

Jorge Badules Martínez

Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en el diseño y estudio de pulverizadores hidroneumáticos

Director/es

Gil Moya, Emilio
García Ramos, Francisco Javier

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606

Tesis Doctoral

APLICACIÓN DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL (CFD) EN EL DISEÑO Y
ESTUDIO DE PULVERIZADORES
HIDRONEUMÁTICOS

Autor

Jorge Badules Martínez

Director/es

Gil Moya, Emilio
García Ramos, Francisco Javier

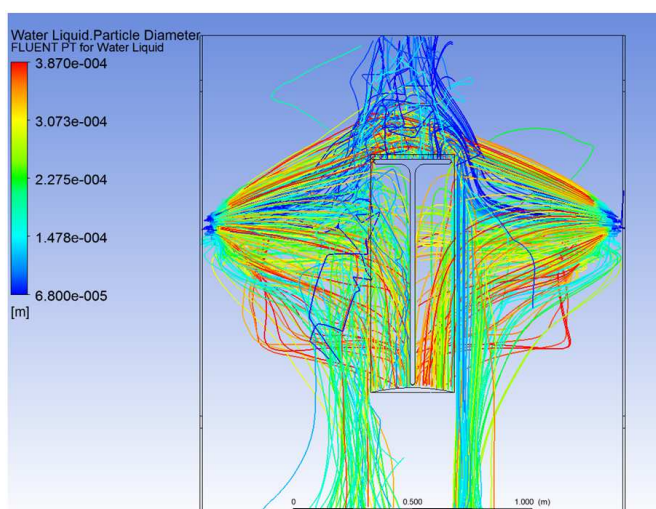
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

2021

TESIS DOCTORAL

JORGE BADULES MARTÍNEZ

Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en el diseño y estudio de pulverizadores hidroneumáticos



Directores:

Dr. Francisco Javier García Ramos

Dr. Emilio Gil Moya

Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural
Escuela Politécnica Superior de Huesca

2020



Universidad
Zaragoza

Listado de publicaciones

Esta tesis doctoral se presenta bajo la modalidad de compendio de publicaciones, habiendo sido autorizada por sus directores y por la Comisión de Doctorado del Departamento de Agricultura y Ciencias del Medio Natural de la Universidad de Zaragoza.

Se adjuntan cinco publicaciones con unidad temática, cuatro pertenecientes a revistas indexadas en el Journal Citations Reports (JCR) de Web of Science y una quinta perteneciente a una publicación no indexada en JCR pero de alto prestigio en su campo. Jorge Badules Martínez ha sido primer firmante en cuatro de las cinco publicaciones, siendo segundo firmante en una de ellas. Las publicaciones son:

Publicaciones JCR

1. García-Ramos, F.J., Badules, J., Boné, A., Gil, E., Aguirre, J., Vidal, M. (2018). "Application of an acoustic Doppler velocimeter to analyse the performance of the hydraulic agitation system of an agricultural sprayer". *Sensors*, 18, p. 3715. Journal impact factor (JCR): 3.031 (Q1, Instruments & instrumentation).
2. Badules, J., Vidal, M., Boné, A., Gil, E., García-Ramos, F.J. (2019) "CFD Models as a tool to analyze the performance of the hydraulic agitation system of an air-assisted sprayer". *Agronomy*, 9 (11), p. 769. Journal impact factor (JCR): 2.603 (Q1, Agronomy).
3. Badules, J., Vidal, M., Boné, A., Gil, E., García-Ramos, F.J. (2020) "Biphasic computational fluid dynamics modelling of the mixture in an agricultural sprayer tank". *Molecules*, 25, p. 1870. Journal impact factor (JCR): 3.267 (Q2, Biochemistry & Molecular Biology).
4. Badules, J., Vidal, M., Boné, A., Llop, J., Salcedo, R., Gil, E. and 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, pp.166-174. Journal impact factor (JCR): 3.171 (Q1, Agriculture).

Publicaciones no JCR

5. Badules, J., Gil, E., García-Ramos, F. J., (2020) "Simulation of pesticide application in vineyards using CFD: Study of off-target losses and treatment optimization". *Aspects of Applied Biology*, nº 144, pp. 229-239.

Justificación de la unidad temática de los artículos

La presente tesis tiene como objetivo el desarrollo de modelos y profundización en el uso de la técnica de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en el estudio y diseño de pulverizadores hidroneumáticos, con especial énfasis en aquellos de conductos verticales que se adaptan a la geometría de cultivos en seto. Este estudio abarca el camino que recorre el líquido, desde que es agitado en el tanque de la máquina, hasta que llega pulverizado en gotas al cultivo objetivo del tratamiento. Siguiendo este camino, *desde el depósito hasta el cultivo*, se han realizado una serie de investigaciones que se han reflejado en los artículos arriba citados.

El primero de ellos describe un ensayo de agitación en un depósito de pulverizador, en el que se analizan las velocidades del fluido en diferentes condiciones y la homogeneidad de un producto que se disuelve en el mismo, constituyendo la base sobre la que comparar posteriores simulaciones CFD.

El segundo pretende simular fielmente mediante CFD los flujos y velocidades del líquido medidos en el experimento del primer artículo, comparando la concordancia del modelo informático frente a los datos recogidos experimentalmente.

La tercera publicación aborda el análisis mediante CFD de la mezcla del producto disuelto en el agua de dilución durante el proceso de agitación, el cual debe garantizar la homogeneidad del caldo. A diferencia del anterior artículo, éste se centra en el análisis de la concentración, evolución con el tiempo de la mezcla e interacción entre ambas fases.

A partir de aquí, se abandona el tanque de los pulverizadores, para seguir estudiando otras partes de estas máquinas implicadas en la realización del tratamiento. Como aspecto crítico, resulta necesario realizar la modelización de las corrientes de aire generadas por los pulverizadores hidroneumáticos, ya que son las encargadas de transportar las gotas pulverizadas en las boquillas hasta el cultivo. Se elige, para continuar el estudio, una tipología de pulverizador hidroneumático de conductos verticales adaptado a la geometría de cultivos en seto, ampliamente usada por ejemplo en viñedo, cuya caracterización mediante técnicas CFD resulta novedosa. El cuarto artículo enumerado, realiza un análisis sobre cómo abordar la simulación CFD de las corrientes generadas en esta máquina, que requieren técnicas desarrolladas en esta investigación.

Finalmente, una última publicación, expone una metodología que mediante el uso de CFD, permite realizar simulaciones de tratamientos con diferentes configuraciones del sistema neumático estudiado en el artículo anterior, así como otras variables de ajuste de la máquina, para determinar cuál es la configuración que permite minimizar las pérdidas y por tanto, optimizar el tratamiento.

De esta forma, se tiene, usando como hilo conductor a la CFD, un compendio de artículos que explican metodologías que permiten analizar las partes más importantes de los pulverizadores hidroneumáticos para conseguir tratamientos fitosanitarios lo más eficientes posibles, así como determinar el comportamiento de los fluidos con los elementos diseñados.

Agradecimientos

La primera persona a la que se le debe agradecer la realización de esta tesis, es sin duda a Javier García Ramos, pero no porque sea típico y tópico el mostrar agradecimiento a un director de tesis, sino desde la sinceridad. Más allá de su colaboración, labor, elaboración de datos, correcciones, etc., Javier tiene el mérito de haberme aguantado y haber apaciguado los ánimos con mucha mano izquierda en momentos en que todo me venía mal y daban ganas de abandonar, cuestión que fue la tónica general de los últimos años de la tesis, cuando compaginar el trabajo profesional con el doctorado fue bastante complicado. Otros no lo hubieran hecho.

