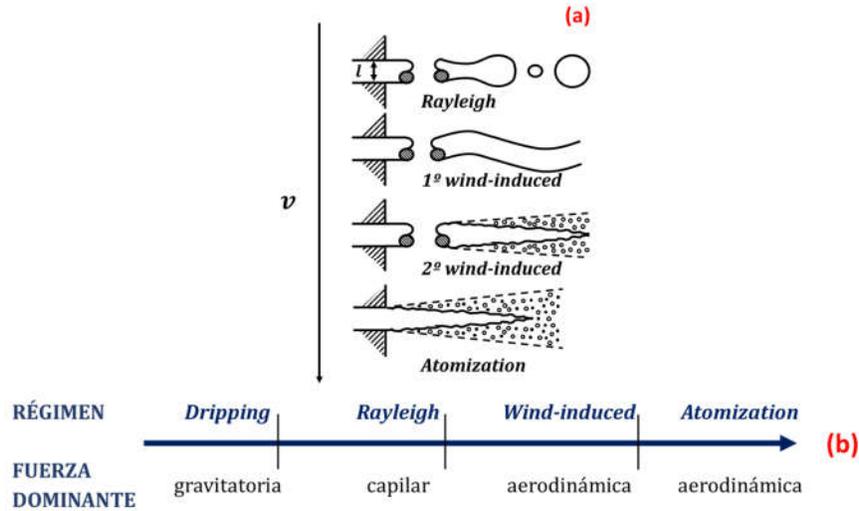


Figura 2.6. (a) Esquema de regímenes de atomización y (b) fuerza dominante para cada régimen.

$$Re = \frac{\rho_l v l}{\mu_l} \quad (2.2)$$

$$We_l = \frac{\rho_l v^2 l}{\sigma_l} \quad (2.3)$$

$$We_g = \frac{\rho_g v^2 l}{\sigma_l} \quad (2.4)$$

$$Oh = \frac{\sqrt{We_l}}{Re} = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma_l l}} \quad (2.5)$$

donde μ_l , σ_l y ρ_l y ρ_g son la viscosidad, la tensión superficial y las densidades de líquido y gas, respectivamente. Chigier y Reitz (1996) reportan rangos de valores de distintos números adimensionales que determinan los distintos regímenes de flujo (ver Tabla 2.5).

Tabla 2.5 Regímenes de flujo externo según Chigier y Reitz (1996)

Régimen	Rango
<i>Dripping</i>	$We_l < 8$
<i>Rayleigh</i>	$We_g < 1.2 + 3.41 Oh^{0.9}$
<i>1º Wind-induced</i>	$1.2 + 3.41 Oh^{0.9} \leq We_g < 13$
<i>2º Wind-induced</i>	$13 \leq We_g < 40.3$
<i>Atomization</i>	$We_g \geq 40.3$

En la Tabla 2.6 se muestran rangos típicos de condiciones de operación, propiedades de fluidos y dimensiones de boquilla para pulverización terrestre mediante botallón (Post y Hewitt, 2018). Por su parte, la Figura 2.7 se muestran los regímenes de flujo en función de los números de Reynolds y Ohnesorge (Reitz y Bracco, 1982) para la pulverización en

boquillas agrícolas. Considerando los rangos típicos de los números de Reynolds y Ohnesorge de la Tabla 2.6 para pulverización agrícola terrestre por botalón, puede observarse en la Figura 2.7 que los regímenes de flujo esperados corresponden a primer y segundo flujo inducido por viento y atomización, predominando el régimen segundo régimen de flujo inducido por viento. Es de esperar, por lo tanto, que las gotas generadas en la pulverización agrícola sean mucho menores que el diámetro de las boquillas.

Tabla 2.6 Dimensiones de boquillas, propiedades del caldo de pulverización y condiciones de operación típicas (Post y Hewitt, 2018).

Parámetro	Mínimo	Máximo	Unidades
Tamaño de orificio	0,25	2,0	mm
Presión	1,0	7,0	bar
Tensión superficial	0,025	0,075	$N m^{-1}$
Viscosidad de líquido	0,001	0,003	$kg m^{-1} s^{-1}$
Densidad de líquido	990	1020	$kg m^{-3}$
Densidad de Aire	1,1	1,2	$kg m^{-3}$
Ángulo de aerosol	80	130	°
Coefficiente de descarga	0,5	0,9	—
Velocidad	7,0	35,0	$m s^{-1}$
Número de Reynolds	2000	70000	—
Número de Weber	700	30000	—
Número de Ohnesorge	0,0025	0,015	—

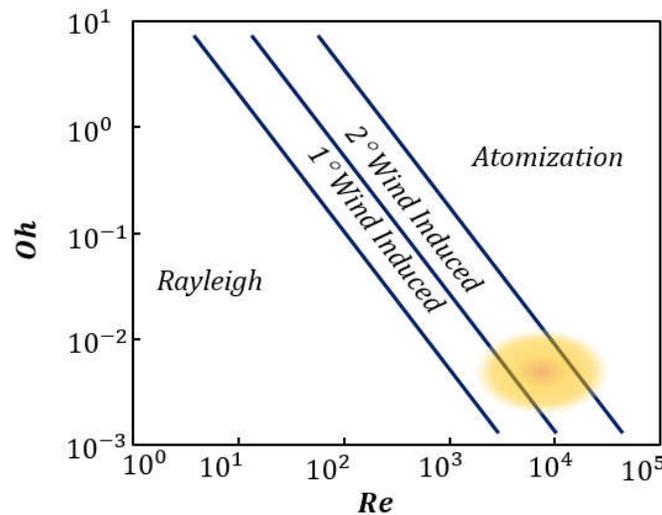


Figura 2.7. Regímenes de atomización en función de números adimensionales para jets líquidos cilíndricos dados por Reitz y Bracco (1982). Se indica la zona correspondiente a pulverización agrícola.

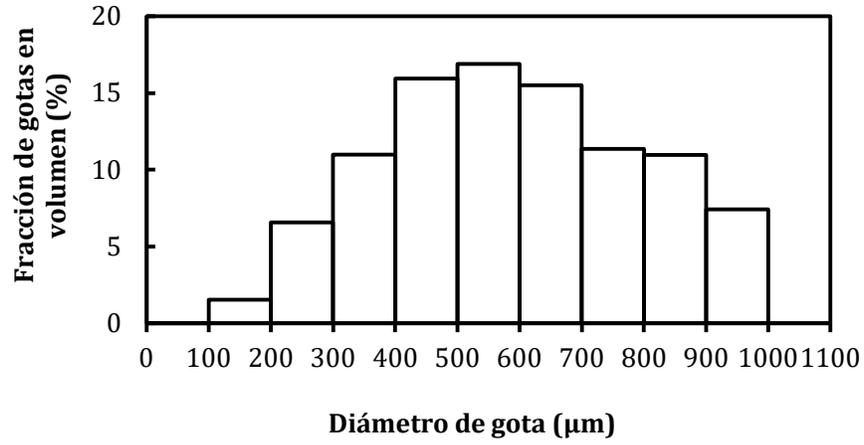
2.3 Representación de DSDs

El aerosol generado por una boquilla consiste en una población de gotas con una determinada distribución de tamaños (Lebeau et al., 2011). Diversos estudios han demostrado que la DSD influye en la eficacia de control biológico (Ford y Salt, 1987;

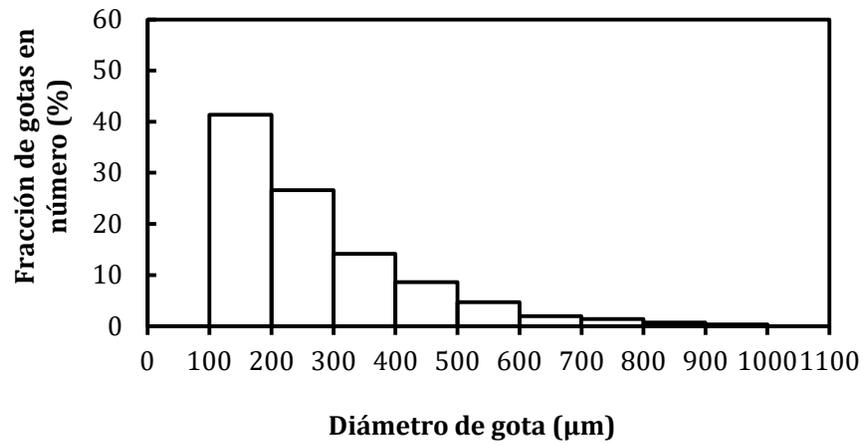
Matthews et al., 2014; Munthali, 1984; Munthali y Wyatt, 1986) y en las trayectorias que tendrán las gotas pulverizadas, la velocidad de evaporación y los sitios en que las gotas se depositarán (Holterman et al., 1997; Lebeau et al., 2011; Ashgriz, 2011; Zhu et al., 1994). La representación básica de las DSDs discretas es mediante el uso de histogramas (Pimentel, 2006). Los mismos se obtienen mediante la división del dominio diámetro de gotas en intervalos de tamaño finito (llamados clases) y representando el volumen de líquido o cantidad gotas existente en cada clase. Usualmente también se utilizan las distribuciones de volumen o número de gotas acumuladas. En esta representación, cada par volumen (o número de gotas) – tamaño señala el volumen total de líquido (o el número de gotas totales) cuyas gotas tienen tamaño menor al señalado (Allen, 2003). En la Figura 2.8 se muestra la DSD típica generada por una boquilla de pulverización agrícola tanto como histograma como curva acumulada. Para el histograma en volumen mostrado en la Figura 2.8.a, el mayor volumen pulverizado corresponde a gotas con diámetros entre 500 y 600 micrómetros. La Figura 2.8b muestra el histograma del número de partículas estimado a partir del histograma en volumen (Figura 2.8.a); en este caso el mayor número de gotas se encuentra en la clase 100-200 micrómetros.

La Figura 2.8.c muestra las distribuciones acumuladas correspondientes a los histogramas de las Figuras 2.8.a. y 2.8.b. Se observa que las distribuciones acumuladas, a diferencia de los histogramas, son representaciones continuas.

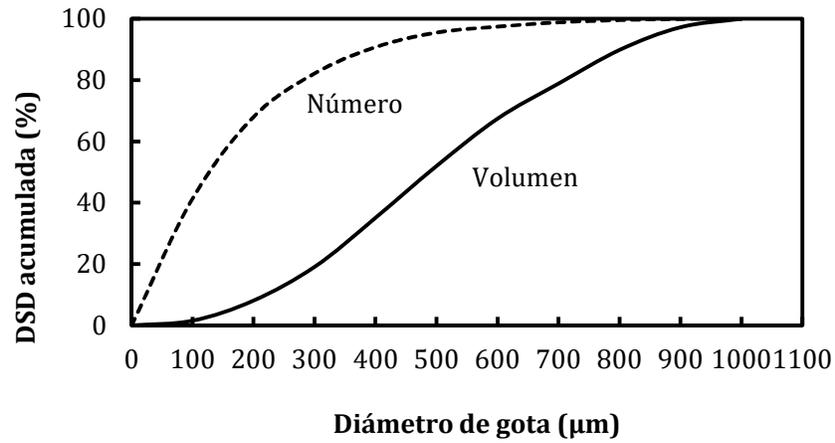
Otra forma de expresar distribuciones de probabilidad es mediante funciones de densidad de probabilidad (PDF) del volumen o número de las gotas (Lefebvre y McDonell, 2017; Mugele y Evans, 1951). Las PDFs son funciones continuas y positivas en todo su dominio y matemáticamente se definen como la derivada de la función de distribución acumulada correspondiente a la distribución de probabilidades. Estas funciones describen la probabilidad según la cual una variable aleatoria (e.g., el diámetro en el caso de DSDs) tomará un determinado valor (Bertsekas y Tsitsiklis, 2008). Las funciones log-normal, Rosin-Rammner, Nukiyama-Tanasawa y upper-limit log-normal son algunas de las PDFs que han sido propuestas en la literatura para describir la DSDs tanto de las gotas liberadas por boquillas como de las depositadas (Babinsky y Sojka, 2002; Lefebvre y McDonell, 2017; Liljedahl, 1971; Mugele y Evans, 1951; Pimentel, 2006). En la Tabla 2.7 se encuentran las ecuaciones y parámetros que describen cada función. En esta Tabla no se incluye la distribución normal debido a que las DSDs producidas por boquillas de uso agrícola no suelen ser simétricas (Ashgriz, 2011). Todas estas funciones poseen parámetros que deben ajustarse a partir de datos experimentales (Mondal et al., 2003).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.8. DSD de la pulverización generada por una boquilla de uso agrícola expresada como: histogramas en (a) volumen y (b) número, y (c) curvas acumuladas en volumen y número.

Tabla 2.7 Funciones de densidad de probabilidad comúnmente utilizadas para describir DSDs.

Ecuación	Parámetros
<p><i>Log-normal</i></p> $\frac{1}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi} d} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln d - \ln d_g}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right]$	<p>d_g: Diámetro geométrico medio σ_g: Desviación geométrica estándar</p>
<p><i>Rosin-Rammler</i></p> $\frac{n_{RR}}{d_{RR}} \left(\frac{d}{d_{RR}} \right)^{n_{RR}-1} \exp \left\{ -\left(\frac{d}{d_{RR}} \right)^{n_{RR}} \right\}$	<p>d_{RR}: Parámetro asociado al diámetro n_{RR}: Parámetro de dispersión</p>
<p><i>Nukiyama-Tanasawa</i></p> $a_{NT} d^2 \exp \{ -b_{NT} d^{q_{NT}} \}$	<p>a_{NT}: Constante de normalización b_{NT}, q_{NT}: Coeficientes de ajuste</p>
<p><i>Upper-Limit Log Normal</i></p> $\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_{ul}} \frac{d_{max}}{d(d_{max} - d)} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln d - \ln a_{ul}}{\ln \sigma_{ul}} \right]^2} & d < d_{max} \\ 0 & d \geq d_{max} \end{cases}$	<p>a_{ul}: Parámetro asociado al tamaño medio σ_{ul}: Parámetro de dispersión d_{max}: Diámetro máximo</p>

La distribución log-normal es sesgada hacia la derecha y generalmente provee un ajuste razonable de DSDs, en especial en la zona de la moda (tamaño de mayor frecuencia). No obstante, esta función puede en ciertas ocasiones sobreestimar la frecuencia a diámetros de gotas grandes (Kooij et al., 2018). Por su parte, la función Rosin-Rammler es comúnmente utilizada para representar DSDs en volumen (Babinsky y Sojka, 2002). En esta función, valores elevados del parámetro de dispersión indican una DSD angosta. La función de Nujiyama-Tanasawa es una función general, de la cual la función Rosin-Rammler resulta ser un caso particular (Crowe, 2006). La función upper-limit log-normal es una modificación de la log-normal y establece un diámetro de gotas máximo a partir del cual el valor de la DSD es cero (Mugele y Evans, 1951).

En la Figura 2.9 se muestran, a modo de ejemplo, las DSDs obtenidas utilizando las PDFs de la Tabla 2.7 y los parámetros de las funciones (ver Tabla 2.8) que fueron ajustados usando los datos de las distribuciones presentadas en la Figura 2.8. Se observa que la función log-normal no es capaz de representar adecuadamente los extremos de la DSD, sub y sobrestimando las colas de gotas finas y gruesas, respectivamente. Por otro lado, las funciones Rosin-Rammler, Nukiyama-Tanasawa y upper-limit log-normal proveen un buen ajuste de los valores experimentales, siendo ésta última la que presenta el menor error cuadrático medio.

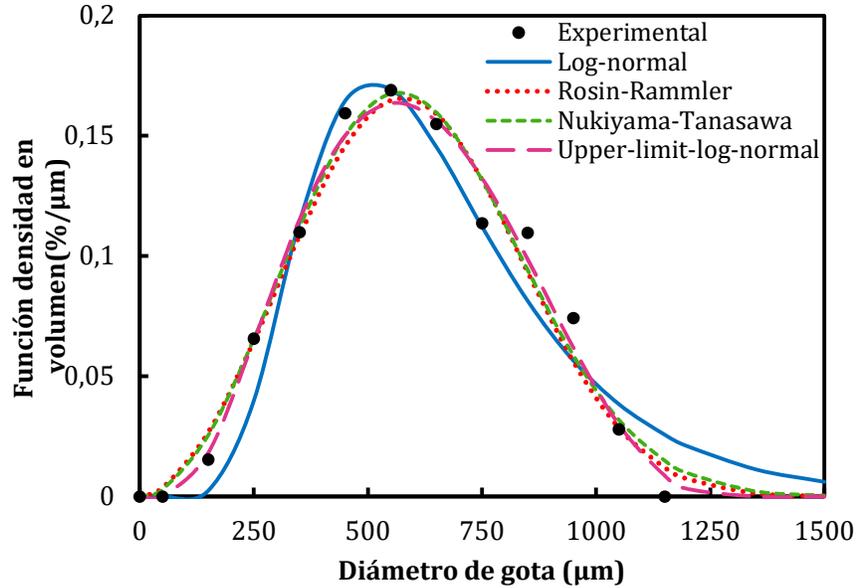


Figura 2.9. Datos experimentales y PDFs calculadas usando parámetros ajustados (Tabla 2.7).

Tabla 2.8 Valores de parámetros ajustados y error cuadrático medio para distintos modelos de PDFs.

Función de densidad de probabilidad (PDF)	Parámetros	Valor	Error cuadrático medio [10^5 (%/ μm)]
Log-normal	d_g (μm)	606,79	30,14
	σ_g (-)	1,52	
Rosin-Rammler	d_{RR} (μm)	673,82	13,57
	n_{RR} (-)	2,82	
Nukiyama-Tanasawa	a_{NT} (μm^{-2})	1,16E-08	12,39
	b_{NT} ($\mu\text{m}^{-q_{NT}}$)	1,17E-07	
	q_{NT} (-)	2,48	
Upper-limit log-normal	d_{ul} (μm)	592,89	7,89
	σ_{ul} (-)	2,08	
	d_{max} (μm)	1358,92	

2.3.1 Diámetros y parámetros representativos de la DSD

La distribución de tamaño de gotas completa provee mucha información, sin embargo, es usual caracterizarla de manera simplificada utilizando diámetros y parámetros representativos (Nuyttens et al., 2007b; Schick, 1997; Teixeira, 2010):

- D_{V50} : Diámetro para el cual las gotas con menores tamaños constituyen el 50% total del volumen. Al diámetro D_{V50} se lo conoce también como diámetro medio en volumen (VMD). Este diámetro es el más utilizado para comparar el tamaño promedio de gotas provisto por diferentes boquillas (Butler Ellis y Tuck, 1999; Butler Ellis et al., 2001; Costa et al., 2017).

2.- Proceso de Atomización y Boquillas de Uso Agrícola

- D_{V10} : Diámetro para el cual las gotas de menor tamaño constituyen el 10% del total de volumen (da información de la importancia de la cola de finos).
- D_{V90} : Diámetro para el cual las gotas de menor tamaño constituyen el 90% del volumen total (da información de la importancia de la cola de gruesos).
- D_{N50} : Diámetro para el cual las gotas de menor tamaño constituyen el 50% del número total de gotas pulverizadas. A D_{N50} también se lo denomina como diámetro medio en número (*NMD*) (Prokop y Kejklicek, 2002).

La dispersión de la DSD se suele cuantificar a través de los siguientes parámetros adimensionales (Costa et al., 2017):

Factor de “span” relativo en volumen (*RSF*):

$$RSF = \frac{D_{V90} - D_{V10}}{D_{V50}} \quad (2.6)$$

Factor de dispersión (*FD*):

$$FD = \frac{VMD}{NMD} = \frac{D_{V50}}{D_{N50}} \quad (2.7)$$

Como ejemplo, la Tabla 2.9 muestra los diámetros representativos y parámetros de dispersión de la DSD mostrada en la Figura 2.8.

Tabla 2.9 Parámetros de la DSD presentada en la Figura 2.7

Variable	Valor
$D_{V50} = VMD$ (μm)	490
D_{V10} (μm)	220
D_{V90} (μm)	800
$D_{N50} = NMD$ (μm)	130
<i>RSF</i>	1,18
<i>FD</i>	3,77

2.3.2 Métodos de medición de tamaño de gota

Existen varios métodos para medir distribuciones de tamaño de gotas, los cuales pueden agruparse en tres categorías: mecánicos, eléctricos y ópticos. Algunos de estos métodos poseen la capacidad de medir, además de la DSD, la velocidad de las gotas y la densidad en número de las mismas (Lefebvre y McDonell, 2017). Si bien existen muchas técnicas para medir distribuciones de tamaño de gotas, para la medición de DSDs producidas por atomizadores de uso agrícola se usan generalmente métodos ópticos. En particular, los métodos de *light scattering* y de difracción láser han sido ampliamente utilizados por autoridades regulatorias e investigadores (Agüera et al., 2012; Matthews et

al., 2014; Nuyttens et al., 2009a). En los últimos años, se han adoptado metodologías basadas en adquisición y tratamiento de imágenes (Ferguson et al., 2016; Fritz y Hoffmann, 2016; Wang et al., 2015). Uno de los métodos más populares utilizados por los aplicadores de agroquímicos para controlar la cobertura y DSD de las aplicaciones, es el uso de hojas de papel hidrosensible (WSPs, por su sigla en inglés *Water Sensitive Paper*). Esta técnica produce información aceptable de la DSD y se caracteriza por tener un costo bajo y ser simple de implementar en campo. Las WSPs generalmente poseen un recubrimiento que, al entrar en contacto con el agua, vira su coloración a azul (Nansen et al., 2015). Previo a realizar la pulverización, el aplicador posiciona las WSPs en la superficie objetivo (hojas del cultivo, suelo, o colocadas en soportes a alturas definidas) (Porras Soriano et al., 2005). Durante la operación, las gotas que alcanzan las WSPs marcan el papel y el tamaño de la marca puede ser observado y medido (Fox et al., 2001). La Figura 2.10 muestra una WSP utilizada para monitorear la pulverización de un herbicida en un campo en estadio de barbecho.

Las WSPs son también una herramienta útil para realizar el calibrado de las pulverizadoras debido a que la cobertura de las gotas es visible al finalizar la pulverización. Además, las WSPs pueden ser escaneadas para luego cuantificar la DSD mediante aplicaciones de software basadas en procesamiento de imágenes (Fox et al., 2003; Hoffmann y Hewitt, 2005; Wolf, 2003). Si bien se trata de una técnica muy usada, en situaciones de elevada cobertura puede producirse al solapamiento de las manchas y por lo tanto errores en la determinación de la DSD (Cunha et al., 2012). Otras limitaciones que restringen el potencial de esta técnica son: es complejo detectar manchas de gotas menores a los 50 μm y sólo puede emplearse en condiciones ambiente de baja humedad (Cunha et al., 2012; Matthews et al., 2014). De acuerdo a Panneton (2002), en áreas de elevada cobertura, el color amarillo del fondo del papel tiende a volverse verde, lo cual debilita el contraste entre las áreas manchadas de azul con el área no cubierta (amarillo-verde).

Al impactar la gota sobre la WSP, el líquido se esparce sobre la misma por lo que el diámetro proyectado es mayor al diámetro volumétrico de una esfera equivalente. La razón entre ambos diámetros se define como factor de esparcimiento. Este factor depende de la tensión superficial del líquido y del ángulo y velocidad de impacto (Cunha et al., 2012). Para agua pura, la Tabla 2.10 presenta correlaciones más usadas para calcular el diámetro volumétrico de las gotas y su factor de esparcimiento en función del diámetro proyectado (d_p).

En la Figura 2.11 se comparan los diámetros volumétricos obtenidos mediante las correlaciones de la Tabla 2.10 en función del diámetro proyectado. Las correlaciones

2.- Proceso de Atomización y Boquillas de Uso Agrícola

predicen resultados similares para diámetros de gota pequeños, pero a medida que se incrementan los diámetros proyectado la diferencia se amplía, en especial para la correlación de DepositScan/Zhu et al. (2011).

Además de proveer datos para la estimación de la DSD de las gotas depositadas, las WSPs permiten calcular los diámetros característicos de la misma (ver Sección 2.31). Otro resultado provisto por las WSPS y de interés para los aplicadores es la Cobertura, variable que se define como el número de gotas que impactan por unidad de superficie. Según la plaga a tratar y el producto fitosanitario a aplicar, los proveedores de estos compuestos habitualmente recomiendan una Cobertura mínima (Lauric et al., 2016),

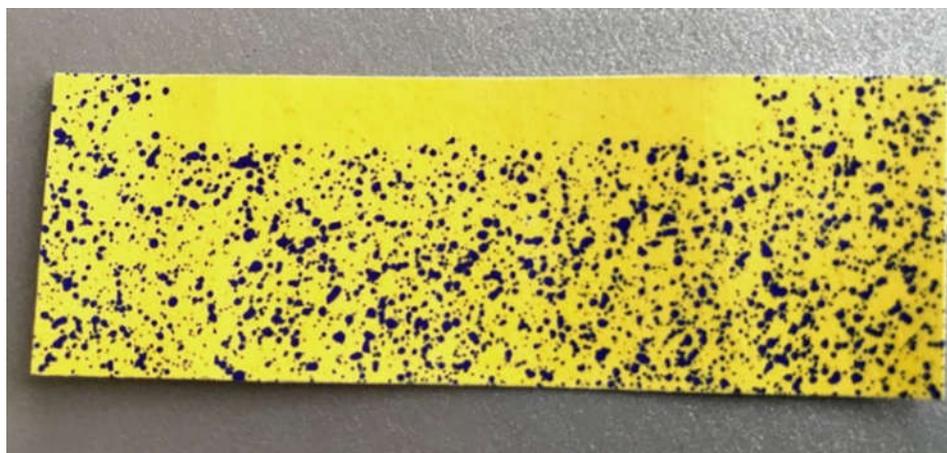


Figura 2.10. WSP utilizada para controlar la aplicación de herbicida en un campo de barbecho. Fuente: Empresa Cuthill SA.

Tabla 2.10 Correlaciones para evaluar el diámetro volumétrico de la gota y factor de esparcimiento en función del diámetro proyectado.

Fuente	Diámetro volumétrico de gota	Factor de esparcimiento
DepositScan/Zhu et al. (2011)	$0,95d_p^{0,91}$	$1,0526d_p^{0,09}$
USDA-ARS System	$0,53549d_p - 8,4839 \times 10^{-5}d_p^2$	$\frac{1}{0,53549 - 8,4839 \times 10^{-5}d_p}$
DropletScan™	$\frac{d_p}{1,6333 + 0,0009d_p}$	$1,6333 + 0,0009d_p$
Swath Kit™	$-4,42 + 0,583d_p - 0,000132d_p^2$	$\frac{1}{0,583 - 0,000132d_p - \frac{4,42}{d_p}}$
Syngenta/Cerruto et al. (2016)	$\left(\frac{d_p}{0,938}\right)^{\frac{1}{1,143}}$	$0,94554d_p^{0,125}$

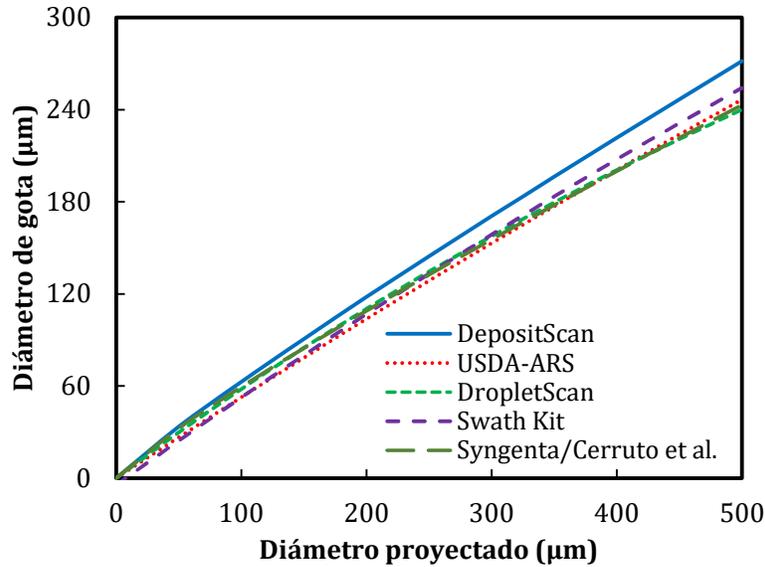


Figura 2.11. Diámetro volumétrico de gota en función del diámetro proyectado, para las distintas correlaciones presentadas en la Tabla 2.9.

2.4 Modelado matemático de DSDs

El procedimiento clásico para representar matemáticamente DSDs experimentales se basa en ajustar funciones definidas minimizando el error entre los valores experimentales y calculados (ver ejemplo de la Tabla 2.7). La desventaja de este enfoque empírico reside en la dificultad de extrapolar las curvas ajustadas a regímenes operativos fuera del rango experimental (Ashgriz, 2011).

Como alternativa al enfoque empírico, en las últimas décadas se han desarrollado enfoques analíticos para modelar la distribución del tamaño de gotas. Dentro ellos, cabe mencionar el método basado en el análisis de inestabilidad (Kooij et al., 2018) y el método de máxima entropía (Babinsky y Sojka, 2002).

Debido a la geometría compleja de las boquillas de abanico plano (i.e., las más comúnmente utilizadas en la aplicación agrícola), no abundan en la literatura modelos simplificados para describir las DSDs (Post y Hewitt, 2018). Por lo tanto, los modelos matemáticos no apuntan a predecir la DSD completa sino algunos diámetros representativos de la misma (Ashgriz, 2011). Luego, la curva de distribución de tamaño de gota puede obtenerse asumiendo una función de distribución como las indicadas en la Tabla 2.6.

Post y Hewitt (2018) desarrollaron un modelo matemático fenomenológico para predecir el diámetro de volumen medio (D_{V50}) de DSDs en boquillas agrícolas. Su modelo

considera un análisis de estabilidad lineal de películas líquidas, basado en el trabajo de Dombrowski y Johns (1963). El modelo está basado en las siguientes suposiciones:

1. La velocidad de la capa líquida en el punto de rotura es la misma que a la salida del orificio de la boquilla.
2. El flujo de líquido a la salida de la boquilla es completamente turbulento, por lo que el coeficiente de descarga se puede considerar constante.
3. La turbulencia no afecta considerablemente el proceso de atomización.
4. El número de Reynolds para flujo completamente turbulento es 9000, para verificar el régimen de flujo, en el cálculo del mismo se utiliza el radio hidráulico en lugar del espesor de la capa líquida.

En el caso de boquillas de abanico plano, el orificio de salida tiene una forma elíptica, por lo que el diámetro hidráulico utilizado para calcular los números adimensionales se puede calcular como (Post y Hewitt, 2018):

$$d_H = \frac{4A_{ellipse}}{P_{ellipse}} = \frac{4a_H b_H}{3(a_H + b_H) - \sqrt{(3a_H + b_H)(a_H + 3b_H)}} \quad (2.8)$$

donde el denominador de la Ecuación 2.8 se aproxima mediante la expresión de Ramanujan al perímetro de una elipse y a_H y b_H son los ejes de mayor y menor longitud, respectivamente.

Los autores realizaron un análisis basado en números adimensionales del proceso de atomización (entre otros, el de Weber y el de Ohnesorge, ver Ecuaciones 2.3 y 2.5) y obtuvieron la siguiente Ecuación:

$$D_{V50} = C_{PH} \left(\frac{FR}{01} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\Delta P}{1bar} \right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\theta}{110^\circ} \right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{H_2O}} \right)^{\frac{1}{3}} C_d^{-\frac{2}{3}} f(Oh) \quad (2.9)$$

donde C_{PH} es una constante, FR es el código numérico de la boquilla (Tabla 2.2), P es la presión de pulverización, θ es el ángulo del aerosol (expresado en grados), σ es la tensión superficial de la solución a pulverizar, σ_{H_2O} es la tensión superficial del agua y $f(Oh)$ es una función del número de Ohnesorge. La constante C_{PH} toma diferentes valores para boquillas de distintos tipos debido a que poseen diferentes tamaños de orificios para proveer igual caudal estandarizado (Post y Hewitt, 2018). Debido a que existen pocos trabajos para fluidos newtonianos donde se analicen los efectos de la viscosidad sobre el tamaño de gotas y a la elevada dificultad en variar la viscosidad de manera independiente de la tensión superficial, Post y Hewitt (2018) consideraron a $f(Oh)$ como una constante. Estos autores

validaron el modelo con datos experimentales, de boquillas de abanico plano e inducción de aire de marca TeeJet, obtenidos por Guler et al. (2012).

Si bien el modelo de Post y Hewitt (2018) es capaz de proveer un diámetro de volumen medio (D_{V50}), ese único valor no es suficiente para describir la DSD. Debido a que las funciones log-normal y Rosin-Rammler poseen dos parámetros y las funciones Nukiyama-Tanasawa y upper-limit log-normal tienen tres parámetros (ver Tabla 2.6), es necesario conocer uno o dos diámetros representativos adicionales para definir completamente la curva de distribución de tamaño de gota. Además, el modelo de Post y Hewitt (2018) fue validado únicamente para boquillas de la marca TeeJet. Para extender la validez del modelo a otras boquillas, es necesario obtener los valores de C_{PH} y C_d de la Ecuación 2.9 en base a ensayos experimentales o información provista por fabricantes o reportada en literatura.

2.5 Modelo propuesto para describir la atomización

Como se mencionó al inicio de este Capítulo, para que un modelo matemático sea capaz de predecir adecuadamente la deriva de pulverización, es necesario disponer de la DSD completa del aerosol atomizado. Si bien el modelo desarrollado por Post y Hewitt (2018) muestra buena concordancia en la predicción de D_{V50} , no provee la DSD. Más aún, debido a que el modelo de Post y Hewitt (2018) fue ajustado con boquillas de la marca Teejet, los datos disponibles de C_{PH} y C_d no son necesariamente extrapolables a otras marcas o modelos con características constructivas diferentes a las utilizadas para el estudio. Por estas razones, a continuación, se desarrolla un modelo para describir DSDs de boquillas agrícolas, basado en las siguientes suposiciones:

1. La distribución de tamaños de gotas puede ser representada por la función upper-limit log-normal (Hong et al., 2018), en concordancia con los buenos resultados del ajuste frente a datos experimentales demostrado en la Sección 2.3.
2. El diámetro D_{V50} puede calcularse satisfactoriamente mediante la correlación propuesta por Post y Hewitt (2018) (Ecuación 2.9).
3. El coeficiente de descarga para boquillas de la misma marca y tipo es constante (ver Sección 2.1.1).
4. Los diámetros característicos D_{V10} y D_{V90} son función de D_{V50} .

Teniendo en cuenta el enfoque seguido por Hong et al. (2018) y la primera suposición, dicha función de distribución viene dada por la Ecuación 2.10.

2.- Proceso de Atomización y Boquillas de Uso Agrícola

$$f_d(d_0) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{d_{max}}{\ln \sigma_{ul} d_0 (d_{max} - d_0)} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(a_{ul} d_0) - \ln(d_{max} - d_0)}{\ln \sigma_{ul}} \right]^2} & d < d_{max} \\ 0 & d \geq d_{max} \end{cases} \quad (2.10)$$

donde a_{ul} , d_{max} y σ_{ul} son los parámetros de la función upper-limit log-normal (ULLN). d_0 es la variable independiente de la función, y corresponde al diámetro de gota atomizada. La Ecuación 2.10 representa una función densidad expresada en volumen.

De acuerdo a Mugele y Evans (1951), los parámetros de la función ULLN se relacionan con los diámetros representativos D_{V10} , D_{V50} y D_{V90} mediante:

$$d_{max} = D_{V50} \left(\frac{D_{V50}(D_{V10} + D_{V90}) - 2D_{V10}D_{V90}}{(D_{V50})^2 - D_{V10}D_{V90}} \right) \quad (2.11)$$

$$\sigma_{ul} = \left[\left(\frac{d_{max} - D_{V50}}{d_{max} - D_{V90}} \right) \frac{D_{V90}}{D_{V50}} \right]^{0.7794} \quad (2.12)$$

$$a_{ul} = \frac{d_{max} - D_{V50}}{D_{V50}} \quad (2.13)$$

Para calcular el diámetro medio D_{V50} , se propone utilizar la ecuación de Post y Hewitt (2018) normalizada respecto a información disponible de una boquilla de la misma marca y tipo a la cual se considera como boquilla de referencia. La boquilla de referencia se define en base a su caudal (FR^{ref}) y su ángulo nominal (θ^{ref}), en conjunto con un D_{V50}^{ref} y la presión de atomización (P^{ref}) para la cual se obtuvo el D_{V50}^{ref} . Realizando el cociente de la Ecuación 2.9 entre la boquilla a modelar y la boquilla de referencia se obtiene:

$$\frac{D_{V50}}{D_{V50}^{ref}} = \frac{C_{PH} \left(\frac{FR}{01} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\Delta P}{1bar} \right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\theta}{110^\circ} \right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{H_2O}} \right)^{\frac{1}{3}} C_d^{-\frac{2}{3}} f(Oh)}{C_{PH}^{ref} \left(\frac{FR^{ref}}{01} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{P^{ref}}{1bar} \right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\theta^{ref}}{110^\circ} \right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{\sigma^{ref}}{\sigma_{H_2O}} \right)^{\frac{1}{3}} (C_d^{ref})^{-\frac{2}{3}} f(Oh)} \quad (2.14)$$

Asumiendo que se pulveriza la misma solución en ambos casos y que se cumple la hipótesis de igualdad de coeficiente de descarga entre ambas boquillas, se obtiene:

$$D_{V50} = D_{V50}^{ref} \left(\frac{FR}{FR^{ref}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P^{ref}} \right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\theta}{\theta^{ref}} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad (2.15)$$

La Ecuación anterior permite correlacionar diámetros de boquillas de características constructivas similares sin disponer de información de coeficientes de descarga y constantes específicas de las boquillas.

Para verificar la validez de la Ecuación 2.15 se recolectó información experimental de valores de D_{V50} para 33 modelos de pastillas de boquillas correspondientes a 5 marcas,

operando a diferentes presiones y de diferente clasificación ISO 10625:2005 (Czaczyk et al., 2012; Gil et al. 2014; Guler et al. 2012; Nuyttens et al., 2007a; Nuyttens et al., 2009a; van de Zande et al., 2002; van de Zande et al., 2008; Wang et al. 2015). Además de boquillas de abanico plano e inducción de aire, dentro de los valores reportados se incluyen boquillas de pre orificio y de cono hueco. Debido a que Womac et al. (1999) reportó que pueden existir diferencias relativas en los diámetros medidos con diferentes técnicas, del total de 154 datos obtenidos se seleccionó una boquilla por modelo y por autor como referencia. La información de las boquillas seleccionadas como de referencia y la presión de operación de las mismas se muestra en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Boquillas seleccionadas como referencia.

Referencia	Marca	Modelo	θ^{ref} (°)	FR^{ref} (gpm)	P^{ref} (bar)	D_{v50}^{ref} (μm)	
Czaczyk et al., 2012	Albuz	AVI	110	0,3	2,76	506,6	
		MMAT	EŽ	110	0,3	3,5	483,2
	TeeJet	EŽK	110	0,3	4,5	327,8	
		EŽKT	110	0,3	3,5	466,8	
Gil et al., 2014	TeeJet	AIXR	110	0,3	3	536	
		XR	110	0,3	3	175	
Guler et al., 2012	TeeJet	AI	110	0,2	6,2	302	
		AIS	110	0,2	5,38	292	
		AM	110	0,3	2,76	354	
		AMS	110	0,3	2,21	342	
		D5-DC25	-	-	2,14	249	
		TJ	110	0,3	2,76	203	
		TP	80	0,3	2,76	253	
		TT	110	0,3	2,76	248	
		TTD	110	0,3	2,76	345	
		XR	110	0,3	2,76	183	
Nuyttens et al., 2007a	Albuz	ATR80	80	0,3	3	298,6	
		API	110	0,4	3	263,6	
		AXI	110	0,4	3	265,5	
		ADI	110	0,4	3	351,1	
	Hardi	AVI	110	0,4	3	526,5	
		ISO F	110	0,3	4	246,5	
		ISO LD	110	0,3	3	348,2	
van de Zande et al., 2002	Lechler	ISO Injet	110	0,3	3	537,4	
		Teejet	XR VP	110	0,3	3	219
van de Zande et al., 2008	Lechler	ID	90	0,1	5	465	
		Teejet	AI	80	0,3	7	387
		DG	80	0,3	7	236	
Wang et al., 2015	Lechler	IDK	120	0,3	3	419	
		ST	110	0,3	3	173	
		TR	80	0,3	3	185	

2.- Proceso de Atomización y Boquillas de Uso Agrícola

La Ecuación 2.15, utilizando los valores de D_{V50}^{ref} reportados en la Tabla 2.12, se validó frente a los 121 puntos experimentales reportados para diferentes presiones, ángulos y clasificación ISO 10625:2005 (Tabla 2.2). En la Figura 2.12 se presentan los resultados obtenidos de la validación. Se observa una buena concordancia entre los diámetros medios en volumen experimentales y calculados por la Ecuación 2.15. Debido a estos resultados, se puede concluir que se extendió la validez de la relación propuesta por Post y Hewitt (2018) a boquillas de marcas diferentes a Teejet y a tipos de boquillas diferentes a abanico plano e inducción de aire.

Para corroborar la validez de la hipótesis 4 para las boquillas utilizadas en aplicaciones agrícolas, se analizaron los valores de D_{V10} y D_{V90} frente a D_{V50} disponibles en literatura (Czaczyk et al., 2012; Gil et al. 2014; Guler et al. 2012; Nuyttens et al., 2007a; Nuyttens et al., 2009a; van de Zande et al., 2002; van de Zande et al., 2008; Wang et al. 2015). En la Figura 2.13, se presentan valores experimentales del D_{V10} en función del D_{V50} para diferentes modelos y marcas de boquillas. Se observa que estos valores se pueden representar mediante una función lineal, cuyo ajuste está descrito por la Ecuación 2.16:

$$D_{V10} = 0.44D_{V50} \quad (2.16)$$

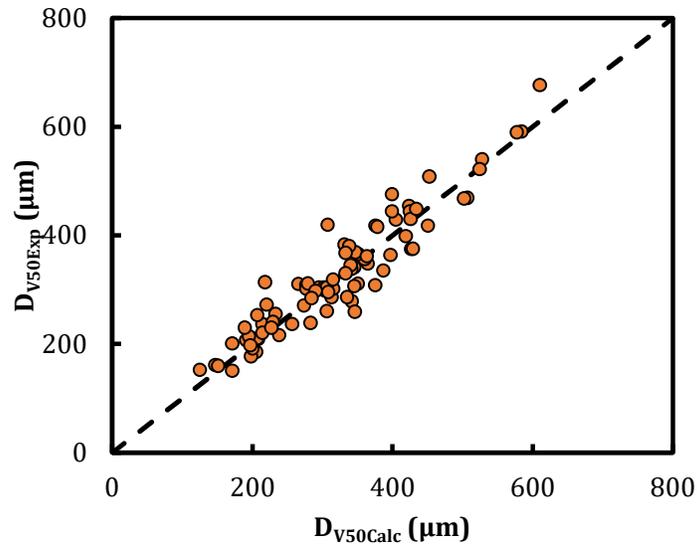


Figura 2.12. Resultados de validación de la Ecuación 2.15.