En segundo lugar, Emilio Gil, desde la distancia, en Barcelona, no pocas veces me ha sacado las castañas del fuego. Esta tesis hubiese sido muchísimo más difícil sin él; su colaboración ha sido fundamental.

También se debe agradecer al Laboratorio de Maquinaria Agrícola de la Universidad de Zaragoza y a la Unidad de Mecanización Agraria de la Universidad Politécnica de Cataluña, por el esfuerzo económico realizado. El hecho de que esta tesis se haya desarrollado “en horas libres del autor fuera de su trabajo” y sin estar asociada a ninguna beca, contrato ni financiación, no quiere decir que haya sido gratis para la sociedad, pues ha existido un coste monetario, principalmente derivado de la realización de ensayos y la publicación de artículos.

Por otra parte, también se debe de agradecer puntualmente la colaboración ofrecida por José Melet, de Gar-Melet, y Jordi Huguet, de ILEMO-Hardi, por sus explicaciones, datos y predisposición para intercambiar información sobre pulverizadores. A Mariano Vidal y Javier Aguirre, por llevarme de un lado a otro de la geografía nacional con sus coches; a Mariano Vidal, además, por sus soldaduras e “inventos” necesarios para la toma de datos de esta tesis. A Ramón Salcedo, por sus orientaciones e ideas, y a Jordi Llop y Antonio Boné, por traerme máquinas o despieces con los que poder avanzar en la investigación.

Además agradecer a los que han sufrido mis seminarios y largas explicaciones, como Hugo Malón, Fernando Molina, y de nuevo Mariano Vidal.

Y también cómo no, a Pilar Catalán y sobre todo a Gemma Sausán, que siempre han estado facilitando la burocracia asociada al desarrollo de esta tesis a lo largo de estos años; incluso cuando metía la pata, ahí estaba Gemma para solucionarlo detrás del correo electrónico.

Lista de abreviaturas y acrónimos

AMG:	Algebraic MultiGrid (Método Algebráico Multimalla)
CAD:	Computer Aid Design (Diseño Asistido por Ordenador)
CFD:	Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional)
DNS:	Direct Numerical Simulation
DPM:	Discrete Phase Model
FVM:	Finite Volume Method (Método de los Volúmenes Finitos)
ISO:	International Standard Organization
JCR:	Journal Citation Reports
LES:	Large Eddy Simulation
LIDAR:	Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging
PISO:	Pressure-Implicit with Splitting of Operators
PRESTO:	Pressure staggering option
QUICK:	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics
RANS:	Reynolds Averaged Navier-Stokes
Re:	Número de Reynolds
RNG:	Re-Normalization Group
RSM:	Reynolds Stress Model
SIMPLE:	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Ecuations
SIMPLEC:	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Ecuations - Consistent
SST:	Shear-Stress Transport
ULV:	Ultra-Low Volume (Ultra Bajo Volumen)
VMD:	Volumetric Median Diameter (Diámetro de la Mediana Volumétrica)
VOF:	Volume Of Fluid

Notación empleada

Dado que el software utilizado usa como símbolo decimal el punto (.), para mantener la coherencia entre las figuras expuestas y el texto de la tesis, se ha usado en todo momento dicho símbolo como separador decimal. Por lo tanto, se ha usado el símbolo coma (,) como separador de miles.

Para la bibliografía mencionada en la memoria, se siguen las normas del estilo Harvard o sistema de autor-fecha. En los artículos publicados que forman parte del compendio de la tesis, sin embargo, se han empleado otros estilos según los requerimientos de la editorial de las revistas.

Resumen

Como cualquier otro cultivo, los árboles frutales, los cultivos leñosos o el viñedo, requieren de la realización de tratamientos contra las diversas plagas y enfermedades que les afectan. En explotaciones profesionales, estos tratamientos se suelen realizar con una maquinaria específica: los pulverizadores hidroneumáticos. Estas máquinas, comúnmente accionadas por un tractor, almacenan el producto a aplicar al cultivo en un tanque, lo pulverizan en finas gotas, y generan corrientes de aire que transportan las gotas hasta el cultivo y además agitan sus hojas.

La realización de estos tratamientos es imprescindible para el suministro global en los mercados, pero su aplicación no está exenta de problemas medioambientales, económicos y de otra índole. Por ello, por un lado deben intentar reducirse a lo mínimo necesario, y por otro, debe conseguirse que estos tratamientos sean lo más eficientes posibles. En esta eficiencia, intervienen el propio pulverizador y las condiciones en que se lleva a cabo el tratamiento. El estudio experimental de este problema es complejo y costoso tanto en tiempo como en recursos humanos y económicos. Una alternativa a estos ensayos podrían ser las simulaciones por ordenador.

Por ello, el objetivo principal de esta tesis es profundizar en el estudio de los pulverizadores hidroneumáticos y de los tratamientos que aplican, mediante el desarrollo de metodologías que usen la dinámica de fluidos computacional (CFD) para realizar simulaciones informáticas, opción que tiene importantes ventajas frente a los ensayos reales. En este aspecto, se ha tomado un enfoque global desde que el producto está en el depósito del pulverizador hasta que la gota llega al cultivo objetivo.

El primer requisito de un tratamiento eficiente es que la mezcla realizada en el depósito entre el producto y el agua de dilución sea homogénea. Tras un ensayo experimental en el tanque de un pulverizador hidroneumático, se procedió a su simulación mediante CFD bajo dos caminos diferentes: estudio de la hidrodinámica generada por los mecanismos de agitación, y estudio del proceso de mezcla entre las diferentes fases del caldo. La simulación CFD de la hidrodinámica del fluido, permitió obtener con éxito cifras medias de velocidades, lo cual es de interés para el fabricante a la hora de probar sus diseños de tanques y sistemas de agitación sin necesidad de fabricarlos; sin embargo la simulación informática tiene baja fiabilidad en proporcionar datos concretos punto a punto de velocidad.

Por otro lado, la simulación del proceso de mezcla entre agua de dilución y producto mediante CFD, es exitosa empleando determinados modelos de física teórica, y puede constituir una alternativa a los ensayos experimentales normalizados para comprobar los sistemas de agitación en pulverizadores de nueva construcción. Este tipo de simulación, aporta la ventaja adicional, sobre los ensayos experimentales, de poder realizar un seguimiento continuo del proceso de mezcla durante la agitación del caldo, lo cual puede aportar importante información al fabricante de la máquina. Por ejemplo, los sistemas de agitación o diseño de tanques serán tanto mejores cuanto más rápidos sean en homogeneizar el caldo. Y esta información, puede obtenerse incluso en fase de diseño, sin necesidad de fabricar un prototipo de la máquina.

Una vez estudiada la agitación del tanque, se procedió, como paso previo a la simulación del tratamiento, a caracterizar las corrientes de aire generadas por los pulverizadores hidroneumáticos. En esta tesis, se ha trabajado con un modelo de conductos verticales adaptado a viñedo. Aunque existía una metodología previa usada por investigadores anteriores en otros modelos de pulverizadores hidroneumáticos, en el modelo elegido no fue satisfactoria. Por ello, se ha desarrollado una nueva metodología más genérica válida para cualquier tipo de pulverizador. A diferencia de la metodología clásica (basada en la medición experimental de flujos de aire y su posterior introducción como condición de contorno en los modelos CFD), la desarrollada en esta tesis se fundamenta en generar las corrientes de aire en la simulación a partir de la geometría de la máquina. Esto conlleva dificultades, como por ejemplo un mallado más complejo, mayores requerimientos de cálculo o cierta inestabilidad en el mismo, pero aporta grandes ventajas, como minimizar la toma de datos experimentales, o de nuevo, permitir al fabricante estudiar un pulverizador sin necesidad de construirlo.

Una vez caracterizadas las corrientes de aire que genera un pulverizador, se puede proceder al estudio de sus tratamientos mediante CFD. En este trabajo, se ha utilizado como demostración, el pulverizador de conductos verticales simulado, bajo diferentes condiciones de velocidad de avance, boquillas pulverizadoras y caudales de aire proporcionados por el circuito neumático de la máquina. La CFD permitió a una persona, realizar en unos pocos días, decenas de simulaciones que un equipo habría tardado semanas en hacerlas de forma experimental. Se consiguió además, realizar balances de masas del líquido pulverizado de una forma mucho más sencilla que con pruebas de campo (lo cual es vital para estimar la eficacia de la aplicación), si bien obtener otros datos, como la deposición (porcentaje de superficie de hojas cubiertas por gotas), no es posible por las propias limitaciones del cálculo informático.

Concretando en la máquina estudiada, se encontró que un mayor caudal de aire disminuye las pérdidas al suelo y mejora el porcentaje de líquido que se pulveriza sobre el cultivo, sin que tenga apenas efecto en las pérdidas por deriva. En este aspecto, la configuración del pulverizador de conductos verticales contrapuestos, sin duda es la responsable de este comportamiento inesperado. También tendrían efecto positivo en el tratamiento los tamaños de gota mayores y las velocidades de tractor más bajas. El análisis CFD del tratamiento, también permite estudiar la eficacia individualizada de cada boquilla del pulverizador, aspecto cuyo estudio experimental es casi inviable. En el pulverizador empleado como ejemplo se encontró que algunas boquillas no eran satisfactorias para tratar viñedos en seto elevados a más de medio metro del suelo.

Si bien las conclusiones concretas extraídas de las simulaciones de esta tesis no deben extrapolarse a otros pulverizadores hidroneumáticos de tipología muy diferente, sí puede decirse que el empleo de esta metodología permite al fabricante extraer información interesante para mejorar el diseño antes de fabricarlo (como la posición y orientación de las boquillas, la idoneidad del diseño de las canalizaciones de aire, etc.) así como puede proporcionar al usuario final de la máquina recomendaciones de uso que mejoren la eficiencia del tratamiento.

Abstract

Like any other crop, orchards, woody crops or vineyards require the realization of treatments against the different pests and diseases that affect them. In agricultural holdings, these treatments are usually carried out with specific machinery: hydropneumatic sprayers. These machines, commonly powered by a tractor, store in a tank the product to be applied to the crop, pulverize it in fine drops, and generate air flows that transport the drops to the crop and also shake its leaves.

Doing these treatments is essential for the global supply in the markets, but its application is not exempt of environmental, economic and other kind of problems. For this reason, it is necessary to try to reduce them to the minimum necessary, and also, to make these treatments to become as efficient as possible. This efficiency involves the sprayer itself and the conditions in which the treatment is carried out. The experimental study of this problem is complex and costly in terms of time, as well as in human and economic resources. An alternative to these tests could be computer simulations.

Therefore, the main objective of this thesis is to deepen in the study of hydropneumatic sprayers and the treatments they apply, through the development of methodologies that use computational fluid dynamics (CFD) to perform computer simulations, an option that has significant advantages over real tests. In this aspect, a global vision has been taken from the moment the product is in the sprayer's tank until the drop reaches the target crop.

The first requirement of an efficient treatment is that the mixing made in the tank between the product and the dilution water is homogeneous. After an experimental test in the tank of a hydropneumatic sprayer, it was simulated by using CFD under two different paths: the study of the hydrodynamics generated by the agitation mechanisms, and the study of the mixing process between the different phases of the mixture. The CFD simulation of the fluid's hydrodynamics successfully obtained average speed values, which is useful for the manufacturer to test its tank and its agitation system designs without the need of building them; however, computer simulation has low reliability in providing concrete point-to-point speed data.

On the other hand, the simulation of the mixing process between dilution water and product using CFD, is successful using certain models of theoretical physics, and can be an alternative to standardized experimental tests to verify the agitation systems in newly constructed sprayers. This type of simulation has the additional advantage, over experimental tests, of being able to continuously monitor the mixing process during the agitation of the liquid, which can provide important information to the machine manufacturer. For example, agitation systems or tank design will be better the faster they are in homogenizing the broth. And this information can be obtained even in the design phase, without the need to build a prototype of the machine.

Once the agitation of the tank was studied, as a previous step to the treatment simulation, a characterization of the air flows generated by the hydropneumatic sprayers was carried out. In this thesis, work has been done with a model of vertical ducts adapted to vineyards. Although there was a previous methodology used by

previous researchers in other models of hydropneumatic sprayers, in the chosen model it was not satisfactory. Therefore, a new more generic methodology, valid for any type of sprayer, has been developed. Unlike the classical methodology (based on the experimental measurement of air flows and its subsequent introduction as a boundary condition in CFD models), the one developed in this thesis is based on generating the air flows in the simulation using the geometry of the machine. This implies difficulties, such as a more complex mesh, greater calculation requirements or some instability in the same, but it provides great advantages, such as minimizing the capture of experimental data, or again, allowing the manufacturer to study a sprayer without building it.

Once the air flows generated by a sprayer have been characterized, the study of its treatment can be carried out by using CFD. In this work, it has been used as a demonstration, the simulated vertical duct sprayer, under different conditions of advance speed, spraying nozzles and air flows provided by the pneumatic circuit of the machine. The CFD allowed a person, to perform in a few days dozens of simulations that it would have taken a team weeks to do in an experimental way. It was also possible to carry out mass balances of the liquid sprayed in a much simpler way than with field tests (which is vital to estimate the effectiveness of the application), although obtaining other data, such as deposition (percentage of leaf surface covered by drops), is not possible due to the limitations of computer calculation.

Specifically in the machine studied, it was found that a greater air flow reduces losses to the soil and improves the percentage of liquid sprayed on the crop, with little effect on drift losses. In this aspect, the configuration of the sprayer with opposed vertical ducts is undoubtedly responsible for this unexpected behavior. Larger drop sizes and lower tractor speeds would also have a positive effect on treatment. The CFD analysis of the treatment also makes it possible to study the individual efficiency of each nozzle of the sprayer, an aspect whose experimental study is almost unfeasible. In the sprayer used as an example, some nozzles were found not to be satisfactory for treating vineyards in hedges at a height of more than half a meter above the ground.

Although the concrete conclusions of this thesis reached from the simulations should not be extrapolated to other hydropneumatic sprayers of very different types, the use of this methodology can be said to allow the manufacturer to extract interesting information to improve the design before manufacturing it (such as the position and orientation of the nozzles, the suitability of the design of the air ducts, etc.) as well as it can provide the end user of the machine with recommendations for use that improve the efficiency of the treatment.