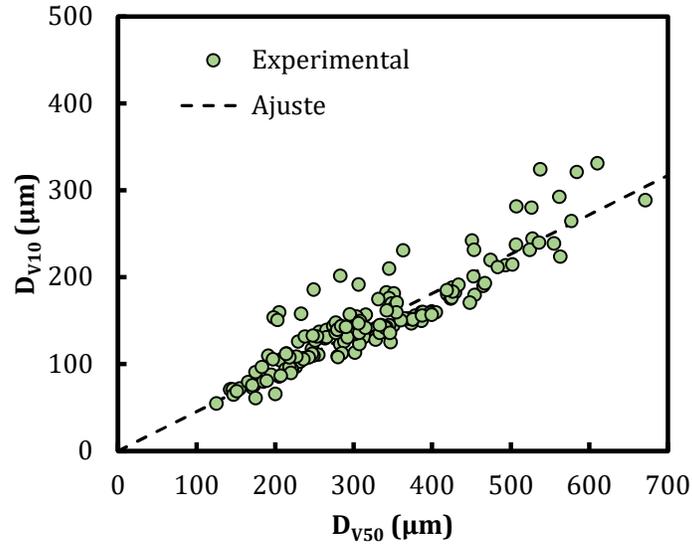


Figura 2.13. D_{V10} en función de D_{V50} experimentales.

Análogamente a lo realizado para D_{V10} , se graficó D_{V90} en función de D_{V50} (Figura 2.14). Para este caso también fue posible obtener una relación lineal entre ambas variables, la cual viene dada por la Ecuación 2.17:

$$D_{V90} = 1,66D_{V50} \quad (2.17)$$

Si bien para diámetros mayores a D_{V50} se observa una mayor desviación de los D_{V90} respecto del valor calculado mediante la Ecuación 2.17, en la mayoría de los puntos se mantiene la tendencia del aumento lineal de D_{V90} con D_{V50} .

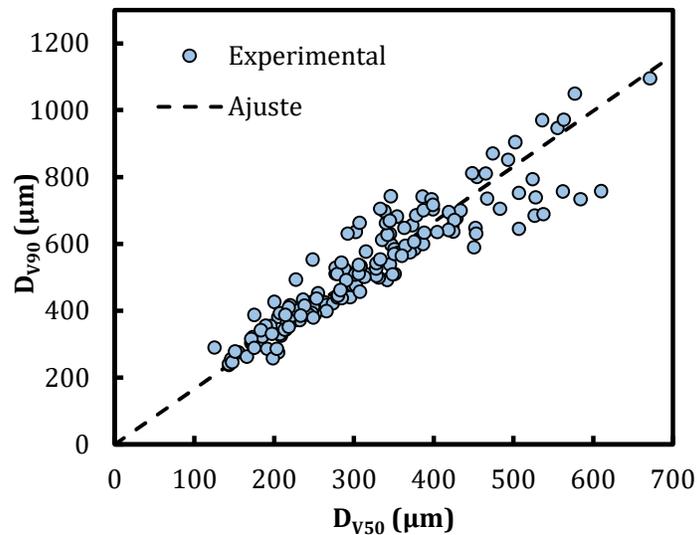


Figura 2.14. D_{V90} en función de D_{V50} experimentales.

Utilizando las Ecuaciones 2.16 y 2.17 se pueden calcular los parámetros de la ULLN. Reemplazando D_{V10} y D_{V90} en las Ecuaciones 2.11 a 2.13 se obtienen los siguientes parámetros:

$$d_{max} = 2,36D_{V50} \quad (2.18)$$

$$a_{ul} = 1.36 \quad (2.19)$$

$$\sigma_{ul} = 2,51 \quad (2.20)$$

Por lo tanto, de los tres parámetros que posee la función ULLN propuesta para el modelo de atomización, a_{ul} y σ_{ul} son constantes y d_{max} depende solamente de D_{V50} (calculado mediante la Ecuación 2.15).

La función acumulada de la ULLN utilizando los parámetros calculados anteriormente queda definida por:

$$F(d_0) = \begin{cases} 0 & d_0 < 0 \\ \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(2,36D_{V50} - d_0) - \ln(1.36d_0)}{\sqrt{2} \ln(2,51)} \right) \right) & 0 \leq d_0 < d_{max} \\ 1 & d_0 \geq d_{max} \end{cases} \quad (2.21)$$

Luego, con información de una pastilla de referencia para un modelo específico de una marca, es posible obtener el D_{V50} aproximado a las condiciones de operación en una pastilla de características similares utilizando la Ecuación 2.15. En base a las correlaciones de las Ecuaciones 2.16 y 2.17 es posible utilizar D_{V50} como único dato para describir la distribución de tamaño de gotas.

2.6 Conclusiones

La distribución de tamaño de gotas atomizadas es una información indispensable para estudiar el vuelo, evaporación, arrastre por el viento y deposición de las mismas. Por lo tanto, esta función es clave para estimar la calidad de la pulverización.

La función upper-limit log-normal, que define un diámetro de gotas máximo a partir del cual la densidad de gotas es nula, resulta muy apropiada para representar las distribuciones de gotas atomizadas por boquillas agrícolas.

El modelo ajustado para una variedad de boquillas y condiciones operativas permitió correlacionar los parámetros de la función upper-limit log-normal con una única variable: la mediana de la distribución de tamaño de gotas atomizadas (D_{V50}). Por otra parte, mediante comparación con valores experimentales, se demostró que la correlación propuesta para estimar el D_{V50} permite predecir satisfactoriamente este diámetro para

Capítulo 2

boquillas de abanico plano convencionales, pre-orificio y con inducción de aire de diferentes marcas.

El modelo desarrollado permite correlacionar la presión de pulverización, código ISO de boquilla y ángulo de aerosol (variables conocidas por los aplicadores tanto porque las eligen o porque las brindan los proveedores de boquillas) con la DSD producida por la atomización. En base a esto, por ejemplo, se puede inferir si un modelo de boquilla será capaz de producir la DSD con los valores deseados de diámetros característicos o si es necesario realizar un cambio de boquilla. Por lo tanto, el modelo desarrollado es una herramienta válida para asistir al aplicador en la tarea de selección de boquillas y presión de operación en base a requerimientos de DSD de los fitosanitarios a aplicar.

En síntesis, las correlaciones propuestas permiten estimar una función clave del proceso de atomización. Para ello se usan datos accesibles de las boquillas y no se requiere evaluar experimentalmente, para cada caso, la distribución de tamaño de gotas a la salida de una boquilla agrícola.

Capítulo 3

Revisión de Modelos Matemáticos para Predicción de Deriva

"We are not makers of history. We are made by history." Martin Luther King, Jr.

Los primeros modelos matemáticos para predecir la deriva de pulverización en pulverizaciones terrestres surgieron en las décadas de los años 70 y 80 (Miller y Hadfield, 1989; Smith, 1970; Thompson y Ley, 1983). Sin embargo, recién en la década del 90 se comenzaron a publicar y aplicar modelos de deriva (Butler Ellis y Miller, 2010; Yarpuz-Bozdogan y Bozdogan, 2009). En este Capítulo se revisan los antecedentes en este tema, y se analizan las ventajas y desventajas de los modelos matemáticos propuestos en la literatura.

Antes de presentar la revisión bibliográfica específica acerca de modelos matemáticos, se realiza una descripción del concepto de volumen pulverizado y el área tratada para diferentes tipos de aplicaciones por botalón. Además, se define matemáticamente la deriva de pulverización y se describen los métodos de obtención de datos experimentales para su estimación. Esta información es necesaria para ajustar y validar los modelos matemáticos.

Por último, se presentan cuatro enfoques de modelado diferentes para estudiar la deriva de pulverización agrícola y se realiza una exhaustiva comparación de los mismos.

3.1 Volumen pulverizado

Al realizar aplicaciones mediante pulverizadoras de botalón es posible aplicar el volumen necesario de fitosanitario sobre la superficie de tres formas, tal como se esquematiza en la Figura 3.1. En las aplicaciones de cobertura total, como su nombre lo indica, se realiza la pulverización sobre toda el área debajo del botalón (Ozkan, 2016b). Para lograr esto, es necesario ubicar las boquillas sobre el botalón con la separación correcta entre ellas (s). En las aplicaciones en banda y en las aplicaciones dirigidas, la pulverización cubre solo una fracción del área total de un ancho determinado (w y r , respectivamente). La diferencia entre estos dos últimos métodos reside en que las aplicaciones dirigidas utilizan más de una boquilla por banda/área tratada.

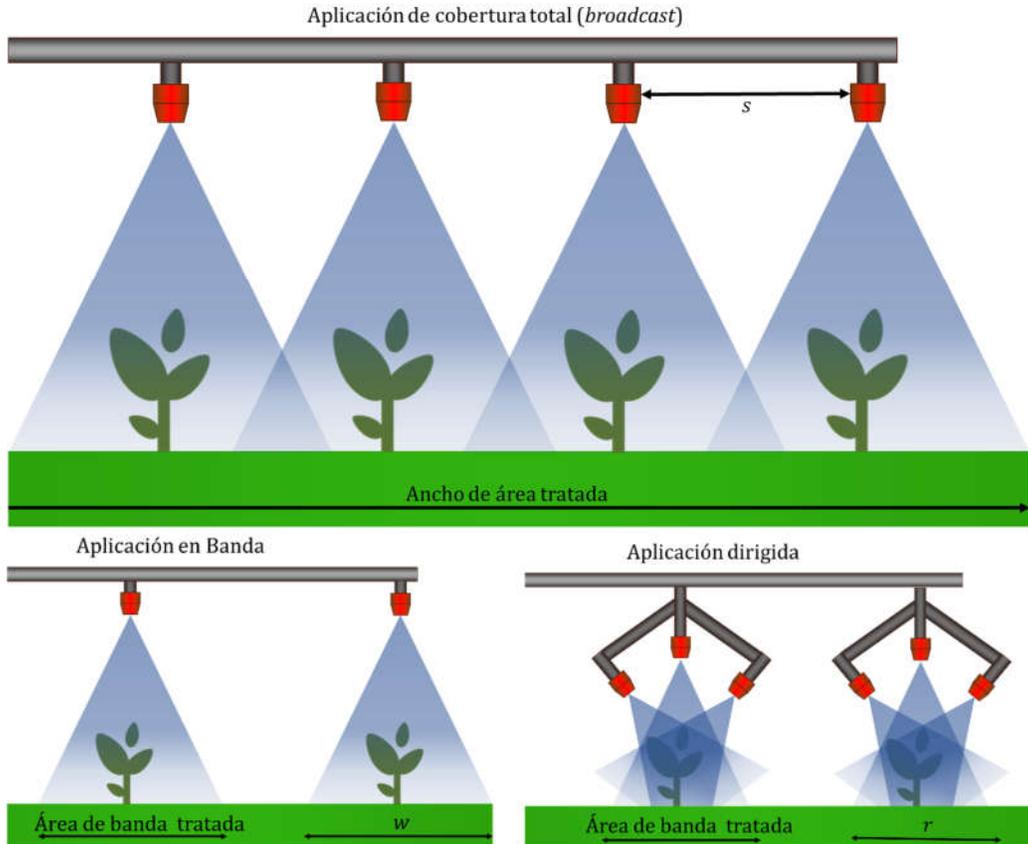


Figura 3.1. Esquemas de aplicación mediante pulverización por botalón.

Para un área rectangular, en la Figura 3.2 se ilustra un esquema de una aplicación de cobertura total. El tiempo (t_A) que demandará la aplicación para cubrir toda el área (A_A) está definido por la longitud cubierta por la pulverización (l_B) y la velocidad de avance del tractor (v_A), tal como se define en la Ecuación 3.1:

$$t_A = \frac{A_A}{l_B v_A} \quad (3.1)$$

Comúnmente, las formulaciones de fitosanitarios son preparadas mediante el mezclado de los ingredientes activos con agua y almacenados en el tanque. El volumen a pulverizar depende de las recomendaciones de dosificación del producto y se encuentra normalmente expresado en litros por hectárea o galones por acre de la solución (Sexton et al., 2007). En base a esta información, las características de la pulverizadora y la velocidad de avance, es posible calcular el caudal total (Q_T) que la bomba debe proveer al botalón para ser pulverizado:

$$Q_T = F v_A l_B \quad (3.2)$$

donde F es el volumen pulverizado requerido por unidad de área.

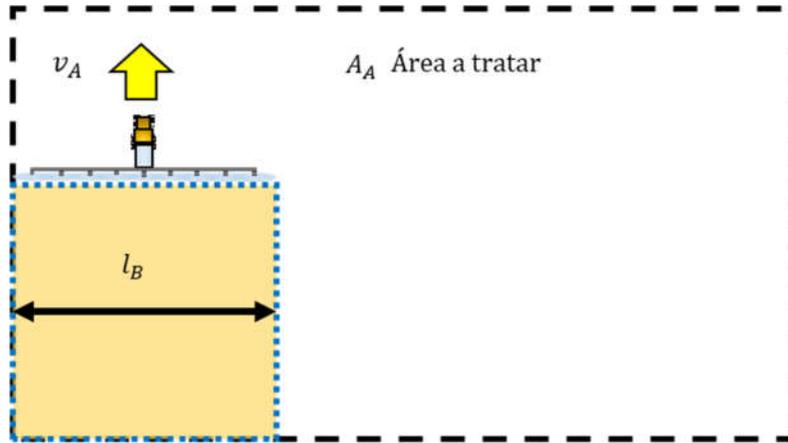


Figura 3.2. Esquema de aplicación de fitosanitarios mediante pulverizadora por botalón.

Conociendo el caudal total, es posible calcular el caudal que cada boquilla debe suministrar en base al número total de boquillas. La Ecuación 3.3 permite calcular el caudal pulverizado por boquilla para aplicaciones de cobertura total, banda y dirigidas, respectivamente (Hofman y Solseng, 2004; Ozkan, 2016):

$$Q_{pulv} = F v_A X \quad (3.3)$$

donde X es el espaciado entre boquillas (s) cuando se trata de aplicaciones de cobertura total, el ancho de banda cubierta (w) para aplicaciones en banda y el ancho de banda (r) dividido las boquillas por banda en el caso de aplicaciones dirigidas (Smith, 1995; Ozkan, 2016).

La Ecuación 3.3 indica que, para obtener el valor deseado de F en una pulverizadora determinada (i.e., X es un valor fijo), el aplicador no puede seleccionar simultáneamente la velocidad de la máquina y el caudal con el cual operar. Más aún, el aplicador frecuentemente elige una presión de pulverización de acuerdo a las boquillas que emplea y la distribución de gotas deseada. Por lo tanto, fijando la presión, el caudal Q_{pulv} queda determinado. En consecuencia, para lograr el valor deseado de F , la única variable que el aplicador puede manipular es la velocidad de la máquina. Alternativamente, se puede seleccionar la velocidad de la máquina y calcular el caudal Q_{pulv} (Ecuación 3.3) que permite satisfacer el valor requerido de F . En este caso, la presión de pulverización quedará determinada por el caudal y las boquillas utilizadas. Como se explicó en el Capítulo 2, seleccionar la presión de pulverización es fundamental para lograr un tamaño de gota deseado, lo cual añade restricciones a las decisiones que puede tomar un aplicador para realizar la pulverización.

3.2 Definición matemática de la deriva de pulverización

El valor requerido de F es nominal, debido a que cuando las gotas abandonan la boquilla se exponen a fuerzas de arrastre producidas por el viento, disminuyen de tamaño debido a la evaporación y se dispersan por efectos turbulentos. Por lo tanto, el volumen de líquido efectivamente depositado por unidad de área suele ser menor a F (Nuyttens et al., 2009). Para cuantificar esta disminución de volumen pulverizado por unidad de área respecto al valor teórico, se define a la deriva de la solución (Y^S) como:

$$Y^S(x_{dep}) = \frac{\left(\frac{\Delta V_{dep}^S}{\Delta A_A}\right)}{F} \quad (3.4)$$

donde ΔV_{dep}^S es el volumen depositado dentro de un área genérica ΔA_A y, para una sola boquilla, x_{dep} es la distancia (en dirección del viento) entre la posición de ΔA_A y la boquilla (Figura 3.3). Para una aplicación realizada con botalón, normalmente se considera x_{dep} como la distancia entre la ubicación de ΔA_A y la última boquilla del botalón.

Debido a que la Ecuación 3.4 representa una fracción de volúmenes depositados por unidad de superficie, la deriva suele expresarse como porcentaje. La deposición de gotas varía con la distancia a la/s boquilla/s, por lo tanto Y^S es función de las coordenadas espaciales. En la Figura 3.3, se representa una curva de deposición de pulverización en la que ocurre deriva. Como se observa, fuera de la zona objetivo hay mayor deposición cerca de la última boquilla y va descendiendo asintóticamente a 0 a medida que aumenta la distancia.

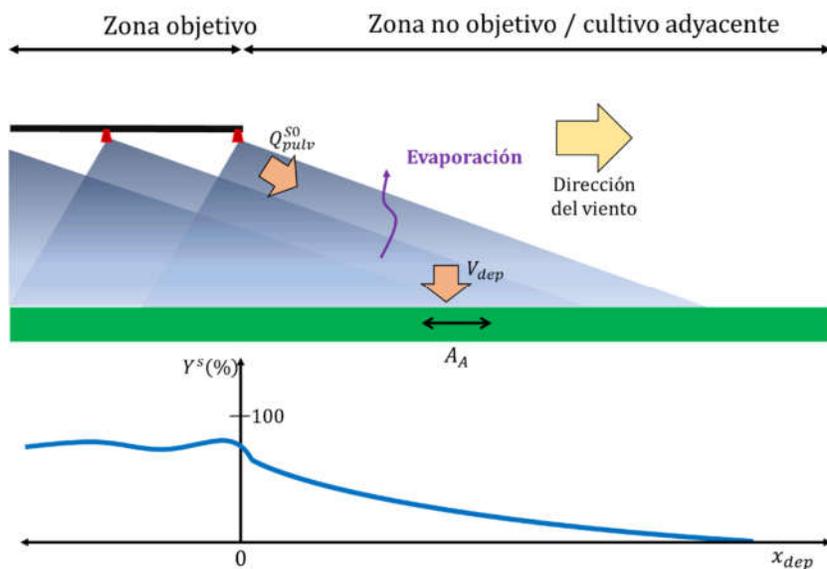


Figura 3.3. Pulverización con deriva.

3.- Revisión de modelos matemáticos para predicción de deriva

En la Ecuación 3.4, V_{dep}^S corresponde al volumen total depositado, incluyendo agroquímicos, agua, coadyuvantes y otros componentes. Sin embargo, varios reportes de estudios de deriva se refieren a la deposición de compuestos no volátiles. La curva de deriva correspondiente a los compuestos no volátiles, expresada en porcentaje de la dosis aplicada, puede calcularse como (De Schamphelre et al., 2008; Nuyttens, 2007):

$$Y(x_{dep}) = 100 \frac{\left(\frac{\Delta V_{dep}^S C_{dep}}{\Delta A_A} \right)}{FC_{pulv}} = 100 \frac{\left(\frac{\Delta V_{dep}}{\Delta A_A} \right)}{FC_{pulv}} \quad (3.5)$$

donde V_{dep} es el volumen depositado de compuestos no volátiles y C_{dep} y C_{pulv} son la concentración volumétrica de agroquímicos no volátiles en las gotas depositadas y pulverizadas, respectivamente.

3.3 Obtención experimental de deriva de pulverización

Los modelos matemáticos requieren de información experimental para su validación, por lo tanto, en esta Sección se discuten distintas técnicas para determinar la deriva. Actualmente, se distinguen tres escalas en las que se realizan ensayos de deriva: en campo, túnel de viento y banco de pruebas.

3.3.1 ISO 22866:2005: Medición de deriva en campo.

La norma ISO 22866:2005 establece los lineamientos para medir la deriva de pulverización en campo, empleando pulverizadoras montadas, remolcadas o autopropulsadas (International Organization for Standardization, 2005b). A su vez, en la norma se detalla cómo medir la deriva de pulverización a distancias definidas desde una zona tratada para realizar análisis de riesgo (Nuyttens, 2007). Para que los resultados de diferentes experimentos sean comparables, se definen distancias de medición estándares en base a una posición de referencia que debe estar correctamente especificada en los resultados (Arvidsson et al., 2011; Bueno et al., 2017). En la Figura 3.5, se muestra una representación gráfica de un estudio de medición de deriva siguiente la norma ISO 22866:2005. En esta Figura se puede observar la disposición espacial de colectores (recipientes donde se acumula el fitosanitario que deriva) en dirección del viento en el área de estudio de deriva; el punto 0 indica la posición de referencia. Los colectores pueden ser platos de Petri, rectángulos o cuadrados de papel hidrosensible o de papel de cromatografía, o cualquier superficie similar de área conocida montada sobre una estructura de soporte (Miller, 2003). En general, el valor 0 de la coordenada x se fija como la posición de la última boquilla del botalón.

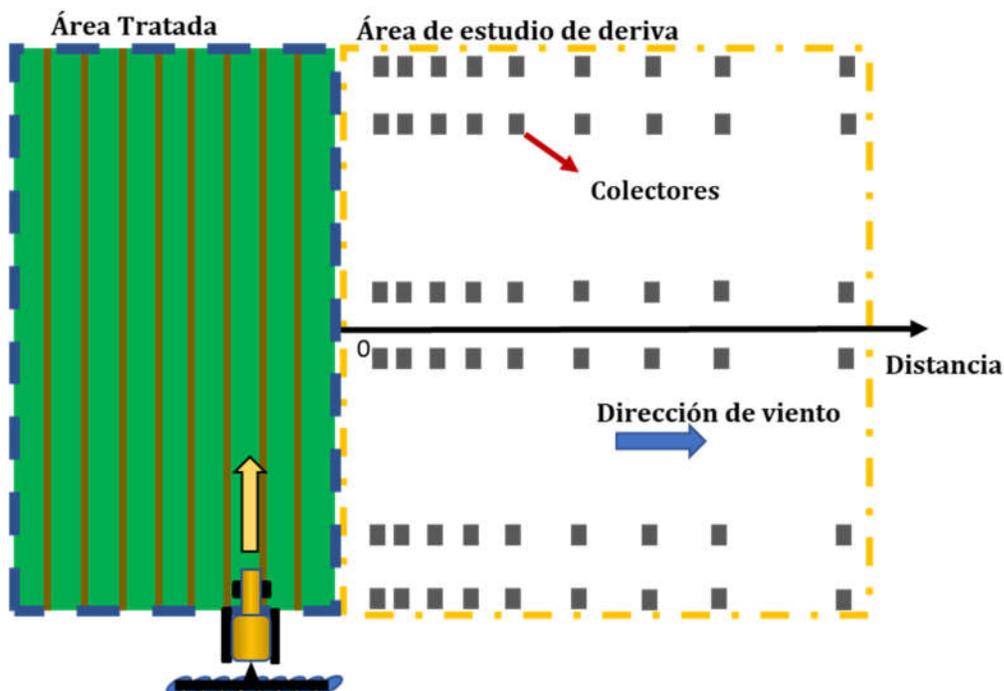


Figura 3.5. Representación gráfica de posición de colectores en dirección del viento.

Para cada recolector se obtiene la cantidad de volumen de trazador depositada (V_{dep}) sobre el área del colector expresado en $\mu L/cm^2$. Posteriormente, se calcula el valor medio de la dosis depositada para los colectores ubicados a la misma distancia (réplicas). Por último, se aplica un método analítico apropiado para calcular la concentración de trazador en la dosis depositada y se utiliza la Ecuación 3.5 para llevar la información a porcentaje de deposición de dosis aplicada de fitosanitario (Grella et al, 2017).

Debido a que el viento puede cambiar de dirección durante las pruebas, uno de los requerimientos para que un ensayo de campo cumpla con el estándar ISO22866:2005 es que la dirección media del viento durante el ensayo se mantenga con un ángulo de $90\pm 30^\circ$ con respecto a la dirección de avance de la pulverizadora (International Organization for Standardization, 2005b). Aun cumpliendo el requerimiento anterior, resulta complejo obtener repeticiones con errores aceptables en los experimentos de campo, debido a la frecuente variabilidad en condiciones climáticas, cambios en la calidad de pulverización y movimientos horizontales o verticales del botallón, entre otros (Rimmer et al., 2009). Más aún, el tamaño y características de estos colectores puede ser una fuente de diferencia en los valores de deriva estimada (van de Zande et al., 2015). Debido a lo anterior, es muy complejo realizar comparaciones objetivas de la deriva producida por diferentes tecnologías de pulverización mediante pruebas de campo (Gil et al., 2015).

3.3.2 ISO 22856:2008: Medición de potencial de deriva en laboratorio (túnel de viento).

La norma ISO 22856:2008 establece los lineamientos generales para realizar mediciones en condiciones controladas utilizando túnel de viento. Además de definir el procedimiento para la medición de datos experimentales, establece una serie de requerimientos que debe cumplir el túnel de viento para que los ensayos se consideren estandarizados. Estos lineamientos son aplicables cuando se desean realizar análisis comparativos o de clasificación de boquillas o soluciones a pulverizar mediante resultados de potencial de deriva.

Los resultados de experiencias en túnel de viento han sido utilizados como medidas del potencial de deposición de agroquímicos para comparar tecnologías de pulverización e indicar la calidad de aplicación de un sistema respecto a uno considerado de referencia (Herbst, 1998; Nuyttens et al. 2009).

3.3.3 ISO 22401:2015: Medición de potencial de deriva en banco de pruebas

Balsari et al. (2007) propuso el uso de un banco de pruebas alternativo para calcular la deriva potencial generada para pulverizadoras de botalón. Este procedimiento, desarrollado por el Departamento de Economía e Ingeniería Agrícola, Forestal y Ambiental de la Universidad de Turin (*Dipartimento di Economia ed Ingegneria Agraria, Forestale ed Ambientale, DEIAFA*), permite estudiar la deriva de una manera más simple y rápida que las pruebas de campo realizadas siguiendo el procedimiento descrito por la norma ISO 22866:2005. Balsari et al. (2007) verificó la aplicabilidad del banco de pruebas al evaluar el potencial de deriva para una pulverizadora de botalón convencional equipada con boquillas de abanico plano. Los autores observaron que la reproducibilidad de los resultados fue mayor a la de la metodología para campo descrita en la norma ISO 22866:2005. Todas las pruebas fueron realizadas en una temperatura media de $10\text{ °C} \pm 1,3\text{ °C}$, humedad relativa de $81\% \pm 3\%$ y velocidades de viento bajas ($0,7\text{ m/s}$).

En el método de medición propuesto por Balsari et al. (2007), tal como se observa en la Figura 3.4, el banco de pruebas posee un cuadro de aluminio capaz de contener colectores artificiales (placas de Petri de plástico, diámetro de 150 mm). Este cuadro se coloca paralelo a la dirección del tractor y alineado con el centro del brazo derecho del botalón. Los colectores colocados cada 0,5 m están tapados inicialmente, al final del banco de pruebas existe una palanca que es accionada al entrar en contacto con el botalón. Esta palanca permite destapar el cuadro para dejar expuestos los colectores a la pulverización (Balsari et al., 2007). De esta forma, las gotas que se encuentran suspendidas en el aire luego de que

pasa el botalón pueden recuperarse para proveer una medida cuantificable del potencial de deriva. Balsari et al. (2007) denominan potencial de deriva a la suma de los volúmenes de líquido recuperados en todo el banco de pruebas.

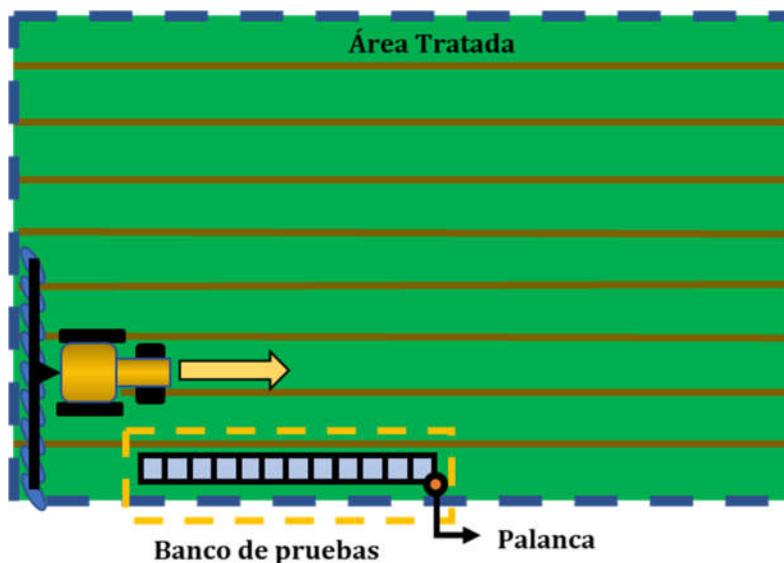


Figura 3.4. Esquema de banco de pruebas para medir potencial de deriva.

Gil et al. (2014) utilizaron esta metodología para medir el potencial de deriva de varias boquillas de abanico plano convencionales y de inducción de aire. van de Zande et al. (2014) compararon los resultados de mediciones de campo para diferentes boquillas siguiendo la norma ISO 22866:2005 y posteriormente utilizando el banco de pruebas. Los autores observaron similares resultados en ambos métodos para las clasificaciones de las boquillas de acuerdo con la norma ISO 22369-1:2006. Los estudios anteriormente nombrados demostraron que el uso del banco de pruebas es un complemento adecuado a los estudios de campo para estudiar la deriva. Estos estudios fueron la base para la norma ISO 22401:2015 (International Organization for Standardization, 2015). Actualmente este estándar provee las especificaciones para medir deriva depositada para pulverizadoras con botalón utilizando un banco de pruebas. Los resultados de estas mediciones indican el potencial de deriva y permiten comparar diferentes tecnologías de pulverización (e.g., tipos de boquilla) utilizando la misma pulverizadora.

3.4 Modelos Empíricos

En relación a los modelos matemáticos para representar la deriva de pulverización, en primer lugar, se discuten los modelos empíricos. Estos modelos también reciben el nombre de *estadísticos*, y están basados en datos experimentales y ajustados mediante regresión sin tomar en cuenta ninguna base fenomenológica para modelar la deriva (Lebeau

3.- Revisión de modelos matemáticos para predicción de deriva

et al., 2011). A pesar de que el esfuerzo para realizar el modelado matemático es menor que el de los otros enfoques que se discutirán más adelante, este tipo de modelos requiere un elevado número de datos experimentales de buena calidad para su ajuste y para proveer buenas predicciones. Dos de los modelos empíricos más utilizados para calcular la fracción depositada de aplicaciones agrícolas son el *Alemán* (Ganzelmeier et al., 1995) y el *Holandés* (Holterman y Van de Zande, 2003). Ambos enfoques calculan directamente la deriva como porcentaje de compuestos no volátiles en la dosis aplicada.

El modelo *Alemán* fue desarrollado por Ganzelmeier et al. (1995) para cultivos en campos de Alemania. En total, se realizaron 119 ensayos (desde 1989 a 1992) y los resultados (en función de la distancia en dirección del viento) fueron medidos para diferentes cereales, viñas, árboles de frutas y lúpulo. Además, se realizaron experiencias en campo para diferentes estadios de crecimiento y diferentes tipos de aplicación. Posteriormente, Rautmann et al. (2001) realizaron ensayos adicionales y actualizaron los parámetros de regresión. Basados en la información experimental recolectada, los autores ajustaron funciones del tipo ley de la potencia y reportaron los parámetros de ajuste (Ganzelmeier et al., 1995; Rautmann et al., 2001). El modelo *Alemán* propone estimar la deriva de pulverización de compuestos no volátiles como:

$$Y(x_{dep}) = G_1 x_{dep}^{-G_2} \quad (3.6)$$

donde G_1 y G_2 son parámetros de ajuste que dependen del tipo de cultivo y estado de crecimiento (se asumen independientes de las condiciones ambientales y de la operación de la pulverizadora).

El modelo *Holandés*, también llamado "IMAG", fue desarrollado por Holterman y van de Zande (2003) utilizando datos de campo obtenidos en el período 1992-2000 para papas, remolacha para azúcar, cereales, barbecho y árboles frutales sin hojas. Los autores utilizaron colectores depositados en el suelo colocados hasta 16 m desde la última boquilla. De acuerdo a la evaluación de los datos, la velocidad del viento varió desde 3 a 4.4 m/s. Dentro de este rango, esta variable no mostró un efecto importante en la deriva de pulverización. Para el modelo *Holandés*, se encontró adecuada la Ecuación 3.7 para representar la mayoría de los datos:

$$Y(x) = A_0 e^{-\frac{x_{dep}}{B_0}} + A_1 e^{-\frac{x_{dep}}{B_1}} \quad (3.7)$$

donde A_0 , B_0 , A_1 y B_1 son parámetros de regresión que dependen del cultivo, altura de botalón y tipo de boquilla.

Alves y Cunha (2014) compararon resultados de los modelos *Alemán* y *Holandés* con curvas de deriva obtenidas mediante ensayos experimentales en campo. Los autores reportaron que, para los casos analizados, el modelo *Holandés* predecía bien las curvas experimentales. Sin embargo, ambos modelos sobreestimaban la deriva para valores cercanos a las boquillas. Bueno et al. (2016) evaluaron la capacidad de los modelos *Alemán* y *Holandés* para predecir datos de campo obtenidos por los autores en cultivos de porotos. Los autores observaron que el modelo *Alemán* subestimaba el porcentaje de deriva mientras que el *Holandés* podía sub o sobrestimar dependiendo del tipo de boquilla utilizada. Los autores utilizaron sus datos experimentales para ajustar los parámetros de la Ecuación 3.7.

Smith et al. (2000) desarrollaron dos modelos empíricos basados en datos experimentales obtenidos de estudios de deriva en campos de Missouri e Illinois. A partir de un análisis estadístico, los autores encontraron seis y cuatro variables significativamente influyentes en la deriva de pulverización para los modelos de *Missouri* e *Illinois* respectivamente. Para modelo de *Missouri*, las variables del proceso (p_j) son:

- $x_{dep}/\cos(\phi)$, donde ϕ es el ángulo de desviación del viento respecto a la línea perpendicular al avance (ASAE, 2004)
- Velocidad del viento
- Altura de boquilla
- Presión de pulverización
- Temperatura de bulbo seco
- Velocidad inicial de gotas atomizadas en la dirección vertical

Para el caso de *Illinois*, las variables del proceso (p_j) son:

- $x/\cos(\phi)$
- Velocidad de viento
- Caudal (o presión) pulverizado
- Temperatura de bulbo seco

Los autores propusieron (para *Missouri* e *Illinois*) la siguiente relación general entre el porcentaje depositado de no volátiles y las variables de proceso:

$$Y(x_{dep}) = \frac{10^{(a+\sum_j b_j p_j)}}{F} \quad (3.8)$$

donde a y b_j son parámetros de ajuste. A diferencia de los modelos *Alemán* y *Holandés*, el modelo empírico de Smith et al. (2000) incluyó las condiciones ambientales y operativas como variables independientes.

Nuyttens (2007) desarrolló un modelo empírico para describir la deriva de pulverización en función de la distancia de boquilla, realizando un análisis de regresión

3.- Revisión de modelos matemáticos para predicción de deriva

múltiple para ajustar parámetros con datos de 175 pruebas de campo. Estos ensayos fueron realizados de acuerdo al standard internacional ISO 22866 (2005). Los ensayos fueron realizados bajo diferentes condiciones ambientales, utilizando diferentes tipos y tamaños de boquilla, variando la altura de botalón, presión de pulverización y velocidad de avance de la pulverizadora. La Ecuación 3.9 corresponde a la presentada por Nuyttens (2007) y posee cuatro variables independientes:

- Distancia a la boquilla (x_{dep})
- Velocidad media de viento a 3,5 m de altura desde el suelo ($U_{3,25m}$)
- Temperatura ambiente (T)
- Humedad absoluta expresada en g/kg (X_{H_2O})

$$Y(x_{dep}) = \frac{13 + 0,5U_{3,25m} + 0,4T - 1,74X_{H_2O}}{x_{dep}^{1,05}} \quad (3.9)$$

Las cuatro variables seleccionadas por Nuyttens (2007) para correlacionar la deriva de pulverización son aquellas que se encontraron como más significativas para describir la variación de los datos disponibles. De acuerdo con los datos de deriva, el modelo es válido para distancias hasta 20 m, temperaturas entre 8 y 30 °C, valores de humedad absoluta entre 3,5 y 12 g/kg y velocidades de viento que varían desde 1 a 6 m/s.

3.5 Modelos Lagrangianos

Los modelos lagrangianos realizan el seguimiento de la trayectoria de gotas individuales. A fin de reducir el costo computacional, las ecuaciones de movimiento usualmente son resueltas solo para algunos tamaños de gotas de la DSD atomizada. La ecuación principal de los modelos lagrangianos es el balance de fuerzas para una gota (Holterman et al., 1997):

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_E + \vec{F}_A \quad (3.10)$$

donde m y \vec{v} son la masa y velocidad de la gota, respectivamente; t es el tiempo y \vec{F}_g , \vec{F}_E y \vec{F}_A representan las fuerzas de gravedad, empuje y arrastre, respectivamente.

Asumiendo gotas esféricas de densidad constante, la Ecuación 3.10 puede escribirse como (Holterman et al., 1997):

$$\rho_l \frac{\pi}{6} d^3 \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho_l \frac{\pi}{6} d^3 \vec{g} - \rho_g \frac{\pi}{6} d^3 \vec{g} - \rho_g C_a \frac{\pi}{8} d^2 \vec{v}_{rel} |\vec{v}_{rel}| \quad (3.11)$$

donde ρ_l y ρ_g son las densidades del líquido y el aire respectivamente; $\vec{v}_{rel} = \vec{v} - \vec{U}$ es la velocidad relativa de la gota; \vec{U} es la velocidad del viento; d el diámetro de gota y C_a el coeficiente de arrastre.

Capítulo 3

Para el coeficiente de arrastre existen diferentes correlaciones en la literatura. Por ejemplo, Haider y Levenspiel (1989) propusieron:

$$C_a = \frac{24}{Re_d} (1 + 0,1806 Re_d^{0,6459}) + \frac{0,4251}{\frac{6880,95}{Re_d} + 1} \quad (3.12)$$

Definiendo el número de Reynolds de la gota (Re_d) como:

$$Re_d = \frac{|\vec{v}_{rel}| d \rho_g}{\mu_g} \quad (3.13)$$

donde μ_g es la viscosidad del aire.

Debido a que la evaporación produce disminución en el diámetro de las gotas, la velocidad de cambio de la masa debe resolverse de forma acoplada al balance de fuerzas. En términos de diámetro de gota, el balance de masa puede expresarse como:

$$\frac{dd}{dt} = -2k_m \frac{\rho_g}{\rho_l} (W_w^l - W_w^\infty) \quad (3.14)$$

donde W_w^l y W_w^∞ son las fracciones de vapor de agua en el aire en condiciones de saturación y lejos de la gota, respectivamente, los cuales varían con las condiciones atmosféricas. k_m es el coeficiente de transferencia de masa debido a evaporación, el cual puede ser calculado por correlaciones tales como las reportadas por Bergman et al. (2011). Las ecuaciones diferenciales 3.11 y 3.14, en conjunto con las ecuaciones algebraicas complementarias, permiten calcular la evolución de la velocidad y el diámetro de las gotas en función del tiempo. Además, la integración en el tiempo de la velocidad (resultados de la Ecuación 3.11) permite obtener las distancias recorridas por las gotas en cada coordenada espacial. Las condiciones iniciales corresponden a la velocidad, tamaño y posición de cada gota en la boquilla. La integración de las ecuaciones diferenciales para cada gota se realiza hasta que la misma alcanza la zona objetivo (o se evapora por completo). Entonces, para cada gota depositada, es posible obtener la distancia recorrida en dirección del viento (x_{dep}) y el diámetro final (d_{dep}). A su vez, la fracción de volumen evaporado para cada gota depositada se calcula como:

$$\psi = 1 - \left(\frac{d_{dep}}{d_0} \right)^3 \quad (3.15)$$

donde d_0 es el diámetro de la gota atomizada.

Como alternativa a la Ecuación 3.14, algunos autores proponen usar la siguiente ley para la velocidad de cambio de diámetro de gota (Lebeau et al., 2011):

3.- Revisión de modelos matemáticos para predicción de deriva

$$d = d_0 \left(1 - \frac{t}{t_l}\right) \quad (3.16)$$

donde t_l es el tiempo de vida de las gotas (Onorato y Tesouro, 2006), el cual puede calcularse como:

$$t_l = \frac{d_0^2}{\beta \Delta T} \quad (3.17)$$

donde ΔT es la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo y β representa la tasa de evaporación, la cual usualmente se asume constante e igual a $80 \frac{\mu m^2}{s^\circ C}$.

Smith (1970) utilizó un modelo matemático para simular la trayectoria de una gota de herbicida que se evaporaba. Los balances fueron resueltos en las direcciones vertical y la del viento (i.e., su modelo era 2D). Para comparar el modelo, generó datos experimentales mediante ensayos en túnel de viento con colectores. El autor concluyó que el fenómeno de evaporación debe ser tenido en cuenta para calcular apropiadamente la posición en que las gotas se depositan.

Para pulverizadoras de botalón, Thompson y Ley (1983) incorporaron fenómenos turbulentos en un modelo lagrangiano mediante una función aleatoria (modelo de recorrido aleatorio, *random-walk*) para estimar la deriva. La trayectoria se resolvió acoplando el balance de fuerzas a la ecuación que describe el fenómeno de evaporación. De las simulaciones, los autores reportaron la influencia del tamaño de gota, altura de liberación, velocidad de viento, velocidad de evaporación y turbulencia del aire sobre la deriva de pulverización. El estudio permitió observar interacciones significativas entre las variables nombradas y a su vez reconoció al enfoque lagrangiano como una herramienta valiosa para analizar el efecto de cada variable sobre la deriva de pulverización.

Miller y Hadfield (1989) desarrollaron un modelo *random-walk* en 2D que incluyó el fenómeno de evaporación para simular la deriva producida con boquillas hidráulicas. La velocidad de las gotas fue actualizada considerando el efecto del aire arrastrado dentro de una zona cercana al cabezal de la boquilla. Para zonas lejanas a la boquilla, los autores propusieron despreciar este efecto. Además, para gotas moviéndose con velocidad terminal, el modelo incluyó efectos turbulentos debido a fluctuaciones en el aire mediante un enfoque estocástico. Para validar el modelo, los autores realizaron mediciones en campo de deriva de pulverización de un equipo de botalón. Del análisis de los resultados obtenidos, observaron que la inclusión del efecto del arrastre de aire en la zona cercana a la boquilla mejoró notablemente la predicción de los datos experimentales. Ghosh y Hunt (1998) también desarrollaron y validaron modelos 1D y 2D para estudiar el arrastre que produce

el aerosol atomizado sobre el aire ambiente, lo cual reduce la velocidad relativa entre ambas fases y, por lo tanto, modifica la desaceleración de las gotas.

Holterman et al. (1997) desarrollaron un modelo *random-walk* denominado IDEFICS para simular la deriva de pulverización de aplicaciones terrestres por botalón. Este modelo, además de los fenómenos de evaporación y arrastre de aire, incluyó perfiles espaciales de velocidad del viento sobre y dentro del cultivo. Los autores concluyeron que el efecto del aire arrastrado por las gotas puede ser despreciado para distancias lejanas de la boquilla. La influencia del cultivo sobre el viento se representó mediante una función dependiente de la coordenada vertical medida desde el suelo y dos parámetros relacionados al tipo y altura de cultivo. La velocidad por encima del cultivo se describió mediante una función logarítmica dependiente de la coordenada vertical. Las pruebas de campo fueron realizadas a fin de calibrar y validar el modelo frente a datos experimentales. Los resultados indicaron que la velocidad de viento, altura de botalón y tamaño de la boquilla son las variables que más afectan la deriva de pulverización.

Buttler Ellis y Miller (2010) desarrollaron un modelo de deriva, basado en el enfoque lagrangiano utilizado por Miller y Hadfield (1989). Debido a que el modelo fue desarrollado para regiones de humedad relativa elevada, el efecto de evaporación fue despreciado. El volumen de control de las simulaciones 3D utilizado por los autores puede conceptualizarse como integrado por cuatro regiones: a) una zona cercana a las boquillas, donde el efecto de arrastre de aire es dominante, b) un volumen debajo las boquillas donde las gotas son afectadas por la velocidad relativa de viento/vehículo c) una zona alejada de la boquilla donde el movimiento de las gotas es afectado por la velocidad y turbulencia del viento, y d) un volumen dentro del cultivo, donde el viento es corregido por una función similar a la reportada por Holterman et al. (1997). El espacio ocupado por cada región fue definido con parámetros de ajuste. Este modelo fue validado frente a datos experimentales. Se obtuvieron buenas predicciones de deriva para boquillas de abanico plano, sin embargo, cuando los cultivos eran altos las predicciones fueron menos satisfactorias.