Tabla de contenido

1.	Protección de cultivos: necesidad en el mundo actual y riesgos asociados	1
1.1.	Justificación del trabajo	2
1.2.	Estructura del documento de tesis.....	2
2.	Objetivos generales de la tesis.	5
3.	Tratamientos fitosanitarios y maquinaria para su aplicación	7
3.1.	Generalidades sobre productos fitosanitarios.....	7
3.2.	Aplicación de tratamientos por vía líquida	8
3.2.1.	Las gotas y la pulverización	8
3.2.2.	Transporte de gotas	14
3.3.	Factores que afectan a la eficiencia de los tratamientos	14
3.3.1.	Variables meteorológicas.....	15
3.3.2.	Variables asociadas a los ajustes del equipo de aplicación	15
3.3.3.	Variables dependientes del cultivo	16
3.3.4.	Otras variables.....	17
3.3.5.	Consideraciones finales sobre las variables	17
3.4.	Terminología de pulverizadores	18
3.5.	Descripción de las máquinas estudiadas en este trabajo.....	18
4.	Conceptos básicos sobre CFD	21
4.1.	Ecuaciones de Navier-Stokes.....	21
4.2.	¿Qué es la CFD?	22
4.3.	El mallado del dominio de cálculo	23
4.3.1.	El método de los volúmenes finitos	23
4.3.2.	El problema del mallado	24
4.3.3.	Opciones avanzadas: mallado adaptativo y mallado poliédrico	26
4.3.4.	Mallas móviles	28
4.3.5.	Comentarios sobre tiempos de cálculo	30
4.4.	Bases teóricas de la CFD.....	31
4.4.1.	El problema de la turbulencia	31
4.4.2.	Los modelos de turbulencia en los métodos RANS.....	33
4.4.3.	Funciones de pared.....	36
4.4.4.	Esquemas de discretización y acople presión-velocidad.....	37
4.4.5.	Convergencia del cálculo.....	39
4.5.	Uso genérico del programa ANSYS Fluent®	40
5.	Aplicación de la CFD a la maquinaria de aplicación de productos fitosanitarios ...	43
5.1.	Generalidades.....	43
5.2.	CFD y tecnología de aplicación de productos fitosanitarios	43
5.2.1.	Estudio de flujos de aire en pulverizadores hidroneumáticos.....	44
5.2.2.	Diseño de pulverizadores.....	46
5.2.3.	Estudio de la deriva.....	48
5.2.4.	Interacción aire-planta y características aerodinámicas de las mismas...	49
5.3.	Tendencias actuales.....	51
6.	CFD y depósitos de los pulverizadores	55
6.1.	Introducción	55
6.1.1.	Preparación de los caldos	55
6.1.2.	Generalidades sobre sistemas de agitación.....	56

6.1.3.	Ensayos de agitación. Problemática	57
6.1.4.	Simulaciones CFD previas.....	59
6.2.	Metodología y planteamiento del estudio.....	60
6.2.1.	Estudio de velocidades en el depósito mediante CFD.....	60
6.2.2.	Estudio de concentraciones en el depósito mediante CFD	62
6.2.3.	Modelado de los agitadores.....	63
6.3.	Resultados	64
6.3.1.	Comparación de velocidades reales con modelos CFD	64
6.3.2.	Estudio de concentraciones en CFD. Tiempos de cálculo.....	65
6.3.3.	Patrones en los modelos Euler-Lagrange.....	66
6.3.4.	Velocidades y flujos bifásicos	67
7.	Estudio CFD de corrientes de aire generadas por pulverizadores.....	69
7.1.	Introducción	69
7.1.1.	Limitaciones de la metodología clásica	70
7.1.2.	Necesidad de una nueva metodología	72
7.2.	Nueva metodología propuesta.....	72
7.3.	Resultados y aplicación	74
7.3.1.	Aplicación a pulverizadores de flujo radial	75
7.3.2.	Ventajas e inconvenientes	77
8.	El problema de la interacción planta-máquina y su modelado en CFD	79
8.1.	Interacción aire-cultivo	79
8.1.1.	Revisión bibliográfica del problema CFD-cultivo	80
8.1.2.	Estudio de setos homogéneos en CFD.....	81
8.1.3.	Estudio aerodinámico de plantas reales.....	82
8.1.4.	Tratamiento de datos	84
8.1.5.	Modelos simplificados de cultivos y plantas artificiales.....	87
8.2.	Comportamiento aerodinámico de parcelas completas de cultivo	87
8.3.	Modelos Lagrangianos en CFD y captura de gotas.....	89
9.	Simulación CFD de tratamientos con pulverizadores hidroneumáticos	93
9.1.	Introducción	93
9.2.	Metodología de simulación.....	94
9.2.1.	La modelización de la máquina	94
9.2.2.	Gotas y boquillas de pulverización	97
9.2.3.	La modelización del seto.....	99
9.2.4.	Consideraciones sobre configuración del cálculo	100
9.2.5.	Variables estudiadas	100
9.3.	Resultados obtenidos.....	104
9.4.	Estudio individualizado de boquillas y deposición	110
10.	Conclusiones generales	113
11.	Propuesta de trabajos futuros	117
12.	Referencias	121

Índice de figuras

Figura 1. Curvas de fracción acumulada de dos poblaciones de gotas.	9
Figura 2. Pulverizador hidroneumático cuyos flujos de aire se han estudiado en este trabajo	19
Figura 3. Pulverizador hidroneumático en laboratorio para estudio del tanque	20
Figura 4. Malla estructurada y no estructurada.	25
Figura 5. Proceso de mallado adaptativo en Fluent®.	27
Figura 6. Mallado poliédrico en Fluent®.	28
Figura 7. Esquema de malla deslizante.	29
Figura 8. Tiempo de cálculo de 1500 iteraciones en un problema CFD según el número de celdas	30
Figura 9. Evolución en el tiempo de la velocidad en un punto fijo dentro de un flujo turbulento.....	32
Figura 10. Organigrama de modelos de turbulencia disponibles en Fluent®.	35
Figura 11. Esquema de celdas de mallado con sus centroides.	38
Figura 12. Ejemplo de residuos de cálculo en diferentes iteraciones	40
Figura 13. Flujos de aire generados por varios modelos de pulverizadores en CFD.....	45
Figura 14. Visualización en CFD de los flujos de aire generados por un pulverizador a diferentes velocidades de giro y avance de la máquina.	46
Figura 15. Boquilla pulverizadora analizada mediante CFD.....	47
Figura 16. Plano de velocidades en un depósito calculado con CFD.....	47
Figura 17. Modelo CFD de la deriva de gotas en un pulverizador de barra.....	48
Figura 18. Árboles frutales modelizados en CFD.....	49
Figura 19. Estudio de pulverizadores en CFD con interacciones con árboles.....	50
Figura 20. Modelización mediante CFD de la pulverización sobre un cultivo de manzanos bajo diferentes condiciones de viento	51
Figura 21. Simulación CFD de un dron empleado en la pulverización	52
Figura 22. Turbulencia generada por un pulverizador durante su trabajo.....	53
Figura 23. Elementos auxiliares necesarios para llevar a cabo mediciones en un depósito de pulverizador hidroneumático.....	59
Figura 24. Simulación de un flujo bifásico con modelo Euler-Lagrange y del mismo con un modelo Euler-Euler	63
Figura 25. Velocidades medias por puntos de medición en los modelos CFD y en las mediciones experimentales de velocidad de fluido	64
Figura 26. Patrones de fase dispersa en un plano horizontal de un depósito, considerando un modelo Euler-Lagrange, con dos agitadores en funcionamiento.....	67
Figura 27. Ensayo de un pulverizador hidroneumático mediante la metodología clásica de caracterización en CFD.	70
Figura 28. Pulverizador de conductos verticales analizado en este trabajo.....	71
Figura 29. Modelo en CFD de un bajante de la máquina de la Figura 28.....	73
Figura 30. Modelo CFD de pulverizador con ventilador axial trasero realizado con la metodología desarrollada en esta tesis.	75
Figura 31. Velocidades CFD de un ventilador de 8 aspas, calculadas sin empleo de cálculo transitorio.	76

Figura 32. Simulación de una corriente uniforme de aire en CFD, sola y atravesando un seto de cultivo.....	81
Figura 33. Simulación de un seto de gran y de poca resistencia aerodinámica.	82
Figura 34. Bastidores instalados en un seto en espaldera de vid experimental para su posterior estudio aerodinámico.	83
Figura 35. Mediciones de laboratorio realizadas con varios segmentos de espaldera de vid.....	84
Figura 36. Determinación del área foliar de un segmento de vid estudiado.....	85
Figura 37. Porcentaje de velocidad medida en puntos determinados tras setos de vid respecto de velocidades medidas sin seto, en relación con el área foliar que tiene que atravesar la corriente de aire.....	86
Figura 38. Vectores de velocidad de viento transversal al incidir sobre varias filas de setos uniformes.	88
Figura 39. Posibilidades de una gota en un modelo CFD al tocar con una condición de contorno	90
Figura 40. Detalle de un grupo de 4 toberas y su correspondiente mallado en volúmenes finitos.....	95
Figura 41. Modelización CAD de una de las conducciones de la máquina estudiada y detalle donde se puede apreciar la transición entre etapas de cálculo	96
Figura 42. Modelo de malla para simulación de pulverización.....	97
Figura 43. Diferentes posibilidades de definición de inyecciones de partículas en el modelo DPM de Fluent®	98
Figura 44. Configuración de las gotas pulverizadas en una boquilla.....	101
Figura 45. Porcentaje de gotas pulverizadas que impactan contra el área del seto de cultivo en tres simulaciones a diferente velocidad (4.5, 6 y 7.5 km h ⁻¹).	102
Figura 46. Imagen de la simulación en un momento intermedio de la misma, en el que se aprecian las corrientes de aire de velocidad mayor a 4 m s ⁻¹	105
Figura 47. Trayectoria de gotas simuladas recién pulverizadas.....	105
Figura 48. Porcentaje de líquido pulverizado que alcanza el seto de vid en los modelos, en función del caudal de aire suministrado por el pulverizador.....	106
Figura 49. Porcentaje de líquido pulverizado que se pierde en el suelo en los modelos, en función del caudal de aire suministrado por el pulverizador.....	107
Figura 50. Porcentaje de líquido pulverizado que se pierde por deriva en los modelos, en función del caudal de aire suministrado por el pulverizador	108
Figura 51. Vista cenital de isosuperficies de velocidad de corrientes de aire 1.5 m s ⁻¹ , producidas a diferentes velocidades de desplazamiento de la máquina	109
Figura 52. Imagen de un conducto de la máquina estudiada con sus boquillas, y eficiencia teórica calculada de cada una de ellas.	110
Figura 53. Izquierda: deposición en porcentaje respecto del total de líquido pulverizado que alcanza el seto a lo largo de su altura, por tramos de 2 cm	111

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de gotas en función de su diámetro según ASABE S572.1.	10
Tabla 2. Diámetro de gotas recomendadas para diferentes tratamientos	12
Tabla 3. Horas de cálculo de varios modelos CFD bifásicos.....	65

1. Protección de cultivos: necesidad en el mundo actual y riesgos asociados

¿Cómo nació la agricultura? La agricultura es inherente a las civilizaciones. Mesopotamia, Lejano Oriente, Mesoamérica, Nueva Guinea..., la agricultura surgió independientemente en varias localizaciones separadas miles de kilómetros. Varias son las hipótesis para explicar cómo y porqué se inventó la agricultura, pero fuese cual fuese la razón, nuestros antepasados dejaron de ser recolectores-cazadores, y pasaron a ser agricultores.

Al domesticar especies vegetales y aparecer la agricultura, surgieron los adversarios naturales de los cultivos. Los pioneros de la agricultura ya tuvieron que conocer y sufrir plagas y enfermedades, y debieron luchar contra ellas. Y esta larga batalla ha llegado hasta nuestros días. Por lo tanto, el concepto “protección de cultivos” nace con la propia agricultura. Pero es evidente que las sociedades actuales, y por lo tanto su agricultura, nada tienen que ver con las civilizaciones antiguas. De este modo, en nuestra actual sociedad la agricultura tiene que cumplir con ciertos requisitos (Vázquez, 2003):

- Ha de proporcionar alimentos en cantidad y calidad adecuada a toda la sociedad.
- Los agricultores y trabajadores agrarios, que en nuestras sociedades suponen un porcentaje de la población muy bajo (de hasta sólo el 2 % en algunos países), deben obtener un provecho económico con su trabajo.
- Los consumidores desean productos de precios lo más bajos posibles dentro de las diferentes calidades que se pueden producir.

Actualmente, cumplir con estas tres premisas no sería posible sin técnicas de protección de cultivos en las que se empleen productos químicos (Cooper y Dobson, 2007; Reddy, 2016). Aunque ciertas personas o grupos sociales cuestionen el empleo de la lucha química, debe remarcarse que, sin ella, sencillamente tan pocas personas no podrían producir elevadas cantidades de alimentos con bajos costes para toda la población; por mucho que un pequeño porcentaje de la población mundial sí puede permitirse pagar alimentos más caros cultivados sin productos químicos, eso no es una situación que se pueda generalizar. En resumen, la lucha química es insoluble de la agricultura que se debe desarrollar en el sistema económico y social actual.

No obstante, las objeciones al uso de empleo de productos químicos en la protección de cultivos no deben ni pueden ser minusvaloradas sin más (McConnell, Kelly y Jones, 2016). En primer lugar, los técnicos debemos incrementar nuestros esfuerzos en mejorar la información que se transmite a la sociedad sobre la necesidad del empleo de estos productos. Y en segundo lugar, dado que el empleo de estos productos no está exento de inconvenientes derivados de su mal uso (DEFRA, 2011), la investigación agraria tiene la obligación de encontrar las formas de minimizar su empleo al máximo posible, siempre que se sigan cumpliendo lo que se espera de su uso:

- Que aumente la productividad de la explotación agrícola. Eso no quiere decir que deba conseguirse la total eliminación de la plaga, pues el óptimo

económico no se da en esa situación (Ostlie y Pedigo, 1987; Bor, 1995). No tiene sentido económico, llegado a un punto, seguir empleando productos químicos para combatir plagas.

- Que aporten una garantía adicional sanitaria al consumidor. Sobre ciertos cultivos pueden desarrollarse microorganismos productores de sustancias peligrosas, con lo que la falta de un tratamiento puede favorecer que aparezcan estas toxinas dañinas. Uno de los ejemplos más clásicos es el del cornezuelo del centeno (*Claviceps purpurea*).
- Que permitan al agricultor conseguir lo que desea el consumidor. Los consumidores en general buscan productos de buen aspecto, de buenas cualidades organolépticas, sanos y adecuados a su presupuesto. Todo esto es más fácil con la lucha química, sin menospreciar por supuesto otro tipo de agriculturas.