De Cock et al. (2017) utilizaron un modelo lagrangiano para encontrar los rangos óptimos de tamaño de gota para maximizar la deposición de agroquímicos en el área objetivo. El modelo utilizó un enfoque lagrangiano estocástico que incluyó los siguientes fenómenos: evaporación y retención de gotas en el objetivo (se modela el rebote y la rotura de las gotas). En cada simulación fueron consideradas hasta cien mil trayectorias de gotas de la nube pulverizada. Una función Rosin-Rammler (Tabla 2.7) fue utilizada para describir la DSD, los parámetros de esta función fueron seleccionados para verificar valores de D_{V50} (Sección 2.3.1) y RSF (Ecuación 2.6) especificados. De un estudio de sensibilidad

3.- Revisión de modelos matemáticos para predicción de deriva

paramétrica, los autores observaron que las gotas con diámetros entre 200 y 250 μm conducen a condiciones de baja deriva y buena retención en el área objetivo. Gotas entre 270 y 400 μm rebotan en las hojas mientras que gotas con diámetros mayores a 400 μm se rompen al impacto, generando menor retención en ambos casos. Basados en estos resultados, De Cock et al. (2017) enfatizaron la necesidad de desarrollar estrategias que controlen el tamaño de gota para reducir efectos adversos en el medioambiente.

3.6 Modelos CFD

Las trayectorias de las gotas pueden ser calculadas también acoplando modelos lagrangianos a fluidodinámica computacional (CFD). Estas técnicas numéricas permiten cuantificar, con precisión razonable, la influencia de condiciones atmosféricas, diseño mecánico de la pulverizadora y condiciones de operación (Bartzanas et al., 2013). En estos modelos, el perfil de velocidades de aire para todo el volumen de control es obtenido mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes (Moukalled et al., 2016) y posteriormente los balances de masa y fuerza se resuelven para las trayectorias de las gotas.

Esta metodología permite incluir un modelado riguroso de los efectos de la turbulencia en el movimiento de la gota. CFD permite comprender la influencia de variables no controladas tales como las condiciones de campo (e.g., geometría del campo, cultivo) y permite generar datos para ajustar modelos de orden reducido. El uso de modelos CFD en aplicaciones de tiempo real es limitado debido al elevado costo y tiempo computacional requerido para realizar las simulaciones, sin embargo, las nuevas tecnologías de conectividad han permitido realizar simulaciones CFD en la nube basadas en datos medidos en tiempo real (Bochtis et al., 2011).

Reichard et al. (1992) aplicaron CFD para obtener los patrones de flujo de aire en 2D dentro de un túnel de viento, pulverizando gotas en dirección vertical. Posteriormente, los autores evaluaron las trayectorias de las gotas por medio de un modelo lagrangiano incluyendo el perfil de velocidades de aire obtenido por CFD. Comparando con la información obtenida en el túnel de viento, los autores demostraron que el uso de modelos lagrangianos acoplados a CFD permite predecir satisfactoriamente la deriva de pulverización a distancias cortas (longitudes evaluadas en los ensayos realizados en el túnel de viento). Zhu et al. (1994) también combinaron simulaciones CFD con un modelo lagrangiano y realizaron un análisis de sensibilidad para estudiar el efecto de la velocidad del viento, la altura de botalón, la temperatura ambiente, la humedad relativa y el tamaño de gota sobre la deriva de pulverización. Los autores concluyeron que es conveniente enfocar esfuerzos en reducir el volumen de gotas producidas por las boquillas cuyo diámetro inicial es menor a 200 μm . Para un pulverizador de botalón, Baetens et al. (2007)

utilizaron un modelo lagrangiano 3D acoplado con la representación de flujo de aire mediante CFD. Los autores calibraron y validaron el modelo utilizando datos experimentales (Nuyttens et al., 2006). La combinación de estos modelos permitió predecir la información experimental con buena precisión para distancias menores a 5 m.

Respecto a diseño de maquinaria, Tsay et al. (2002a) evaluaron el potencial para reducir la deriva de pulverizadores protegidos neumáticamente comparado con pulverizadores convencionales. A partir de los resultados obtenidos, los autores observaron que un diseño correcto de protección neumática produce una reducción en el potencial de deriva similar a sistemas de pulverización asistidos por aire. Tsay et al. (2002b) utilizaron CFD para evaluar diferentes diseños de pulverizadores con protección mecánica. Los autores encontraron que un diseño de escudo de doble lámina se desempeñó mejor que la pulverización sin escudo. Molari et al. (2005) utilizaron CFD para diseñar una pulverizadora de túnel eficiente reduciendo los problemas inherentes a este tipo de maquinaria.

Existen numerosos trabajos en modelado CFD que se han orientado a estudiar la influencia del cultivo sobre la deriva y retención de las gotas para pulverizadoras de huerta asistidas por aire (Badules et al., 2018; Endalew et al., 2010; Hong et al., 2018). A pesar de que estos trabajos fueron realizados para pulverizadoras de huerta, el uso de CFD para entender el efecto de la geometría de los cultivos y generar modelos más complejos debería permitir a los investigadores mejorar los modelos de deposición para pulverizadoras de botalón.

3.7 Modelos de dispersión

Los modelos de dispersión fueron inicialmente utilizados para estimar patrones de contaminación aérea, y posteriormente fueron aplicados para estimar la deriva de pulverización en aplicaciones aéreas (Bilanin et al., 1989). Más recientemente, fueron empleados para evaluar la eficiencia de pulverizaciones terrestres por botalón (Lebeau et al., 2011; Stainier et al., 2006a; Teske et al., 2009). Este enfoque de modelado permite estudiar la evolución espacial de la concentración de la nube de pulverización. Los modelos de dispersión requieren conocer el caudal de volumen atomizado, la ubicación de la boquilla y las condiciones atmosféricas, entre otros (Ritner et al., 2013; Stainier et al., 2006).

El modelo de dispersión más comúnmente utilizado es el de *Pluma Gaussiana* (Lebeau et al., 2011; Stainier et al., 2006b; Tan, 2014). La Figura 3.6 ejemplifica una representación esquemática de una pluma que muestra una distribución de concentración gaussiana a una determinada posición arbitraria (Tan, 2014). Debido a que las gotas se mueven hacia abajo hasta una cierta distancia vertical antes de moverse en la dirección del viento, se considera

3.- Revisión de modelos matemáticos para predicción de deriva

que las gotas son descargadas desde una altura efectiva (H_{eff}) menor que la altura real de descarga (ver Figura 3.6).

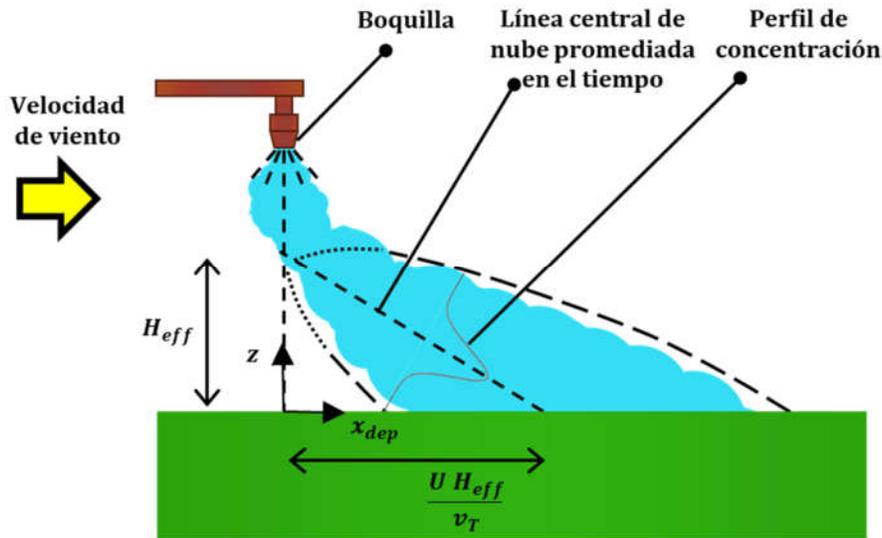


Figura 3.6. Representación esquemática de un modelo de Pluma Gaussiana.

Lebeau et al. (2011) desarrollaron el software RTDrift, el cual utiliza un modelo de *Pluma Gaussiana* para estimar la deriva de pulverización para aplicaciones agrícolas. En este modelo, el origen del sistema de coordenadas fue seleccionado en el suelo y la dirección de la coordenada x se orienta en la dirección del viento. Se considera que la nube de aerosol se dispersa tanto en la dirección vertical como en la transversal a la dirección del movimiento de la máquina. Por otro lado, la dispersión se considera despreciable en la dirección del viento (e.g, dirección x_{dep}), ya que se asume que el transporte convectivo debido al viento es mucho más importante (Lebeau et al., 2011; Tan, 2014). De acuerdo con la Figura 3.6, la nube se desplaza en la coordenada x_{dep} mientras se dispersa en las direcciones $-y$ y $-z$ (la dirección $-y$ no se muestra en la Figura). Asumiendo estado estacionario y velocidad de viento constante (U), el balance de masa de la nube se transforma en (Tan, 2014):

$$U \frac{\partial C_i}{\partial x_{dep}} = D_y \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \quad (3.18)$$

donde C_i es la concentración de la nube de gotas que corresponden a la clase por tamaño i . D_y y D_z son dispersiones por remolinos para las direcciones y - y z -, respectivamente.

Para cada tamaño de gota, Lebeau et al. (2011) calcularon la altura efectiva como:

$$H_{eff,i} = \frac{v_{T,i} x_{dep,i}}{U} \quad (3.19)$$

Capítulo 3

donde $v_{T,i}$ es la velocidad terminal y $x_{dep,i}$ es la distancia de deposición en dirección del viento para la clase de gotas i . Lebeau et al. (2011) calculó $x_{dep,i}$ resolviendo previamente un modelo lagrangiano (considerando evaporación) y obteniendo un diámetro medio en vuelo de las gotas.

La Ecuación 3.18 es resuelta utilizando las siguientes condiciones de borde (Tan, 2014):

$$C_i(x_{dep} \rightarrow \infty, y, z) = 0 \quad (3.20)$$

$$C_i(x_{dep} = 0, y = 0, z = 0) \rightarrow \infty \quad (3.21)$$

$$D_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big|_{z=0, x_{dep}, y > 0} = 0 \quad (3.22)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} U C_i dz dy = \dot{m}_i \quad (x_{dep} > 0) \quad (3.23)$$

donde \dot{m}_i es el caudal másico de descarga correspondiente a gotas de la clase i . La Ecuación 3.23 es un balance de masa líquido que indica que, para cada $x_{dep} > 0$, \dot{m}_i se mantiene constante en la dirección del viento. Esta condición implica que se desprecia la evaporación del líquido, y es correcta solo si el modelo es expresado en términos de concentración de componentes no volátiles (Lebeau et al., 2011). Al resolver la Ecuación del modelo de dispersión descrito anteriormente, se obtiene la distribución 3D de la concentración mediante la siguiente Ecuación (Tan, 2014):

$$C_i = \frac{\dot{m}_i}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{\left[z - \left(H_{eff,i} - \frac{v_{T,i}x_{dep}}{U}\right)\right]^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (3.24)$$

donde σ_y y σ_z son módulos de dispersión, los cuales están relacionados a las difusividades de remolino mediante las siguientes ecuaciones (Lebeau et al., 2011):

$$\sigma_y^2 = \frac{2D_y x_{dep}}{U} \quad (3.25)$$

$$\sigma_z^2 = \frac{2D_z x_{dep}}{U} \quad (3.26)$$

Estos parámetros pueden ser ajustados si existen datos experimentales (Lebeau et al., 2011) o utilizando correlaciones aproximadas en función de la distancia (Briggs, 1973).

Para aerosoles polidispersos, la distribución total de la concentración es obtenida mediante la suma de la concentración de la clase i ponderada por la fracción volumétrica de dicha clase en la DSD.

3.- Revisión de modelos matemáticos para predicción de deriva

De acuerdo a Lebeau et al. (2011), el caudal másico depositado por unidad de área (G_i) es obtenido como:

$$G_i(x_{dep}, y) = v_{T,i} C_i(x_{dep}, y, z = 0) \quad (3.27)$$

La curva de deposición puede calcularse convirtiendo los resultados de la Ecuación 3.27 a caudal volumétrico por unidad de área, y dividiendo el resultado por el caudal pulverizado por una boquilla (Q_i).

Stainier et al. (2006b) utilizaron el modelo de dispersión descrito anteriormente para evaluar el potencial de deriva de boquillas de uso agrícola. Los autores ajustaron diferentes parámetros del modelo para representar datos experimentales de túnel de viento y concluyeron que el modelo describió correctamente la deriva de pulverización. Lebeau et al. (2011) desarrollaron el software RTDrift para generar mapas de deriva en tiempo real basados en mediciones de caudal y velocidad y dirección de viento. El modelo calibrado fue capaz de realizar predicciones de datos experimentales con buena precisión.

Para aplicaciones terrestres de botalón, Baetens et al. (2009) calibraron un modelo de dispersión 2D utilizando resultados de un modelo CFD previamente validado (Baetens et al., 2007). Con respecto al modelo de dispersión presentado, los autores despreciaron D_y y asumieron que la velocidad del viento era función de la coordenada vertical. Finalmente, el modelo fue validado utilizando datos de 38 experiencias de campo. De acuerdo a Baetens et al. (2009), los valores de deriva predichos mostraron buen acuerdo con los valores experimentales para diferentes velocidades de viento, alturas de botalón y tipos de boquillas hasta distancias de 20 m en dirección del viento. Además, los autores reportaron que el tiempo de cálculo del modelo de dispersión fue 100 veces menor que el requerido para las simulaciones del modelo CFD.

Teske et al. (2009) desarrollaron un modelo de predicción de deriva de pulverización terrestre por botalón basado en el modelo AGricultural DISPersal (AGDISP) (Bilanin et al., 1989), el cual fue originalmente desarrollado para aplicaciones aéreas. AGDISP utiliza un modelo lagrangiano para predecir las trayectorias y un modelo de dispersión para calcular la deposición en el área objetivo. Las predicciones del modelo fueron comparadas frente a dos conjuntos de datos experimentales que incluyeron variaciones en rugosidad del suelo, velocidad del viento y temperatura y humedad relativa ambiente. Los autores concluyeron que la humedad relativa no afectaba significativamente la deriva. También observaron que el modelo puede sobrestimar la deriva a distancias de deposición cercanas a la boquilla y subestimarla a distancias lejanas de la pulverización.

Nsibandé et al. (2015) utilizaron el software AGDISP v8.27 para predecir la deriva en aplicaciones terrestres de atrazina. Los resultados simulados fueron comparados con datos de campo. Los autores observaron una elevada sensibilidad del modelo respecto a la DSD atomizada. También encontraron que la velocidad de evaporación no produjo impacto significativo en la distancia de deposición de las gotas, mientras que el viento fue la variable ambiental que más afectó la deriva de pulverización.

La empresa *Cambridge Environmental Research Consultants Ltd.* (Cambridge Environmental Research Consultants, 2010), desarrolló el software comercial ADMS para el modelado de la dispersión de contaminación atmosférica, el cual permite calcular la distribución de diferentes contaminantes. El mismo fue utilizado por Butler Ellis et al. (2010) para realizar análisis de riesgo de exposición de vapores producto de pulverizaciones de fitosanitarios. Butler Ellis et al. (2010) concluyeron que es necesario desarrollar modelos de emisiones que tengan en cuenta las condiciones ambientales y fisicoquímicas de la formulación.

3.8 Comparación de modelos

Para una revisión rápida de las características de los modelos descritos anteriormente, la Tabla 3.1 muestra para cada uno de ellos: el número de boquillas modeladas, el tipo de información utilizada para validar/calibrar el modelo (campo o laboratorio) y los fenómenos físicos (evaporación, arrastre de aire, retención de gotas en cultivo) que consideran. Además, la Tabla 3.2 completa la información dada por la Tabla 3.1 listando las variables de entrada requeridas para calcular la deriva de pulverización (condiciones ambientales, operativas y de campo, así como también propiedades de las gotas atomizadas).

Al incluir condiciones de operación, los enfoques lagrangianos y de dispersión son factibles de utilizarse en herramientas de control. Definidos los requerimientos de aplicación deseados y las condiciones ambientales, los modelos pueden estimar las variables de proceso adecuadas (e.g., presión de operación, velocidad de la máquina pulverizadora, altura de botallón y tipo de boquilla) para minimizar la deriva de pulverización.

Tabla 3.1 Comparación de modelos basada en: a) número de boquillas, b) datos usados en validación/calibración y c) fenómenos físicos que consideran.

Referencias – Dimensiones espaciales del modelo	Número de boquillas	Validación / calibración	Fenómenos físicos		
			Evaporación	Arrastre de aire	Retención de gotas en cultivo
Empíricos					
Ganzelmeier et al. (1995) – 1D		FD			
Holterman y van de Zande (2003) – 1D		FD			
Smith et al. (2000) – 1D					
Nuyttens (2007) – 1D		FD			
Lagrangianos					
Smith (1970) – 2D	1	LD	●		
Thompson y Ley (1983) – 2D	1	-	●		
Miller y Hadfield (1989) – 2D	1	FD	●	●	
Holterman et al. (1997) – 3D/2D	1	FD	●	●	
Butler Ellis y Miller (2010) – 3D	M	FD		●	
De Cock et al. (2017) – 2D	1	-	●		●
Reichard et al. (1992) – 2D	1	LD	●		
Zhu et al. (1994) – 2D	1	-	●		
Baetens et al. (2007) – 3D	M	FD			
Dispersión					
Stainier et al (2006) – 2D	1	LD			
Lebeau et al. (2011)– 3D	1	FD	●		
Baetens et al. (2009) – 2D	1	FD			
Teske et al. (2009) – 2D	1	FD	●	●	

Una boquilla: 1; Múltiples boquillas: M; Datos de campo: FD; Datos de laboratorio: LD.

Tabla 3.2. Variables de entrada requeridas para resolver el modelo.

Referencias - Dimensiones espaciales del modelo	Condiciones ambientales				Condiciones de operación			Propiedades de la pulverización			Condiciones del cultivo		
	U	\vec{U}	T	HR	H	ΔP	v_A	d_0	v_0	Composición	Rugosidad del terreno	Tipo	Altura
Empíricos													
Ganzelmeier et al. (1995) - 1D													
Holterman y van de Zande (2003) - 1D													
Smith et al. (2000) - 1D	●		●		●	●			●				
Nuyttens (2007) - 1D	●		●	●									
Lagrangianos													
Smith (1970) - 2D	●		●	●				●	●				
Thompson y Ley (1983) - 2D	●		●	●	●			●	●	●			●
Miller y Hadfield (1989) - 2D	●		●	●	●			●	●				
Holterman et al. (1997) - 3D/2D	●		●	●	●	●	●	●	●	●		●	●
Butler Ellis y Miller (2010) - 3D	●	●			●	●	●	●	●			●	●
De Cock et al. (2017) - 2D	●		●	●	●	●		●	●	●		●	●
Reichard et al. (1992) - 2D	●		●	●	●			●	●				
Zhu et al. (1994) - 2D	●		●	●	●			●	●				
Baetens et al. (2007) - 3D	●	●			●	●		●	●		●		
Dispersión													
Stainier et al (2006) - 2D	●	●			●			●	●				
Lebeau et al. (2011)- 3D	●	●	●	●	●			●	●				
Baetens et al. (2009) - 2D	●				●	●		●	●				
Teske et al. (2009) - 2D	●		●	●	●	●		●	●	●	●		

U: velocidad de viento; \vec{U} : dirección de viento; T: temperatura ambiente; RH: humedad relativa; H: altura de botalón; ΔP : Presión de pulverización; v_A : Velocidad de avance; d_0 : Tamaño inicial de gotas; v_0 Velocidad inicial de gotas.

3.- Revisión de modelos matemáticos para predicción de deriva

A pesar del amplio uso de los modelos empíricos para proveer curvas de deriva en función de la distancia y de que han sido adoptados por agencias medioambientales, estos modelos deberían ser utilizados solo en condiciones de aplicación similares a las empleadas para el ajuste de sus parámetros. Más aún, si se cuenta con una cantidad considerable de datos disponibles, los modelos empíricos pueden obtenerse muy rápidamente. Por el contrario, los modelos lagrangianos y de dispersión, al estar basados en primeros principios, pueden ser utilizados para evaluar la deriva incluso por condiciones diferentes a las utilizadas para la calibración. Aun cuando los modelos CFD permiten representar de forma detallada el aerosol, además de requerir recursos humanos altamente entrenados, el cálculo requiere elevados costos computacionales para realizar simulaciones de dominios grandes y/o incluir fenómenos complejos. La Tabla 3.3 resume las ventajas y desventajas de cada tipo de modelo.

Tabla 3.3 Enfoques de modelado matemático de deriva.

Enfoque	Ventajas	Desventajas
Empírico	Nivel de predicción rápido Buenas predicciones para condiciones de operación cercanas a las de validación	Requiere abundante cantidad de datos de campo de calidad Elevada incertidumbre en predicciones fuera de las condiciones de calibración Modelo de sólo una dimensión (dirección del viento)
Lagrangiano	Modelo fenomenológico Permite acoplar efectos tales como arrastre de aire Modelos en 1D, 2D y 3D	Costo computacional elevado si se evalúan muchas gotas Requiere datos de calidad de la DSD y velocidad de gotas a la salida de la boquilla
Dispersión	Menor costo computacional que lagrangianos (si se dispone de la altura efectiva de liberación de gotas) Modelos 2D y 3D	Dificultad para incluir directamente el comportamiento de la boquilla Requiere datos de calidad de la DSD y velocidad de gotas a la salida de la boquilla Requiere un cálculo previo de la posición en que las gotas comienzan a dispersarse
CFD	Modelado fenomenológico Representación rigurosa de las corrientes de aire Los resultados se pueden utilizar para evaluar o ajustar modelos menos rigurosos Modelos 1D, 2D y 3D Se puede incluir directamente la geometría del cultivo Se ha utilizado con éxito para diseño en varias industrias.	Elevados tiempos de cómputo para modelos grandes Requiere usuarios entrenados Requiere datos de calidad de la DSD y velocidad de gotas a la salida de la boquilla

3.9 Conclusiones

En este Capítulo se presentaron las diferentes formas en las que se cuantifica experimentalmente la deriva y la formulación matemática de la deriva de deposición. Se analizaron los diferentes modelos matemáticos disponibles en literatura para predecir la deriva de pulverización agrícola. Debido a la gran variedad de condiciones climáticas y de terreno, características de las boquillas, condiciones de operación y requerimientos de pulverización, todos los modelos requieren ajustes específicos para cada caso.

A pesar de los avances computacionales, actualmente los modelos empíricos siguen siendo ampliamente utilizados para modelar la deriva de pulverización. Una posible razón para esto sea la dificultad de representar adecuadamente todos los fenómenos involucrados en la pulverización mediante modelos de primeros principios.

La DSD atomizada es una variable de entrada para todos los modelos fenomenológicos. Esto implica que, para una correcta predicción de la deriva, es necesario contar con un modelo de atomización que represente correctamente la DSD. Los modelos publicados asumen que la DSD es una función conocida o la describen solo para distribuciones de referencia en base a la clasificación de las gotas producidas (ASABE S572.1, Tabla 2.4). Esto limita la capacidad de dichos modelos para realizar control en línea de la pulverización debido a que no proveen una correlación directa entre el tipo de boquilla y la presión de operación con la DSD pulverizada. Por lo tanto, se reconoce la necesidad de contar con un modelo matemático capaz de predecir la deriva de pulverización que incluya el cálculo de la DSD atomizada en función de información que maneje el aplicador.

Los modelos gaussianos, aplicados originalmente a la predicción de la dispersión de contaminantes, tienen la ventaja de no consumir mucho tiempo computacional, porque en general no requieren evaluar trayectorias de partículas. Sin embargo, aplicados a la predicción de deriva en pulverizaciones terrestres, la resolución de los mismos (como el presentado por Lebeau et al. (2011)) involucra una etapa de cálculos previa en la cual se estima la altura efectiva desde la cual las gotas atomizadas comienzan a dispersarse. Este enfoque de resolución es secuencial, e incorpora costo computacional al modelo.

Los modelos lagrangianos tienen la ventaja de que resulta relativamente fácil incluir los diferentes fenómenos que modifican el tamaño, velocidad y posición de las gotas. Por otro lado, tienen la desventaja de que no permiten calcular la deriva de pulverización en forma directa. Además, una estimación precisa de esta variable requiere el seguimiento de muchas clases (i.e., tamaños) de gotas.

3.- Revisión de modelos matemáticos para predicción de deriva

A pesar de que existen varios modelos matemáticos para predecir la deriva de pulverización, son escasos aquellos que tienen en cuenta, entre las variables de entrada, aquellas condiciones operativas que el aplicador puede modificar antes o durante la pulverización (e.g., altura de botalón, tipo de boquillas, presión de pulverización). Además de cumplir con esta característica, un modelo matemático capaz de predecir la deriva en tiempo real debe ser capaz de resolver, de la forma más directa posible, las ecuaciones que describen la evolución de las gotas desde que salen de cada boquilla hasta que se depositan. Por esta razón, en los Capítulos que siguen se formula un modelo matemático que representa el proceso de pulverización, usando variables de entrada y calculando respuestas que son las comúnmente manejadas por el aplicador, y que se resuelve usando muy bajo tiempo de cómputo.

Capítulo 4

Modelo de Deriva para una Boquilla

"Not all those who wander are lost." J.R.R. Tolkien

Los modelos descritos en el Capítulo 3, a excepción de los basados en técnicas CFD que son demandantes de altos tiempo de cómputo, no describen el fenómeno de atomización y en su mayoría usan sólo distribuciones de tamaño de gotas ignorando las diferentes trayectorias iniciales de las mismas. Dentro de los modelos que consumen menores tiempo de cómputo, se ubican los empíricos. Sin embargo, esta clase de modelos requiere parámetros de ajuste y sólo puede emplearse dentro de la ventana operativa usada para su calibración. Con mayor requerimiento de tiempo de cómputo se ubican los modelos de dispersión. Estos modelos requieren condiciones iniciales que no corresponden a las de la salida de la boquilla. En efecto, necesitan corregir la altura de liberación de gotas como aquella en que las gotas comienzan a dispersarse, lo cual debe realizarse para cada tamaño de gota. Esta corrección, necesaria para calcular adecuadamente la deposición del líquido pulverizado, demanda la resolución previa de otros modelos (como el lagrangiano, que incrementa el tiempo de cómputo). Por último, los modelos del tipo lagrangiano, que siguen las trayectorias de cada gota, consumen un tiempo de cómputo que es proporcional al número de intervalos de diámetro empleados en la discretización de la DSD (i.e, número de clases de la distribución). Todos los modelos, excepto los empíricos, requieren la resolución de ecuaciones diferenciales.

Los modelos arriba descritos permiten estimar la deriva de pulverización. No obstante, los aplicadores caracterizan la calidad de aplicación en base a parámetros obtenidos mediante hojas hidrosensibles, tales como diámetros representativos de las gotas depositadas y número de impactos de gotas por unidad de área. A la fecha, no existen publicaciones con modelos matemáticos que provean esta clase de resultados. Es decir, no existen herramientas de simulación que correlacionen las variables de entrada que el aplicador maneja (e.g., presión de pulverización, altura de botalón) con las que el aplicador requiere (e.g., número de impactos, diámetros de gotas depositadas).

En función de la aplicación prevista para el software (controlar la deriva en tiempo real), en este Capítulo, como primera etapa, se desarrolla un nuevo modelo matemático para una boquilla con las siguientes características:

- De naturaleza fenomenológica.
- De bajo tiempo de cómputo, que lo haga apto para aplicaciones en tiempo real.
- Con variables de entrada coincidentes con los parámetros del proceso que el aplicador puede modificar antes o durante la pulverización.
- Con capacidad predictiva de la deriva de pulverización, DSD de gotas depositadas, entre otras variables de salida.
- El aerosol atomizado se describe mediante una función de distribución bivariante que permite describir, de manera conjunta, el tamaño y trayectoria inicial de las gotas. Esta representación permite, a su vez, seguir la posición, velocidad y tamaño de las gotas desde la pulverización hasta la deposición.

4.1 Distribución espacial de las gotas atomizadas

El tratamiento efectivo con productos fitosanitarios requiere una distribución óptima del líquido pulverizado sobre el área objetivo. Sin embargo, tal como señalan Bucquet et al. (2014), las boquillas no necesariamente poseen una distribución espacial de gotas uniforme. Dicha distribución suele estudiarse mediante el llamado *diagrama de distribución*. Este diagrama, que se construye a partir de datos experimentales, es un histograma que describe la distribución espacial de las gotas depositadas a una cierta distancia de la boquilla.

Para obtener el diagrama, tal como se muestra en la Figura 4.1a, un volumen conocido de líquido se pulveriza desde una altura H y con un ángulo θ sobre una bandeja inclinada con canales recolectores de dimensiones normalizadas, sin viento y a temperatura y humedad relativa constante (i.e., condiciones controladas). Al final de la experiencia se mide el volumen de líquido acumulado en cada canal (Matthews et al., 2014; Onorato and Tesouro, 2006). El diagrama de distribución es específico para cada una de las boquillas y condiciones de pulverización. El patrón con el que se depositan las gotas en condiciones de laboratorio provee información valiosa para definir la separación entre boquillas a fin de obtener la cobertura deseada. El diagrama de distribución es dependiente de la altura H desde la cual se realiza la pulverización y del ángulo del aerosol (ver Figura 4.1a).

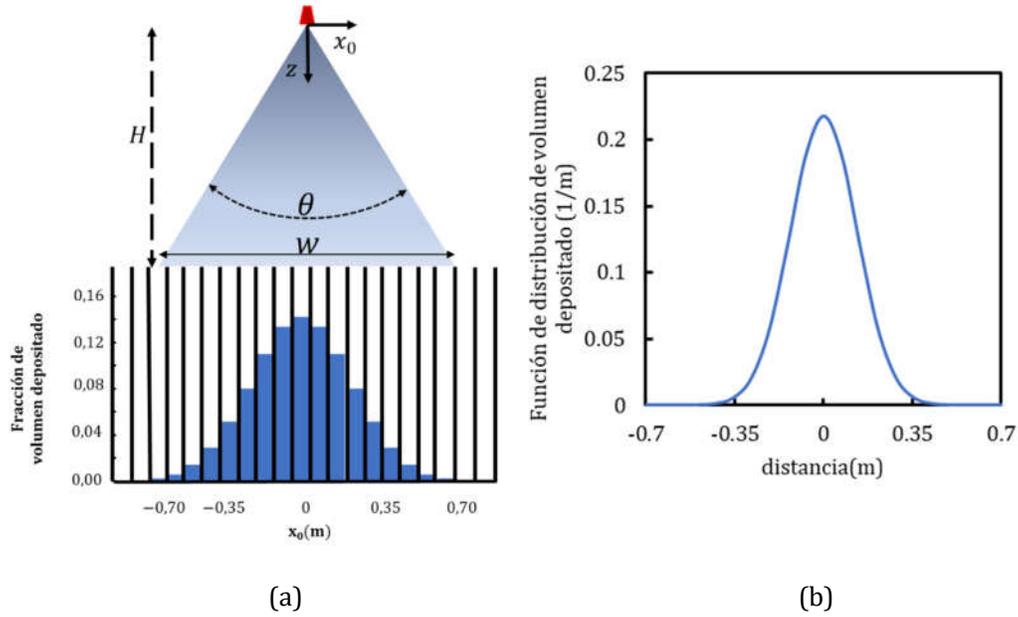


Figura 4.1. a) Diagrama de deposición en bandejas recolectoras. b) Diagrama de distribución de aerosol.

Existe información de diagramas de distribución de aerosoles en bibliografía y provistas por fabricantes de boquillas (Mangus et al., 2017). Para boquillas de abanico plano, se han propuesto funciones de distribución para representar el patrón de cobertura a una distancia específica de la boquilla. Mawer y Miller (1989) utilizaron funciones triangulares, gaussianas y beta para describir la distribución de volumen debajo de una boquilla. Estos autores concluyeron que una función gaussiana describe con mayor precisión la distribución espacial de gotas que la función triangular, y que presenta menos problemas asociados a la estimación de los parámetros necesarios que la función beta. Leunda et al. (1990) también encontraron que la distribución del aerosol se puede aproximar adecuadamente mediante una función gaussiana. Kluza et al. (2019) propusieron una función definida a trozos para describir la función de distribución del aerosol, incorporando 5 parámetros de ajuste. Este último enfoque requiere una gran cantidad de información experimental para ajustar y validar la función propuesta.

Debido a su simplicidad, en este trabajo se sigue la propuesta de Mawer y Miller (1989) y Leunda et al. (1990), para describir la función de distribución espacial de gotas mediante una función gaussiana:

$$f_{x_0}(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_0}{\sigma_s}\right)^2\right] \quad (4.1)$$

donde x_0 es la distancia a la que se depositan las gotas en condiciones controladas y σ_s es la desviación estándar de la función gaussiana. La Figura 4.1 b muestra un ejemplo de una

función de distribución espacial construida con la Ecuación 4.1 (utilizando parámetros tal que la función distribución represente los datos experimentales de la Figura 4.1.a). Debido a que la desviación estándar se relaciona con la dispersión de la distribución, σ_s es función del ancho del depósito del aerosol (w) (ver Figura 4.1a). En particular, en este trabajo σ_s se calcula imponiendo la siguiente relación:

$$f_{x_0}(w/2) = f_{x_0}(-w/2) = 1e^{-6} \quad (4.2)$$

donde w se calcula como:

$$w = 2H \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4.3)$$

Mediante la Ecuación 4.2, se fuerza matemáticamente a que la función de distribución espacial presente valores despreciables para distancias mayores al ancho del depósito de aerosol.

4.2 Función de distribución bivariable propuesta para describir la población de gotas atomizadas

Considerando el modelo de distribución de tamaño de gotas desarrollado en el Capítulo 2 y la necesidad de contar con una distribución integral de tamaño y localización espacial de gotas, en esta Sección se propone un modelo bivariable basado en las siguientes hipótesis:

- I. El aerosol atomizado tiene una distribución bidimensional que es función de: a) el diámetro de gota y b) la dirección de la trayectoria inicial de gota respecto a la vertical (Figura 4.2). Por lo tanto, es posible describir la distribución del aerosol atomizado mediante una función bivariable, $f_{d\alpha}(d_0, \alpha)$, siendo las variables de distribución el diámetro de gota d y el ángulo de trayectoria inicial α . En el Apéndice A, se describen fundamentos de funciones de distribución multivariable que resultan relevantes para representar poblaciones de gotas.
- II. $f_{d\alpha}(d_0, \alpha)$ se expresa como un producto de funciones unidimensionales independientes (Ramkrishna, 2000).
- III. La DSD atomizada, $f_d(d_0)$, se representa mediante la Ecuación 2.10.
- IV. El orificio de la boquilla se considera puntual (i.e., no existe una distribución espacial de gotas dentro del orificio de la boquilla). Para las simulaciones de deposición de fitosanitarios, donde las gotas pueden trasladarse desde centímetros hasta más de cien metros, la variación de las gotas en la posición inicial dentro de la boquilla puede considerarse despreciable (Holterman et al., 1997; Lebeau et al., 2011; Nuyttens, 2007).

- V. La función densidad respecto a la dirección de la trayectoria de gota, $f_{\alpha}(\alpha)$, se estima a partir de un diagrama de distribución, obtenido en condiciones de laboratorio o controladas, (Bucquet et al., 2014; Mangus et al., 2017).

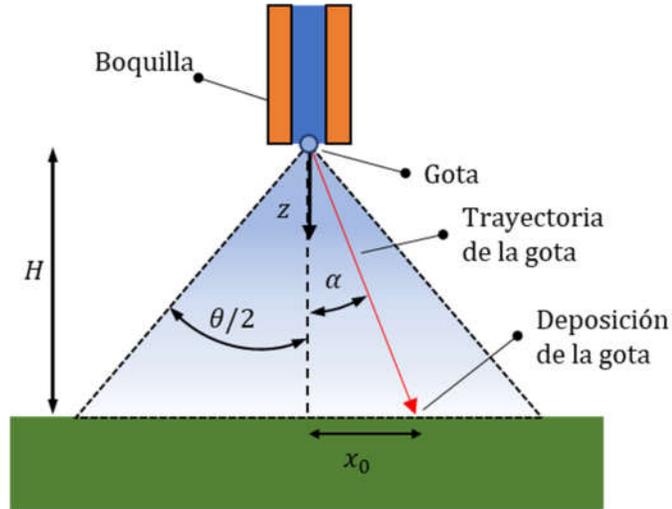


Figura 4.2. Trayectoria y deposición de una gota atomizada en condiciones controladas.

A partir de las suposiciones I y II, la función de distribución de la población de gotas atomizadas se define como:

$$f_{d\alpha}(d_0, \alpha) = f_d(d_0)f_{\alpha}(\alpha) \quad (4.4)$$

donde $f_d(d_0)$ es la función que describe la DSD y $f_{\alpha}(\alpha)$ es la función de distribución respecto al ángulo α . Considerando la suposición III, la función de distribución de tamaño de gotas $f_d(d_0)$, en la Ecuación 4.4 se reemplaza por la dada en la Ecuación 2.10, resultando:

$$f_{d\alpha}(d_0, \alpha) = \begin{cases} \frac{f_{\alpha}(\alpha)}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_{ul}} \frac{d_{max}}{d_0(d_{max} - d_0)} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(a_{ul}d_0) - \ln(d_{max} - d_0)}{\ln \sigma_{ul}} \right]^2} & d_0 < d_{max} \\ 0 & d_0 \geq d_{max} \end{cases} \quad (4.5)$$

donde d_{max} , a_{ul} y σ_{ul} se calculan según las Ecuaciones 2.18, 2.19 y 2.20, respectivamente.

Para hallar $f_{\alpha}(\alpha)$, es conveniente realizar un cambio de variables, expresando α en función de la distancia x_0 a la que la gota se deposita en condiciones de laboratorio. Como se indica en la Figura 4.2, la distancia a la que una gota alcanzará un colector es:

$$x_0 = H \tan \alpha \quad (4.6)$$

Despejando α de la Ecuación 4.6 y derivando respecto a x_0 , se obtiene:

$$\frac{d\alpha}{dx_0} = \frac{H}{H^2 + x_0^2} \quad (4.7)$$

Luego, aplicando un cambio de variables para funciones de distribución (ver Apéndice A), se obtiene la siguiente expresión para $f_\alpha(\alpha)$:

$$f_\alpha(\alpha) = \frac{dx_0}{d\alpha} f_{x_0}(x_0) = \frac{H^2 + x_0^2}{H} f_{x_0}(x_0) \quad (4.8)$$

Reemplazando las Ecuaciones 4.6 y 4.8 en 4.5, se obtiene la función bidimensional que representa la distribución de las gotas atomizadas respecto al diámetro y a la trayectoria inicial para todo diámetro mayor a $0 \mu\text{m}$ y menores al diámetro d_{max} (i.e., el diámetro máximo de la DSD atomizada):

$$f_{d\alpha}(d_0, \alpha) = \frac{H(1 + (\tan \alpha)^2)}{2\pi\sigma_d \ln \sigma_{ul}} \frac{d_{max}}{d_0(d_{max} - d_0)} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(a_{ul}d_0) - \ln(d_{max} - d_0)}{\ln \sigma_{ul}} \right]^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{H \tan \alpha}{\sigma_s} \right)^2} \quad (4.9)$$

En la Figura 4.3a, a modo de ejemplo, se muestra un gráfico de superficie de la Ecuación 4.9. Los parámetros usados para los cálculos se presentan en la Tabla 4.1. En la Figura 4.3b se representa la misma distribución bidimensional mediante un gráfico de contorno. Para este ejemplo, se observa que la mayor frecuencia de gotas atomizadas corresponde a gotas entre 200 y $250 \mu\text{m}$ y con un ángulo igual a 0° (i.e. en dirección vertical).

Tabla 4.1. Parámetros para ejemplificar la distribución de gotas atomizadas

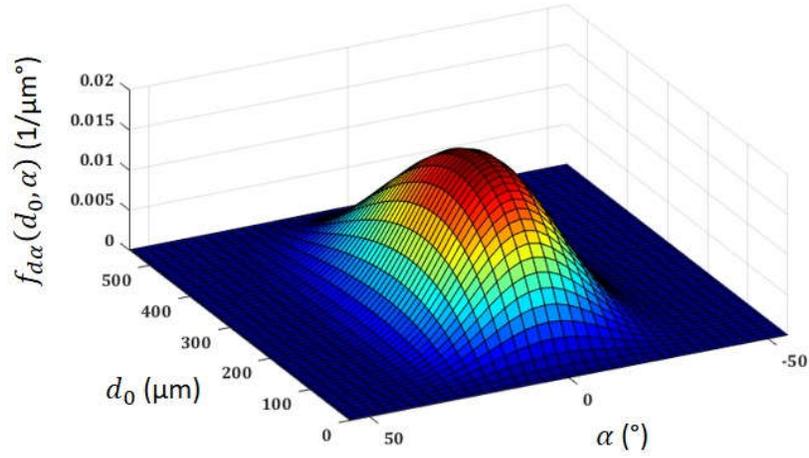
Parámetro	Valor
a_{ul}	1,36
σ_{ul}	2,51
d_{max} (μm)	570,52
σ_s (m)	0,13
H (m)	0,5

4.3 Modelo matemático de la deriva de la solución pulverizada para una boquilla

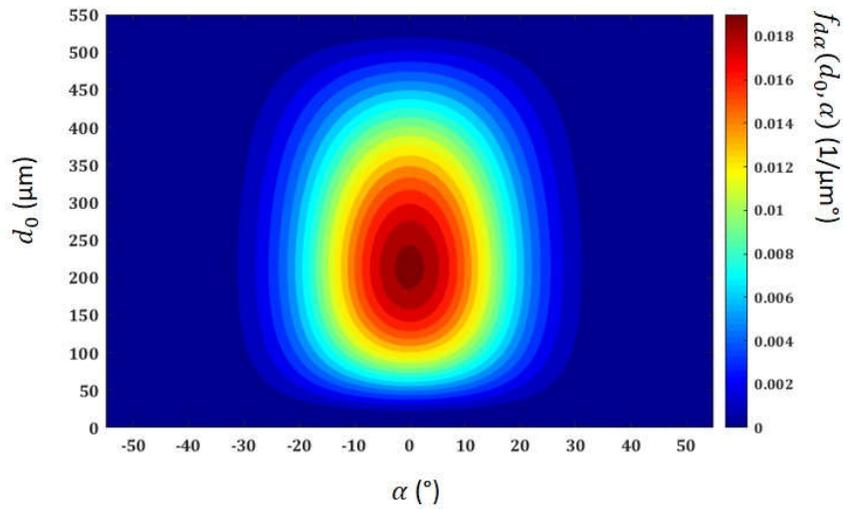
Como se mencionó en el Capítulo 3, la curva de deposición de la solución pulverizada (Y^S) (i.e., mezcla de agua y fitosanitarios) se determina mediante la Ecuación 3.4:

$$Y^S(x_{dep}) = \frac{\Delta V_{dep}^S(x_{dep})}{\Delta A_A} \quad (3.4)$$

donde, como se indicó en el Capítulo 3, $\Delta V_{dep}^S(x_{dep})$ es el volumen depositado sobre un área ΔA_A , el cual depende de la distancia de deposición (x_{dep}) y el volumen pulverizado por unidad de área (F).