Esta sensibilidad que emana de la demanda de la sociedad, se ha materializado en una legislación que obliga a que el uso de los productos químicos sea cada vez más sostenible, como la Directiva 2009/128/CE (Parlamento Europeo, 2009a) de uso sostenible de plaguicidas. La nueva estrategia “de la granja a la mesa” o “Farm to Fork” (Comisión Europea, 2020), profundiza esta senda iniciada hace más de una década.

En todo caso, la protección de cultivos empleando productos químicos es, en definitiva, indispensable por razones sociales y económicas. Permite a una gran parte de la población mundial tener acceso a alimentos a precios razonables, y ha librado a los agricultores de ciertos trabajos penosos. Pero su empleo debe ser cuidadoso, ceñirse a lo establecido por la legislación y reducirse a lo mínimo imprescindible.

1.1. Justificación del trabajo

Dado que el empleo de productos químicos resulta estar justificado en la agricultura actual, pero éste tiene que ser cada vez menor y/o más preciso por razones sociales, medioambientales y económicas, el estudio de los equipos de aplicación de productos fitosanitarios resulta por lo tanto de interés, ya que el manejo y diseño adecuado de los mismos es uno de los pilares en los que se fundamenta el correcto uso de estos productos químicos.

Este trabajo, por lo tanto, profundiza en el estudio de estas máquinas, indispensables en el contexto actual, aprovechando para ello las herramientas informáticas disponibles en el ámbito de la simulación de fluidos.

1.2. Estructura del documento de tesis

Esta tesis se presenta bajo la modalidad de compendio de artículos con unidad temática ya publicados en revistas científicas de alto impacto, indexadas en el Journal Citation Reports (Web of Science), o bien en revistas especializadas. Esta memoria inicial contiene un conjunto de explicaciones previas y adicionales que permiten complementar los artículos, y establecer un nexo de unión en la temática entre ellos.

Para ello, esta memoria presenta una estructura según se describe a continuación.

Tras esta introducción, se enumerarán de forma explícita los objetivos de la tesis.

A continuación, el texto se estructura en varios apartados en los que se expone un diagnóstico de la situación actual. En primer lugar, se analizan los fundamentos de los tratamientos fitosanitarios, describiendo por una parte la tipología de productos químicos presentes en el mercado, y por otra parte, se describen los procesos más importantes que tienen lugar durante el proceso de su aplicación, como por ejemplo la pulverización y transporte hasta las plantas. Tras ello se enumeran las máquinas con las que se realizan estas operaciones, las cuales son objeto del trabajo de estudio.

Posteriormente se explican los fundamentos de la mecánica de fluidos sobre los que se apoya la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), que es la base de este trabajo, haciendo hincapié en el mallado del dominio de cálculo para su resolución por medios numéricos y en los diferentes modelos físicos teóricos que sustentan el método. Y tras ello, se analiza el estado del arte en relación con el empleo de la CFD para el estudio de pulverizadores agrícolas y sus tratamientos.

Los siguientes apartados entran ya a detallar la investigación realizada, proporcionando información adicional a la contenida en los artículos publicados. Se comienza con el estudio de la agitación del caldo fitosanitario en los depósitos de los pulverizadores. Este estudio es genérico y válido para cualquier tipo de pulverizador.

Seguidamente, se detalla la problemática de la modelización de las corrientes de aire generadas por el circuito neumático de los pulverizadores hidroneumáticos. A partir de aquí el trabajo se centra en una tipología muy concreta, los pulverizadores hidroneumáticos con bajantes verticales, adaptados a cultivos en seto, si bien es cierto que las metodologías y técnicas empleadas se pueden implementar en otros tipos de pulverizadores, tal y como se explicará en el documento.

Tras ello, se trata un tema complementario al estudio de la maquinaria de tratamientos, que es la modelización de cultivos leñosos en CFD. Resulta necesario hacer este paréntesis con un apartado específico, ya que los resultados de los tratamientos realizados por los pulverizadores hidroneumáticos dependen de la interacción entre las corrientes de aire generadas por la máquina y las características aerodinámicas del cultivo.

Analizadas las corrientes de aire producidas por los pulverizadores hidroneumáticos y la interacción de éstas con las plantas, se dedica un apartado (el último que describe la investigación realizada) a la modelización en CFD de los tratamientos, mostrando la capacidad de la técnica para aumentar la eficiencia de los mismos mediante la simulación computacional de variables como el tamaño de gota pulverizada, la velocidad de avance durante el tratamiento o el caudal de aire aplicado, cuya conclusión debe ser encontrar la mejor configuración posible para cada máquina.

Finalmente, se incluyen dos breves apartados que cierran la memoria, con las conclusiones más importantes de la investigación, y las propuestas de líneas de trabajo futuras.

En los anexos, se recogen los artículos publicados en revistas científicas a lo largo de la realización de esta tesis, y que conforman el compendio.

2. Objetivos generales de la tesis.

La minimización de los riesgos asociados al uso de productos fitosanitarios en agricultura tiene dos pilares básicos: el aplicador y la maquinaria de aplicación. Respecto del primer pilar, lo fundamental es la formación. Respecto del segundo pilar, la maquinaria es responsable de conseguir que los tratamientos sean eficientes (que el producto sea aplicado en la dosis justa y en el lugar adecuado), y que los riesgos sean mínimos para el aplicador, consumidor y medio ambiente.

Esta tesis pretende, por tanto, progresar en la aplicación de la técnica de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) en el estudio, desarrollo y mejora de diseño de ciertas tipologías de pulverizadores hidroneumáticos utilizados habitualmente para la aplicación de productos fitosanitarios en cultivos en seto (estando muy implantados por ejemplo en viñedo en espaldera), con los objetivos generales de:

- Establecer metodologías generales y robustas de simulación mediante CFD de las corrientes de líquido generadas en sus depósitos, con las que se garantice la adecuada homogeneidad de la mezcla aplicada (producto químico diluido o mezclado en agua), así como profundizar en el estudio del proceso de mezcla del producto en el agua de dilución.
- Establecer metodologías generales de simulación de las corrientes de aire generadas por los pulverizadores hidroneumáticos mediante CFD, que resultan fundamentales para la aplicación del tratamiento y el éxito del mismo.
- Mostrar la capacidad de la CFD para simular el resultado del tratamiento realizado por la máquina, buscando así una configuración óptima de la misma.
- Establecer los problemas y limitaciones que, pese a sus ventajas, tiene la CFD aplicada a estos fines.

La consecución de estos objetivos, tendrán utilidad práctica en primer lugar para el fabricante de la maquinaria en la fase de diseño y pruebas de las máquinas y prototipos; y en segundo lugar, para el usuario final, que podría disponer de unas pautas básicas y sencillas de manejo de la máquina para obtener un tratamiento óptimo.

3. Tratamientos fitosanitarios y maquinaria para su aplicación

3.1. Generalidades sobre productos fitosanitarios

Los productos químicos usados en protección de cultivos reciben el nombre técnico de productos fitosanitarios. Es conveniente dedicar unos párrafos a los mismos para explicar su tipología y forma de aplicación, porque ello tiene consecuencias en aspectos concretos que se desarrollarán más adelante, como es la mezcla del producto en el tanque o la elección de boquillas.

Existen productos químicos para la protección de cultivos que no encajan en este trabajo y que no merecen ser explicados, como los molusquicidas, helicidas, rodenticidas o productos contra gusanos de suelo, pues se suelen aplicar en estado sólido con máquinas en las que la mecánica de fluidos no tiene importancia capital para su funcionamiento, tales como sembradoras con dispositivos específicos o abonadoras.