(a)



(b)

Figura 4.3. Gráficos a) de superficie y b) de contorno para la función de distribución respecto al diámetro de gota atomizada d_0 y el ángulo de trayectoria de salida α .

La Ecuación 3.4 puede reescribirse considerando el caudal depositado $\Delta Q_{dep}^S(x_{dep})$ en la distancia x_{dep} y la velocidad de la pulverizadora (v_A) como:

$$Y^S(x_{dep}) = \frac{\Delta Q_{dep}^S(x_{dep})}{v_A \Delta x_{dep} F} \quad (4.10)$$

El caudal depositado se puede expresar como:

$$\Delta Q_{dep}^S(x_{dep}) = Q_{pulv}^S [L_{dep}^S(x_{dep} + \Delta x_{dep}) - L_{dep}^S(x_{dep})] \quad (4.11)$$

donde L_{dep}^S es la función acumulada de caudal pulverizado que se deposita en distancias menores a x_{dep} . Reemplazando la Ecuación 4.11 en la 4.10 y aplicando el límite para $\Delta x_{dep} \rightarrow 0$, se obtiene:

$$Y^S(x_{dep}) = \frac{Q_{pulv}^{S0}}{v_A F} \frac{dL_{dep}^S(x_{dep})}{dx_{dep}} \quad (4.12)$$

En la Figura 4.4 se ilustra esquemáticamente el comportamiento de $L_{dep}^S(x_{dep})$ en función de la distancia. Debido a la evaporación, no todo el caudal pulverizado se deposita en la superficie de suelo, y entonces $L_{dep}^S(x_{dep})$ puede no alcanzar el 100% para $x_{dep} \rightarrow \infty$.

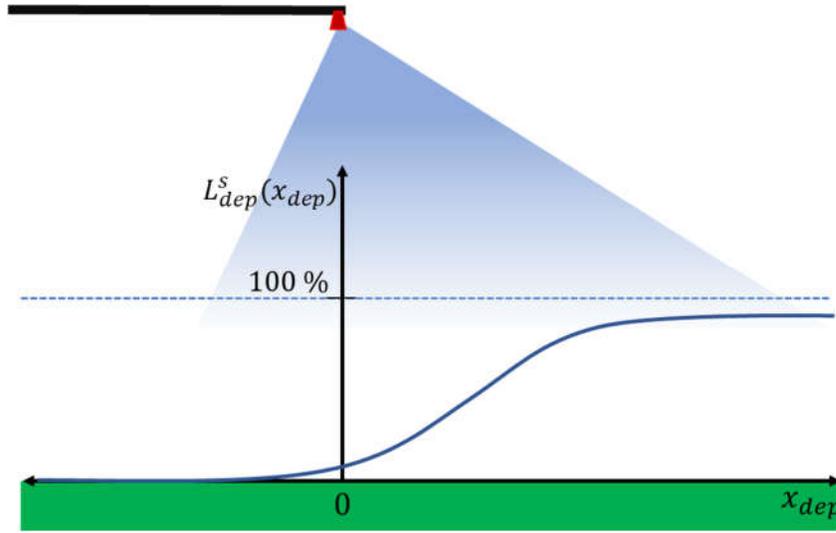


Figura 4.4. Representación esquemática de la función acumulada del caudal depositado con respecto a la distancia de deposición.

Resulta conveniente definir la *función de distribución de volumen depositado* como la función densidad asociada a $L_{dep}^S(x_{dep})$:

$$f_{dep}^S(x_{dep}) = \frac{dL_{dep}^S(x_{dep})}{dx_{dep}} \quad (4.13)$$

Reemplazando la Ecuación 4.13 en la Ecuación 4.12, resulta:

$$Y^S(x_{dep}) = \frac{Q_{pulv}^{S0}}{v_A F} f_{dep}^S(x_{dep}) \quad (4.14)$$

La curva de deposición de la solución pulverizada (Y^S) puede establecerse si se conoce la expresión para $f_{dep}^S(x_{dep})$. Teniendo en cuenta los conceptos sobre funciones de distribución (Apéndice A), junto con las características del proceso de atomización y los

fenómenos que afectan al movimiento y tamaño de las gotas (ya discutidas en los Capítulos anteriores), para el cálculo de la función $f_{dep}^S(x_{dep})$ se asumen válidas las siguientes hipótesis:

1. El proceso de atomización y deposición de gotas ocurre en estado estacionario.
2. Si bien el proceso se representa adecuadamente en dos coordenadas espaciales: x (dirección del viento) y z (dirección vertical), en este Capítulo solo es de interés obtener la distribución de gotas depositadas en la coordenada x para $z = H$ (nivel del suelo).
3. Las gotas son esféricas, con densidad y viscosidad constantes.
4. La pulverización de gotas atomizadas puede representarse mediante la función de distribución bidimensional obtenida en la Ecuación 4.9.
5. La velocidad del viento se considera constante y unidimensional (Lebeau et al, 2011). Debido a que existe un perfil de velocidad de viento en la dirección vertical (Richard y Norris, 2011), el valor constante se obtiene aplicando el teorema del valor medio a dicho perfil.
6. Ni bien abandonan la boquilla, la velocidad de las gotas en dirección vertical es igual a la terminal (v_T) (Lebeau et al, 2011; Løfstrøm et al., 2013).
7. La velocidad de las gotas en la dirección x es igual a la velocidad promedio del viento (Løfstrøm et al., 2013).
8. Las gotas se depositan ni bien alcanzan la superficie del suelo.
9. El ingrediente activo en se encuentra presente en las gotas en baja concentración (Finch et al., 2014).
10. 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 (Teske et al., 2016).
11. El terreno es plano y la densidad de malezas y cultivos es despreciable. Estas características corresponden a las de campos de barbecho, los cuales constituyen el peor escenario desde el punto de vista de la deriva de pulverización, dado que las gotas se ven afectadas por la turbulencia del viento aún cerca del suelo.

A continuación, se obtienen las ecuaciones que describen el tamaño y posición de las gotas en vuelo, para ser luego integradas en el modelo completo.

4.3.1 Disminución del diámetro de gota por evaporación

Como es habitual en la simulación de gotas pulverizadas al aire ambiente, se considera que el diámetro de las gotas disminuye linealmente en función del tiempo, de acuerdo a la siguiente Ecuación (Lebeau et al., 2011; Onorato and Tesouro, 2006):

$$d = \begin{cases} d_0 \left(1 - \frac{t}{kd_0^2}\right) & t < kd_0^2 \\ 0 & t \geq kd_0^2 \end{cases} \quad (4.15)$$

donde d_0 es el diámetro inicial de gota (i.e., a la salida de la boquilla), t es el tiempo y k está dada por la Ecuación 4.16. La Ecuación 4.15 resulta de reemplazar la Ecuación 3.17 en la 3.16.

$$k = \frac{10^{12}}{\beta \Delta T} \quad (4.16)$$

donde ΔT es la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco (T) y de bulbo húmedo (T_{bh}) y $\beta = 80 \times 10^{12} \frac{m^2}{s^\circ C}$. Para obtener la temperatura de bulbo húmedo, se utiliza la correlación empírica propuesta por Stull (2011):

$$T_{bh} = T \tan^{-1}(0,15\sqrt{HR + 8,31}) + \tan^{-1}(T + HR) - \tan^{-1}(HR - 1,68) + 3,91 \cdot 10^{-3} HR^{\frac{3}{2}} \tan^{-1}(0,0231HR) - 4,69 \quad (4.17)$$

donde HR es la humedad relativa expresada como porcentaje. Conociendo la temperatura y la humedad relativa del ambiente, es posible calcular ΔT :

$$\Delta T = T - T_{bh} \quad (4.18)$$

La velocidad de disminución de tamaño de gota durante el vuelo se obtiene a partir de la Ecuación 4.15:

$$\frac{dd}{dt} = -\frac{1}{kd_0} \quad (4.19)$$

4.3.2 Evolución del diámetro de gota en función de la distancia vertical recorrida

La distancia vertical recorrida por una gota varía de acuerdo con su velocidad terminal:

$$\frac{dz}{dt} = v_T \quad (4.20)$$

Asumiendo régimen de Stokes (Zannetti, 2013):

$$v_T = \frac{\Delta\rho g d^2}{18\mu_g} \quad (4.21)$$

donde $\Delta\rho$ es la diferencia entre la densidad de la gota y la del aire, μ_g es la viscosidad del aire, g es la aceleración de la gravedad y en este caso d representa el diámetro de la gota en vuelo (se calcula con la Ecuación 4.15). Considerando las ecuaciones 4.19 y 4.20, la derivada de la distancia vertical recorrida con respecto al diámetro de gota es:

$$\frac{dz}{dd} = \frac{dt}{dd} \frac{dz}{dt} = -kd_0 \frac{\Delta\rho g d^2}{18\mu_g} \quad (4.22)$$

Integrando la ecuación 4.22 para z entre 0 y una distancia vertical genérica, y d entre d_0 y un diámetro genérico, se obtiene la ecuación que relaciona al diámetro con la posición vertical para cada gota en vuelo:

$$\int_0^z dz = \int_{d_0}^d -kd_0 \frac{\Delta\rho g d^2}{18\mu_g} dd \quad (4.23)$$

$$z = -\frac{kd_0\Delta\rho g}{54\mu_g} (d^3 - d_0^3) \quad (4.24)$$

La deposición de cada gota ocurre cuando ésta alcanza la superficie del suelo o del cultivo. Entonces, el diámetro de cada gota depositada se obtiene a partir de la Ecuación 4.24 para $z = H$:

$$d_{dep} = d_0 \left(1 - \frac{54\mu_g H}{kd_0^4 \Delta\rho g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.25)$$

El cociente entre los volúmenes de gota depositada y atomizada viene dado por:

$$\lambda = \left(\frac{d_{dep}}{d_0} \right)^3 = 1 - \frac{54\mu_g H}{kd_0^4 \Delta\rho g} \quad (4.26)$$

Las gotas muy pequeñas pueden evaporarse completamente antes de tocar la superficie. Experimentarán este fenómeno todas las gotas para las cuales $d_{dep} \leq 0$ en las ecuaciones 4.25 y 4.26. Igualando a 0 la Ecuación 4.25 (o 4.26), es posible obtener el diámetro mínimo que debe tener una gota atomizada para poder depositarse:

$$d_{min} = \left(\frac{54\mu_g H}{k\Delta\rho g} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.27)$$

donde d_{min} es el diámetro atomizado mínimo de una gota que asegura que la misma se deposita en el suelo. Todas las gotas con diámetros menores a d_{min} se evaporarán

completamente antes de recorrer la distancia H . El volumen de componente no volátil contenido en estas gotas se considera como pérdida.

4.3.3 Tiempo de deposición

Se llama tiempo de deposición al tiempo que tarda una gota en llegar desde la boquilla a la superficie del terreno. Este tiempo se obtiene igualando las ecuaciones 4.15 y 4.25:

$$t_{dep} = kd_0^2 \left[1 - \left(1 - \frac{54\mu_g H}{kd_0^4 \Delta\rho g} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (4.28)$$

La Ecuación 4.28 indica que gotas atomizadas con diferentes tamaños tendrán diferentes tiempos de deposición.

4.3.4 Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta de una gota es una medida indicadora del tiempo que transcurre desde que la gota sale de la boquilla hasta que comienza a sentir el efecto del viento, y se define como (Fritsching, 2016):

$$t_{resp} = \frac{\rho_d d_0^2}{18\mu_g} \quad (4.29)$$

donde ρ_d es la densidad de la gota. De acuerdo con la Ecuación 4.29, cuanto menor sea la densidad y diámetro de las gotas, menor será el tiempo de respuesta, indicando que éstas serán afectadas por la velocidad del viento más rápidamente (Schwarzkopf et al., 2011).

4.3.5 Diámetro crítico

Si se igualan las ecuaciones 4.28 y 4.29, se puede calcular el diámetro máximo que debe tener una gota atomizada para ser afectada durante su trayectoria por el viento antes de depositarse:

$$d_{crit} = \left[\frac{54\mu_g H}{k\Delta\rho g} \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{\rho_d}{k18\mu_g} \right)^3} \right]^{1/4} \quad (4.30)$$

Gotas atomizadas con diámetros mayores a d_{crit} alcanzarán la superficie del suelo sin que su trayectoria sea considerablemente modificada por acción del viento.

A modo de ejemplo, en la Figura 4.5 se presenta un ejemplo de DSD atomizada con $D_{V50}=250 \mu\text{m}$, y se indican los diámetros d_{min} y d_{crit} calculados mediante las ecuaciones 4.27 y 4.30, respectivamente. Para los cálculos, se consideraron las siguientes condiciones:

temperatura ambiente de 20°C, 50% de humedad relativa, altura de botalón igual a 0.5 m y una densidad de solución pulverizada igual a la del agua. Se observa que los diámetros d_{min} y d_{crit} permiten clasificar las gotas atomizadas en tres clases: gotas que se evaporan completamente y no llegan a depositarse (diámetros menores a d_{min}), gotas que se depositan en la superficie del terreno, con trayectorias modificadas por el arrastre producido por el viento (diámetros entre d_{min} y d_{crit}) y gotas que se depositan en la superficie del terreno manteniendo prácticamente su trayectoria inicial (diámetros mayores a d_{crit}). Al evaluar la Ecuación 2.21 en d_{min} se obtiene la pérdida por evaporación respecto al volumen total pulverizado. Para el caso ejemplo de la Figura 4.5, las pérdidas por evaporación son 3,37%. La diferencia entre el resultado de la Ecuación 2.21 evaluada en d_{crit} y el resultado de la misma ecuación evaluada en d_{min} representa la fracción de gotas con riesgo de deriva. Para el caso ejemplo este valor es igual al 49% del volumen pulverizado.

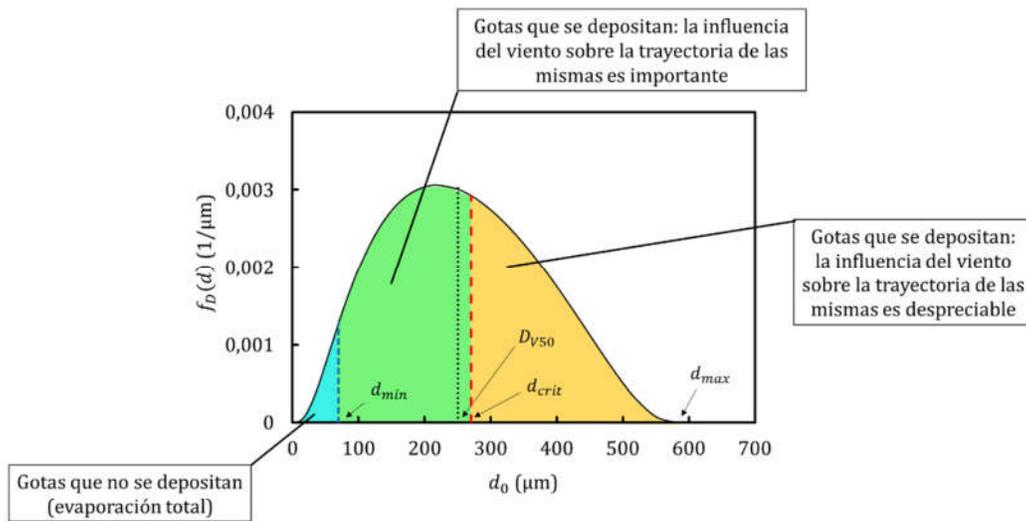


Figura 4.5. Ejemplo de una DSD atomizada y clasificación de gotas en tres clases de acuerdo al diámetro de las mismas.

4.3.6 Velocidad media de viento

La variación de la velocidad del viento con la distancia al suelo se representa mediante la siguiente ecuación (Jacobson, 2005; Richards y Hoxey, 1993; Tan, 2014):

$$U = U_0 \frac{\ln\left(\frac{(H - z) + \epsilon}{\epsilon}\right)}{\ln\left(\frac{H + \epsilon}{\epsilon}\right)} \quad (4.31)$$

donde U_0 es la velocidad de viento correspondiente a la altura de botalón H , ϵ es la rugosidad del terreno y z la coordenada vertical según el eje de la Figura 4.2. La Ecuación 4.31 establece que la velocidad del viento es nula para $z = H$ (nivel del suelo). Para terrenos

relativamente planos, como los correspondientes a campos de barbecho, la rugosidad puede considerarse igual a 0,09 (Tieleman, 2003).

De acuerdo con la hipótesis 5, la velocidad del viento será considerada constante en el modelo. Por lo tanto, es necesario promediar adecuadamente la Ecuación 4.31. Para ello, se reemplaza la Ecuación 4.24 en 4.31:

$$U = U_0 \frac{\ln \left[1 + \frac{H}{\epsilon} + \frac{kd_0 \Delta \rho g}{54 \mu_g \epsilon} (d^3 - d_0^3) \right]}{\ln \left(\frac{H + \epsilon}{\epsilon} \right)} \quad (4.32)$$

La Ecuación 4.32 permite obtener la velocidad U a la que está expuesta una gota que con diámetro d , habiendo sido atomizada con diámetro d_0 . A su vez, el diámetro d puede reemplazarse por la Ecuación 4.15:

$$U = U_0 \frac{\ln \left\{ 1 + \frac{H}{\epsilon} + \frac{kd_0 \Delta \rho g d_0^3}{54 \mu_g \epsilon} \left[\left(1 - \frac{t}{kd_0^2} \right)^3 - 1 \right] \right\}}{\ln \left(\frac{H + \epsilon}{\epsilon} \right)} \quad (4.33)$$

La Ecuación 4.33 permite obtener la velocidad del viento U a la que se expone una gota en función del tiempo de vuelo, habiendo sido atomizada con diámetro d_0 .

Para obtener una velocidad de viento representativa de la población total de gotas que se mueve por acción del viento, la Ecuación 4.33 es promediada con respecto a d_0 y a t de la siguiente manera:

$$\bar{U} = \frac{\int_{d_{min}}^{d_{crit}} \int_{t_{resp}}^{t_{dep}} U f_d(d_0) dt dd_0}{\int_{d_{min}}^{d_{crit}} \int_{t_{resp}}^{t_{dep}} f_d(d_0) dt dd_0} \quad (4.34)$$

Los límites de integración de la Ecuación 4.34 se seleccionaron para considerar solo aquellos diámetros de gotas que se depositan y son afectadas por el viento, y el período de tiempo en el cual las mismas son arrastradas por el viento.

Para simplificar, la Ecuación 4.34 puede escribirse como:

$$\bar{U} = \gamma U_0 \quad (4.35)$$

donde:

$$\gamma = \ln \left(\frac{H + \epsilon}{\epsilon} \right) \frac{\int_{d_{min}}^{d_{crit}} \int_{t_{resp}}^{t_{dep}} \ln \left\{ 1 + \frac{H}{\epsilon} + \frac{kd_0 \Delta \rho g d_0^3}{54 \mu_g \epsilon} \left[\left(1 - \frac{t}{kd_0^2} \right)^3 - 1 \right] \right\} f_d(d_0) dt dd_0}{\int_{d_{min}}^{d_{crit}} \int_{t_{resp}}^{t_{dep}} f_d(d_0) dt dd_0} \quad (4.36)$$

γ varía entre 0 y 1 y corrige a U_0 para obtener la velocidad media del viento a la que se exponen las gotas pulverizadas antes de depositarse.

En búsqueda de una representación del parámetro γ más sencilla que requiera menor tiempo de cómputo, la Ecuación 4.36 fue resuelta para distintas DSDs. Las DSDs se representaron utilizando la Ecuación 2.10 y distintos valores de D_{V50} (γ , por lo tanto, diferentes d_{max} , ver Ecuación 2.18). Además, se estudió un amplio rango de condiciones climáticas (temperatura entre 1 y 35°C, HR entre 10 y 99%), alturas de botalón entre 0,35 y 0,7 m, y densidades de solución pulverizada entre 900 y 1100 kg/m³. Se encontró que el parámetro γ fue muy sensible al D_{V50} , y fue posible aproximarlos mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma = 0,04 D_{V50}^{-0,28} \quad (4.37)$$

donde D_{V50} se ingresa en m.

En la Figura 4.6 se comparan las ecuaciones 4.36 y 4.37 para un rango amplio de valores D_{V50} y diferentes alturas de botalón. Como puede verse el factor γ es afectado de manera significativa por el D_{V50} , y la altura de botalón ejerce una menor influencia. Por esta razón se considera que la Ecuación 4.37 resulta satisfactoria para predecir la velocidad media del viento, minimizando considerablemente los tiempos de cómputo.

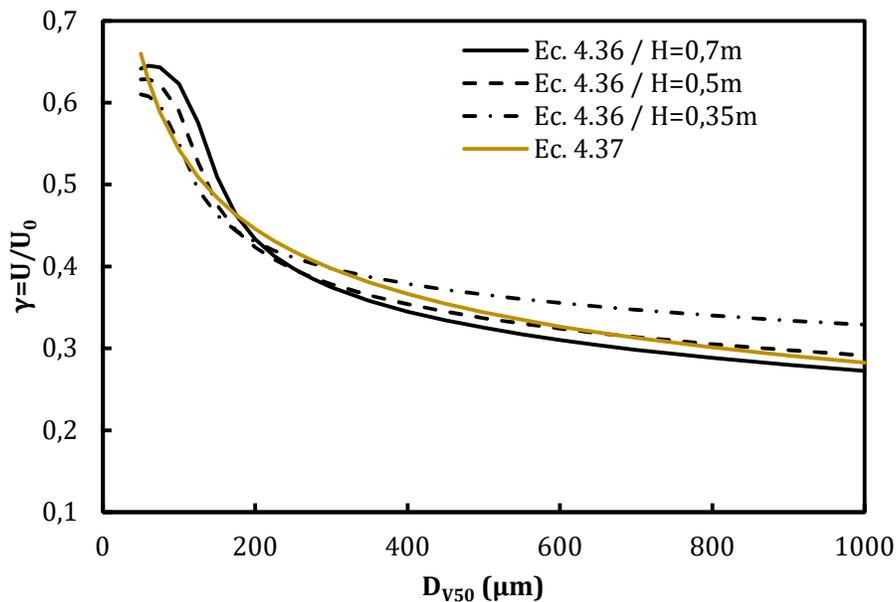


Figura 4.6. Comparación entre las Ecuaciones 4.36 y 4.37 para el cálculo del factor γ .

4.3.7 Distancia de deposición de gotas

El movimiento de las gotas por efecto del viento se cuantifica mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{dx}{dt} = \bar{U} \quad (4.38)$$

$$x_{dep} = x_0 + \bar{U}t_{dep} \quad (4.39)$$

De acuerdo a la Ecuación 4.39, x_{dep} está formada por dos contribuciones: un término que depende únicamente de la trayectoria inicial de la gota y un término que representa la distancia recorrida debido al viento.

Reemplazando la Ecuación 4.28 y 4.35 en 4.39, se obtiene la distancia de deposición:

$$x_{dep} = x_0 + C \quad (4.40)$$

donde:

$$C = \gamma U_0 k d_0^2 \left[1 - \left(1 - \frac{54 \mu_g H}{k d_0^4 \Delta \rho g} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (4.41)$$

4.3.8 Función de distribución de gotas depositadas

Anteriormente se obtuvo una función de distribución de gotas (Ecuación 4.9) resultante de la conceptualización de dicha función como producto de dos funciones univariantes dependientes por un lado del diámetro (d_0) y por otro del ángulo de las trayectorias iniciales de las gotas (α). Para el cálculo de la deriva, motivo del modelo planteado en este Capítulo, es necesario conocer la distribución de las gotas en función del diámetro inicial de las mismas (d_0) y de la posición donde ellas se depositan (x_{dep}). A continuación, se detallan los pasos algebraicos necesarios para transformar f_α (Ecuación 4.4) en $f_{x_{dep}}$.

En primer lugar, se deriva la Ecuación 4.6 respecto a α :

$$\frac{dx_0}{d\alpha} = H[1 + (\tan \alpha)^2] \quad (4.42)$$

Derivando la ecuación 4.40 respecto a x_0 y utilizando la Ecuación 4.42, se obtiene:

$$\frac{\partial x_{dep}}{\partial \alpha} = \frac{dx_0}{d\alpha} \frac{\partial x_{dep}}{\partial x_0} = H[1 + (\tan \alpha)^2] \quad (4.43)$$

Luego, la función de distribución respecto a x_{dep} se calcula realizando un cambio de variables en la Ecuación 4.8 de α a x_{dep} , y reemplazando en la expresión resultante las ecuaciones 4.1 y 4.43:

$$f_{x_{dep}}(x_{dep}|d_0) = \frac{\partial \alpha}{\partial x_{dep}} f_{\alpha}(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_0}{\sigma_s}\right)^2\right] \quad (4.44)$$

Como se indica en el Apéndice A, la expresión $|d_0$ indica que d_0 es un parámetro de esta distribución. Además, x_0 es función de x_{dep} según la Ecuación 4.40, por lo tanto la Ecuación 4.44 puede reescribirse como:

$$f_{x_{dep}}(x_{dep}|d_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_{dep} - C}{\sigma_s}\right)^2\right] \quad (4.45)$$

Es importante tener en cuenta que C depende de d_0 (ver Ecuación 4.41).

La distribución bivariable dada en la Ecuación 4.4 puede expresarse en términos de d_0 y x_{dep} :

$$f_{d,x_{dep}}(d_0, x_{dep}) = f_d(d_0) f_{x_{dep}}(x_{dep}|d_0) \quad (4.46)$$

La distribución bivariable en volumen obtenida en la Ecuación 4.46 refiere a volúmenes de gota a la salida de la boquilla. Sin embargo, la deriva mediante la Ecuación 4.14 se refiere a la distribución en volumen de gotas depositadas. Por lo tanto, la Ecuación 4.46 debe ser multiplicada por el cociente de volúmenes de gotas depositadas y atomizadas (λ).

$$f_{d,x_{dep}}^S(d_0, x_{dep}) = \lambda f_d(d_0) f_{x_{dep}}(x_{dep}|d_0) \quad (4.47)$$

Finalmente, la función de deposición de la solución pulverizada, $f_{dep}^S(x_{dep})$, se obtiene a partir de la integración de la Ecuación 4.47 para todos los diámetros de la DSD (esta función se denomina distribución marginal, ver definiciones en Apéndice A). Considerando que las gotas depositadas tienen diámetros mayores a d_{min} (Ecuación 4.27) y menores a d_{max} (Ecuación 2.18), la distribución marginal viene dada por:

$$f_{dep}^S(x_{dep}) = \int_{d_{min}}^{d_{max}} f_{d_0,x_{dep}}^S(d_0, x_{dep}) dd_0 \quad (4.48)$$

Al reemplazar la Ecuación 4.48 en 4.14, se obtiene la curva de deriva para la solución pulverizada.

$$Y^S(x_{dep}) = \frac{Q_{pulv}^{SO}}{v_A F} \int_{d_{min}}^{d_{max}} f_{d_0, x_{dep}}^S(d_0, x_{dep}) dd_0 \quad (4.49)$$

4.4 Modelo matemático de la deriva de la solución pulverizada para los no volátiles

El mismo procedimiento utilizado en la Sección anterior para obtener la función de deposición de la solución (solvente + fitosanitarios) puede aplicarse para obtener la función de deposición de los compuestos no volátiles. Para este caso, la función de deposición viene dada por la integral de la Ecuación 4.46:

$$f_{dep}(x_{dep}) = \int_{d_{min}}^{d_{max}} f_{d, x_{dep}}(d_0, x_{dep}) dd_0 \quad (4.50)$$

Por lo tanto, la curva de deriva para compuestos no volátiles se puede escribir como:

$$Y(x_{dep}) = \frac{Q_{pulv}^{SO}}{v_A F} f_{dep}(x_{dep}) \quad (4.51)$$

4.5 Validación del modelo matemático

La deriva de pulverización aplicada a compuestos no volátiles se obtiene mediante la Ecuación 4.51. El conjunto de ecuaciones que constituye el modelo matemático se implementó en el lenguaje de programación Python. Para la integración numérica requerida, se utilizó el método clásico del trapecio.

4.5.1 Datos experimentales para la validación

Stallinga et al. (2014) realizaron 16 ensayos de pulverización en los que midieron y reportaron la deriva de compuestos no volátiles (Y vs x_{dep}) producida por una única boquilla montada sobre un soporte capaz de desplazarse sobre un riel a velocidad constante, como se muestra en la Figura 4.7. Los ensayos se realizaron en un campo abierto libre de obstáculos, pulverizando una solución acuosa conteniendo un colorante fluorescente y un surfactante. Los ensayos para cada boquilla fueron realizados por triplicado y en cada ensayo la boquilla circuló 10 veces sobre el riel. La deposición de fitosanitarios fue medida mediante colectores ubicados desde 1 a 5 m en dirección del viento y respecto a la boquilla (Figura 4.7).

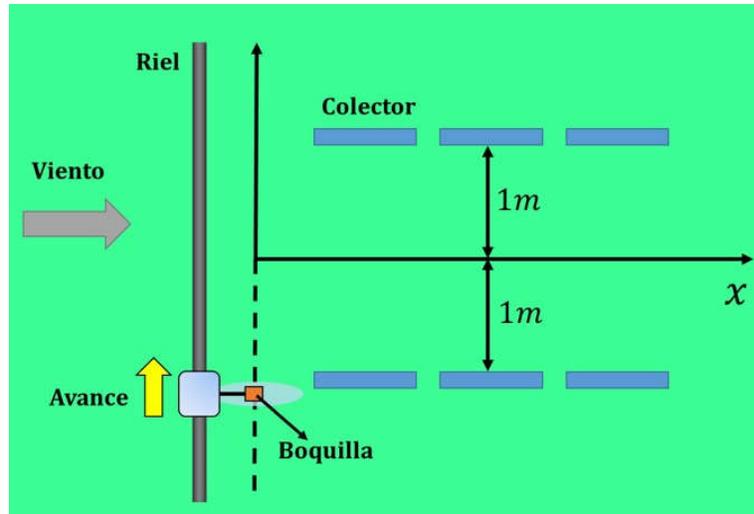


Figura 4.7. Esquema de experiencias realizadas por Stallinga et al. (2014)

La boquilla se ubicó a una altura de 0,5 m y el soporte se desplazó sobre el riel a 2 m/s. En la Tabla 4.2 se presentan las boquillas utilizadas para cada uno de los ensayos de Stallinga et al. (2014).

Tabla 4.2 Descripción de las boquillas usadas en los ensayos realizados por Stallinga et al. (2014)

Ensayo	Boquilla	FR
S1	Lurmark 31-F110	0,3
S2	TeeJet XR 110	0,4
S3	Agrotop Airmix AM OC	0,2
S4	Agrotop Airmix AM OC	0,4
S5	Agrotop Turbodrop TD OC	0,2
S6	Agrotop Turbodrop TD OC	0,4
S7	TeeJet AI UB	0,2
S8	TeeJet AI UB	0,4
S9	Hardi B-Jet	0,2
S10	Hardi B-Jet	0,4
S11	Lechler IDKS	0,2
S12	Lechler IDKS	0,4
S13	Lechler IS	0,2
S14	Lechler IS	0,4
S15	Albuz AVI OC	0,2
S16	Albuz AVI OC	0,4

Para cada ensayo, se determinó la deriva de pulverización a 9 distancias, comprendidas entre 0,75 y 4,75 m en intervalos de 0,5 m, con excepción de los casos S5 y S6, en donde la distancia máxima reportada fue 4.25 m. En la Tabla 4.3 se presentan las condiciones climáticas, altura de boquilla y presión de pulverización utilizadas en los ensayos. Con respecto a U_0 , los autores midieron la velocidad de viento a diferentes alturas

(0,5, 2, 3 y 4 m) y registraron los valores mínimos, máximos y medios promedios para todos los ensayos.

Tabla 4.3 Variables de proceso utilizadas en las simulaciones.

Variable	Valor
T (°C)	16,1
HR (%)	66
U_0 media (m/s)	1,71
U_0 mínima (m/s)	0,97
U_0 máxima (m/s)	2,8
H (m)	0,5
ΔP (bar)	3

Para calcular el D_{V50} requerido para los cálculos del modelo presentado en este Capítulo se seleccionaron boquillas de referencia, de acuerdo con los lineamientos detallados en el Capítulo 2. Las boquillas de referencia seleccionadas se detallan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 D_{V50} de boquillas de referencia a 3 bar para Ecuación 2.15

Boquilla	FR	D_{V50} (μm)*	Clasificación ASABE S572.1
Lurmark 31-03-F110	0,3	247	M
TeeJet XR 110-03	0,3	239	F
Agrotop Airmix AM OC	0,2	459	VC
TeeJet AI UB	0,2	563	XC
Hardi B-Jet	0,2	480	VC
Lechler IDKS	0,2	417	VC
Agrotop Turbodrop TD OC	0,2	779	UC
Lechler IS	0,2	493	VC
Albuz AVI OC	0,2	552	XC

* Valores reportados por Stallinga et al. (2014), con excepción de la boquilla TeeJet XR 110-03, el cual corresponde al valor promedio a los reportados por van de Zande et al. (2002).

4.5.2 Resultados de validación

En la Figura 4.8 se comparan los valores experimentales y simulados de deriva para productos no volátiles (142 puntos). La concentración de puntos cerca de la línea de 45° indica una buena concordancia entre valores experimentales y simulados para la mayoría de los ensayos. Los ensayos 6, 7 y 13, que presentan las mayores desviaciones del modelo frente a las mediciones, son especialmente analizados y discutidos al final de esta Sección.

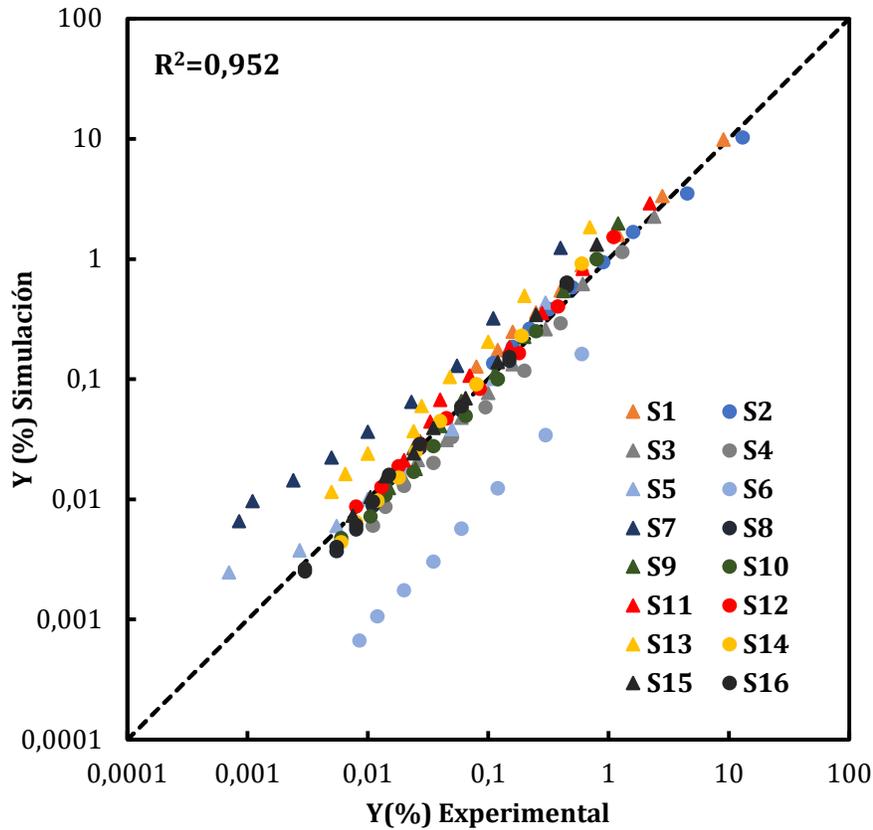


Figura 4.8. Comparación entre la deriva experimental y simulada de no volátiles pulverizados.

A modo de ejemplo, las Figuras 4.9 a, b y c presentan la deriva de pulverización para tres ensayos seleccionados. Se incluyen los gráficos de deriva (eje y) tanto en escala lineal como logarítmica, para favorecer la visualización de los resultados en todos los rangos de distancia. Estos casos (ensayos S1, S3 y S14) fueron seleccionados porque los valores de D_{V50} fueron muy diferentes entre sí (247, 459 y 621 μm , respectivamente). Como es de esperar, la deriva de pulverización disminuye con la distancia. A una distancia de 1 m de la boquilla, la deriva de pulverización es aproximadamente 9, 2 y 0,7% para los ensayos S1, S3 y S14, respectivamente, indicando la influencia del tamaño de las gotas atomizadas sobre la deposición de las mismas. Para los tres casos, se observa una buena predicción en todo el rango de distancias, aun cuando la deriva se encuentra por debajo del 0,1%. Esto permite concluir que el movimiento y tamaño de las gotas está siendo bien representado por el modelo.

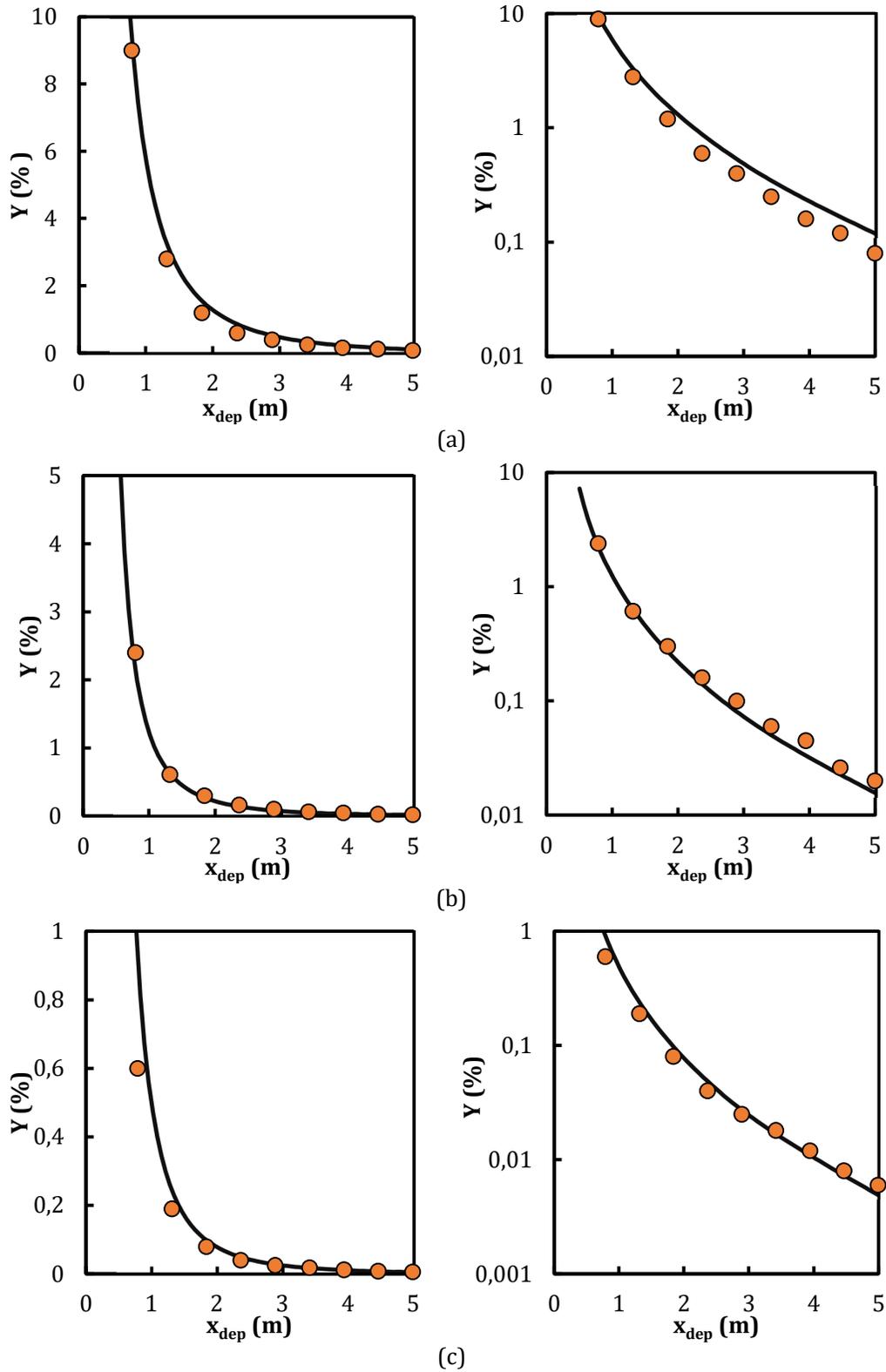


Figura 4.9. Deriva de pulverización predicha (curva continua) y experimental (puntos) para los ensayos a) S1, b) S3 y c) S14.

Como se mencionó, en 3 de los 16 ensayos simulados se obtuvo una mayor desviación respecto a los resultados experimentales. En la Figura 4.10a se presenta la curva de deriva para el ensayo S6. Para este caso, cuando el valor medio de U_0 es utilizado, el modelo subestima la deriva. Para verificar si la variación en la velocidad de viento registrada por Stallinga et al. (2014) es la causa del error de estimación del modelo, se realizaron simulaciones adicionales utilizando la velocidad mínima y máxima reportadas por los autores. Se observa que, cuando el valor máximo de U_0 es empleado, la curva de deriva simulada se aproxima a la experimental. En las Figuras 4.10b y 4.10c, se muestran las curvas de deriva predichas para los ensayos S7 y S13, respectivamente. En estos casos, el modelo sobrestima la deriva cuando el valor medio de U_0 es utilizado. Si las simulaciones se realizan empleando los valores mínimos de U_0 , la predicción mejora considerablemente. Por lo tanto, se concluye que la variación de la velocidad del viento (que es aproximadamente del $\pm 50\%$ del valor medio) puede ser la causa de la discrepancia entre valores predichos y medidos. Otra razón de la desviación puede estar dada por errores en la predicción de la DSD mediante las Ecuaciones 2.10, 2.18, 2.19 y 2.20. De todas maneras, los modelos desarrollados hasta este Capítulo predicen de manera satisfactoria los datos experimentales, provenientes de una única boquilla, sin necesidad de usar parámetros de ajuste.

Es importante destacar que en aquellos ensayos en que la deriva de pulverización fue considerablemente alta, las predicciones del modelo matemático propuesto fueron capaces de reproducir los valores experimentales, tal como se observa en la Figura 4.10. Estos son los casos de mayor importancia en cuanto a la pérdida de fitosanitarios y, por lo tanto, en donde las capacidades predictivas del modelo pueden ser aprovechadas para evaluar y/o optimizar condiciones de aplicación.

4.6 Estudio de las DSDs depositadas

Considerando al ensayo S1 como caso base de simulación, la Figura 4.11 muestra el diámetro de las gotas que se depositan (d_{dep}) en función de la distancia de deposición (x_{dep}) para gotas cuya trayectoria corresponde a $\alpha = 0$ (ver Figura 4.12). En la Figura 4.11 también se presenta el diámetro que tenían las gotas al ser atomizadas (d_0) (calculado con las Ecuaciones 4.40 y 4.41 una vez definido x_{dep}). A medida que aumenta la distancia, la diferencia entre d_{dep} y d_0 es mayor. Esto se debe a que las gotas que alcanzan mayores distancias de deposición tienen menores diámetros y por lo tanto menores velocidades terminales (Ecuación 4.21). Consecuentemente, estas gotas tienen un mayor tiempo en vuelo, lo que aumenta la extensión de la evaporación de las mismas y hace más evidente la diferencia entre el diámetro depositado y el diámetro inicial.

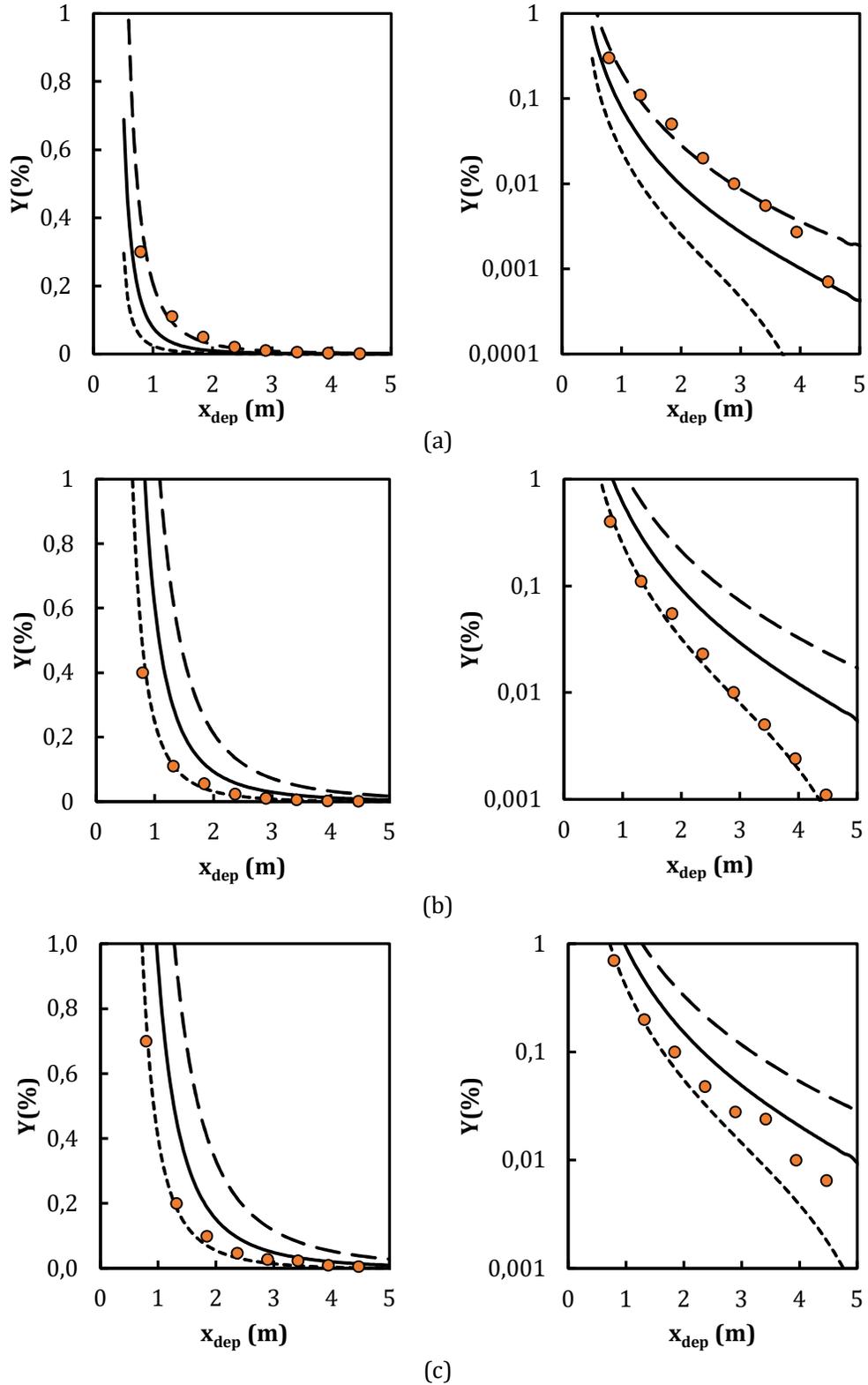


Figura 4.10. Deriva de pulverización predicha utilizando U_0 media (curva continua), mínima (línea discontinua corta) y máxima (línea discontinua larga) y deriva experimental (puntos) para los ensayos a) S6, b) S7 y c) S13.

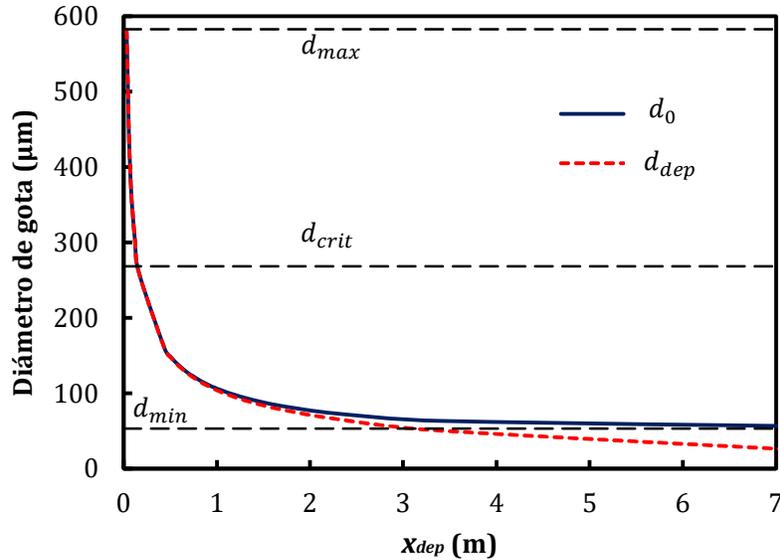


Figura 4.11. Diámetros d_0 y d_{dep} de gotas atomizadas en $x_0 = 0$ para el caso S1.

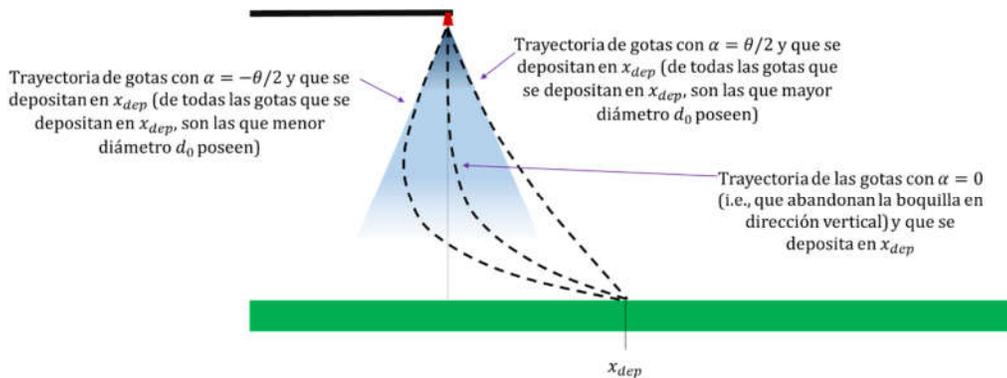


Figura 4.12. Esquema de trayectorias de gotas que se depositan en una misma distancia x_{dep} .

Para gotas menores a 100 μm , la evaporación no puede ser considerada despreciable (observar las diferencias entre las curvas d_0 vs x_{dep} y d_{dep} vs x_{dep} en la Figura 4.11). En la Figura 4.11 también se corrobora que, a medida que aumenta la distancia recorrida, el diámetro d_0 de las gotas que se depositan tiende a d_{min} .

El modelo matemático propuesto también permite calcular la DSD de las gotas depositadas. Para ello, primero se debe obtener la derivada de d_0 con respecto a d_{dep} , a partir de la Ecuación 4.25:

$$\frac{dd_{dep}}{dd_0} = \left(1 - \frac{54\mu_g H}{kd_0^4 \Delta\rho g}\right)^{-\frac{2}{3}} \left[1 + \frac{18\mu_g H}{kd_0^4 \Delta\rho g}\right] \quad (4.52)$$

Capítulo 4

Luego, se realiza un cambio de variables, de d_0 a d_{dep} , en la Ecuación 4.47, y se la multiplica por la Ecuación 4.52:

$$\Gamma(d_{dep}, x_{dep}) = \frac{dd_0}{dd_{dep}} f_{d,x_{dep}}^S(d_0, x_{dep}) \quad (4.53)$$

resultando:

$$\Gamma(d_{dep}, x_{dep}) = \left(1 - \frac{54\mu_g H}{kd_0^4 \Delta\rho g}\right)^{\frac{2}{3}} \left[1 + \frac{18\mu_g H}{kd_0^4 \Delta\rho g}\right]^{-1} \lambda f_{d_0}(d_0) f_{x_{dep}}(x_{dep}|d_0) \quad (4.54)$$

La Ecuación 4.54, donde d_0 depende de d_{dep} mediante la Ecuación 4.25, permite obtener la DSD de las gotas depositadas expresada en función del diámetro de gota depositada d_{dep} , para cada distancia x_{dep} de interés. Es conveniente normalizar la Ecuación 4.54 para que el área bajo la curva de la DSD depositada sea igual a 1:

$$\bar{\Gamma}(d_{dep}, x_{dep}) = \frac{\Gamma(d_{dep}, x_{dep})}{\int_0^{\infty} \Gamma(d_{dep}, x_{dep}) dd_{dep}} \quad (4.55)$$

A modo de ejemplo, la Figura 4.14 muestra la DSD de las gotas depositadas a 0,5, 1 y 2 m de distancia. Para $x_{dep} = 0,5$ m, la DSD es relativamente dispersa, con diámetros de gotas depositadas entre 110 y 270 μm . Para $x_{dep} = 1$ m, se observa que las gotas se encuentran principalmente entre 80 y 135 μm . Para $x_{dep} = 2$ m, la DSD depositada se encuentra aproximadamente entre 60 y 80 μm . A medida que aumenta la distancia de deposición, la DSD presenta frecuencias más grandes, lo cual es consistente con la menor dispersión de la curva de distribución y la condición de normalización (i.e., área debajo la curva igual a 1). Este resultado permite comprobar que, para distancias cortas, la DSD depositada depende principalmente de la DSD de las gotas que salen de la boquilla. Por otro lado, a distancias de deposición mayores, llegan gotas de menor tamaño (i.e., las que experimentan de manera más significativa el arrastre del viento).

Debido a que las gotas grandes, las cuales se depositan en distancias cortas, están poco influidas por el viento, la DSD para pequeños valores de x_{dep} depende principalmente de la distribución de trayectorias iniciales. Por otro lado, a medida que aumenta la distancia de deposición, las gotas de mayor tamaño ya se han depositado y, por lo tanto, la DSD que impacta en el suelo es más estrecha.

La Figura 4.14 muestra que el modelo es capaz de calcular la distribución de tamaño de gotas depositadas, información que permite la estimación de la cobertura (i.e., # de impactos/área) del fitosanitario, así como diámetros representativos de la DSD.

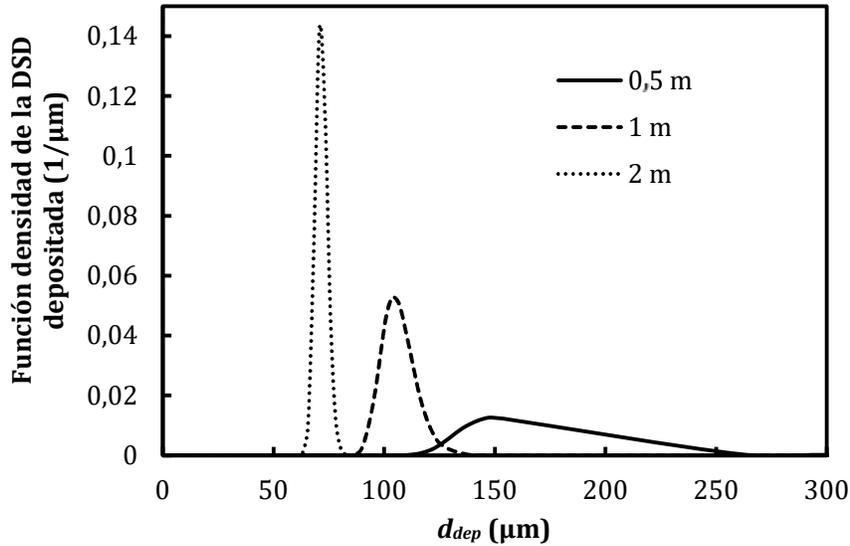


Figura 4.14. DSD de las gotas depositadas a 0,5, 1 y 2 m de distancia, para el caso S1.

4.7 Análisis de sensibilidad de la deriva

Con el propósito de estudiar la influencia de diferentes variables sobre la deriva de productos no volátiles durante la pulverización, se las modificó en $\pm 50\%$ con respecto al valor del caso base. En la Figura 4.15 se compara, a modo de ejemplo, la deriva de pulverización ante cambios positivos en la velocidad del viento, la presión de pulverización y la altura de botalón para distancias mayores a 1 m.

Cuando la velocidad del viento aumenta en 50%, la curva de deriva se desplaza hacia distancias mayores. Esto se debe al mayor arrastre de las gotas, predicho por la Ecuación 4.40. Un cambio en la velocidad del viento no modifica los valores de d_{min} , d_{crit} , ni el porcentaje de volumen de cada tamaño de gota que es producido durante la atomización. Por lo cual, el único efecto es un incremento en el desplazamiento C (Ecuación 4.41) que se refleja en un corrimiento de la curva de deriva en la dirección del viento.

Cuando el aumento del 50% se realiza sobre la presión de pulverización, el D_{V50} disminuye acorde a la Ecuación 2.15, produciendo una DSD atomizada con gotas más pequeñas. Al disminuir el tamaño de las gotas, éstas son más factibles de ser arrastradas por el viento y, por lo tanto, de depositarse a mayores distancias.

El aumento del 50% en la altura del botalón produce un incremento en el tiempo de deposición de las gotas (Ecuación 4.28). Por esta razón, el aumento de la altura de botalón causa mayores distancias de deposición y deriva.

Aunque no se muestra, para las distancias simuladas, un incremento del 50% en la temperatura ambiente produce un cambio despreciable en la deriva. De acuerdo a las Ecuaciones 4.15-4.17, el diámetro de gota varía con la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de bulbo húmedo (ΔT). Con respecto al caso base, el aumento del 50% en la temperatura ambiente se corresponde con un incremento del 9% en ΔT , lo cual no afectó apreciablemente el diámetro de gota y, por lo tanto, no modificó la deriva.

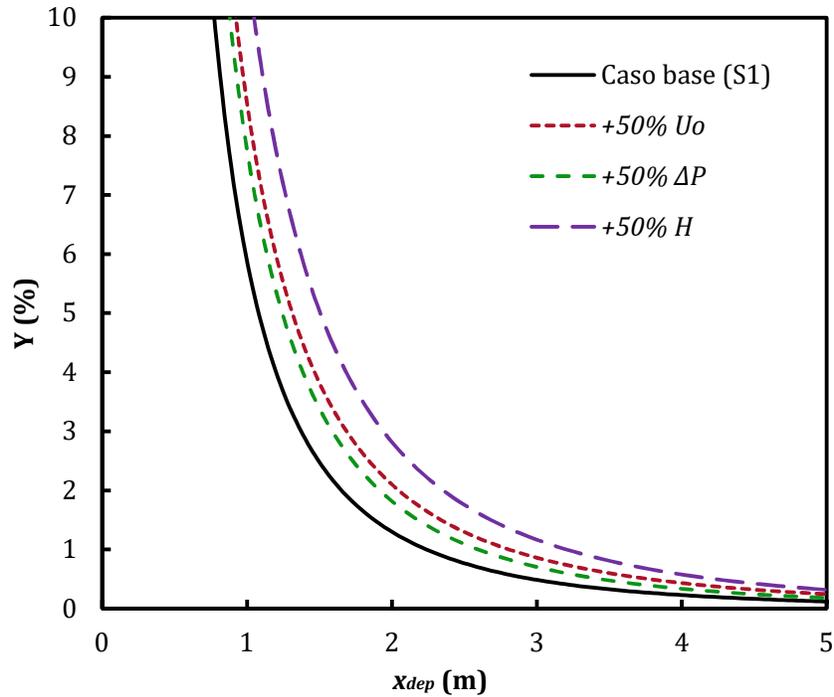


Figura 4.15. Deriva de pulverización ante cambios en la velocidad del viento, la presión de pulverización y la altura de botalón, con respecto al caso S1.

4.8 Conclusiones

El modelo presentado se validó con datos experimentales tomados en campo para pulverizaciones mediante una boquilla. Los valores de deriva predichos por el modelo para diferentes tipos de boquilla reproducen satisfactoriamente los valores medidos. Es importante señalar que el modelo no contiene parámetros de ajuste.

Los cambios en la velocidad del viento, altura de botalón y presión de pulverización tienen una influencia significativa sobre la deriva. En cambio, la temperatura y la humedad relativa producen efectos despreciables sobre esta variable.

Las gotas factibles de ser arrastradas por el viento son aquellas menores al diámetro d_{crit} . Por esta razón, para elevadas alturas de botalón y altas velocidades de viento, las estrategias de reducción de deriva deben estar enfocadas en controlar la deposición de las gotas atomizadas menores a dicho diámetro (el cual puede ser calculado a priori). Un criterio para restringir la deriva de pulverización es forzar al D_{V50} atomizado a ser mayor o igual al d_{crit} . De esta manera, menos del 50% en volumen de las gotas será factible de perderse por deriva. El modelo desarrollado en este Capítulo (en combinación con el modelo de atomización presentado en el Capítulo 2) permite, igualando el d_{crit} (Ecuación 4.30) al D_{V50} de las gotas atomizadas (Ecuación 2.15), obtener una relación entre la altura de botalón y la presión de pulverización con que se puede operar con el objeto de reducir la deriva.

El modelo provee la distribución de tamaño de gotas depositadas a diferentes distancias. A partir de esta información se puede calcular *ex ante* el número de impactos por cm^2 , parámetro que es indicativo de la calidad de aplicación y que actualmente es muy usado por los aplicadores para introducir medidas correctivas *ex post*.

Para predecir correctamente la deriva en aplicaciones agrícolas terrestres, se requiere contemplar las múltiples boquillas que tiene el botalón de una máquina pulverizadora. En el Capítulo siguiente se adapta el modelo propuesto para cuantificar la deposición de las gotas pulverizadas cuando varias boquillas están presentes.

Capítulo 5

Modelo de deriva para botalón

“Similitudes que soñás, lugares que no existen, pero vuelves a pasar, errores ópticos del tiempo y de la luz”.

Gustavo Cerati

Como se mencionó en el Capítulo 1, 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 (Gil et al., 2014, Matthews et al., 2014). En la pulverización con botalón, la dosis depositada de fitosanitario en el área objetivo depende de la contribución de las múltiples boquillas. Por esta razón se extiende el modelo desarrollado en el Capítulo 4 para describir la deposición de fitosanitarios en suelo cuando la pulverización se realiza con botalón, incorporando efectos turbulentos en el transporte de las gotas pulverizadas.

5.1 Deriva de pulverización para múltiples boquillas

Esta sección desarrolla las herramientas matemáticas para calcular la deriva de pulverización, desde un botalón con múltiples boquillas, en función de la distribución de deposición de gotas para cada boquilla.

En la Figura 5.1 se muestra un esquema del volumen depositado sobre una zona arbitraria definida por (Δx_{dep}) cuando se realiza la pulverización con una única boquilla (Figura 5.1a) y con tres boquillas (Figura 5.1b). En la Figura 5.1b se observa que diferentes boquillas pueden aportar volumen de gotas sobre una misma área de deposición.

Para un botalón con múltiples boquillas, el caudal depositado en un flujo de área $v_A \Delta x_{dep}$ se calcula como:

$$\Delta Q_{dep}^S(x_{dep}) = \sum_i^N \Delta Q_{dep}^{S,i}(x_{dep}) \quad (5.1)$$

donde $Q_{dep}^{S,i}(x_{dep})$ es el caudal de solución pulverizado por la i -ésima boquilla que se deposita en un flujo de área $v_A \Delta x_{dep}$ y N es el número total de boquillas en el botalón.

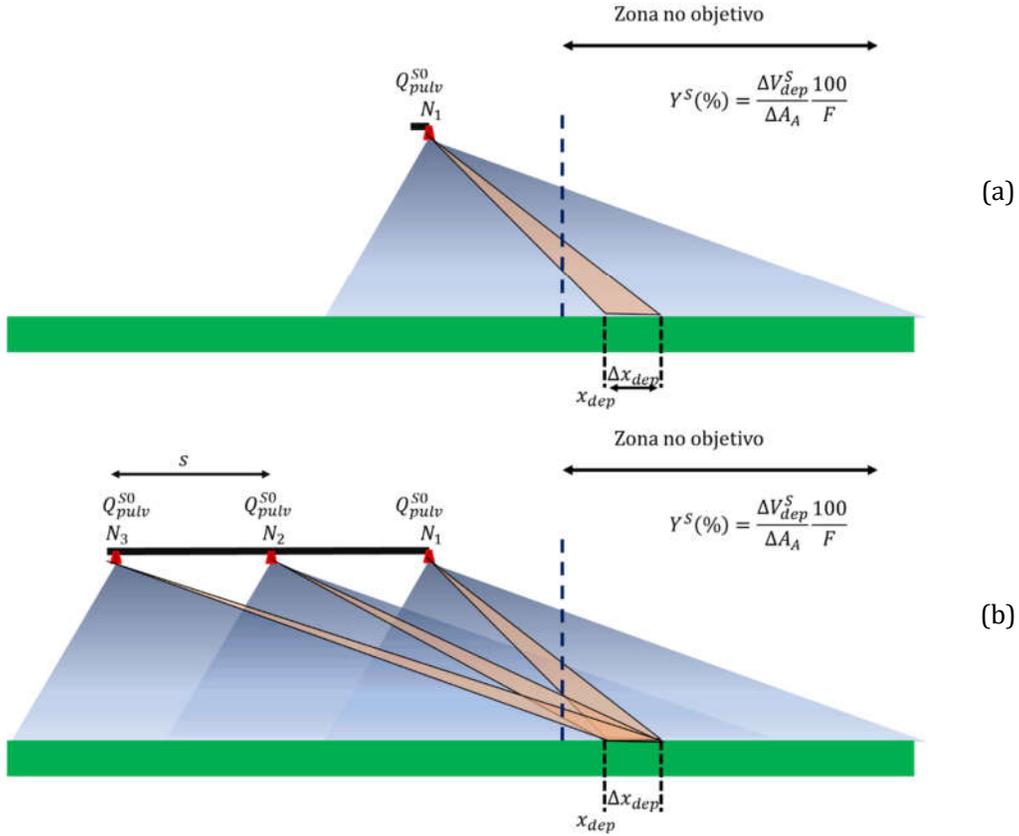


Figura 5.1. Esquema de deposición de una boquilla y de tres boquillas.

Por analogía con la Ecuación 4.11, $Q_{dep}^{S,i}(x_{dep})$ se calcula como:

$$\Delta Q_{dep}^{S,i}(x_{dep}) = Q_{pulv}^{SO} [L_{dep}^{S,i}(x_{dep} + \Delta x_{dep}) - L_{dep}^{S,i}(x_{dep})] \quad (5.2)$$

donde $L_{dep}^{S,i}$ es la función acumulada de caudal pulverizado proveniente de la i -ésima boquilla que se deposita en distancias menores a x_{dep} .

Incluyendo la Ecuación 5.2 en la Ecuación 5.1, y reemplazando en la Ecuación 4.10 resulta:

$$Y^S(x_{dep}) = \frac{Q_{pulv}^{SO}}{v_A F} \frac{\sum_i (L_{dep}^{S,i}(x_{dep} + \Delta x_{dep}) - L_{dep}^{S,i}(x_{dep}))}{\Delta x_{dep}} = \frac{Q_{pulv}^{SO}}{v_A F} \frac{\sum_i \Delta L_{dep}^{S,i}}{\Delta x_{dep}} \quad (5.3)$$

Tomando el límite para $\Delta x_{dep} \rightarrow 0$, y teniendo en cuenta la definición de la distribución de volumen depositado (Ecuación 4.13), se obtiene:

$$Y^S(x_{dep}) = \frac{Q_{pulv}^{SO}}{v_A F} \sum_{i=1}^N f_{dep}^{S,i}(x_{dep}) \quad (5.4)$$

Si se asume que las boquillas son iguales por lo que producen una deriva idéntica (i.e., idéntica *función de distribución de volumen depositado*) y se utiliza separación constante entre boquillas (s , ver Figura 5.1), para calcular sitios de deposición resulta:

$$\sum_{i=1}^N f_{dep}^{S,i}(x_{dep}) = \sum_{i=1}^N f_{dep}^S(x_{dep} + (i-1)s) \quad (5.5)$$

Reemplazando la Ecuación 5.5 en la Ecuación 5.4:

$$Y^S(x_{dep}) = \frac{Q_{pulv}^{S0}}{v_A F} \sum_{i=1}^N f_{dep}^S(x_{dep} + (i-1)s) \quad (5.6)$$

Para aplicaciones con botalón, es conveniente reemplazar la Ecuación 3.3 (para aplicaciones de cobertura total) en la Ecuación 5.6, obteniéndose:

$$Y^S(x_{dep}) = s \sum_{i=1}^N f_{dep}^S(x_{dep} + (i-1)s) \quad (5.7)$$

Si se realiza el mismo desarrollo para no volátiles, se obtiene una expresión análoga para la deriva de pulverización:

$$Y(x_{dep}) = s \sum_{i=1}^N f_{dep}(x_{dep} + (i-1)s) \quad (5.8)$$

5.2 Función de distribución de gotas depositadas considerando dispersión

En esta sección se modifica la función de deposición (definida en el Capítulo 4) para incorporar los efectos turbulentos ocasionados por el viento en el transporte de las gotas pulverizadas. Esta modificación permite además extender la validez del modelo matemático planteado en el Capítulo 4 para mayores distancias de deposición, incorporando además la pulverización de múltiples boquillas.

5.2.1 Función de dispersión

Las funciones de deposición obtenidas para la solución total pulverizada y para los compuestos no volátiles (ecuaciones 4.48 y 4.50, respectivamente), no consideran la dispersión de las gotas debido a efectos turbulentos. Bajo este supuesto, para todas las gotas con diámetros y trayectorias iniciales idénticas se predice que se depositarán a idéntica distancia. Esto significa que, para una determinada distancia x_{dep} , la función de deposición cuantifica todas aquellas gotas con diámetros iniciales d_0 y ángulo de trayectoria inicial α

que alcanzan una posición vertical $z = H$ cuando la distancia es exactamente x_{dep} (Figura 5.2.a).

En los modelos de dispersión, la dispersión de las gotas en vuelo en dirección vertical comúnmente se representa mediante una distribución gaussiana (Bilanin, A. J., 1989; Jacobson, M. Z., 2005; Lebeau et al. 2011):

$$f_{disp}^{Vuelo}(z|\bar{z}, \sigma_z) = \frac{1}{\sigma_z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\bar{z})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (5.9)$$

donde z es la posición espacial en dirección vertical, \bar{z} es la posición vertical media de la población de las gotas y σ_z la desviación estándar en la dirección z (ver ilustración de la Figura 5.2.b). Para la dirección horizontal, se asume que los efectos convectivos del arrastre del viento son mayores a los dispersivos producidos por la turbulencia, por lo cual se asume que no hay dispersión en la coordenada x .

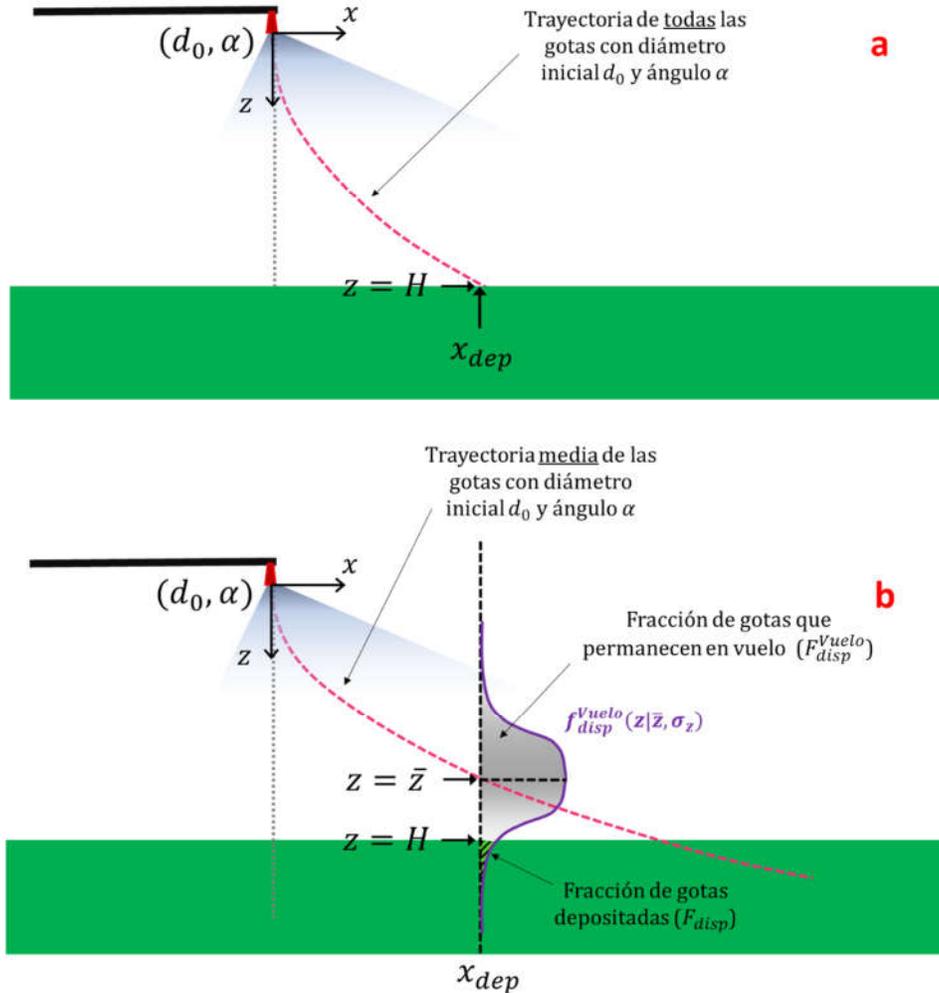


Figura 5.2. Trayectoria de gotas atomizadas con d_0 y α : a) sin dispersión. b) con dispersión.

La función de distribución acumulada de la Ecuación 5.9, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$F_{disp}^{Vuelo} = \int_{-\infty}^z f_{disp}^{Vuelo}(z|\bar{Z}, \sigma_z) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{z - \bar{Z}}{\sqrt{2}\sigma_z} \right) \right] \quad (5.10)$$

Derivando la Ecuación 5.10 respecto a la variable \bar{Z} se obtiene la función de dispersión de las gotas en vuelo con un tamaño inicial d_0 y un ángulo α :

$$f_{disp}^{Vuelo}(\bar{Z}|z, \sigma_z) = \frac{d \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{z - \bar{Z}}{\sqrt{2}\sigma_z} \right) \right] \right\}}{d\bar{Z}} = -\frac{1}{\sigma_z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\bar{Z})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (5.11)$$

Debido a que el objetivo de esta tesis es la predicción de la deposición, se calcula la fracción de gotas depositadas como:

$$F_{disp} = 1 - F_{disp}^{Vuelo} \quad (5.12)$$

Por último, la derivada de la Ecuación 5.12 respecto a \bar{Z} para $z = H$ es igual a:

$$f_{disp}(\bar{Z}|z = H, \sigma_z) = \frac{d\{1 - F_{disp}^{Vuelo}\}}{d\bar{Z}} = -f_{disp}^{Vuelo}(\bar{Z}|z, \sigma_z) = \frac{1}{\sigma_z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H-\bar{Z})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (5.13)$$

En la Ecuación 5.13 se debe hacer un segundo cambio de variables para expresar la función de dispersión en términos de x_{dep} :

$$f_{disp}(x_{dep}|z = H, \sigma_z) = \frac{d\bar{Z}}{dx_{dep}} \frac{1}{\sigma_z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H-\bar{Z})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (5.14)$$

Como se mencionó, no hay dispersión en la dirección del viento, por esta razón el movimiento de las gotas en esta dirección se sigue representando mediante la Ecuación 4.38 (i.e., es válida la expresión $\frac{dx_{dep}}{dt} = \bar{U}$). Además, todas las gotas con un tamaño inicial d_0 y un ángulo α tienen igual tiempo de vuelo, igual pérdida de volumen por evaporación y por lo todas esas gotas descienden con una velocidad igual a la terminal (Stainier et al., 2006b, Tan, 2014). Por lo tanto, se verifica:

$$\frac{d\bar{Z}}{dx_{dep}} = \frac{\frac{d\bar{Z}}{dt}}{\frac{dx_{dep}}{dt}} = \frac{v_T}{\bar{U}} \quad (5.15)$$

donde v_T se calcula mediante la Ecuación 4.20.

Reemplazando la Ecuación 5.15 en la 5.14, se obtiene la función de dispersión para un tamaño de gota y una trayectoria dadas:

$$f_{disp}(x_{dep}|z = H, \sigma_z) = \frac{v_T}{\bar{U}} \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H-\bar{Z})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (5.16)$$

5.2.2 Función de distribución de volumen depositado de solución considerando dispersión

La función de distribución de volumen depositado considerando efectos de dispersión se obtiene multiplicando las Ecuaciones 4.48 y 5.16, para $z = H$ (i.e., nivel del suelo donde las gotas se depositan):

$$f_{d,x_0,x_{dep}}^S(d_0, x_0, x_{dep}) = \lambda' f_{d_0}(d_0) f_{x_0}(x_0) \frac{v_T}{\bar{U}} \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H-\bar{Z})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (5.17)$$

A diferencia de la Ecuación 4.26, el cociente entre los volúmenes de gota depositada y atomizada se expresa en función de la altura \bar{Z} en lugar de H :

$$\lambda' = 1 - \frac{54\mu_g \bar{Z}}{k d_0^4 \Delta \rho g} \quad (5.18)$$

donde \bar{Z} es función de d_0 , x_0 y x_{dep} , y se obtiene a partir de las Ecuaciones 4.40 y 4.41 (reemplazando H por \bar{Z} para contemplar todas las alturas posibles):

$$\bar{Z} = \frac{k d_0^4 \Delta \rho g}{54\mu_g} \left[1 - \left(1 - \frac{x_{dep} - x_0}{\gamma U_0 k d_0^2} \right)^3 \right] \quad (5.19)$$

La función de deposición de la solución pulverizada se obtiene como la distribución marginal (ver Apéndice A) para x_{dep} , para lo cual se requiere la integración de la Ecuación 5.17 sobre todos los diámetros iniciales y sobre todas las distancias axiales de donde las gotas son atomizadas:

$$f_{x_{dep}}^S(x_{dep}) = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \int_{d_{min}}^{d_{max}} \lambda' f_{d_0}(d_0) f_{x_0}(x_0) \frac{v_z}{\bar{U}} \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H-\bar{Z})^2}{2\sigma_z^2}} dd_0 dx_0 \quad (5.20)$$

5.2.3 Función de distribución de gotas depositadas de no volátiles considerando dispersión

Análogamente a lo realizado para obtener la Ecuación 5.17 para la deposición de la solución, se obtiene la función de distribución multivariable de compuestos no volátiles depositados:

$$f_{d,x_0,x_{dep}} = f_{d_0}(d_0) f_{x_0}(x_0) \frac{v_T}{\bar{U}} \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H-\bar{Z})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (5.21)$$

Integrando para todo d_0 y x_0 se obtiene la función de gotas depositadas de compuestos no volátiles, incluyendo la dispersión en el eje z:

$$f_{x_{dep}}(x_{dep}) = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \int_{d_{min}}^{d_{max}} f_{d_0}(d_0) f_{x_0}(x_0) \frac{v_T}{\bar{U}} \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H-\bar{z})^2}{2\sigma_z^2}} dd_0 dx_0 \quad (5.22)$$

5.2.4 Módulo de dispersión

El módulo de dispersión σ_z es función de la turbulencia atmosférica, la rugosidad de la superficie, la velocidad media del viento y la distancia recorrida por la gota (Tan, 2014). En general, σ_z se expresa en función de la coordenada espacial en dirección del viento (Liu et al., 2018; Seinfeld y Pandis, 2016):

$$\sigma_z = C_1 (x_{dep} - x_0)^{C_2} \quad (5.23)$$

donde

$$C_1 = \sqrt{\frac{2D_z'}{\bar{U}}} = \sqrt{\frac{2D_z'}{\gamma U_0}} \quad (5.24)$$

En la Ecuación 5.24, D_z' es la difusividad de remolino en dirección z. En la literatura, se sugieren diferentes valores para D_z' y C_2 , los cuales son dependientes de las condiciones ambientales. Estos valores suelen ser utilizados en modelos de dispersión que abarcan desde decenas de metros hasta cientos de kilómetros (e.g., Lebeau et al., 2011; Liu et al., 2018; Seinfeld y Pandis, 2016; Venkatran, 1996). Para el modelo presentado en esta Tesis, D_z' y C_2 son parámetros de ajuste.

5.3 Ajuste y validación del modelo matemático de pulverización por botalón

5.3.1 Ajuste y validación del modelo con datos de Nuyttens (2007)

Nuyttens (2007) midió la deriva de pulverización en campo aplicando el procedimiento establecido en la norma ISO 22866 (ver Capítulo 3). Dentro de los casos reportados, se seleccionaron 28 casos para ajustar y validar el modelo que fueron aquellos ensayos en los que las direcciones de avance de la pulverizadora y del viento fueron aproximadamente perpendiculares entre sí. Para cada ensayo el autor reportó la deriva para 8 distancias. 13 de los 28 ensayos fueron seleccionados al azar para realizar el ajuste de los parámetros de dispersión, y los 15 restantes para validar el ajuste. En las Figuras 5.3.a

y 5.3.b se resumen las condiciones ambientales (velocidad de viento, temperatura y humedad relativa) de los ensayos considerados para el ajuste y la validación, respectivamente. Debido a las fluctuaciones de las condiciones meteorológicas durante cada ensayo, se consideraron los valores promedio reportados para U_0 , T y HR . Para todos los casos, la separación entre boquillas fue de 0,5 m y la altura de botalón varió entre 0,3 y 0,75 m. Diferentes boquillas y presiones de pulverización fueron usadas para cada ensayo, generando valores de D_{V50} del aerosol atomizado entre 240 y 310 μm .

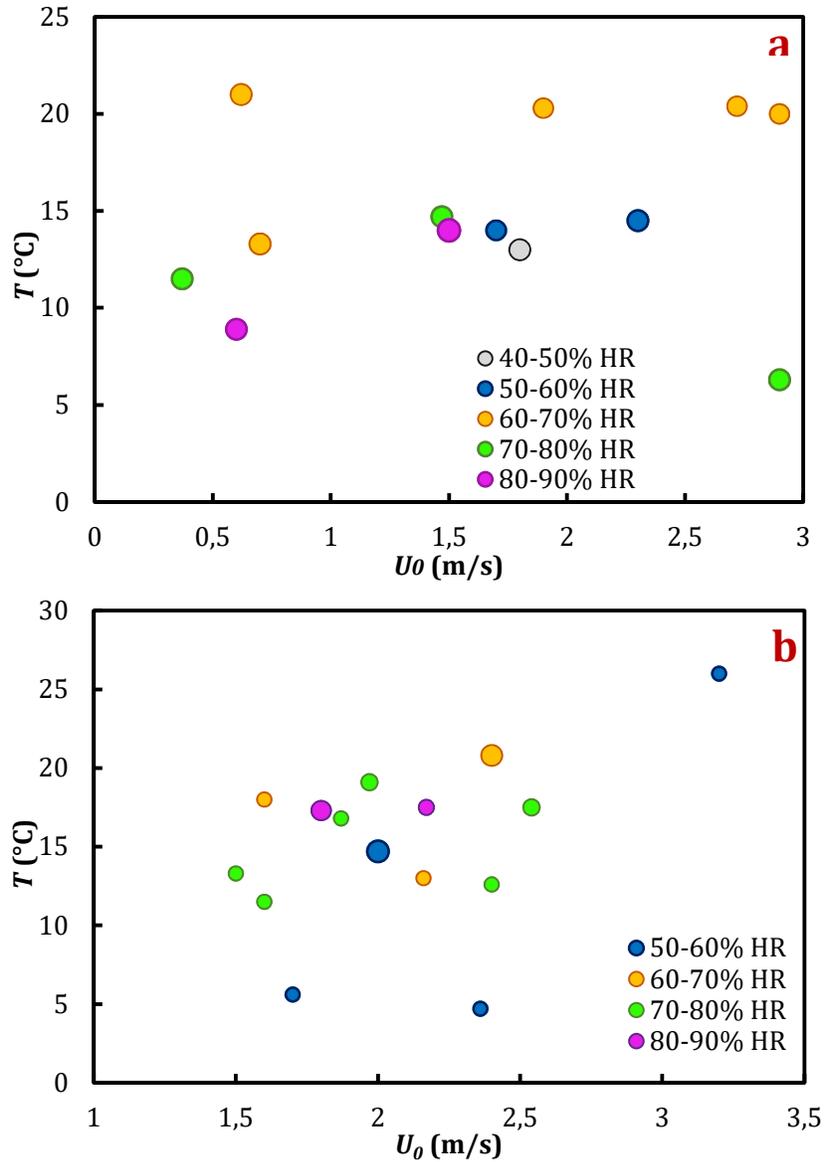


Figura 5.3. Velocidad de viento, temperatura y humedad relativa de los ensayos experimentales realizados por Nuyttens (2007) y utilizados para a) el ajuste y b) validación del modelo con dispersión. El tamaño relativo de las esferas es un indicador del D_{V50} del spray atomizado.

Para cada ensayo, se realizó un ajuste de D_z y C_2 para minimizar el error cuadrático medio entre la deriva predicha por el modelo y los valores experimentales reportados en el trabajo de Nuyttens (2007). Para 9 de los 13 ensayos experimentales utilizados para la etapa de ajuste, se obtuvo prácticamente el mismo valor para la constante C_2 . Estos casos correspondieron a velocidades del viento mayores a 1 m/s. Además, para estos mismos casos se observó una correlación entre el D_z' ajustado y la humedad relativa. En la Figura 5.4 se grafica D_z' vs. HR , donde puede observarse que los datos experimentales con velocidades de viento mayores a 1 m/s pueden reproducirse adecuadamente (línea punteada) si los parámetros respetan las Ecuaciones 5.25 y 5.26.

$$D_z' = 0,0038 \left(\frac{HR}{100} \right)^{-3,33} \quad (5.25)$$

$$C_2 = 0,85 \quad (5.26)$$

En la Ecuación 5.25, el valor de HR debe ser porcentual, y D_z' tiene unidades SI.

La literatura reporta que C_1 (ver Ecuación 5.24) y C_2 presentan valores típicos entre 0,017-0,4 y 0,5-1,38, respectivamente (Seinfeld y Pandis, 2016). Los resultados de C_1 (0,1-0,28) y C_2 provenientes del ajuste realizado, para condiciones de los ensayos de Nuyttens (2007), se encuentran dentro de dichos rangos.

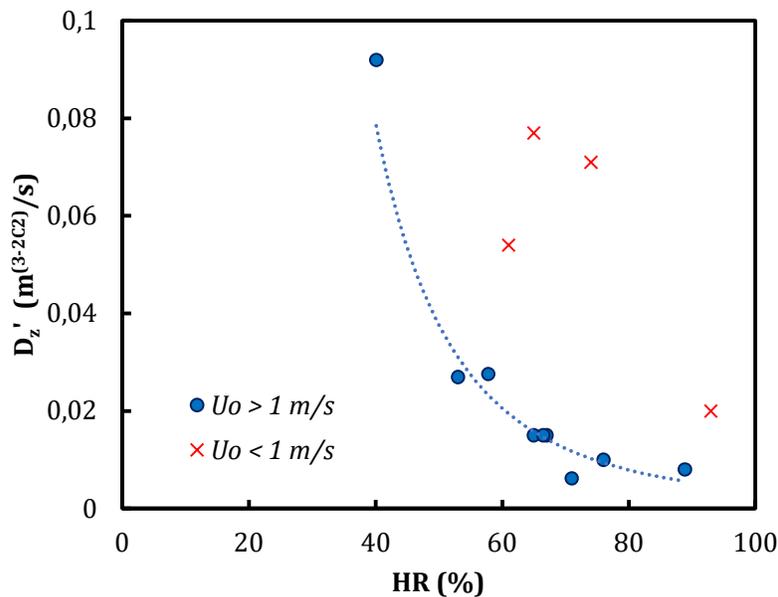


Figura 5.4. Variación del parámetro de dispersión con la humedad relativa.