Más interesante resulta explicar el tipo de formulaciones que pueden presentar estos productos químicos. La primera clasificación que puede hacerse atiende al estado físico en que se presenta la formulación comercial. De esta forma podemos tener:

- Formulaciones para aplicar en estado gaseoso. Conocidos como fumigantes, el más conocido es el bromuro de metilo. Se aplican en forma de gas en recintos cerrados (cámaras, invernaderos). Son muy tóxicos y peligrosos, y en la actualidad, su uso está muy restringido en la Unión Europea (Parlamento Europeo, 2009b) y se requiere de una formación especial para manejarlos. No son objeto de este trabajo.
- Formulaciones para aplicar en forma sólida. Se trata de polvos para espolvoreo o granulados. Los molusquicidas y otros antes nombrados serían ejemplos de estos últimos. Respecto a los primeros, sí podría tener interés en este trabajo la aplicación de azufre mediante equipos denominados espolvoreadores acoplados al tractor, que fueron muy usadas antaño en viñedo y árboles frutales. Estos equipos constan de un ventilador que produce un flujo de aire, un sistema de distribución del producto, un dosificador y una tolva que almacena el producto antes de ser aplicado. El espolvoreo permite una gran penetración en las partes de difícil acceso de las plantas, pero es muy sensible a las condiciones atmosféricas siendo la deriva (fenómeno explicado más adelante) un problema muy grave. No merece la pena detenernos en ellos porque su uso en España actualmente ha caído considerablemente dejando paso a las aplicaciones en forma líquida, y porque llegado el caso, muchas de las metodologías y conclusiones de este trabajo serían de aplicación directa a los espolvoreadores accionados por tractor, con sólo reconfigurar ciertos aspectos del cálculo mediante CFD.
- Formulaciones para aplicar en forma líquida. En la actualidad, son las usadas de forma abrumadoramente mayoritaria. Las máquinas que se estudian en esta tesis doctoral están diseñadas para trabajar con estas formulaciones. No obstante, que la aplicación sea en estado líquido, no quiere decir que el formato del producto sea siempre en estado líquido.

Debemos diferenciar en este punto algunos conceptos sobre el líquido aplicado en el tratamiento. La **sustancia activa** es el compuesto químico que tiene acción en la protección de cultivos contra la plaga o enfermedad que queremos tratar. El laboratorio (fabricante) que sintetiza dicha sustancia activa, la mezcla con otras **sustancias auxiliares** como colorantes (para facilitar su identificación), diluyentes (para facilitar su posterior disolución en agua), sustancias inertes y otros productos, dando así lugar al producto fitosanitario comercial, que recibe entonces el nombre de formulación o **producto**. Esto es lo que el agricultor adquiere, pero no es lo que se aplica al cultivo directamente. Este producto, que puede ser sólido o líquido, debe ser mezclado con grandes cantidades de agua y, en ocasiones, con otros productos o sustancias (como coadyuvantes o mojantes), dando lugar, ahora sí, al **caldo** de aplicación.

Es importante esta distinción porque, en algunos apartados de esta tesis, lo que se modeliza es directamente el caldo de aplicación (por ejemplo, las gotas pulverizadas lo son), mientras que en otros casos, se profundiza en el proceso de mezcla entre el producto fitosanitario y el agua de dilución.

3.2. Aplicación de tratamientos por vía líquida

En el apartado 6.1.1 se explica el proceso de formación del caldo de aplicación, ya que tiene relación con la agitación, cuestión que se trata específicamente más adelante. En este apartado de la memoria, se explican otras etapas del tratamiento: la pulverización (transformación del líquido en gotas) y el transporte de las gotas hasta el objetivo del tratamiento.

3.2.1. Las gotas y la pulverización

Las gotas son las protagonistas principales de los tratamientos fitosanitarios por vía líquida. El proceso de formación tiene lugar en las boquillas, las cuales consiguen transformar el líquido proveniente del depósito en una población de gotas de características específicas. El objetivo de los diseñadores de boquillas es que estas gotas sean lo más iguales posibles entre sí, pero la tecnología de generación de gotas determina que haya una cierta variación en los diámetros de las gotas formadas. Por ello, aunque la elección de las boquillas y los ajustes necesarios de las máquinas se hace de forma simplificada suponiendo un tamaño de gota tipo, en realidad lo que se pulveriza es una población de gotas de diferentes tamaños. La caracterización de esta población de gotas resulta muy compleja por métodos CFD como los empleados en este trabajo¹ (Altimira et al., 2009) y hasta la fecha lo que se ha utilizado son metodologías que emplean instrumentos de alta precisión como espectrómetros de difracción láser o LIDAR (Nuyttens et al., 2005) o fotografías de alta resolución o analizadores por efecto Doppler (Vulgarakis et al., 2016).

Para definir una población de gotas se emplean ciertos parámetros. Los más clásicos son el Diámetro de la Mediana Volumétrica (VMD o $Dv50$), el $Dv90$ o el $Dv10$:

¹ Ver apartado 5.2.2

- Dv90: diámetro tal que las gotas de diámetro inferior integran el 90 % del volumen pulverizado.
- Dv10: diámetro tal que las gotas de tamaño inferior suman el 10 % del líquido pulverizado.
- Dv50: diámetro tal que las gotas de diámetro inferior de la población suman el 50 % del volumen pulverizado.

La homogeneidad de una población de gotas se puede establecer por muchos métodos. Uno de ellos es el cálculo de coeficientes como el “SPAN” relativo (coeficiente de uniformidad adimensional), que se calcula según ecuación 1.

$$SPAN = \frac{(Dv90 - Dv10)}{Dv50} \quad [1]$$

En este sentido, cuanto más bajo es el valor de SPAN más uniforme es el espectro de gotas en cuanto a su tamaño.

En aplicación de tratamientos fitosanitarios, los diámetros de las gotas se expresan en micrómetros (μm). Mediante un análisis de los volúmenes acumulados en función de los diámetros, se construyen las curvas de volumen acumulado. Estas curvas permiten de forma visual establecer cualitativamente la homogeneidad de la población: cuanto más vertical sea la curva acumulada, más homogénea será la población. Por ejemplo, en la Figura 1, la población de gotas representada con la curva 2 es más homogénea que la de la curva 1, teniendo ambas el mismo valor de VMD.

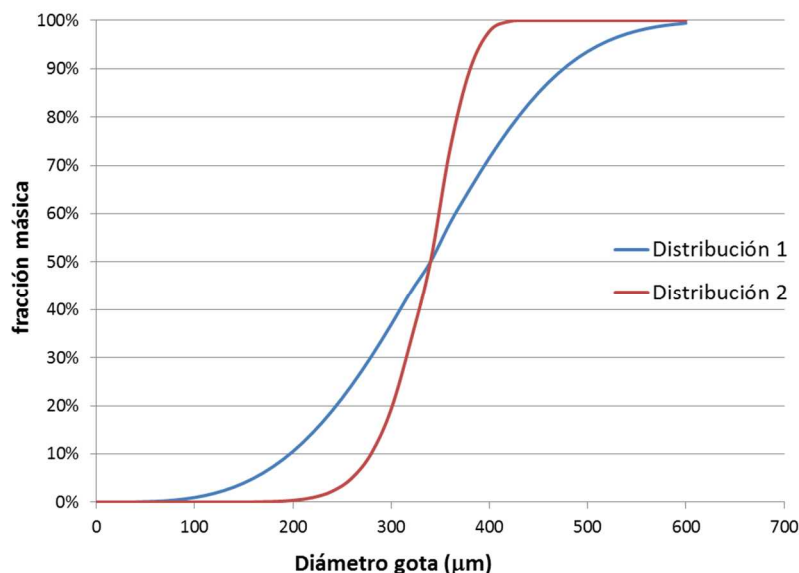


Figura 1. Curvas de fracción acumulada de dos poblaciones de gotas de idéntico VMD, pero diferente uniformidad.