Para velocidades del viento menores a 1 m/s, los parámetros ajustados no cumplen con las Ecuaciones 5.25 y 5.26. La razón de esta discrepancia puede atribuirse a que los efectos dispersivos en la dirección del viento pueden ser significativos, lo cual contradice una de las hipótesis planteadas para el desarrollo del modelo del presente capítulo (efectos convectivos mayores a los dispersivos en dirección del viento).

En la Figura 5.5 se comparan los valores experimentales y simulados, clasificados por distancia de deposición (colores) y si corresponde a datos utilizados para el ajuste (triángulos) o para la validación (cuadrados). En la Figura 5.5 se observa una buena correspondencia entre los valores simulados y experimentales para la mayoría de las distancias simuladas. A partir de los 10 m, se aprecia que el modelo subestima la deriva de pulverización. Sin embargo, para las distancias que se reportan los mayores valores de deriva la predicción es satisfactoria, más aun considerando que a iguales condiciones de trabajo, las réplicas de las curvas de deriva experimentales suelen tener variaciones importantes (Fox et al., 1993; Nuyttens, 2007). Por lo tanto, el modelo matemático se posiciona como una herramienta útil para realizar recomendaciones operativas a fin de minimizar la deriva.

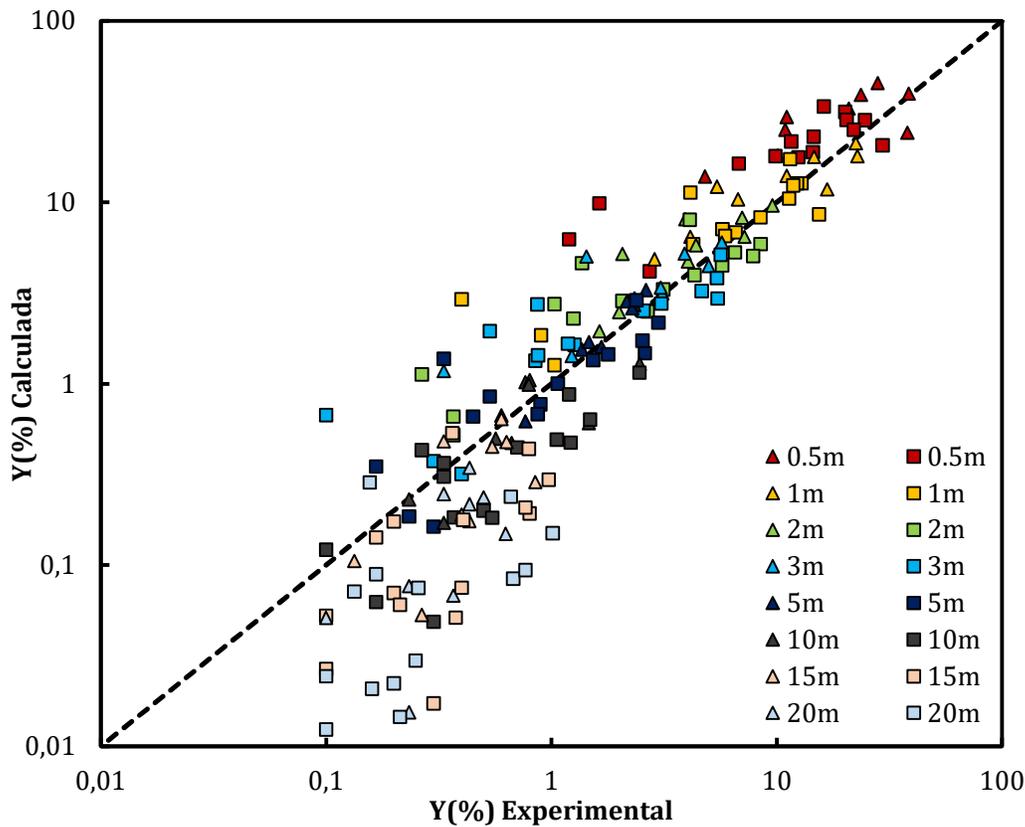


Figura 5.5. Comparación entre resultados experimentales de Nuyttens (2007) y calculados por el modelo matemático ajustado.

Al comparar valores experimentales y predichos de deriva por el modelo de deposición y dispersión atmosférica presentado por Løfstrøm et al. (2013), los autores reportaron que el 82% de los valores de deriva calculados se encontraron en el rango de $(Y_{exp}/4; 4Y_{exp})$ y concluyeron que el ajuste era satisfactorio. Para el modelo presentado en este capítulo, en la Figura 5.5 se obtuvo que el 87% de los puntos presentó una desviación dentro de un factor de cuatro. Por lo tanto, el modelo propuesto puede considerarse satisfactorio.

5.3.2 Validación del modelo con datos de deriva de van de Zande et al. (2014)

Para investigar si los parámetros ajustados utilizando datos experimentales de Nuyttens (2007) pueden aplicarse a mediciones de otros autores, en esta sección se valida el modelo con los datos de Van de Zande et al. (2014). Estos autores realizaron 6 ensayos de pulverización en campo y reportaron la deriva en función de la distancia. Las boquillas utilizadas en cada experimento fueron diferentes; la Tabla 5.1 presenta el D_{V50} del spray atomizado para cada ensayo. La presión de pulverización fue de 3 bar para los casos de V1 a V4 y de 1 bar para los ensayos V5 y V6. La velocidad promedio del viento a la altura del botalón fue 1,5 m/s (calculada mediante el valor reportado y la Ecuación 4.31), la temperatura 9°C, la humedad relativa 80% y la dirección del viento tuvo 20° de desviación con respecto a la perpendicular a la dirección de avance de la pulverizadora. La altura de botalón y la separación entre boquillas fueron de 0.5 m.

Tabla 5.1. D_{V50} del spray atomizado para cada ensayo de van de Zande et al. (2014).

Ensayo	Dv50 (μm)
V1	274
V2	322
V3	485
V4	573
V5	646
V6	648

En la Figura 5.6, para los ensayos V1 y V2, se comparan la deriva calculada y la experimental en función de la distancia de deposición. Esta Figura incluye la deriva expresada en escalas lineal y logarítmica. Para demostrar que el fenómeno de dispersión impacta en los resultados del modelo, en la Figura 5.6 se incluyen también las simulaciones sin considerar la dispersión de las gotas ($\sigma_z \rightarrow 0$). Como era de esperar, para todos los casos, la deriva de pulverización aumenta cuando se considera la dispersión. Esto se debe a que la turbulencia provoca que las gotas permanezcan más tiempo en vuelo y, en consecuencia, se depositen en distancias mayores. Si bien las tendencias de la deriva con la distancia son

captadas por ambos modelos, el modelo con dispersión representa más adecuadamente los valores experimentales. Aun así, se observa que, para distancias menores a 3 metros, el modelo sin dispersión describe de manera apropiada la deriva de pulverización.

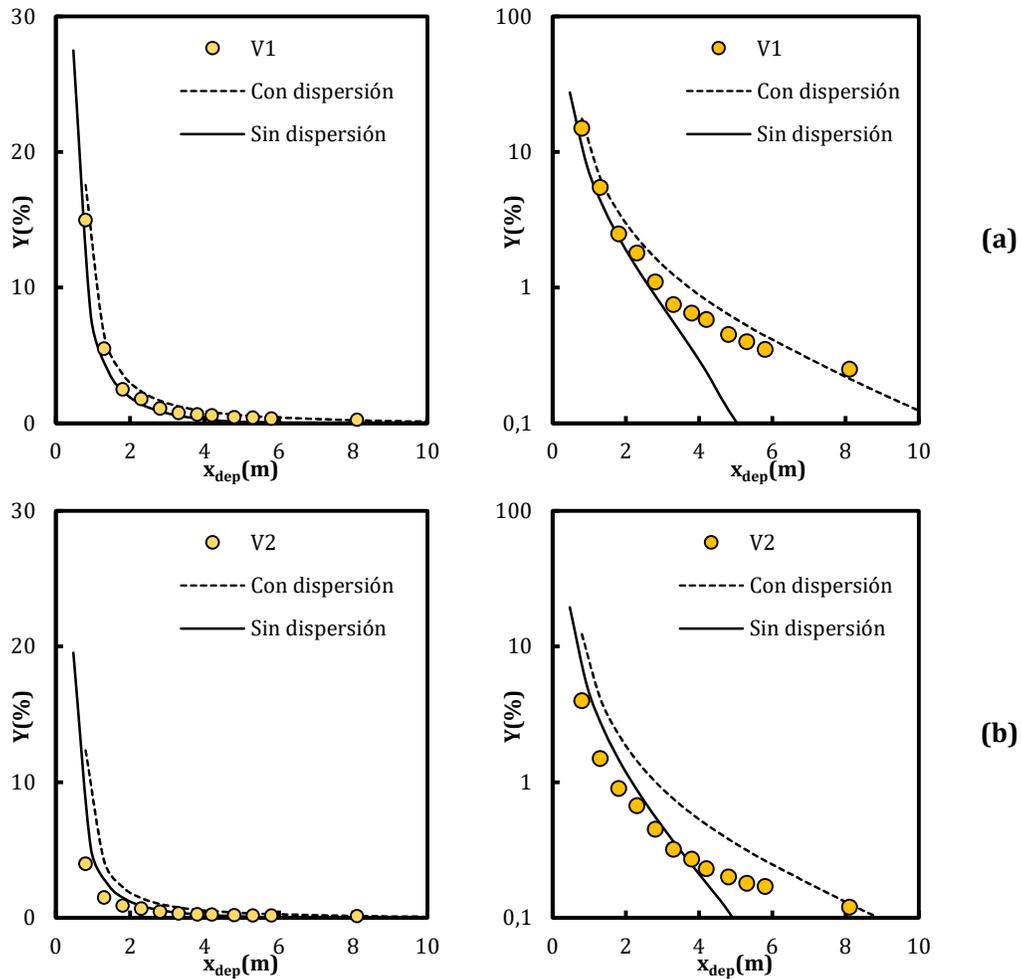


Figura 5.6 Comparación entre resultados experimentales de van de Zande (2014) y calculados con el modelo con dispersión (línea discontinua) y sin dispersión (línea continua) para casos a) V1 y b) V2.

Para los ensayos V3 y V4, la Figura 5.7 presenta los perfiles axiales de deriva calculados (con y sin dispersión) utilizando tanto una escala lineal como logarítmica para el eje y (deriva). En los dos ensayos se observa que el modelo con dispersión predice adecuadamente los valores experimentales en todo el rango de distancias. El modelo sin dispersión predice adecuadamente los datos experimentales hasta una distancia de 2 m.

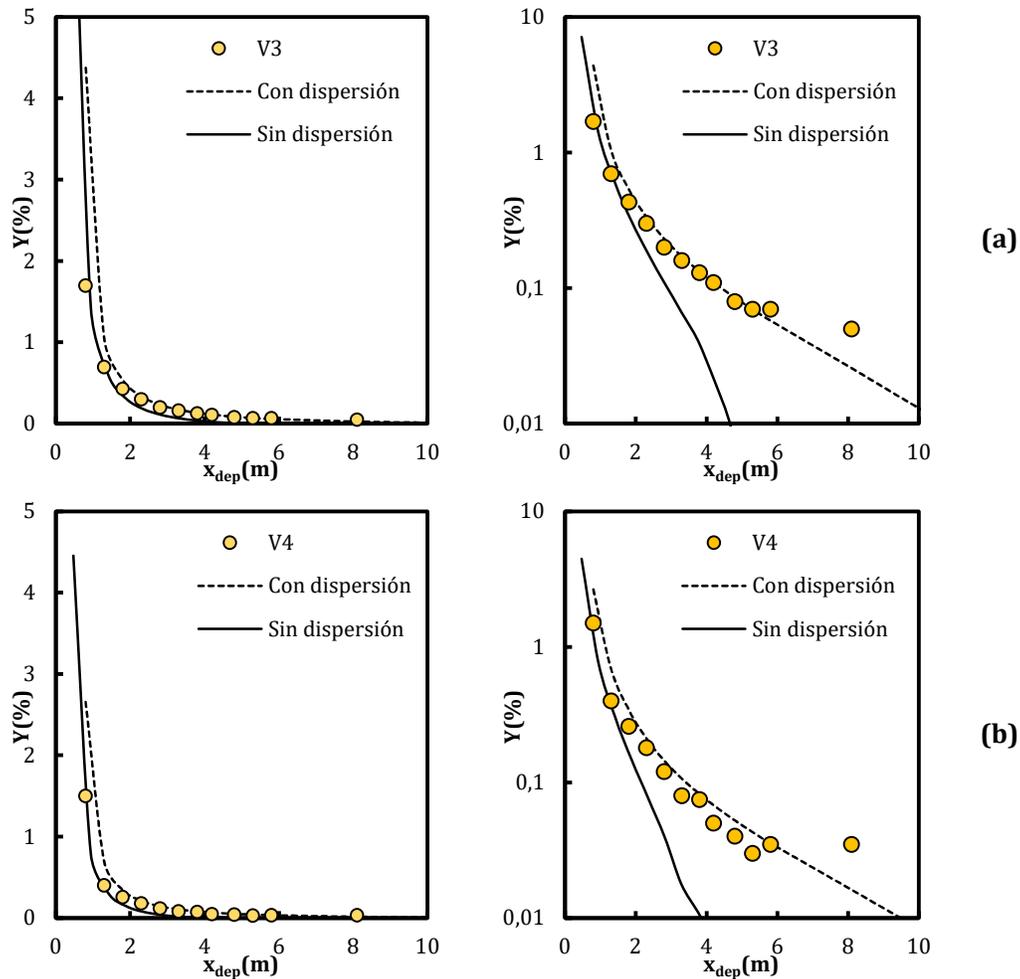


Figura 5.7 Comparación entre resultados experimentales de van de Zande (2014) y calculados con el modelo con dispersión (línea discontinua) y sin dispersión (línea continua) para casos a) V3 y b) V4.

Por último y análogamente a los casos anteriores, la Figura 5.8 presenta los resultados experimentales y calculados para los casos V5 y V6. Para el ensayo V5, ambos modelos proveen resultados similares hasta 3 m de distancia, pero subestiman la deriva para distancias mayores. Para el ensayo V6, nuevamente el modelo con dispersión reproduce adecuadamente el comportamiento de los valores experimentales en todo el rango de distancias, no así el modelo sin dispersión.

El modelo con dispersión para múltiples boquillas desarrollado junto con el uso de los parámetros ajustados utilizando parte de los datos experimentales de Nuyttens (2007), permitieron estimar la deriva reportada por van de Zande et al. (2014) que utilizaron otros tipos de boquilla.

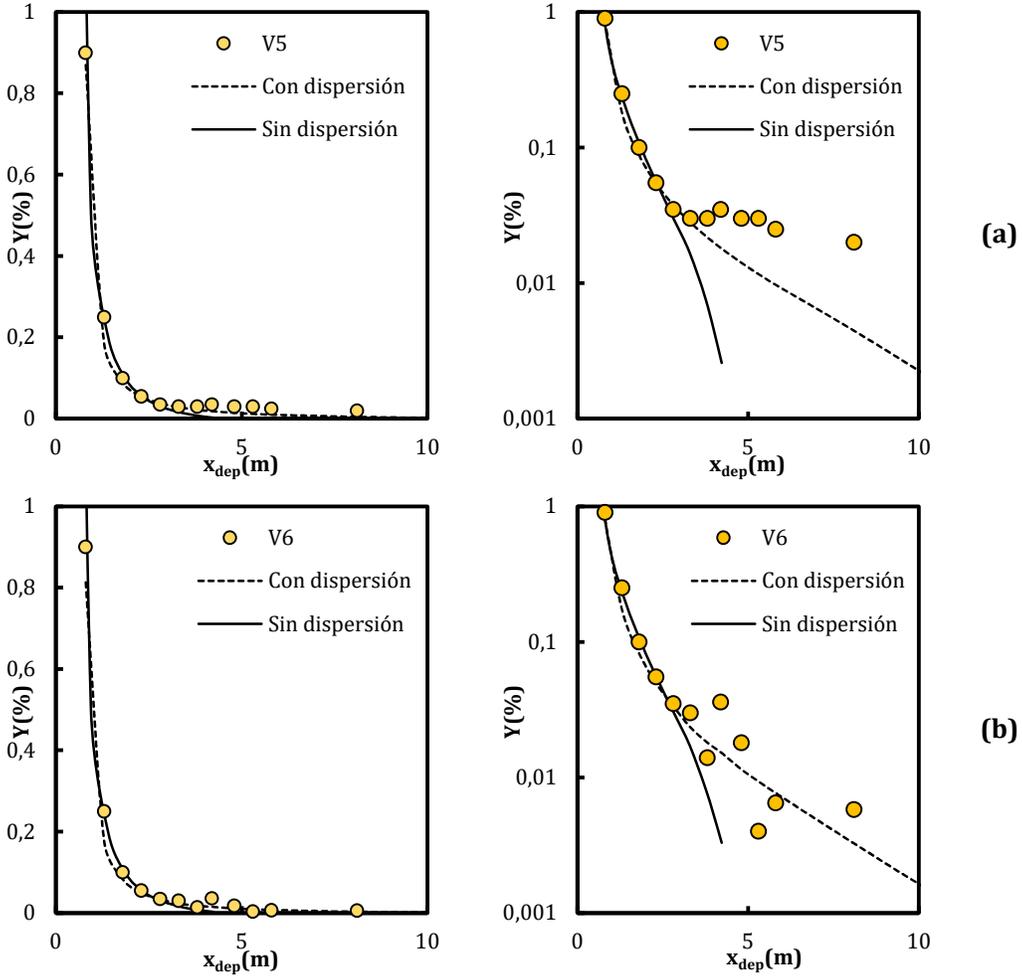


Figura 5.8 Comparación entre resultados experimentales de van de Zande (2014) y calculados con el modelo con dispersión (línea discontinua) y sin dispersión (línea continua) para casos a) V5 y b) V6.

5.3.3 Distribución de tamaño de gotas depositadas

La distribución de tamaño de gotas depositadas provee información valiosa para el aplicador, porque está relacionada con la cobertura que logra el fitosanitario. Para el modelo con dispersión, y considerando inicialmente una única boquilla, la DSD de las gotas que se depositan en una distancia específica x_{dep} puede obtenerse si se realiza un cambio de variables en la Ecuación 5.17 mediante la multiplicación por dd_0/dd_{dep} (Ecuación 4.52). Luego, la expresión resultante se integra con respecto a x_0 para considerar todas las posibles trayectorias iniciales y se obtiene la distribución de tamaño de gotas para todo x_{dep} .

$$\Gamma^S_{disp}(d_{dep}, x_{dep}) = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \left(\frac{dd_0}{dd_{dep}} \right) f^S_{d,x_0,x_{dep}}(d_0, x_0, x_{dep}) dx_0 \quad (5.27)$$

donde dd_0/dd_{dep} se calcula mediante la Ecuación 4.52 y como se ha mencionado anteriormente w es el ancho de cobertura de una boquilla (ver Figura 4.1.a).

Para un botalón con N boquillas separadas por una distancia s , se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Gamma^S_{disp,bot}(d_{dep}, x_{dep}) = \sum_{i=1}^N \Gamma^S_{disp}(d_0, [x_{dep} + (i-1)s]) \quad (5.28)$$

La Ecuación 5.28 normalizada (lo cual permite que el área bajo la curva sea igual a la unidad) es:

$$\bar{\Gamma}^S_{disp,bot}(d_{dep}, x_{dep}) = \frac{\sum_{i=1}^N \Gamma^S_{disp}(d_0, [x_{dep} + (i-1)s])}{\int_0^{\infty} \sum_{i=1}^N \Gamma^S_{disp}(d_0, [x_{dep} + (i-1)s]) dd_{dep}} \quad (5.29)$$

La DSD de las gotas depositadas, calculada mediante la Ecuación 5.29, puede correlacionarse con datos experimentales obtenidos por ejemplo con hojas hidrosensibles (método de control de calidad de pulverización comúnmente usado por aplicadores). Por lo tanto, el modelo completo que permite predecir la deriva *ex ante* también brinda información de manera anticipada de la calidad de pulverización esperada.

La Ecuación 5.29 es función de la distancia de deposición, por lo tanto, puede calcularse la distribución de gotas depositadas en cualquier distancia (x_{dep}). Una vez definida esta distancia, se pueden calcular los parámetros de interés de dicha distribución. Por ejemplo, es posible calcular el diámetro característico D_{V50} .

Rodríguez Vassallo (2018) realizó ensayos de pulverización con un botalón de 8,4 m de longitud con 24 boquillas Hypro de abanico plano inducido por aire 110-015, separadas cada 0,35 m y una velocidad de avance de 9 km/h. Este autor realizó ensayos de pulverización bajo las siguientes condiciones: presión de pulverización 3 bar, altura de botalón 0,75 m, temperatura media 26°C, humedad relativa 67 % y velocidad media del viento 4 m/s. En los experimentos, el autor colocó hojas hidrosensibles a 5 m del extremo del botalón y evaluó el diámetro promedio de gotas depositadas obtenido. Encontró que los valores de D_{V50} se ubicaron en el rango 60-90 μm , siendo 72,2 μm el valor promedio. Para las mismas condiciones que las reportadas por Rodríguez Vassallo (2018), se evaluó la DSD mediante la Ecuación 5.29, y se obtuvo un D_{V50} de 93 μm para $x_{dep} = 5$ m. Este resultado indica que, para este caso, el modelo permitió estimar de manera aceptable la mediana de la distribución.

Lauric et al. (2016) también realizó ensayos de pulverización y utilizó hojas hidrosensibles para estudiar la calidad de la aplicación. Las condiciones climáticas promedio reportadas fueron 11°C de temperatura ambiente, 67% de humedad relativa y 3,8 m/s de velocidad del viento y una velocidad de avance de 7 km/h. La pulverizadora utilizó 30 boquillas Lurmark de abanico plano 8002, separadas entre sí por 0,5 m. Los valores reportados de D_{V50} para las gotas depositadas a 5 m del botalón fueron 120 y 70 μm para 1.3 y 3.5 bar de presión, respectivamente. Utilizando el modelo matemático, el D_{V50} (calculado para $x_{dep} = 5$ m) tanto para 1.3 y 3.5 bar de presión fue de 85 μm (se asumió una altura de botalón de 0.5 m, ya que su valor no fue reportado). El valor calculado de la mediana en volumen se ubicó dentro del rango experimental reportado. No obstante, el D_{V50} calculado no resultó sensible a la presión de pulverización. Desde el punto de vista fenomenológico la presión de atomización afecta la DSD a la salida de la boquilla, pero su efecto sobre las distribuciones de gotas depositadas debería atenuarse a distancias de deposición lejanas de la boquilla por el efecto de la dispersión. Por esta razón, sería conveniente contar con más datos experimentales para comprobar la existencia de la tendencia reportada por Lauric et al. (2016) en cuanto al impacto de la presión sobre el D_{V50} depositado a fin de realizar acciones correctivas al modelo.

5.4 Resultados de simulación

Habiendo comprobado que el modelo desarrollado en este Capítulo puede predecir satisfactoriamente variables claves del proceso de pulverización, se lo emplea para analizar la influencia de la cantidad de boquillas sobre la deriva y presentar diagramas operativos para minimizar la deriva durante la aplicación.

5.4.1 Influencia de la cantidad de boquillas sobre la deriva

Para analizar la influencia de diferentes parámetros y variables sobre el modelo, se define un caso de estudio para las condiciones definidas de la Tabla 4.3, y se selecciona un botalón ubicado a 0,5 m de altura, con boquillas Lurmark 31-03-F110 separadas en 0,5 m. En la Figura 5.9 se compara la deriva de pulverización obtenida mediante simulación para $N = 1$ (i.e., una única boquilla) y para $N = 30$ (i.e., botalón). La presencia de las múltiples boquillas produce un aumento en la curva de deriva, lo cual es lógico debido a la sumatoria de funciones de deposición. Para $x_{dep} = 1$ m, por ejemplo, Y aumenta desde 5% (1 boquilla) hasta aproximadamente 14% (30 boquillas).

En la Figura 5.10 se presentan los valores de deriva (Y) para 1 y 5 m en función del número de boquillas. Si $x_{dep} = 0$ es la posición de la última boquilla del botalón respecto al

viento, el aporte de volumen de cada boquilla del botalón depende de la separación ellas (Ecuaciones 5.7 y 5.8). Se observa que aún las últimas boquillas del botalón contribuyen a la deriva. Para $N > 10$, un aumento en el número de boquillas tiene un mayor impacto relativo en $x_{dep} = 5$ m que en $x_{dep} = 1$ m.

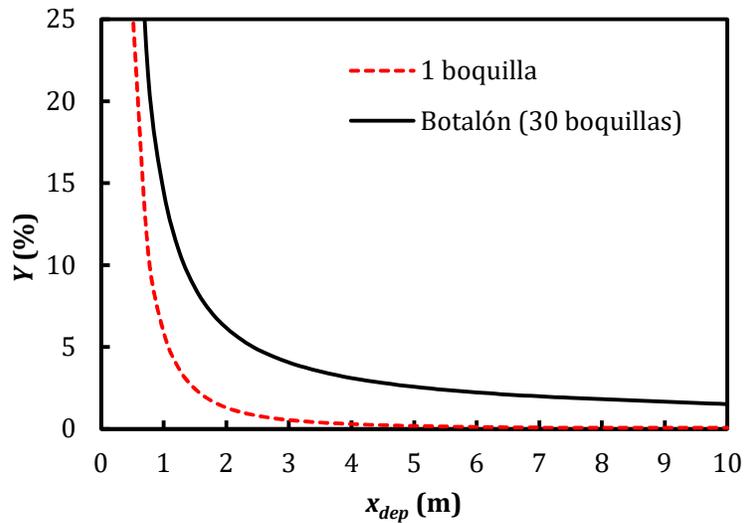


Figura 5.9. Deriva de pulverización para $N=1$ y $N=30$.

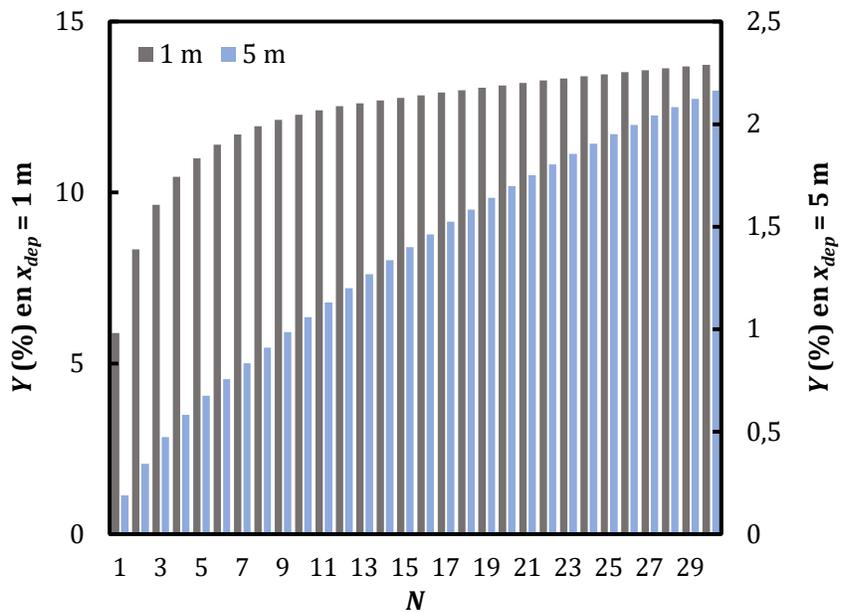


Figura 5.10. Deriva de pulverización de compuestos no volátiles para distancias de deposición de 1 y 5 m en función del número de boquillas.

5.4.2 Cobertura (# impactos/cm²)

La cobertura, definida en número de impactos de gota por unidad de área, es una medida de la cantidad de gotas que se deposita en un lugar determinado, y, es un parámetro frecuentemente utilizado para medir la calidad de aplicación.

Teniendo en cuenta la Ecuación 3.4, la cobertura queda definida por:

$$Cob = \frac{F Y^S(x_{dep})}{\frac{\pi}{6} d_{NV50}^3} \quad (5.30)$$

donde d_{NV} es el diámetro medio número-volumen de la dosis depositada, el cual se obtiene a partir de la Ecuación 5.29:

$$\frac{1}{d_{NV50}^3} = \int_0^{\infty} \frac{\bar{\Gamma}^S_{disp,bot}(d_{dep}, x_{dep})}{d_{dep}^3} dd_{dep} \quad (5.31)$$

Debido a que la cobertura aumenta al disminuir los diámetros de gotas depositadas, parecería entonces conveniente pulverizar utilizando gotas lo más pequeñas posibles. Sin embargo, se genera una situación de compromiso en la selección de las condiciones de atomización, ya que las gotas pequeñas tienen más riesgo de deriva.

La cobertura recomendada varía de acuerdo al tipo de aplicación (Cid, 2014), valores típicos se ubican desde 20 a 70 # de impactos por cm².

El análisis de sensibilidad realizado para deriva se extiende en esta sección para la variable Cobertura. En este sentido, en la Figura 5.11 se compara el valor de esta variable para el caso base (definido en la Sección 5.4.1) respecto a las coberturas calculadas cuando se aplican cambios de +50% en la presión de pulverización, la altura de botalón, la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa. Cabe aclarar que los resultados presentados en la Figura 5.11 corresponden a la cobertura calculada justo debajo de la última boquilla del botalón ($x_{dep}=0$ m). Como puede observarse, la cobertura demostró alta sensibilidad ante la velocidad de viento y altura de botalón.

5.4.3 Diagrama de recomendaciones de pulverización con baja deriva

El propósito último del desarrollo de los modelos presentados en esta Tesis es contribuir a la agricultura de precisión mediante el uso de la herramienta matemática para lograr buenas prácticas agrícolas, y en el futuro ejercer un control en tiempo real de la pulverización. Por esta razón, en esta sección se presentan diferentes modos en los que el modelo podría actuar a los efectos de realizar recomendaciones para pulverizar.

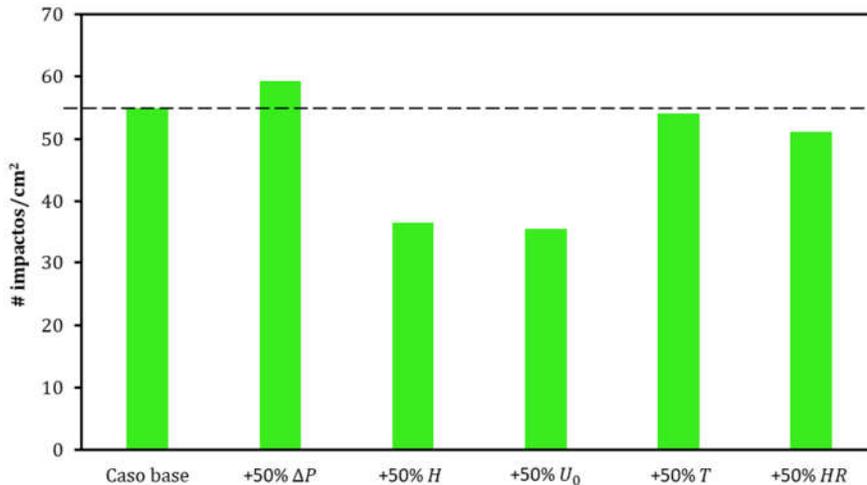


Figura 5.11. Sensibilidad de cobertura respecto a variables de proceso.

De acuerdo a las prácticas actuales de pulverización, el aplicador debe conocer las condiciones de clima y la dosis requerida de fitosanitario (F) antes de planificar la pulverización, variables que no puede modificar. Por otra parte, el aplicador define o ha definido previamente a la pulverización la configuración del botalón (altura de botalón, tipo, número y separación de boquillas). Si las condiciones de clima no son restrictivas, el aplicador selecciona (en función de su percepción o recomendación de terceros) la velocidad de avance (v_A) o la presión de pulverización de trabajo (ΔP). Luego de la pulverización, el aplicador controla la calidad de pulverización usando tarjetas hidrosensibles y toma acciones correctivas post pulverización si son necesarias.

El modelo desarrollado en el Capítulo 4 y extendido en este Capítulo, puede incluirse en un sistema que opere en tiempo real abordo de la máquina de pulverizadora tanto para que realice recomendaciones o ejerza acciones de control en línea a fin mantener valores de deriva y cobertura en los niveles deseados. Dentro de los múltiples modos en los que puede operar el software, en la Figura 5.12 se ilustra un posible algoritmo de funcionamiento. En base a la dosis requerida, las condiciones de clima, la configuración de botalón y el valor de una variable seleccionada por el aplicador (v_A o ΔP), mediante el modelo es posible predecir la deriva (Y) y la cobertura (Cob). Al comparar estos valores respecto al valor mínimo de cobertura (ε) (recomendado por el fabricante de fitosanitario) y al valor máximo de deriva (δ) (restringido por legislación y/o pérdida aceptable) se pueden ejercer o recomendar acciones correctivas en caso de ser necesarias. Si bien en la Figura 5.12 se presenta una opción de cálculo centrada en recomendación de acciones correctivas aplicables durante la pulverización, el sistema podría sugerir modificaciones en la configuración del botalón a fin de poder realizar pulverizaciones en condiciones climáticas adversas o con menores derivas.

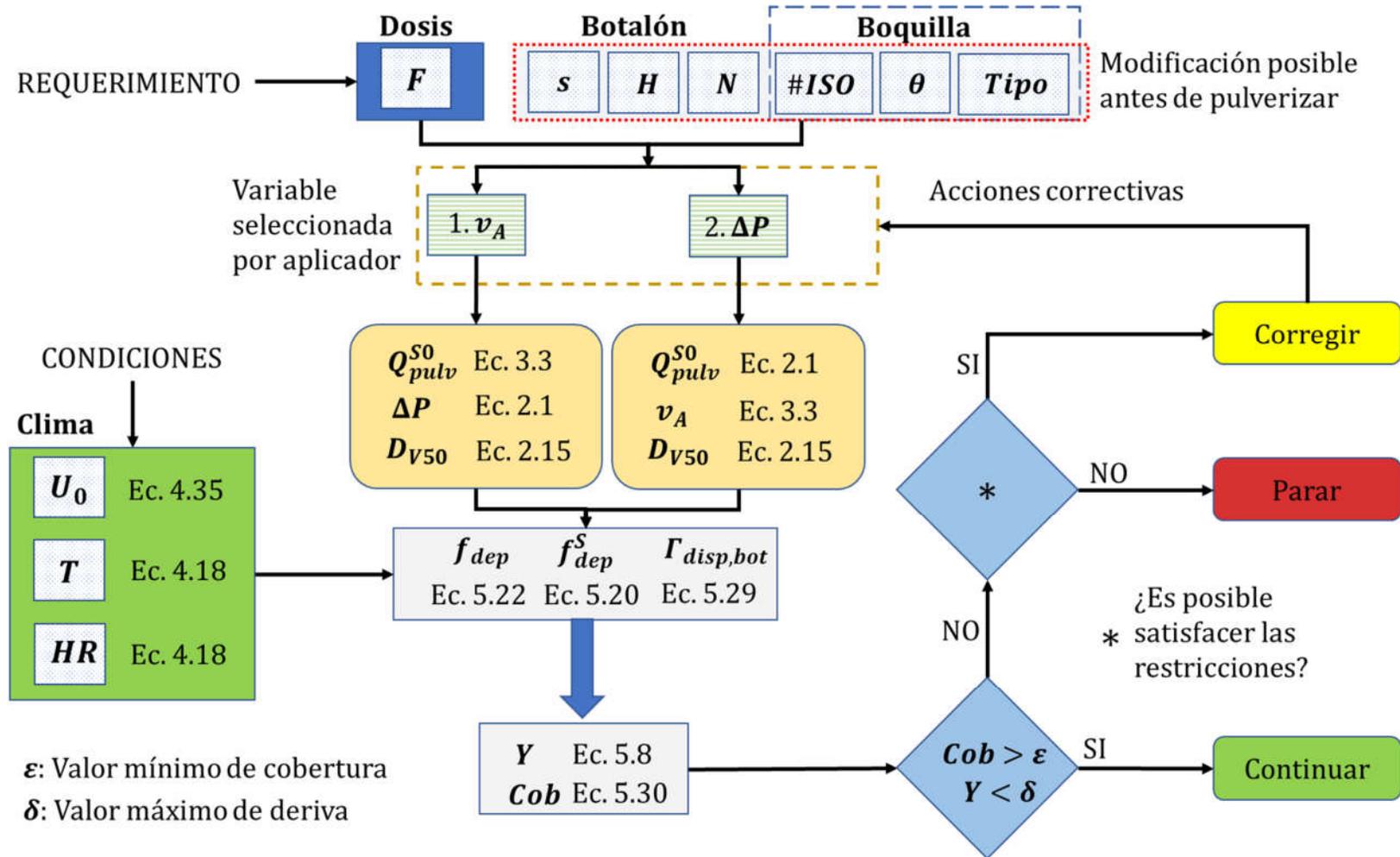


Figura 5.12. Esquema de cálculo para realizar recomendaciones en línea.

A fin de ilustrar las posibilidades de aplicación del modelo predictivo, en la Figura 5.13 se propone un diagrama formado por tres gráficos que relacionan los resultados de deriva simulados con variables directas que el aplicador puede manejar durante la pulverización. En particular, el diagrama de la Figura 5.13 se construyó para las condiciones descritas en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Configuración de boquilla/botalón y condiciones ambientales utilizadas en los diagramas de recomendaciones

	Variable	Valor
Botalón		
	Número de boquillas (N)	30
	Separación (s)	0,5 m
	Altura (H)	0,5m
Boquilla		
	Tipo	Abanico plano
	Ángulo de aerosol (θ)	110°
Clima		
	Temperatura ambiente (T)	16,1°C
	Humedad relativa (HR)	66%

En la Figura 5.13, el gráfico ubicado en la parte inferior izquierda relaciona el caudal pulverizado por boquilla (eje y) con la dosis de aplicación F (eje x), para diferentes velocidades de avance de la máquina pulverizadora (Ecuación 3.2). El gráfico ubicado en la parte inferior derecha relaciona el caudal por boquilla (eje y) con la presión de pulverización (eje x), para 4 boquillas de diferente clasificación ISO 10625:2005 (distintos caudales nominales, ver Tabla 2.2). Además, las líneas discontinuas de este gráfico indican valores constantes de D_{V50} , los cuales fueron obtenidos mediante la Ecuación 2.15 del modelo de atomización presentado en el Capítulo 2. Por último, el gráfico de la parte superior derecha relaciona la deriva de pulverización Y , calculada a 1 m de distancia del botalón, con la presión de pulverización (eje x) para 4 colores de boquilla y 3 velocidades de viento. Para obtener este diagrama, se realizaron distintas simulaciones con el modelo matemático presentado en este capítulo.

Para ejemplificar el uso del diagrama, se considera un caso de estudio en el que la dosis deseada de aplicación es 220 l/ha, la pulverización se realiza con boquillas 03 (color azul) y la velocidad de avance de la pulverizadora es de 12 km/h. La velocidad del viento se asume igual a 5 km/h.

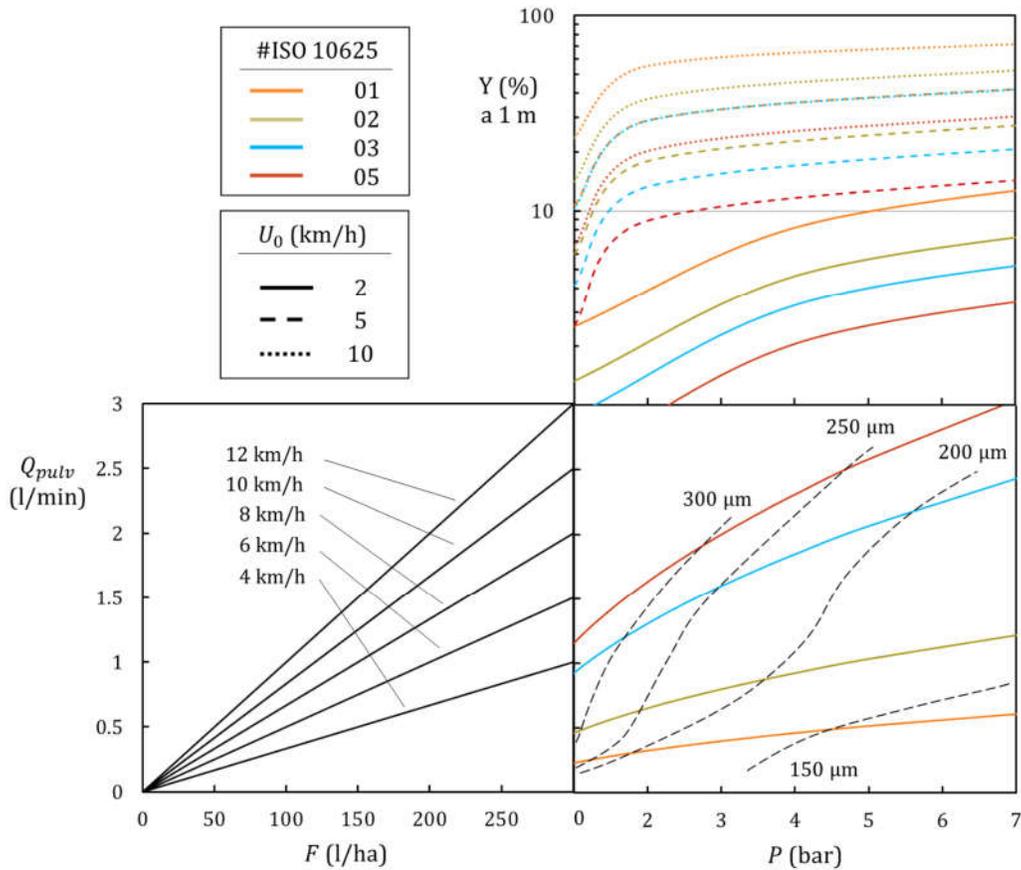


Figura 5.13. Diagrama de condiciones de pulverización.

Para calcular la deriva de pulverización, en el gráfico inferior izquierdo se ingresa con $F = 220$ l/ha, como se indica en el punto A de la Figura 5.14, y se interseca con la recta correspondiente a $v_A = 12$ km/h (punto B). El punto C indica que el caudal pulverizado por boquilla debe ser 2,2 l/min para cumplir con la dosis requerida (i.e., satisfacer Ecuación 3.3). Trazando una línea horizontal desde el punto B hacia el gráfico inferior derecho hasta intersectar la curva de boquillas 03 (curva azul, punto D), es posible estimar que la presión de pulverización necesaria para lograr ese caudal es 5,9 bar (punto E). Además, trazando una línea vertical hacia el gráfico superior derecho hasta intersectar la curva correspondiente a boquillas 03 y 5 km/h de velocidad de viento (punto F), se encuentra que la deriva de pulverización a 1 m de distancia es aproximadamente $Y = 15\%$. Como información adicional, el punto D indica que el D_{V50} de las gotas atomizadas es aproximadamente 200 μm .

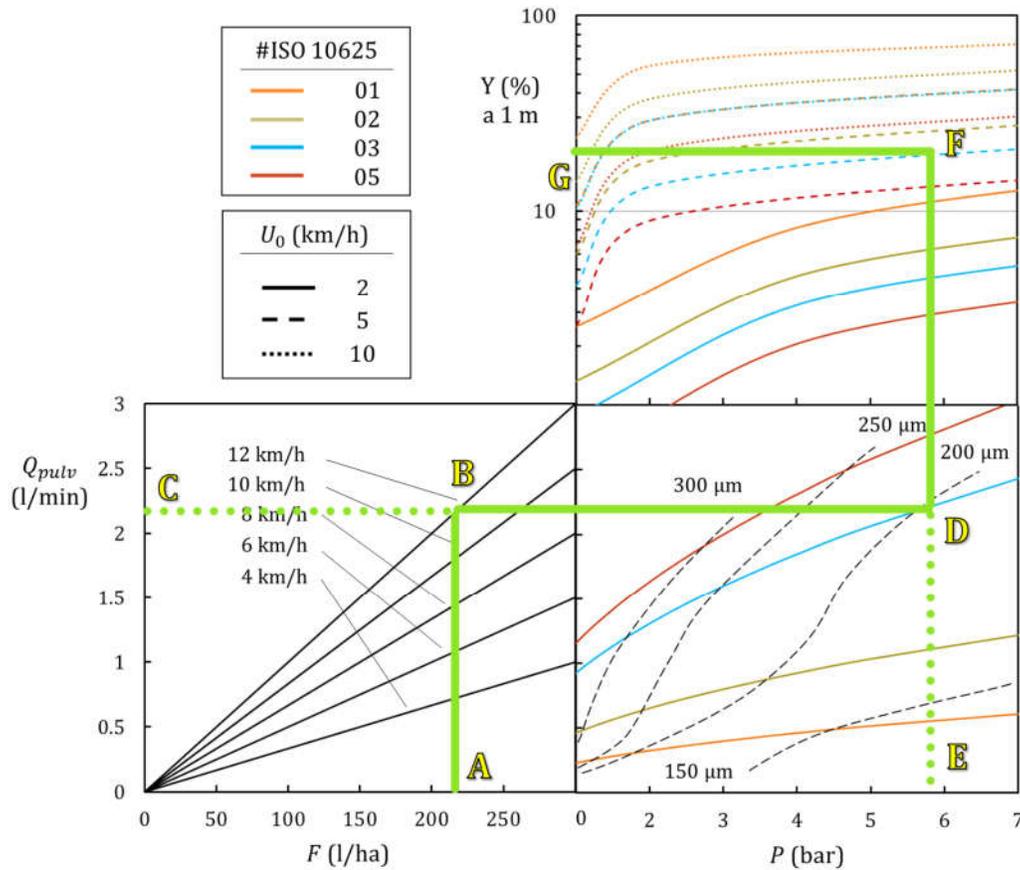


Figura 5.14. Diagrama de condiciones de pulverización. Caso de estudio: Estimación de la deriva.

El diagrama de la Figura 5.14 también permite visualizar el impacto que tiene la velocidad del viento sobre la deriva. Para velocidades de viento de 10 km/h, el valor de Y asciende a 30%. Por otro lado, si la velocidad de viento es de 2 km/h, el valor de Y disminuye a 4%.

Continuando con el caso de estudio, se propone modificar la presión de pulverización para reducir la deriva. La Junta para la Autorización de Pesticidas (Board for the Authorization of Pesticides, CTB) (Holanda) sugiere un límite máximo $Y = 10\%$ a 1 m de distancia (van de Zande et al., 2007). Si, para este caso de estudio, se fija este valor de deriva como límite admisible, se obtiene el punto A de la Figura 5.15. Si a partir de este punto se ingresa horizontalmente hasta intersectar la curva correspondiente a boquillas 03 y viento de 5 km/h (punto B), es posible trazar una línea vertical hasta el punto D y determinar que la presión de pulverización debe ser reducida a aproximadamente 1 bar para lograr el objetivo definido para la deriva. Además, una línea horizontal desde el punto C hacia la izquierda permite establecer que el caudal pulverizado por boquilla será 1.1 l/min. Por último, la intersección de esta línea horizontal con $F = 220$ l/ha (punto G) indica que la

pulverizadora debe reducir su velocidad de avance a 6 km/h. Se requerirá, por lo tanto, el doble de tiempo para llevar a cabo la aplicación.

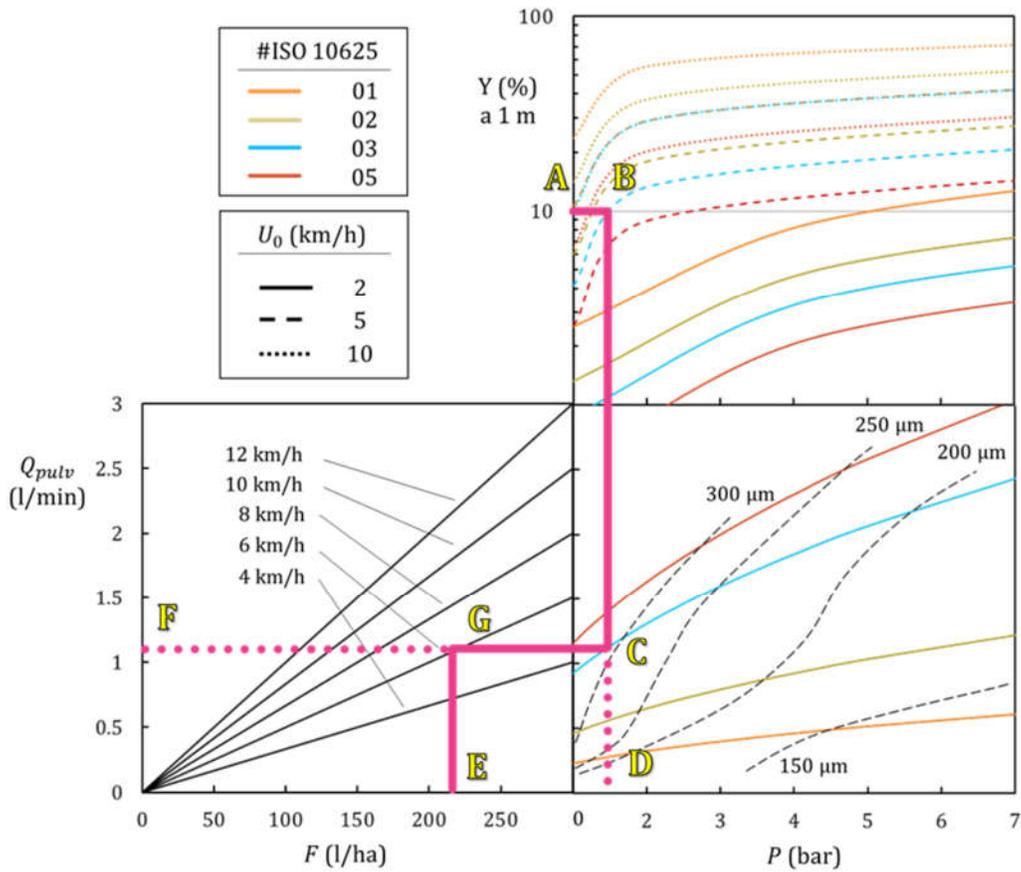


Figura 5.15. Diagrama de condiciones de pulverización. Caso de estudio: Presión de pulverización para reducir la deriva.

Para no reducir la velocidad de avance de la máquina pulverizadora hasta 6 km/h, una alternativa es cambiar las boquillas (cambio que no puede hacerse en línea, pero que es factible de realizar antes de iniciar la pulverización). En la Figura 5.16, se propone cambiar las boquillas 03 por boquillas 05. Ingresando desde el punto A con $Y = 10\%$, intersectando en la curva para boquillas 05 con velocidad de viento 5 km/h (punto B), y descendiendo verticalmente hasta el punto D, se obtiene que la presión de pulverización necesaria es 2.6 bar. Para esta presión, el punto G indica que el caudal pulverizado será 1.8 l/min y que una velocidad de avance de la pulverizadora de 10 km/h permitirá cumplir con el objetivo de deriva propuesto.

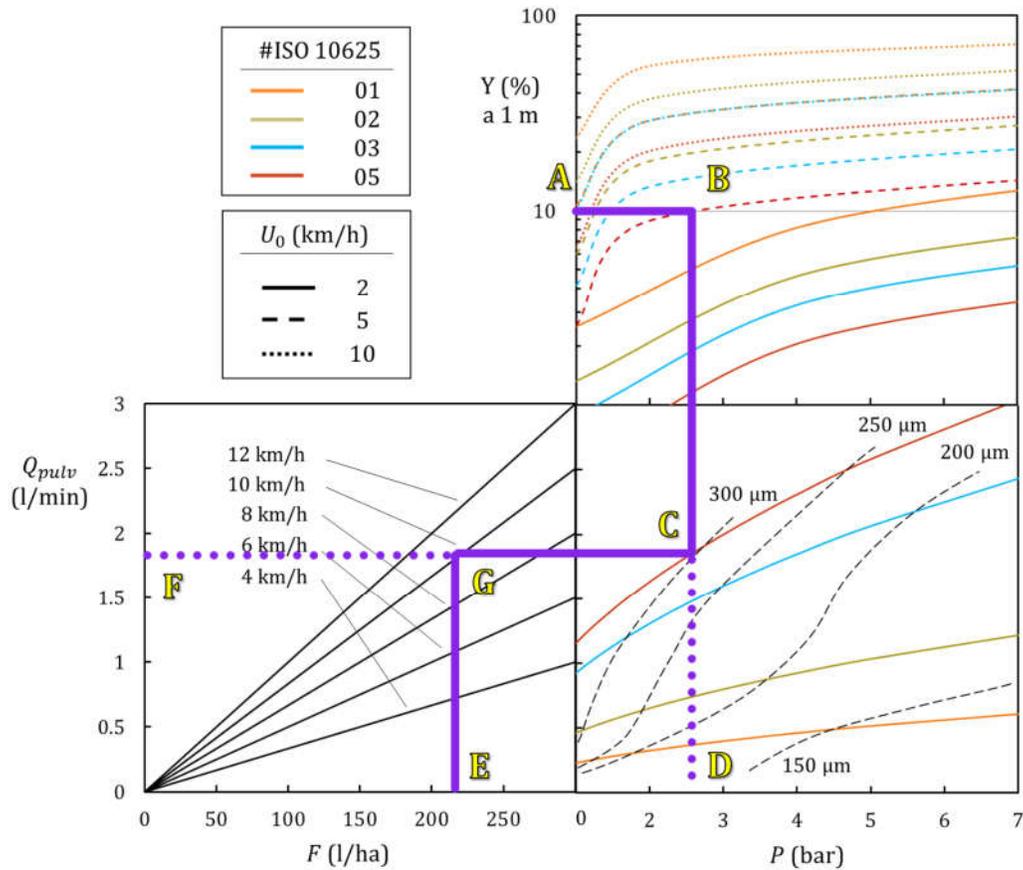


Figura 5.16. Diagrama de condiciones de pulverización. Caso de estudio: Presión de pulverización y cambio de boquillas para reducir la deriva.

Actualmente los aplicadores recurren al asesoramiento de expertos para decidir si pueden pulverizar un determinado día con condiciones climáticas particulares, definir presiones de atomización, regular la velocidad de la máquina o bien seleccionar boquillas adecuadas. Estos expertos viajan grandes distancias quizás diariamente y a veces no logran ayudar a los aplicadores en el momento que lo necesitan. En este contexto el modelo desarrollado, que es una herramienta que permite tomar decisiones inteligentes para minimizar la deriva, constituiría un avance tecnológico en el campo de la agricultura de precisión.

5.5 Conclusiones

El modelo para múltiples boquillas presentado en este Capítulo es una extensión de la representación matemática desarrollada para una única boquilla. Adicionalmente, el modelo completo incluye los efectos de la dispersión turbulenta mediante una función de distribución. Los coeficientes de dispersión de dicha función fueron ajustados utilizando datos de deriva experimental reportados en la literatura. Los valores mínimos y máximos

de los coeficientes de dispersión se encontraron dentro del rango de valores reportados en la literatura. En particular, la correlación de la difusividad de remolino en función de la humedad relativa del aire ambiente resultó adecuada para predecir adecuadamente la calidad de aplicación.

Los resultados de la simulación presentaron una buena correspondencia con datos experimentales de diferentes autores (no utilizados en la etapa de calibración del modelo), obtenidos para una gran variedad de condiciones climáticas, boquillas, presiones de pulverización y alturas de botalón.

Para distancias menores a 3m, se observó buena concordancia entre los resultados experimentales y los calculados utilizando el modelo sin considerar dispersión. En cambio, para mayores distancias, el modelo sin dispersión subestimó la deriva en todos los casos analizados.

Del análisis del impacto del número de boquillas en el proceso de pulverización, se observó que el efecto del número de boquillas utilizadas genera un mayor impacto relativo en la deriva depositada a 5 m que a 1 m.

Al comparar los datos de la mediana en volumen de la distribución de gotas depositadas y reportadas por diversos autores y con los calculados, se comprobó que el modelo pudo predecir satisfactoriamente el D_{V50} de las gotas depositadas. Esto significa que el modelo provee información que puede ser fácilmente comparada con datos provenientes del análisis de tarjetas hidrosensibles de experiencias en campo.

La velocidad del viento y altura de botalón son las variables que más afectan la cobertura. La presión de pulverización y la humedad relativa tienen un menor efecto sobre el número de impactos/cm², mientras que los cambios en la temperatura causan efectos prácticamente despreciables.

El modelo desarrollado permite correlacionar *ex ante* cambios en variables conocidas por los aplicadores sobre la deriva y cobertura. Por esto, el modelo es una herramienta válida para incluir en un sistema de control a fin de realizar pulverizaciones cumpliendo restricciones de deriva y cobertura. Por otro lado, las cartas de operación, que pueden construirse a partir del modelo, ofrecen información útil para la toma de decisiones fuera de línea por parte de los aplicadores.

Capítulo 6

Conclusiones generales y tareas futuras

En esta Tesis se desarrolló un modelo predictivo de la calidad de pulverización agrícola, para aplicaciones terrestres por botalón, cuyas características permiten recomendar acciones correctivas o ejercer acciones de control en línea. Su base fenomenológica, abordaje matemático integral que permite su resolución en pocos segundos, validación y conceptualización del uso de variables de entrada y salida aptas para ser cargadas/interpretadas por aplicadores lo posicionan como una herramienta de valor para contribuir a la agricultura sostenible.

En particular, el modelo permite estimar el efecto de los parámetros de pulverización seleccionados por el aplicador (velocidad de la máquina pulverizadora, tipo y número de boquillas de atomización, presión, altura de barra pulverizadora) y las condiciones ambientales (velocidad del viento, humedad relativa y temperatura) sobre el valor de deriva y la cobertura. Permite, por lo tanto, en función de los estudios y correlaciones desarrollados en esta Tesis, predecir la calidad de la pulverización en función de datos de fácil acceso.

El modelo cuenta con un módulo inicial que estima la distribución de tamaño de gotas atomizadas mediante una función upper-limit log-normal ajustada, la cual se ha podido correlacionar satisfactoriamente con la mediana de la distribución de tamaño de gotas atomizadas (D_{V50}). A su vez, se ha propuesto una correlación para el cálculo del D_{V50} en función de la presión de pulverización, código ISO de boquilla y ángulo de aerosol, (variables conocidas por los aplicadores tanto porque las eligen o porque las brindan los proveedores de boquillas) que permite predecir satisfactoriamente este diámetro para boquillas de abanico plano convencionales, pre-orificio y con inducción de aire de diferentes marcas.

El modelado del proceso de pulverización para boquillas únicas permitió verificar que para experimentos desarrollados en condiciones controladas, la representación fenomenológica del proceso de pulverización planteada fue adecuada. En efecto, fue posible predecir la calidad de pulverización sin uso de parámetros de ajuste. La representación de las gotas mediante una función de distribución bivariable, basada en las distribuciones de tamaño y espacial de gotas atomizadas, permitió representar adecuadamente a las gotas desde que son atomizadas, pasando por su etapa en vuelo, hasta su deposición. Esta conclusión surge del proceso de validación realizado con datos experimentales reportados en literatura. La validez del modelo de una boquilla fue comprobada para diferentes tipos

de boquillas analizadas y condiciones de aplicación. Por lo tanto, se concluye que el modelo es una herramienta válida para analizar el efecto de cambios en variables de operación, de clima y del tipo y modelo de boquilla sobre parámetros de calidad de la pulverización. En concordancia con los hallazgos reportados por otros autores, se encontró que cambios en la velocidad del viento, altura de botalón y presión de pulverización generan una influencia significativa sobre la deriva mientras que la temperatura y la humedad relativa producen efectos despreciables.

Tomando como base el modelo para una boquilla, se extendió el modelo a pulverización de botalón (i.e., para múltiples boquillas). Para este caso, se incorporó el efecto de dispersión turbulenta de gotas para predecir adecuadamente la deriva en distancias mayores a 2 o 3 metros. En este caso fue necesario ajustar los parámetros de dispersión. Luego de la etapa de calibración del modelo, se comprobó que versión ajustada fue capaz de predecir satisfactoriamente la deriva de ensayos experimentales de varios autores (i.e. diferentes condiciones de operación, de clima y de configuración del botalón). Como era de esperar, la deriva de pulverización correspondiente a un botalón fue mayor que la deriva de una única boquilla. Al comparar los resultados del modelo con y sin dispersión, se observó que los efectos de dispersión son más significativos para distancias de deposición mayores a 3 metros aproximadamente. El análisis de sensibilidad realizado para analizar el efecto de cambios en variables de operación o climáticas sobre la deriva produjo similares resultados que para una boquilla. La única excepción a esto fue la humedad relativa, variable que se encontró que afectó significativamente el parámetro de dispersión. Por esta razón, las variaciones en HR para el modelo con múltiples boquillas impactaron en la deriva de manera más significativa que para el caso de boquilla única.

El modelo de múltiples boquillas, además de predecir satisfactoriamente datos de deriva, fue capaz de representar adecuadamente datos experimentales relacionados con la distribución de tamaño gotas depositadas. Esto, en conjunto con la capacidad predictiva de la deriva, permite concluir que el modelo de botalón permite correlacionar adecuadamente las variables de operación, las condiciones de clima y la configuración del botalón con la deriva y la cobertura.

El modelo puede configurarse de diversas maneras de acuerdo a las variables de entrada que se conozcan y las respuestas que se deseen especificar o controlar. Para ilustrar su versatilidad, en el Capítulo 5 se introdujeron ejemplos de modos operativos del modelo para realizar recomendaciones en línea. Para ello, se presentaron cartas operativas que permiten calcular variables de salida o bien fijar respuestas y calcular variables de entrada al modelo. Por ejemplo, si se fija un límite al valor de deriva correspondiente a 1 m de

distancia, las cartas operativas permiten establecer combinaciones de presión de pulverización, tipo de boquilla y velocidad de avance de la pulverizadora que aseguran una dosis de aplicación deseada. Estas cartas también brindan el D_{V50} de las distribuciones atomizadas lo que le permitiría al aplicador corroborar si este parámetro es adecuado para la pulverización del fitosanitario en cuestión (diferentes fitosanitarios y tipos de suelo/cultivo requieren gotas con tamaños en rangos específicos).

La presente Tesis Doctoral se enmarca dentro de un proyecto tendiente a desarrollar un prototipo para el control y optimización en tiempo real de pulverización de agroquímicos, mediante la integración de sensores y modelos matemáticos en una plataforma tecnológica portable, apta para integrarse a distintas unidades de fumigación terrestres. Para ello, en 2019 fue aprobado un PICT Start-Up para desarrollar dicho dispositivo. El prototipo será validado en unidades de pulverización terrestre, comparando mediciones en campo con las predicciones de la unidad desarrollada. Se prevé que el dispositivo pueda ser posteriormente adaptado a otros equipos de pulverización (tripulados y no tripulados, terrestres y aéreos). Se prevé que el prototipo realice recomendaciones en tiempo real para optimizar la calidad de pulverización. Para ello, el software recibirá la medición continua de las condiciones ambientales, la velocidad del vehículo y los parámetros de la máquina pulverizadora. Como característica adicional, y a los efectos de corregir eventuales errores en la predicción de la calidad de pulverización, se proyecta monitorear la pluma de gotas mediante cámaras que interactúen con el dispositivo.

El modelo matemático desarrollado en esta Tesis será incorporado en dicho dispositivo. En función de la información de entrada, calculará la distribución de tamaño de gotas depositadas, la superficie cubierta, los litros/ha depositados en el área objetivo y consecuentemente la deriva estimada. En función de estos datos el software recomendará ajustes de parámetros y condiciones operativas antes de iniciar el tratamiento. Durante el proceso de pulverización, la densidad y dispersión de la nube de pulverización provistas por las cámaras serán parámetros de retroalimentación para efectuar acciones correctivas en tiempo real. Se prevé que el software cuando opere en modo recomendación informe al aplicador (con código tipo semáforo) si: a) la pulverización se está realizando correctamente, b) se aconseja modificar las condiciones de aplicación debido a que la deriva de pulverización es considerable, o c) debe parar y suspender la aplicación ya que bajo las condiciones imperantes la deriva no cumple con las restricciones impuestas. El software podrá integrarse a sistemas de control para realizar acciones correctivas automáticas, esta opción será evaluada durante el desarrollo del proyecto PICT-Start up.

Capítulo 6

Luego de un extenso estudio de benchmarking realizado por el equipo de trabajo, no se han identificado en el mercado internacional herramientas con las prestaciones mencionadas. Por esta razón, el desarrollo podría tener una escala de aplicación global.

Apéndice A

Funciones de distribución

Una *función de distribución* (también llamada *función de probabilidad* o *función densidad* en el campo de la estadística) es una función matemática que define la frecuencia con que una propiedad, se repite (Ramkrishna, 2000). Un ejemplo son las funciones de distribución de tamaño de gota (DSD), mencionadas en la Sección 2.3. En la Tabla 2.7 se presentaron diferentes funciones para describir DSDs. Dentro de las funciones estudiadas, la distribución ULLN fue capaz de describir apropiadamente las DSDs de boquillas de uso agrícola:

$$f_d(d) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{d_{max}}{\ln \sigma_{ul}} \frac{d}{d_{max} - d} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(a_{ul}d) - \ln(d_{max}-d)}{\ln \sigma_{ul}} \right]^2} & d < d_{max} \\ 0 & d \geq d_{max} \end{cases} \quad (2.10)$$

Debido a que los modelos planteados en esta Tesis se basan en funciones densidad, a continuación se presentan propiedades fundamentales de dichas funciones:

- i)** En forma general, para una función de distribución $f_x(x)$, siendo x la variable independiente cuyo dominio se encuentra en el rango entre 0 e ∞ , la condición de normalidad exige que se cumpla la siguiente relación:

$$\int_0^{\infty} f_x(x) dx = 1 \quad (A.1)$$

- ii)** Las funciones de distribución pueden ser univariadas (p.ej., Ecuación A.1), o multivariadas. Por ejemplo, para una función bivariable $f_{xy}(x, y)$, la condición de normalidad exige que se verifique:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_{xy}(x, y) dx dy = 1 \quad (A.2)$$

- iii)** Las funciones de distribución se pueden obtener a partir de funciones acumuladas. Si $F_x(x)$ es la función acumulada de $f_x(x)$, se cumple que:

$$f_x(x) = \frac{dF_x(x)}{dx} \quad (A.3)$$

$$F_x(x) = \int_0^x f_x(x) dx \quad (\text{A.4})$$

iv) Análogamente, para una función bivariable, si $F_{xy}(x, y)$ es la función acumulada de una $f_{xy}(x, y)$, se cumple:

$$f_{xy}(x, y) = \frac{\partial^2 F_{xy}(x, y)}{\partial x \partial y} \quad (\text{A.5})$$

$$F_{xy}(x, y) = \int_0^y \int_0^x f_{xy}(x, y) dx dy \quad (\text{A.6})$$

v) Dos funciones de distribución $f_x(x)$ e $f_y(y)$ que describen la misma población, pero cuya variable independiente es diferente (x e y , respectivamente), están relacionadas mediante la siguiente ecuación:

$$f_y(y)dy = f_x(x)dx \quad (\text{A.7})$$

En otros términos:

$$f_y(y) = f_x(x) \frac{dx}{dy} \quad (\text{A.8})$$

La Ecuación A.8 permite realizar cambios de variable manteniendo la condición de normalidad. A modo de ilustración, si se desea convertir la función $f_d(d)$ de la Ecuación 2.10 a una función de distribución de superficie de gota $f_\xi(\xi)$, entonces aplicando la Ecuación A.8 para gotas esféricas se obtiene:

$$f_\xi(\xi) = f_d(d) \frac{dd}{d\xi} = f_d(d) \frac{dd}{d(\pi d^2)} = \frac{f_d(d)}{2\pi d} \quad (\text{A.9})$$

Remplazando la Ecuación 2.10 en A.9, se obtiene la distribución de superficie de gota:

$$f_\xi(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \ln \sigma_{ul}} \frac{d_{max}}{d^2(d_{max} - d)} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(a_{ul}d) - \ln(d_{max} - d)}{\ln \sigma_{ul}} \right]^2} & d < d_{max} \\ 0 & d \geq d_{max} \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

en donde $d = \sqrt{\xi/\pi}$.

vi) Normalmente las funciones de distribución contienen parámetros (p.ej., a_{ul} , σ_{ul} y d_{max} en la Ecuación 2.10), estos parámetros suelen presentarse en las ecuaciones después de un símbolo | de la siguiente manera:

$$f_d(d|a_{ul}, \sigma_{ul}, d_{max}) \quad (\text{A.11})$$

La notación anterior implica que la distribución de probabilidades de d descrita es para los valores particulares de los parámetros $a_{ul}, \sigma_{ul}, d_{max}$.

Si una variable es dependiente de otra, la probabilidad de la misma será dependiente del valor que tome la segunda variable. Un ejemplo de esto es x_{dep} , el cual depende de d_0 por las Ecuaciones 4.40 y 4.41. Debido a esto, la probabilidad de x_{dep} está condicionada por el valor que toma d_0 y se utiliza la misma notación que para los parámetros:

$$f_{x_{dep}}(x_{dep}|d_0) \quad (A.12)$$

La notación anterior, al referirse a dos variables se denomina **función de distribución condicional** y su expresión estará determinada por la relación entre ambas variables.

En el caso de que las variables sean independientes (ejemplo d_0 y x_0) se cumple lo siguiente:

$$f_{x_0}(x_0|d_0) = f_{x_0}(x_0) \quad (A.13)$$

De modo que la expresión de la distribución condicional es idéntica a la función de distribución de la variable única en cuestión.

De la misma manera y teniendo en cuenta que las funciones distribución bidimensionales pueden expresarse producto de dos funciones unidimensionales, un ejemplo de función bidimensional condicional queda dado por:

$$f_{d,x_{dep}}(d_0, x_{dep}) = f_{x_{dep}}(x_{dep}|d_0)f_{d_0}(d_0) \quad (A.14)$$

Si las variables son dependientes, es necesario conocer la expresión que define la distribución condicional. En caso contrario, la función condicional de una variable respecto a otra es la propia distribución de probabilidad (i.e., Ecuación A.13) por lo que es posible expresar la función de distribución bivariable como el producto de dos funciones independientes:

$$f_{d,x_0}(d_0, x_0) = f_{x_0}(x_0)f_{d_0}(d_0) \quad (A.15)$$

vii) Si se conoce la función bivariable $f_{xy}(x, y)$, la función de distribución respecto de x (para todo y) es:

$$f_x(x) = \int_0^{\infty} f_{xy}(x, y)dy \quad (A.16)$$

Análogamente, la función de distribución respecto de y (para todo x) es:

Apéndice A

$$f_y(y) = \int_0^{\infty} f_{xy}(x, y) dx \quad (\text{A.17})$$

Al utilizar las ecuaciones A.16 y A.17, se dice que $f_x(x)$ y $f_y(y)$ son las funciones de distribución *marginales* de $f_{xy}(x, y)$.

viii) Si dos variables x e y son mutuamente independientes, una función bivariable puede expresarse como un producto de funciones univariadas:

$$f_{xy}(x, y) = f_x(x)f_y(y) \quad (\text{A.18})$$

Nomenclatura

Todas las variables reportadas en las ecuaciones utilizan unidades del sistema internacional, a excepción de que se aclare lo contrario. En el texto pueden encontrarse valores reportados en unidades fuera del sistema internacional para facilitar la lectura o expresar variables en unidades comúnmente utilizadas en el ámbito de la pulverización agrícola.

Variable	Descripción	Unidad
a	Parámetro de ajuste modelo Smith et al. (2000)	$m^3 m^{-2}$
a_H	Eje de mayor longitud de elipse	m
a_{NT}	Parámetro de ajuste de función NT	m^{-2}
a_{ul}	Parámetro de ajuste de función <i>ULLM</i>	m
A_A	Área tratada durante la aplicación	m^2
A_b	Área de orificio de salida de la boquilla	m^2
A_0	Parámetro de ajuste modelo <i>Holandés</i>	%
A_1	Parámetro de ajuste modelo <i>Holandés</i>	%
b_H	Eje de menor longitud de elipse	m
b_j	Parámetro de ajuste modelo Smith et al. (2000) para variable p_j	—
b_{NT}	Parámetro de ajuste de función NT	$m^{-(q_{NT})}$
B_0	Parámetro de ajuste modelo <i>Holandés</i>	m
B_1	Parámetro de ajuste modelo <i>Holandés</i>	m
C	Desviación respecto a deposición ideal	m
C_1	Constante de ajuste modelo de dispersión	$m^{(1-C_2)}$
C_2	Constante de ajuste modelo de dispersión	—
C_a	Coefficiente de arrastre	—
C_d	Coefficiente de descarga de la boquilla	—
C_i	Concentración espacial de nube de gotas	$kg m^3$
C_{PH}	Constante ecuación de Post y Hewitt (2018)	m
C_{dep}	Concentración volumétrica de no volátiles en gotas depositadas	—
C_{pulv}	Concentración volumétrica de no volátiles en gotas pulverizadas	—
Cob	Cobertura	$\# m^{-2}$
d	Diámetro de gota	m
d_0	Diámetro de las gotas a la salida de la boquilla	m
d_g	Parámetro de ajuste de función log-normal	m
d_H	Diámetro hidráulico de boquilla	m
d_p	Diámetro proyectado	m
d_{RR}	Parámetro de ajuste de función RR	m
d_{crit}	Máximo diámetro que es afectado apreciablemente por el arrastre	m
d_{dep}	Diámetro de la gota en el punto de deposición	m
d_{max}	Parámetro de ajuste de función <i>ULLN</i>	m
d_{min}	Diámetro mínimo de gota que se depositará	m
d_{NV50}	Diámetro medio número-volumen	m
D_y	Difusividad de remolino en dirección y	$m^2 s^{-1}$

Nomenclatura

D_z	Difusividad de remolino en dirección z	$m^2 s^{-1}$
D_z'	Parámetro de dispersión de modelo de deriva de botalón	$m^{(3-2C_1)} s^{-1}$
D_{V50}	Diámetro medio en volumen	m
D_{V10}	Diámetro para el cual las gotas de menor tamaño constituyen el 10% del total de volumen	m
D_{V90}	Diámetro para el cual las gotas de menor tamaño constituyen el 90% del total de volumen	m
D_{N50}	Diámetro medio en número	m
P	Presión de pulverización	Pa
F	Volumen pulverizado por unidad de área - Dosis	$m^3 m^{-2}$
f_α	Función densidad en trayectoria inicial	m^{-1}
f_d	Función densidad en el diámetro	m^{-1}
$f_{d\alpha}$	Función densidad de diámetro y trayectorias de spray	$m^{-1 \circ -1}$
f_{dep}	Función densidad de volumen depositado marginal en distancia depositada	m^{-1}
$f_{d,x_{dep}}$	Función bi variable en diámetro y distancia de deposición. Modelo sin dispersión	m^{-2}
$f_{d,x_0,x_{dep}}$	Función tri variable en diámetro, trayectoria y distancia de deposición. Modelo con dispersión	m^{-3}
f_{disp}	Función densidad de dispersión	m^{-1}
f_{disp}^{Vuelo}	Función densidad de dispersión de gotas en vuelo	m^{-1}
f_{x_0}	Función densidad en distancia depositada a condiciones controladas	m^{-1}
$f_{x_{dep}}$	Función densidad en la distancia depositada	m^{-1}
\vec{F}_g	Vector de fuerza de gravedad que afecta la gota en vuelo	$kgm s^{-2}$
\vec{F}_E	Vector de fuerza de empuje que afecta la gota en vuelo	$kgm s^{-2}$
\vec{F}_A	Vector de fuerza de arrastre que afecta la gota en vuelo	$kgm s^{-2}$
FD	Factor de dispersión	—
F_{disp}	Fracción acumulada de gotas depositadas por dispersión	—
F_{disp}^{Vuelo}	Fracción acumulada de gotas en vuelo	—
FR	Caudal nominal de boquilla a $\Delta P = 300kPa$ de acuerdo con norma ISO 10625:2005	$m^3 s^{-1}$
g	Aceleración de la gravedad	$m s^{-2}$
G_1	Parámetro de ajuste modelo <i>Alemán</i>	%
G_2	Parámetro de ajuste modelo <i>Alemán</i>	—
G_i	Caudal másico depositado por unidad de área	$kg m^{-2} s^{-1}$
H	Altura de botalón	m
$H_{eff,i}$	Altura efectiva de descarga de gota i	m
HR	Humedad relativa	%
k	Constante de reducción de diámetro	$m s^{-1}$
k_m	coeficiente de transferencia de masa debido a evaporación	$m s^{-1}$
l	Longitud característica de orificio de salida de la boquilla	m
l_B	Longitud cubierta por la aplicación	m
L_{dep}^S	Fracción acumulada de solución pulverizada que se deposita a una distancia x_{dep}	—
L_{dep}	Fracción acumulada de no volátiles pulverizados que se deposita a una distancia x_{dep}	—
m	Masa de gota	kg
\dot{m}_i	Caudal másico pulverizado de gotas de clase i	$kg s^{-1}$
N	Número de boquillas	#
n_{RR}	Parámetro de ajuste de función RR	—
Oh	Número de Ohnesorge	—

p_j	Variables de proceso j para modelo Smith et al. (2000)	—
q_{NT}	Parámetro de ajuste de función NT	—
Q_{pulv}	Caudal en volumen de no volátiles pulverizado	$m^3 s^{-1}$
Q_{pulv}^{SO}	Caudal en volumen de solución (Volátiles + No volátiles) pulverizado	$m^3 s^{-1}$
Q_{dep}	Caudal en volumen de no volátiles depositado	$m^3 s^{-1}$
Q_{dep}^S	Caudal en volumen de solución (Volátiles + No volátiles) depositado	$m^3 s^{-1}$
Q_T	Caudal en volumen de solución total pulverizado	$m^3 s^{-1}$
r	Ancho de banda aplicación dirigida	m
Re	Número de Reynolds	—
RSF	Factor de span relativo en volumen	—
s	Separación entre boquillas en botalón	m
T	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
T_{bh}	Temperatura de bulbo húmedo	$^{\circ}C$
t	Tiempo	s
t_A	Tiempo de aplicación	s
t_l	Tiempo de vida de las gotas en vuelo	s
t_{dep}	Tiempo que tarda en depositarse una gota	s
t_{resp}	Tiempo de respuesta de una gota a fuerzas externas	s
U	Velocidad de viento	$m s^{-1}$
$U_{3,25m}$	Velocidad de viento a 3.25m	$m s^{-1}$
\vec{U}	Vector de velocidad de viento	$m s^{-1}$
U_0	Velocidad de viento a la altura de la boquilla	$m s^{-1}$
\bar{U}	Velocidad media de viento	$m s^{-1}$
v	Velocidad de líquido a la salida de la boquilla	$m s^{-1}$
v_A	Velocidad de avance de pulverizadora / o boquilla	$m s^{-1}$
v_T	Velocidad terminal de gota de diámetro d	$m s^{-1}$
\vec{v}	Vector de velocidad de gota en vuelo	$m s^{-1}$
\vec{v}_{rel}	Vector de velocidad relativa de gota respecto a viento	$m s^{-1}$
V_{dep}	Volumen depositado	m^3
w	Ancho cubierto por una boquilla/ ancho de banda	m
We	Número de Weber	—
W_w^I	Fracciones de vapor de agua en el aire en condiciones de saturación	—
W_w^{∞}	Fracciones de vapor de agua en el aire lejos de la gota	—
x	Coordenada espacial en dirección del viento	m
X	s para aplicación de cobertura total, w para aplicación en bandas, r para aplicación dirigida	m
x_0	Distancia de deposición en condiciones controladas	m
x_{dep}	Distancia de deposición	m
X_{H_2O}	Humedad absoluta	$g kg^{-1}$
y	Coordenada espacial en dirección de avance de pulverizadora	m
Y	Deriva de no volátiles respecto a F	%
Y^S	Deriva de solución (Volátil + No volátil) respecto a F	%
z	Coordenada espacial en dirección vertical	m
\bar{Z}	Posición vertical media de la gota	m

Símbolos griegos

Variable	Descripción	Unidad
α	Ángulo de trayectoria de gotas respecto a eje z	$^{\circ}$
β	Tasa de evaporación de la gota (Ecuación 4.16)	$m^2 s^{-1} C^{-1}$
γ	Factor de corrección de velocidad de viento	—
Γ^S	Distribución de tamaño de gotas de solución depositadas para una distancia x_{dep}	m^{-2}
Γ_{disp}^S	Distribución de tamaño de gotas de solución depositadas para una distancia x_{dep} considerando dispersión (1 boquilla)	m^{-2}
$\Gamma_{disp,bot}^S$	Distribución de tamaño de gotas de solución depositadas para una distancia x_{dep} considerando dispersión (botalón)	m^{-2}
$\bar{\Gamma}^S$	Distribución normalizada de tamaño de gotas depositadas de solución para una distancia x_{dep}	m^{-1}
$\bar{\Gamma}_{disp,bot}^S$	Distribución normalizada de tamaño de gotas depositadas para una distancia x_{dep} considerando dispersión (botalón)	m^{-1}
δ	Valor máximo admisible de deriva	$\%$
ΔP	Presión de pulverización	Pa
$\Delta \rho$	Diferencia de densidad de gota y aire	$kg m^{-3}$
ΔT	Diferencia de temperatura de bulbo seco y húmedo	$^{\circ}C$
ϵ	Rugosidad del terreno	m
ε	Valor mínimo admisible de cobertura	$\# m^{-2}$
θ	Ángulo de spray	$^{\circ}$
λ	Fracción de volumen depositado frente a volumen inicial de gota	—
λ'	Fracción de volumen depositado frente a volumen inicial de gota en función de \bar{Z}	—
μ	Viscosidad	$Pa s$
ξ	Superficie de gota	m^2
ρ	Densidad	$kg m^{-3}$
σ	Tensión superficial	$m^3 s^{-1}$
σ_g	Parámetro de ajuste de función log-normal	—
σ_{ul}	Parámetro de ajuste de función ULLN	m
σ_s	Desviación estándar de la distribución espacial f_{x_0}	m
σ_y	Módulo de dispersión en coordenada y	m
σ_z	Módulo de dispersión en coordenada z	m
ϕ	Desviación de avance de pulverizadora respecto a trayectoria ideal	$^{\circ}$
ψ	Fracción de volumen evaporado	

Subíndices

0	En condición a la salida de la boquilla
A	Aplicada / Tratada
b	Boquilla
bh	Bulbo húmedo
d	De gota
dep	En condición de deposición
disp	Con dispersión
g	gas
i	Boquilla número i
l	Líquido atomizado

Superíndices

<i>ref</i>	De referencia
<i>S</i>	Solución depositada (Volátil + No volátil)
<i>S0</i>	Solución inicial (Volátil + No volátil)

Abreviaturas

<i>CFD</i>	Fluidodinámica computacional
<i>DSD</i>	Distribución de tamaño de gotas
<i>NT</i>	Nukiyama-Tanasawa
<i>PDF</i>	Función de probabilidad en densidad
<i>RR</i>	Rosin-Rammler
<i>ULLN</i>	Upper-Limit Log Normal

Bibliografía

- Agüera, F., Nuyttens, D., Carvajal, F., & Sánchez-Hermosilla, J. (2012). Fractal analysis of agricultural nozzles spray. *Sci. Agric.*, 69(1), 6–12.
<https://doi.org/10.1590/S0103-90162012000100002>
- Aktar, W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdiscip. Toxicol.*, 2(1), 1–12.
<https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>
- 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.
- Allen, T. (2003). *Powder Sampling and Particle Size Determination (First Edit)*.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51564-3.X5000-1>
- Altimira, M., Rivas, A., Larraona, G. S., Anton, R., & Ramos, J. C. (2009). Characterization of fan spray atomizers through numerical simulation. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 30(2), 339–355.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.12.006>
- Alvarenga, C. B. D., & da Cunha, J. P. (2010). Aspectos qualitativos da avaliação de pulverizadores hidráulicos de barra na região de Uberlândia, Minas Gerais. *Engenharia Agrícola*, 30(3), 555–562.
- Alves, G. S., & Cunha, J. P. A. R. D. (2014). Field data and prediction models of pesticide spray drift on coffee crop. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(8), 622–629.
- Amaveda, H. (2003). *Generación de gotas microscópicas y caracterización de aerosoles (Doctoral dissertation, Universidad de Zaragoza)*.
- Anthonis, J., Audenaert, J., & Ramon, H. (2005). Design optimisation for the vertical suspension of a crop sprayer boom. *Biosystems engineering*, 90(2), 153–160.
- Arvidsson, T., Bergström, L., & Kreuger, J. (2011). Spray drift as influenced by meteorological and technical factors. *Pest Manag. Sci.*, 67(5), 586–598. <https://doi.org/10.1002/ps.2114>
- ASABE. (2009). S572.1 Droplet Size Classification. The American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- ASAE. (2004). S561.1: Procedure for Measuring Drift Deposits from Ground, Orchard, and Aerial Sprayers (p. 1). p. 1. Disponible en:
<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=44207&t=2>
- Ashgriz, Nasser. (2011). *Handbook of Atomization and Sprays*. In Nasser Ashgriz (Ed.), *Handbook of Atomization and Sprays*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7264-4>
- Babinsky, E., & Sojka, P. E. (2002). Modeling drop size distributions. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 28(4), 303–329. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(02\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(02)00004-7)
- Badules, J., Vidal, M., Boné, A., Llop, J., Salcedo, R., Gil, E., & García-Ramos, F. J. (2018). Comparative study of CFD models of the air flow produced by an air-assisted sprayer adapted to the crop geometry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 166–174.
- Baetens, K., Ho, Q., Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Melese Endalew, A., Hertog, M. L. A. T. M., ... Verboven, P. (2009). A validated 2-D diffusion-advection model for prediction of drift from ground boom sprayers. *Atmos. Environ.*, 43(9), 1674–1682.

Bibliografia

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.047>

Baetens, K., Nuyttens, D., Verboven, P., De Schampheleire, M., Nicolai, B. M., & Ramon, H. (2007). Predicting drift from field spraying by means of a 3D computational fluid dynamics model. *Comput. Electron. Agric.*, 56(2), 161–173.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.01.009>

Balan, M. G., Saab, O. J. G. A., Ecker, A. E. D. A., & Migliorini, G. D. O. (2016). Descrição metodológica para trabalhos técnico-científicos que tratam da aplicação de inseticidas. *Acta Sci. Agron.*, 38(1), 9. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i1.25170>

Balestrini, L. (2006). Mobile inspection and diagnosis service of sprayers in resistance prevention. Results obtained out of inspections performed by a group of producers during the 2004-2005 Season. *Resistant Pest Management Newsletter*, 16(s1).

Balsari, P., Gil, E., Marucco, P., van de Zande, J. C., Nuyttens, D., Herbst, A., & Gallart, M. (2017). Field-crop-sprayer potential drift measured using test bench: Effects of boom height and nozzle type. *Biosyst. Eng.*, 154, 3–13.

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.015>

Balsari, P., Marucco, P., & Tamagnone, M. (2007). A test bench for the classification of boom sprayers according to drift risk. *Crop Prot.*, 26(10), 1482–1489.

<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.12.012>

Bartzanas, T., Kacira, M., Zhu, H., Karmakar, S., Tamimi, E., Katsoulas, N., Lee I. B. & Kittas, C. (2013). Computational fluid dynamics applications to improve crop production systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 151-167.

BCPC. (1986). Nozzle Classification Scheme. British Crop Protection Council.

Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.

Bertsekas, D. P., & Tsitsiklis, J. N. (2008). *Introduction to probability*. Athena Scientific.

Bilanin, A. J., Teske, M. E., Barry, J. W., & Ekblad, R. B. (1989). AGDISP: The Aircraft Spray Dispersion Model, Code Development and Experimental Validation. *Trans. ASAE*, 32(1), 327. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.31005>

Bochtis, D. D., Sørensen, C. G., Green, O., & Bartzanas, T. (2011). A diagnostic system for improving biomass quality based on a sensor network. *Sensors*, 11(5), 4990-5004.

Briggs, G. A. (1973). Diffusion estimation for small emissions. Preliminary report. <https://doi.org/10.2172/5118833>

Bucquet, T., Sander, S., & Fritsching, U. (2014). Characterization of spray nozzles for quenching of metal components. In *26th European Conference on Liquid Atomization & Spray Systems* (pp. 08-10).

Bueno, M. R., Cunha, J. P. A. R. D., & Santana, D. G. D. (2016). Drift curves from spray applications on common bean crop. *Ciência e Agrotecnologia*, 40(6), 621-632.

Bueno, M. R., Cunha, J. P. A. R., & Santana, D. G. (2017). Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops. *Biosyst. Eng.*, 154, 35–45.

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.017>

Butler Ellis, M. C., & Miller, P. C. H. (2010). The Silsoe Spray Drift Model: A model of spray drift for the assessment of non-target exposures to pesticides. *Biosyst. Eng.*, 107(3), 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.09.003>

Butler Ellis, M. C., & Tuck, C. R. (1999). How adjuvants influence spray formation with different hydraulic nozzles. *Crop Prot.*, 18(2), 101–109. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(98\)00097-0](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(98)00097-0)

- Butler Ellis, M. C., Tuck, C. R., & Miller, P. C. H. (2001). How surface tension of surfactant solutions influences the characteristics of sprays produced by hydraulic nozzles used for pesticide application. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, 180(3), 267–276. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(00\)00776-7](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(00)00776-7)
- Butler Ellis, M. C., Underwood, B., Peirce, M. J., Walker, C. T., & Miller, P. C. H. (2010). Modelling the dispersion of volatilised pesticides in air after application for the assessment of resident and bystander exposure. *Biosyst. Eng.*, 107(2), 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.08.002>
- Butler-Ellis, M. C., & Bradley, A. (2002). The influence of formulation on spray drift. *Aspects of Applied Biology*, 66, 251-258.
- Calzada, J., Treboux, J. Importancia económica del sector agropecuario y agroindustrial en la República Argentina. *Bolsa de Comercio de Rosario. Año XXXVII - N° 1912. 2019a.*
- Calzada, J., Treboux, J. Importancia económica del sector agropecuario y agroindustrial en la República Argentina. *Bolsa de Comercio de Rosario. Año XXXVII - N° 1927. 2019b.*
- Cambridge Environmental Research Consultants. (2010). CERC, Environmental software and services. Disponible en: <http://www.cerc.co.uk/>
- Cerruto, E., Failla, S., Longo, D., & Manetto, G. (2016). Simulation of Water Sensitive Papers for Spray Analysis. *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, 18(4), 22–29.
- Chigier, N., & Reitz, R. D. (1996). Regimes of Jet Breakup and Breakup Mechanisms (Physical Aspects). In *Progress in Astronautics and Aeronautics. Recent Advances en Spray Combustion: Spray Atomization and Drop Burning Phenomena* (pp. 109–135). <https://doi.org/doi:10.2514/5.9781600866418.0109.0135>
- Cid, R. (2014). *Aplicación eficiente de fitosanitarios*. Ediciones INTA.
- Costa, L. L., Silva, H. J. P. S. da, Almeida, D. P., Ferreira, M. da C., & Pontes, N. d. C. (2017). Droplet Spectra and Surface Tension of Spray Solutions by Biological Insecticide and Adjuvants. *Eng. Agrícola*, 37(2), 292–301. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n2p292-301/2017>
- Courshee, R. J. (1960). Some Aspects of the Application of Insecticides. *Annu. Rev. Entomol.*, 5(1), 327–352. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.05.010160.001551>
- Crowe, C. T. (2006). *Multiphase Flow Handbook*. <https://doi.org/10.1201/9781420040470>
- Cunha, M., Carvalho, C., & Marcal, A. R. S. (2012). Assessing the ability of image processing software to analyse spray quality on water-sensitive papers used as artificial targets. *Biosyst. Eng.*, 111(1), 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.002>
- Czarczyk, Z., Kruger, G., & Hewitt, A. (2012). Droplet size classification of air induction flat fan nozzles. *Journal of plant protection research*, 52(4), 415-420.
- De Cock, N., Massinon, M., Salah, S. O. T., & Lebeau, F. (2017). Investigation on optimal spray properties for ground based agricultural applications using deposition and retention models. *Biosyst. Eng.*, 162, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.BIOSYSTEMSENG.2017.08.001>
- De Luca, M., & Vallet, A. (2008). Pesticide Atomization Modelling for Hollow Cone Nozzle. *Agric. Eng. Int. CIGR Ejournal*.
- De Schampheleire, M., Baetens, K., Nuyttens, D., & Spanoghe, P. (2008). Spray drift measurements to evaluate the Belgian drift mitigation measures in field crops. *Crop Protection*, 27(3-5), 577-589.
- Dickinson, A. R., Johnson, D. M., & Wardlow, G. W. (2007). A compact variable rate sprayer for teaching precision agriculture. *Applied engineering in agriculture*, 23(3), 267-272.

Bibliografía

- Ding, J. W., Li, G. X., Yu, Y. S., & Li, H. M. (2016). Numerical Investigation on Primary Atomization Mechanism of Hollow Cone Swirling Sprays. *Int. J. Rotating Mach.*, 2016, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2016/1201497>
- Dombrowski, N., & Fraser, R. P. (1954). A photographic investigation into the disintegration of liquid sheets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 247(924), 101-130.
- Dombrowski, N., & Johns, W. R. (1963). The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets. *Chemical Engineering Science*, 18(3), 203-214.
- Douzals, J. P., & Chalendard, M. P. (2015). Vertical and horizontal spray distribution of hollow cone nozzles in a wind tunnel: a preliminary study to mitigate spray drift in orchard applications. 448, 32–34. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01271797>
- Douzals, J.P., Al Heidary, M., (2014). How spray characteristics may influence spray drift in a wind tunnel. *Asp. Appl. Biol.* 122, 271e278
- Dumouchel, C. (2008). On the experimental investigation on primary atomization of liquid streams. *Exp. Fluids*, Vol. 45, pp. 371–422. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0526-0>
- Egel, D. S., & Harmon, P. (2001). Effects of Nozzle Type and Spray Pressure on Control of *Alternaria* Leaf Blight of Muskmelon with Chlorothalonil. *Plant Dis.*, 85(10), 1081–1084. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2001.85.10.1081>
- Endalew, A. M., Debaer, C., Rutten, N., Vercammen, J., Delele, M. A., Ramon, H., Nicolai, B. M. & Verboven, P. (2010). Modelling pesticide flow and deposition from air-assisted orchard spraying in orchards: a new integrated CFD approach. *Agricultural and forest meteorology*, 150(10), 1383-1392.
- EPA. (2001). PRN 2001-X Draft: Spray and Dust Drift Label Statements for Pesticide Products. Retrieved April 26, 2018, from Pesticide Registration website: <https://www.epa.gov/pesticide-registration/prn-2001-x-draft-spray-and-dust-drift-label-statements-pesticide-products>
- Etiennot, A., & Piazza, A. (2010). Buenas prácticas de aplicación en cultivos planos extensivos: Distancias a zonas urbanas. Criterios y soluciones. *Acta toxicológica argentina*, 18(2), 40-53.
- F. A. y R. N. (2005). Marco legal aplicable al manejo integral de pesticidas Argentina.
- Felsot, A. S., Unsworth, J. B., Linders, J. B., Roberts, G., Rautmann, D., Harris, C., & Carazo, E. (2010). Agrochemical spray drift; assessment and mitigation-a review. *J. Environ. Sci. Heal. - Part B Pestic. Food Contam. Agric. Wastes*, 46(1), 1–23. <https://doi.org/10.1080/03601234.2010.515161>
- Ferguson, J. C., Chechetto, R. G., O'Donnell, C. C., Fritz, B. K., Hoffmann, W. C., Coleman, C. E., Bhagirath, B. S., Adkins, S. W., Kruger, G. R., & Hewitt, A. J. (2016). Assessing a novel smartphone application – SnapCard, compared to five imaging systems to quantify droplet deposition on artificial collectors. *Comput. Electron. Agric.*, 128, 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.08.022>
- Ferguson, J. C., O'Donnell, C. C., Chauhan, B. S., Adkins, S. W., Kruger, G. R., Wang, R., Urach Ferreira, P. H., & Hewitt, A. J. (2015). Determining the uniformity and consistency of droplet size across spray drift reducing nozzles in a wind tunnel. *Crop Prot.*, 76, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.06.008>
- Filippini. (2016). Disponible en www.reduas.com.ar
- Finch, C.W., Byrne, T., Oloumi-Sadeghi et al. (2014), Liquid pesticide compositions. Patent 8741324 B2. United States Patent.

- Ford, M. G., & Salt, D. W. (1987). Behaviour of insecticide deposits and their transfer from plant to insect surfaces. *Pestic. Plant Surfaces* / Ed. by H.J. Cottrell. Chichester : Published on behalf of the Society of Chemical Industry by Wiley, 1987.
- Fox, R. D., Derksen, R. C., Cooper, J. A., Krause, C. R., & Ozkan, H. E. (2003). Visual and image system measurement of spray deposits using water-sensitive paper. *Applied engineering in agriculture*, 19(5), 549.
- Fox, R. D., Reichard, D. L., Brazee, R. D., Krause, C. R., & Hall, F. R. (1993). Downwind residues from spraying a semi-dwarf apple orchard. *Transactions of the ASAE*, 36(2), 333-340.
- Fox, R. D., Salyani, M., Cooper, J. A., & Brazee, R. D. (2001). Spot Size Comparisons on Oil – and Water-Sensitive paper. *Appl. Eng. Agric.*, 17(2), 131–136.
- França, J. A., da Cunha, J. P., & Antuniassi, U. R. (2017). Spectrum, velocity and drift of droplets sprayed by nozzles with and without air induction and mineral oil. *Engenharia Agrícola*, 37(3), 502-509.
- Fritsching, U. (Ed.). (2016). *Process-spray: functional particles produced in spray processes*. Springer.
- Fritz, B. K., & Hoffmann, W. C. (2016). Measuring Spray Droplet Size from Agricultural Nozzles Using Laser Diffraction. *J. Vis. Exp.*, (115), 54533. <https://doi.org/10.3791/54533>
- Gandolfo, M. A., Antuniassi, U. R., Gandolfo, U. D., Moraes, E. D. D., Rodrigues, E. B., & Adegas, F. S. (2013). Periodic inspection of sprayers: diagnostic to the northern of Paraná. *Engenharia Agrícola*, 33(2), 411-421.
- Gandolfo, M. A., Carvalho, F. K., Chechetto, R. G., Gandolfo, U. D., & Moraes, E. D. D. (2014). Effect of working pressure at different spray nozzles on drift quantification in wind tunnel. *Engenharia Agrícola*, 34(1), 66-73.
- Ganzelmeier, H., Rautmann, D., Spangenberg, R., Streloke, M., Herrmann, M., Wenzelburger, H. J., & Walter, H. F. (1995). Studies on the spray drift of plant protection products: Results of a test program carried out throughout the Federal Republic of Germany.
- Ghosh, S., Hunt, J.C.R. (1998). Spray jets in a cross-flow. *J. Fluid Mech.* 365, 109–136. doi:10.1017/S0022112098001190
- Gil, E., Balsari, P., Gallart, M., Llorens, J., Marucco, P., Andersen, P. G., Fàbregas, X., & Llop, J. (2014). Determination of drift potential of different flat fan nozzles on a boom sprayer using a test bench. *Crop Prot.*, 56, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.10.018>
- Gil, E., Gallart, M., Balsari, P., Marucco, P., Almajano, M. P., & Llop, J. (2015). Influence of wind velocity and wind direction on measurements of spray drift potential of boom sprayers using drift test bench. *Agric. For. Meteorol.*, 202, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.002>
- Giles, D. K., & Comino, J. A. (1990). Droplet size and spray pattern characteristics of an electronic flow controller for spray nozzles. *J. Agric. Eng. Res.*, 47, 249–267. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(90\)80045-V](https://doi.org/10.1016/0021-8634(90)80045-V)
- Graham-Bryce, I. J. (1977). Crop Protection: A Consideration of the Effectiveness and Disadvantages of Current Methods and of the Scope for Improvement. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 281(980), 163–179. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0131>
- Gras, N., & Unsworth, J. B. (2016). Latin American Pesticide Residue Workshop—Food and Environment. *Chemistry International*, 38(2), 28-28.
- Grella, M., Gil, E., Balsari, P., Marucco, P., & Gallart, M. (2017). Advances in developing a new test method to assess spray drift potential from air blast sprayers. *Spanish J. Agric. Res.*, 15(3), e0207. <https://doi.org/10.5424/sjar/2017153-10580>

Bibliografía

- Griesang, F., Decaro, R. A., dos Santos, C. A. M., Santos, E. S., de Lima Roque, N. H., & da Costa Ferreira, M. (2017). How much do adjuvant and nozzles models reduce the spraying drift? Drift in agricultural spraying. *American Journal of Plant Sciences*, 8(11), 2785-2794.
- Grisso, R. D., Askew, S., & McCall, D. S. (2019). Nozzles: selection and sizing. Virginia Cooperative Extension P442-032.
- Guler, H., Zhu, H., Ozkan, H. E., & Ling, P. (2012). Characterization of hydraulic nozzles for droplet size and spray coverage. *Atomization and Sprays*, 22(8).
- Haider, A., & Levenspiel, O. (1989). Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. *Powder technology*, 58(1), 63-70.
- Harper, S. A. (2008). Mathematical models for dispersal of aerosol droplets in an agricultural setting. Massey University, Albany, New Zealand (Doctoral dissertation, Massey University).
- Hassen, N. S., Sidik, N. A. C., & Md Sheriff, J. (2014). Effect of nozzle type on spray drift in banding application. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 465, pp. 520-525). Trans Tech Publications Ltd.
- Heister, S. D. (2011). Plain Orifice Spray Nozzles. In N. Ashgriz (Ed.), *Handbook of Atomization and Sprays* (pp. 625-646). Springer.
- Herbst, A. (1998). A method to determine spray drift potential from nozzles and its link to buffer zone restrictions. In 2001 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Hewitt, A. J. (1998). The importance of nozzle selection and droplet size control in spray application. In *Proc. of the North American Conf. on Pest. Spray Drift Manag* (pp. 75-85).
- Hilz, E., & Vermeer, A. W. (2013). Spray drift review: The extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction. *Crop Protection*, 44, 75-83.
- Hoffmann, W. C., & Hewitt, A. J. (2005). Comparison of three imaging systems for water-sensitive papers. *Appl. Eng. Agric.* 21(6), 961-964
- Hofman, V., & Solseng, E. (2004). Spray equipment and calibration. Agricultural and Biosystems Engineering North Dakota State University.
- Hollyer, J. D., Meyer, D. G., Brooks, F. E., Shimabuku, R. S., Castro, L. F., Nagamine, C. Y., ... Hawai'i Department of Agriculture Pesticides Branch. (2014). Good Agricultural Practices: A Best Practices Kit for Safe, Legal, and Effective Pesticide Application in Hawai'i. Food Saf. Technol. Disponible en: <http://www.ctahr.hawaii.edu/oc/freepubs/pdf/FST-59.pdf>
- Holterman, H. J., & van de Zande, J. C. (2003). IMAG drift calculator user manual. Disponible en https://www.pesticidemodels.eu/sites/default/files/documents/IDCmanual_0.pdf
- Holterman, H. J., van de Zande, J. C., Porskamp, H. A. J., & Huijsmans, J. F. M. (1997). Modelling spray drift from boom sprayers. *Comput. Electron. Agric.*, 19(1), 1-22. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(97\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(97)00018-5)
- Hong, S. W., Zhao, L., & Zhu, H. (2018). SAAS, a computer program for estimating pesticide spray efficiency and drift of air-assisted pesticide applications. *Comput. Electron. Agric.*, 155, 58-68. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2018.09.031>
- INDEC. (2020) Censo Nacional Agropecuario 2018. Resultados preliminares. Agricultura Enero de 2020 Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC) ISBN 978-950-896-571-4
- International Organization for Standardization. (2005a). ISO 10625,2005: Equipment for crop protection -- Sprayer nozzles -- Colour coding for identification. International Organization for Standardization.

- International Organization for Standardization. (2005b). ISO 22866,2005: Equipment for crop protection -- Methods for field measurement of spray drift. International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2006). ISO 22369-1: 2006: Drift classification of spraying equipment - Part 1: Classes. International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2008). ISO 22856, 2008: Equipment for crop protection-Laboratory measurement of spray drift-part 1: wind tunnel. International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2015). ISO 22401:2015: Equipment for crop protection -- Method for measurement of potential spray drift from horizontal boom sprayers by the use of a test bench. International Organization for Standardization.
- Jacobson, M. Z. (2005). Fundamentals of atmospheric modeling. Cambridge university press.
- Johnson, M. P., & Swetnam, L. D. (1996). Sprayer nozzles: selection and calibration. Lexington. Univ. Kentucky, 6. Disponible en: <http://pest.ca.uky.edu/PSEP/Manuals/Nozzles.pdf>
- Kim, K.D., Lee, H. S., Hwang, S. J., Lee, Y. J., Nam, J. S., & Shin, B. S. (2017a). Analysis of Spray Characteristics of Tractor-mounted Boom Sprayer for Precise Spraying. *Journal of Biosystems Engineering*, 42(4), 258-264.
- Kim, K.H., Kabir, E., & Jahan, S. A. (2017b). Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Sci. Total Environ.*, 575, 525–535.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.09.009>
- Kjær, C., Strandberg, M., & Erlandsen, M. (2006). Metsulfuron spray drift reduces fruit yield of hawthorn (*Crataegus monogyna* L.). *Sci. Total Environ.*, 356(1–3), 228–234.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2005.03.019>
- Kluza, P. A., Kuna-Broniowska, I., & Parafiniuk, S. (2019). Modeling and Prediction of the Uniformity of Spray Liquid Coverage from Flat Fan Spray Nozzles. *Sustainability*, 11(23), 6716.
- 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>
- Krämer, W., & Schirmer, U. (2007). Modern crop protection compounds, 3 volume set. John Wiley & Sons Ltd.
- Labrada, R., Caseley, J. C., & Parker, C. (Eds.). (1994). Weed management for developing countries (Vol. 120). Food & Agriculture Organization.
- Langenakens, J. J., Clijmans, L., Ramon, H., & De Baerdemaeker, J. (1999). The effects of vertical sprayer boom movements on the uniformity of spray distribution. *J. Agric. Eng. Res.*, 74(3), 281–291. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0464>
- Lauric, M. A., De Leo, g., Carbonell, C.A., Vigna M.R. & Leiva, P.D. (2016). Utilización de tarjetas hidrosensibles para evaluar el efecto de la presión sobre la calidad de aplicación. Disponible en: <https://inta.gob.ar/documentos/utilizacion-de-tarjetas-hidrosensibles-para-evaluar-el-efecto-de-la-presion-sobre-la-calidad-de-aplicacion>
- 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.

Bibliografía

- Leunda, P., Debouche, C., & Caussin, R. (1990). Predicting the transverse volume distribution under an agricultural spray boom. *Crop protection*, 9(2), 111-114.
- Liljedahl, L. A. (1971). Effect of fluid properties and nozzle parameters on drop size distribution from fan spray nozzles (Iowa State University). Disponible en: <http://lib.dr.iastate.edu/rtd/4476>
- Liu, C. H., Mo, Z., & Wu, Z. (2018). Parameterization of vertical dispersion coefficient over idealized rough surfaces in isothermal conditions. *Geoscience Letters*, 5(1), 1-11.
- Løfstrøm, P., Bruus, M., Andersen, H. V., Kjær, C., Nuyttens, D., & Astrup, P. (2013). The OML-SprayDrift model for predicting pesticide drift and deposition from ground boom sprayers. *Journal of Pesticide Science*, D12-064.
- Lupea, I., Tudose, L., STANESCU, C., & Lupea, M. (2009). Dynamic simulation and experiment on a sprayer boom structure. In *Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of 20th DAAAM International Symposium*.
- Maheshwari, D. K. (Ed.). (2010). *Plant growth and health promoting bacteria* (Vol. 18). Springer Science & Business Media.
- Maltby, L., & Hills, L. (2008). Spray drift of pesticides and stream macroinvertebrates: Experimental evidence of impacts and effectiveness of mitigation measures. *Environ. Pollut.*, 156(3), 1112–1120. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2008.04.013>
- Mangus, D. L., Sharda, A., Engelhardt, A., Flippo, D., Strasser, R., Luck, J. D., & Griffin, T. (2017). Analyzing the Nozzle Spray Fan Pattern of an Agricultural Sprayer Using Pulse Width Modulation Technology to Generate an On-Ground Coverage Map. *Trans. ASABE*, 60(2), 315–325. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/trans.11835>
- maquiNAC (2014). Disponible en www.maquinac.com
- Masiá, G., & Cid, R. (2010). *Las boquillas de pulverización. Tecnología de aplicación de agroquímicos*. 1ª Edición. Alto Valle, Argentina: Red CYTED “Técnicas sostenibles de distribución de agroquímicos” Área de comunicaciones del INTA Alto Valle.
- Masiá, G., Moltoni, A., Cid, R., Duro, S., & Pozzolo, O. (2012). Desempeño de dos alternativas comerciales en boquillas de cono hueco para aplicaciones con volúmenes de campo reducidos. *X Congreso Latinoamericano y Del Caribe de Ingeniería Agrícola*.
- Mateo-Sagasta, J., Zadeh, S. M., Turrall, H., & Burke, J. (2017). *Water pollution from agriculture: a global review. Executive summary*. Rome, Italy: FAO Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE).
- Matthews, G. A. (1982). New developments in pesticide-application technology. *Crop Prot.*, 1(2), 131–145. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(82\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0261-2194(82)90036-9)
- Matthews, G. A., Bateman, R., & Miller, P. (2014). *Pesticide Application Methods*. In *Pesticide Application Methods: Fourth Edition* (Fourth, Vol. 9781118351). <https://doi.org/10.1002/9781118351284>
- 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.
- Merret, R. (1983). Crop Desiccation with Minimum Spray Drift1. *EPP0 Bulletin*, 13(3), 413-417.
- Miller, P. C. H. (2003). The measurement of spray drift. *Pestic. Outlook*, 14(5), 205–209. <https://doi.org/10.1039/B311466J>
- Miller, P. C. H., & Hadfield, D. J. (1989). A simulation model of the spray drift from hydraulic nozzles. *J. Agric. Eng. Res.*, 42(2), 135–147.

- [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(89\)90046-2](https://doi.org/10.1016/0021-8634(89)90046-2)
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2019). Campaña 2018/19: cosecha récord de 147 millones de toneladas. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/noticias/campana-201819-cosecha-record-de-147-millones-de-toneladas>
- Ministerio de Agroindustria. (2017). Mercado argentino de Pulverizadoras. Disponible en <http://www.agroindustria.gob.ar>
- Molari, G., Benini, L., & Ade, G. (2005). Design of a recycling tunnel sprayer using CFD simulations. *Transactions of the ASAE*, 48(2), 463-468
- Mondal, D., Datta, A., & Sarkar, A. (2003). Prediction of drop size distribution in a spray from a pressure swirl atomizer using maximum entropy formalism. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 217(7), 831-838. <https://doi.org/10.1243/095440603767764471>
- Moreira, A. L. N., & Oliveira Panaño, M. R. (2011). Spray-Wall Impact. En N. Ashgriz (Ed.), *Handbook of Atomization and Sprays* (pp. 441-455). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7264-4_21
- Mottes, C., Lesueur-Jannoyer, M., Le Bail, M., & Malézieux, E. (2014). Pesticide transfer models in crop and watershed systems: A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 34(1), 229-250. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0176-3>
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The finite volume method in computational fluid dynamics* (Vol. 113). Berlin, Germany: Springer.
- Mugele, R. A., & Evans, H. D. (1951). Droplet Size Distribution in Sprays. *Ind. Eng. Chem.*, 43(6), 1317-1324. <https://doi.org/10.1021/ie50498a023>
- Munjanja, B. K., Naudé, Y., & Forbes, P. B. C. (2019). A Review of Sampling Approaches to Off-Target Pesticide Deposition. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, e00075.
- Munthali, D. C. (1984). Biological efficiency of small dicofol droplets against *Tetranychus urticae* (Koch) eggs, larvae and protonymphs. *Crop Prot.*, 3(3), 327-334. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(84\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0261-2194(84)90038-3)
- Munthali, D. C., & Wyatt, I. J. (1986). Factors affecting the biological efficiency of small pesticide droplets against *Tetranychus urticae* eggs. *Pestic. Sci.*, 17(2), 155-164. <https://doi.org/10.1002/ps.2780170213>
- Nansen, C., Ferguson, J. C., Moore, J., Groves, L., Emery, R., Garel, N., & Hewitt, A. J. (2015). Optimizing pesticide spray coverage using a novel web and smartphone tool, SnapCard. *Agron. Sustain. Dev.*, 35(3), 1075-1085. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0309-y>
- Nsibande, S. A., Dabrowski, J. M., van der Walt, E., Venter, A., & Forbes, P. B. C. (2015). Validation of the AGDISP model for predicting airborne atrazine spray drift: A South African ground application case study. *Chemosphere*, 138, 454-461. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.092>
- 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*.
- Nuyttens, D., Baetens, K., De Schampheleire, M., & Sonck, B. (2007a). Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*, 97(3), 333-345. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001>
- Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Baetens, K., & Sonck, B. (2007b). The Influence of Operator-Controlled Variables on Spray Drift from Field Crop Sprayers. *Trans. ASABE*, 50(4), 1129. <https://doi.org/10.13031/2013.23622>

Bibliografía

- Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Steurbaut, W., Baetens, K., Verboven, P., Nicolai, B., Ramon, H., & Sonck, B. (2006). Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers, Part 1: Meteorological conditions. *Aspects of applied biology*, 77(2).
- Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Verboven, P., Brusselman, E., & Dekeyser, D. (2009a). Droplet Size and Velocity Characteristics of Agricultural Sprays. *Trans. ASABE*, 52(5), 1471. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.29127>
- Nuyttens, D., Taylor, W. A., De Schampheleire, M., Verboven, P., & Dekeyser, D. (2009b). Influence of nozzle type and size on drift potential by means of different wind tunnel evaluation methods. *Biosyst. Eng.*, 103(3), 271–280. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.001>
- Nuyttens, D., Zwervaegher, I. K., & Dekeyser, D. (2017). Spray drift assessment of different application techniques using a drift test bench and comparison with other assessment methods. *Biosystems engineering*, 154, 14-24.
- Oliveira, R. B., Antuniassi, U. R., & Gandolfo, M. A. (2015). Spray adjuvant characteristics affecting agricultural spraying drift. *Engenharia Agrícola*, 35(1), 109-116.
- Onorato, A., & Tesouro, M. O. (2006). *Pulverizaciones Agrícolas Terrestres* (1ra ed.). Disponible en: http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/27491/mod_resource/content/1/PULVERIZACIONES_AGRICOLAS_TERRESTRES.pdf
- Ooms, D., Lebeau, F., Ruter, R., & Destain, M. F. (2002). Measurements of the horizontal sprayer boom movements by sensor data fusion. *Comput. Electron. Agric.*, 33(2), 139–162. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00006-6)
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Agenda de Desarrollo Sostenible 2030 – ONU Argentina*. Retrieved July 24, 2019, from <https://www.onu.org.ar/agenda-post-2015/>
- Ozkan, H. E. (2016a). New nozzles for spray drift reduction. Disponible en: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-523>
- Ozkan, H. E. (2016b). Selecting the Best Nozzle for the Job. Disponible en: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-528>
- Panneton, B. (2002). Image analysis of water-sensitive cards for spray coverage experiments. *Appl. Eng. Agric.*, 18(2), 179–182.
- Payri, R., Salvador, F. J., Gimeno, J., & De La Morena, J. (2011). Analysis of diesel spray atomization by means of a near-nozzle field visualization technique. *At. Sprays*, 21(9), 753–774. <https://doi.org/10.1615/AtomizSpr.2012004051>
- Pereyra, C., Toledo, C., Herrera, M., Anglada, M., Pozzolo, O. (2008) *Uso Eficiente de Fitosanitarios. Informe Técnico N° 6: Pulverizaciones - Algunos Aspectos Económicos*. Universidad Nacional de Entre Ríos.
- Pilatti, H. H., & Caruso, P. I. (2019). Mitos, paradigmas y paradojas reflejadas en la regulación de los agroquímicos en la provincia de Buenos Aires. In V Congreso Nacional de Derecho Agrario Provincial (Corrientes, 3 y 4 de junio de 2019).
- Pimentel, R. (2006). Measurement and prediction of droplet size distribution in sprays. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1224.5841>
- Porrás Soriano, A., Porrás Soriano, M. L., Porrás Piedra, A., & Soriano Martín, M. L. (2005). Comparison of the pesticide coverage achieved in a trellised vineyard by a prototype tunnel sprayer, a hydraulic sprayer, an air-assisted sprayer and a pneumatic sprayer. *Spanish J. Agric. Res.*, 3(2), 175–181.

- 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>
- Post, S. L., Roten, R. L., & Connell, R. J. (2017). Discharge Coefficients of Flat-Fan Nozzles. *Trans. ASABE*, 60(2), 347–351. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/trans.12064>
- Prokop, M., & Kejklicek, R. (2002). Effect of adjuvants on spray droplet size of water. *Res. Agric. Eng.*, Vol. 48, pp. 144–148.
- Ramamurthi, K., & Tharakan, T. J. (1998). Flow Transition in Swirled Liquid Sheets. *AIAA J.*, 36(3), 420–427. <https://doi.org/10.2514/2.380>
- Ramankutty, N., Mehrabi, Z., Waha, K., Jarvis, L., Kremen, C., Herrero, M., & Rieseberg, L. H. (2018). Trends in global agricultural land use: implications for environmental health and food security. *Annual review of plant biology*, 69, 789-815.
- Ramkrishna, D. (2000). *Population balances: Theory and applications to particulate systems in engineering*. Elsevier.
- Rautmann, D., M. Streloke & R. Winkler, (2001). New basic drift values in the authorization procedure for plant protection products. In: R. Forster & M. Streloke, Workshop on Risk Assessment and Risk Mitigation measures in the context of the authorization of plant protection products (WORMM) 27.-29. September 1999. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem, Heft 381*. 2001. 133-141.
- Reddy, K. N., Ding, W., Zablutowicz, R. M., Thomson, S. J., Huang, Y., & Krutz, L. J. (2010). Biological responses to glyphosate drift from aerial application in Non-Glyphosateresistant corn. *Pest Manag. Sci.*, 66(10), 1148–1154. <https://doi.org/10.1002/ps.1996>
- Reddy, P. P. (2016). *Sustainable Crop Protection under Protected Cultivation* (1st edition 2016.). Singapore: Springer Singapore : Imprint: Springer.
- Reichard, D. L., Zhu, H., Fox, R. D., & Brazee, R. D. (1992). Wind Tunnel Evaluation of a Computer Program to Model Spray Drift. *Trans. ASAE*, 35(3), 755–758. <https://doi.org/10.13031/2013.28658>
- Reitz, R. D., & Bracco, F. V. (1982). Mechanism of atomization of a liquid jet. *Phys. Fluids*, 25(10), 1730–1742. <https://doi.org/10.1063/1.863650>
- Richards, P. J., & Hoxey, R. P. (1993). Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model. In *Computational Wind Engineering 1* (pp. 145-153). Elsevier.
- 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.
- Rimmer, D. A., Johnson, P. D., Kelsey, A., & Warren, N. D. (2009). Field experiments to assess approaches for spray drift incident investigation. *Pest Manag. Sci.*, 65(6), 665–671. <https://doi.org/10.1002/ps.1734>
- Ritner, M., Westerlund, K. K., Cooper, C. D., & Claggett, M. (2013). Accounting for acceleration and deceleration emissions in intersection dispersion modeling using MOVES and CAL3QHC. *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 63(6), 724–736. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23858998>
- Rivero, M. (2012). *Manual para la aplicación de fitosanitarios*. Primera Edición Ed. Carlino S, editor. Buenos Aires: SENASA.
- Rodríguez Vassallo, M. (2018). Control de malezas: Evaluación de la eficiencia de riesgos ambientales de distintas pastillas (Disertación de grado, Universidad Nacional de La Plata). Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/65502>

Bibliografía

- Safari, M., & Sharifnasab, H. (2010). Design, construction and evaluation of a tractor air assisted boom sprayer against Sunn pests and comparison with conventional sprayers.
- Salvador, F. J., Romero, J. V., Roselló, M. D., & Jaramillo, D. (2016). Numerical simulation of primary atomization in diesel spray at low injection pressure. *J. Comput. Appl. Math.*, 291, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.03.044>
- Santos, N. B. D. (2019). Economic analysis of different hydraulic sprayers used in sugarcane (*Saccharum spp.*). *Engenharia Agrícola*, 39(2), 225-233.
- Sayinci, B. (2015). Effect of strainer type, spray pressure, and orifice size on the discharge coefficient of standard flat-fan nozzles. *Turkish J. Agric. For.*, 39(5), 692–704. <https://doi.org/10.3906/tar-1410-89>
- Schick, R. J. J. (1997). General Guidelines on Drop Size Measurement Techniques and Terminology. 47th Chemical Processing Industry Exposition, 18–20(November). New York: Spraying Systems Co.
- Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M., Crowe, C. T., & Tsuji, Y. (2011). *Multiphase flows with droplets and particles*. CRC press.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- Sexton, S.E., Lei, Z. & Zilberman, D. (2007) The Economics of Pesticides and Pest Control. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 2007, 1: 271–326
- Slocombe, J. W., & Sharda, A. (2015). *Agricultural Spray Nozzles: Selection and Sizing*. Disponible en: <https://www.bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/MF3178.pdf>
- Smith, A. E. (1995). *Handbook of weed management systems*. Routledge. CRC Press. ISBN 9780824795474
- Smith, D. B., Bode, L. E., & Gerard, P. D. (2000). Predicting ground boom spray drift. *Trans. ASAE*, 43(3), 547–553. <https://doi.org/10.13031/2013.2734>
- Smith, M. R. (1970). Analog simulation of In-Flight evaporation of spray droplets. *Trans. ASAE*, 13(5), 587–590.
- Soloneski, S., & Larramendy, M. L. (2011). *Herbicides, Theory and Applications*. Ed: Soloneski and Larramendy. ISBN 978-953-307-975-2
- Spanoghe, P., De Schampheleire, M., Van der Meeren, P., & Steurbaut, W. (2006). Influence of agricultural adjuvants on droplet spectra. *Pest Manag. Sci.*, 63(1), 4–16. <https://doi.org/10.1002/ps.1321>
- Spraying Systems Co. 2004. *Guía del usuario de boquillas de pulverización*; Wheaton, Illinois 60189-7900 USA.
- Srivastava, S., Goyal, P., & Srivastava, M. M. (2009). Pesticides: Past, Present, and Future. In L. M. L. Nollet & H. S. Rathore (Eds.), *Handbook of pesticides: methods of pesticide residues analysis* (p. 628). Boca Raton: CRC Press.
- Stainier, C., Robaye, V., Destain, M. F., Schiffers, B., & Lebeau, F. (2006a). Experimental evaluation of a spray drift Gaussian tilting plume model. *Asp. Appl. Biol.*, 77(2), 365–370.
- Stainier, C., Robaye, V., Schiffers, B., & Lebeau, F. (2006b). Modelling the spray drift by a Gaussian tilting plume model. *Asp. Appl. Biol.*, 77, 281–287.
- Stallinga, H., van de Zande, J. C., Michielsen, J. G. P., & van Velde, P. (2014). Spray drift and spray distribution of end nozzles. In *International Advances in Pesticide Application*, Oxford, UK (Vol. 122, pp. 395-400).

- Stephenson, G. R., Ferris, I. G., Holland, P. T., & Nordberg, M. (2006). Glossary of terms relating to pesticides (IUPAC Recommendations 2006). *Pure Appl. Chem.*, 78(11), 2075–2154. <https://doi.org/10.1351/pac200678112075>
- Stull, R. (2011). Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of applied meteorology and climatology*, 50(11), 2267-2269.
- Sumner, P. E. (2012). *Sprayer Nozzle Selection*. University of Georgia Extension B-1158.
- Tahmasebi, M., Rahman, R. A., Mailah, M., & Gohari, M. (2013). Roll movement control of a spray boom structure using active force control with artificial neural network strategy. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, 32(3), 189-201.
- Tan, Z. (2014). *Air Pollution and Greenhouse Gases From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission Control*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-212-8>
- Teixeira, M. M. (2010). Estudio de la población de gotas de pulverización. In J. C. Magdalena, B. Castillo Herrán, A. Di Prinzio, I. Homer Bannister, & J. Villalba (Eds.), *Tecnología de aplicación de agroquímicos* (First, pp. 77–88).
- Terziev, V., & Petkova-Georgieva, S. (2019). The Pesticides Toxic Impact on the Human Health Condition and the Ecosystem. Available at SSRN 3477254.
- Teske, M. E., Miller, P. C. H., Thistle, H. W., & Birchfield, N. B. (2009). Initial development and validation of a mechanist spray drift model for ground boom sprayers. *Trans. ASABE*, 52(4), 1089–1097. Disponible en: <https://pubag.nal.usda.gov/download/34900/PDF>
- 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.
- Thompson, N., & Ley, A. J. (1983). Estimating spray drift using a random-walk model of evaporating drops. *J. Agric. Eng. Res.*, 28(5), 419–435. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(83\)90134-8](https://doi.org/10.1016/0021-8634(83)90134-8)
- Tieleman, H. W. (2003). Roughness estimation for wind-load simulation experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(9), 1163-1173.
- Torrent, X., Garcerá, C., Moltó, E., Chueca, P., Abad, R., Grafulla, C., ... Planas de Martí, S. (2017). Comparison between standard and drift reducing nozzles for pesticide application in citrus: Part I. Effects on wind tunnel and field spray drift. *Crop Prot.*, 96, 130–143. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.02.001>
- Tsay, J., Fox, R. D., Ozkan, H. E., Brazee, R. D., & Derksen, R. C. (2002b). Evaluation Of A Pneumatic-Shielded Spraying System By Cfd Simulation. *Transactions of the ASAE*, 45(1), 47.
- Tsay, J., Ozkan, H. E., Brazee, R. D., & Fox, R. D. (2002a). CFD simulation of moving spray shields. *Transactions of the ASAE*, 45(1), 21.
- Van de Zande, J. C., Holterman, H. J., & Wenneker, M. (2008). Nozzle classification for drift reduction in orchard spraying: Identification of drift reduction class threshold nozzles. *Agricultural Engineering International*, 10(ALNARP 08 0013).
- Van de Zande, J. C., Michielsen, J. G. P., & Stallinga, H. (2007). Spray drift and off-field evaluation of agrochemicals in the Netherlands (No. 149). *Plant Research International*.
- van de Zande, J. C., Michielsen, J. G. P., Stallinga, H., & van Velde, P. (2014). Spray drift of reducing nozzle types spraying a bare soil surface with a boom sprayer. In *International Advances in Pesticide Application*, Oxford, UK (Vol. 122, pp. 245-254). Disponible en: <http://edepot.wur.nl/352735>

Bibliografia

- Van De Zande, J. C., Porskamp, H. A. J., & Holterman, H. J. (2002). Influence of reference nozzle choice on spray drift classification. *Aspects of applied biology*, 66, 49-56.
- van de Zande, J. C., Rautmann, D., Holterman, H. J., & Huijsmans, J. F. M. (2015). Joined spray drift curves for boom sprayers in The Netherlands and Germany. Disponible en: Plant Research International, Business Unit Agrosystems website: <http://edepot.wur.nl/353554>
- van den Berg, F., Kubiak, R., Benjey, W. G., Majewski, M. S., Yates, S. R., Reeves, G. L., ... van der Linden, A. M. A. (1999). Emission of Pesticides into the Air. *Water, Air, Soil Pollut.*, 115(1), 195-218. <https://doi.org/10.1023/A:1005234329622>
- Venkatram, A. (1996). An examination of the Pasquill-Gifford-Turner dispersion scheme. *Atmospheric Environment*, 30(8), 1283-1290.
- Wang, S. J., Dorr, G. J., Khashehchi, M., & He, X. (2015). Performance of Selected Agricultural Spray Nozzles using Particle Image Velocimetry. *J. Agric. Sci. Technol.*, 17(3), 601-613. Disponible en: http://jast.modares.ac.ir/article_12688.html
- Wilson, J., Nowatzki, J., & Hofman, V. (2008). Selecting drift-reducing nozzles.
- Wolf, R. E. (2003). Assessing the ability of dropletscan to analyze spray droplets from a ground operated sprayer. *Appl. Eng. Agric.*, 19(5), 525-530.
- Wolf, R. E., & Slocombe, J. W. (2000). Equipment to Reduce Spray Drift. Disponible en: <https://www.bookstore.ksre.k-state.edu/pubs/MF2445.pdf>
- Wolf, R. E., Gardisser, D. R., Slocombe, J. W., & Shaw, B. W. (2002). Nozzle Types Available for Boom Sprayer Applications of Crop Protection Products. Disponible en: <https://www.bookstore.ksre.k-state.edu/pubs/MF2541.pdf>
- Womac, A. R., Maynard II, R. A., & Kirk, I. W. (1999). Measurement variations in reference sprays for nozzle classification. *Transactions of the ASAE*, 42(3), 609.
- Yarpuz-Bozdogan, N., & Bozdogan, A. M. (2009). Comparison of field and model percentage drift using different types of hydraulic nozzles in pesticide applications. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 6(2), 191-196.
- Zannetti, P. (Ed.). (2013). *Air pollution modeling: theories, computational methods and available software*. Springer Science & Business Media.
- Zhang, X., Luo, Y., & Goh, K. S. (2018). Modeling spray drift and runoff-related inputs of pesticides to receiving water. *Environ. Pollut.*, 234, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.032>
- Zhou, Q., Miller, P. C. H., Walklate, P. J., & Thomas, N. H. (1996). Prediction of spray angle from flat fan nozzles. *J. Agric. Eng. Res.*, 64(2), 139-148. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0055>
- Zhu, H., Fox, R. D., Ozkan, H. E., Derksen, R. C., & Krause, C. R. (2004). DRIFTSIM -- A User-Friendly Computer Program to Predict Drift Distances of Droplets. In C. Ramsay, A. Hewitt, H. Thistle, C. Hoffman, R. Wold, & T. Wolf (Eds.), *International Conference on Pesticide Application for Drift Management* (pp. 317-323). Waikoloa.
- Zhu, H., Reichard, D. L., Fox, R. D., Brazee, R. D., & Ozkan, H. E. (1994). Simulation of Drift of Discrete Sizes of Water Droplets from Field Sprayers. *Trans. ASAE*, 37(5), 1401-1407. <https://doi.org/10.13031/2013.28220>
- Zhu, H., Salyani, M., & Fox, R. D. (2011). A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution. *Comput. Electron. Agric.*, 76(1), 38-43. <https://doi.org/10.1016/j.COMPAG.2011.01.003>
- Zimdahl, R. L. (2018). *Fundamentals of weed science*. Academic press.