Una forma diferente y complementaria para caracterizar poblaciones de gotas es definir las estadísticamente mediante funciones de distribución. La función de distribución más usada en pulverización de líquidos es la Rosin-Rammler

(originalmente concebida para describir partículas sólidas), cuya expresión general refleja la ecuación 2.

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad [2]$$

Donde

Y_d : volumen acumulado para las gotas iguales o superiores al diámetro “d”.

$\bar{d}$: diámetro característico de la distribución (que no es lo mismo que VMD).

n: parámetro de distribución de la función. Si no se conoce, se suele recomendar (Fluent, 2014) tomar un valor de 3.5.

Mediante varios valores de diámetros “d”, puede construirse una curva de volumen acumulado de una población de gotas, y ser introducida a los programas CFD, si bien el que se usará en esta tesis, tiene integrada esta distribución.

El tamaño de gota es fundamental para el éxito del tratamiento. Teóricamente, y a igualdad de otros factores, a menor tamaño de gota, se consiguen más impactos contra el objetivo para un mismo volumen de caldo. Esto es muy importante, especialmente para los productos que actúan por contacto, pues necesitan una buena cobertura de la planta, en oposición a los que actúan de forma sistémica, los cuales, son absorbidos por la planta y distribuidos por su interior gracias a su sistema vascular, por lo que es tolerable conseguir con el tratamiento una cobertura peor. Pero esto no quiere decir que sea conveniente que las gotas sean lo más pequeñas posibles debido a los fenómenos de deriva y evaporación.

Antes de explicar estos fenómenos, deben definirse los tamaños de gota, para lo cual, existen varias clasificaciones similares. Citaremos como ejemplo la clasificación ASABE, que en función de su diámetro, clasifica las gotas según la Tabla 1:

Tabla 1. Clasificación de gotas en función de su diámetro según el estándar ASABE S572.1.

Denominación gota	Diámetro (μm)	
	Mínimo	Máximo
Niebla	-	60
Muy fina	61	105
Fina	106	235
Media	236	340
Gruesa	341	400
Muy gruesa	401	500
Extremadamente gruesa	500	665
Ultra gruesa	665	-

Deriva:

La deriva es la cantidad de producto fitosanitario que se desplaza fuera de la zona rociada (tratada) por la acción de las corrientes de aire durante el proceso de aplicación (ISO, 2005). El fenómeno es mayor cuanto más pequeños son los diámetros de la población de gotas y mayor es el viento. La deriva provoca varios efectos indeseados: pérdida de producto (que implica pérdida económica directa), pérdida de

la eficacia del tratamiento (que implica pérdida económica indirecta), potenciales daños a cultivos vecinos donde las gotas son arrastradas (si es el caso de la aplicación de herbicidas o fitorreguladores) y potenciales daños al medio ambiente e incluso a las personas.

Para hacernos una idea, se estima que, en campo abierto, un viento de 2 m s^{-1} puede arrastrar a 360 metros de distancia gotas de $100 \mu\text{m}$ depositadas a 1 metro de altura del suelo (Vázquez, 2003). La legislación española (Ministerio de Presidencia, 2013) por ello establece como límite para realizar tratamientos los 3 m s^{-1} . Técnicamente se considera los $100 \mu\text{m}$ como el diámetro mínimo que en la práctica puede tener una población de gotas para ser aplicada en un tratamiento en campo abierto con equipos tradicionales, pues hay relación directa (Gil et al., 2014) entre volumen de caldo aplicado con gotas menores de 100 micrómetros y la deriva generada. En recintos cerrados, como por ejemplo invernaderos, esta limitación no estaría presente. En ellos es habitual realizar tratamientos con técnicas en los que las gotas son tan pequeñas que forman una niebla (nebulizadores). Sin embargo, este trabajo no se centra en este tipo de entornos, sino en maquinaria a usar en campo abierto, por lo que no se tratan en este trabajo gotas de diámetro inferior a ese orden de magnitud anteriormente mencionado.

Evaporación:

La evaporación consiste en la pérdida de caldo debido al paso de fase líquida a gaseosa. Se ve favorecida por altas temperaturas y bajas humedades relativas del ambiente, pero también por un tamaño pequeño de la gota. Provoca una pérdida económica directa por pérdida del producto, una pérdida de eficacia del tratamiento (entendido como porcentaje del líquido pulverizado que efectivamente llega al objetivo), y también un cierto peligro para el operario pues puede inhalar la sustancia activa.

Su control debe establecerse evitando realizar el tratamiento bajo condiciones meteorológicas desfavorables (por ejemplo, evitar las horas centrales del día en verano en nuestro entorno) y eligiendo boquillas que pulvericen una población de gotas adecuada.

Si uno de los métodos para luchar contra la deriva y la evaporación es aumentar el tamaño de la gota, ello no quiere decir que sea conveniente aumentar los diámetros hasta el absurdo. Además de conseguir una peor cobertura con el tratamiento, nos enfrentaremos a un problema adicional, el escurrimiento. Aunque el escurrimiento se puede reducir añadiendo al caldo coadyuvantes (entre los que están los mojantes y los adherentes), y depende también de la naturaleza y estado del cultivo que se esté tratando, en general se magnifica en el caso de gotas grandes o muy grandes (a partir de un diámetro de $500 \mu\text{m}$).

En resumen, hemos justificado que el rango de diámetros aceptables en poblaciones de gotas para tratamientos fitosanitarios por vía líquida en exteriores está entre los 100 y los $500 \mu\text{m}$. Existen numerosas recomendaciones en función del producto a aplicar sobre la elección del tamaño de gota (boquillas), por lo que nos limitamos a reproducir una de ellas en la Tabla 2.

Tabla 2. Diámetro de gotas recomendadas para diferentes tratamientos (Fuente: Vázquez, 2003).

Tratamiento		Diámetro gota (μm)
Fungicida de aplicación foliar	Contacto	100-200
	Sistémico	200-300
Insecticida de aplicación foliar	Contacto	100-200
	Sistémico	200-300
Herbicidas	Preemergencia	300-500
	Plántulas	150-250
	Contacto	150-250
	Sistémico	150-250

Para el aplicador del tratamiento, resulta fácil comprobar in situ la cobertura conseguida (porcentaje de superficie foliar mojada con el tratamiento fitosanitario) por medio de tarjetas hidrosensibles. Estas tarjetas son tiras de papel que al contacto con líquido cambian de color. Deben colocarse en el cultivo y realizar un análisis cualitativo de las mismas. Por lo general un cubrimiento del 20 al 30 % es suficiente para que el tratamiento tenga éxito (muy lejos por tanto de la idea de que todas las hojas queden empapadas) y nos puede indicar si estamos trabajando con un tamaño de gotas adecuado (Chen et al., 2013; Gil et al., 2019). Pese a la sencillez del análisis y economía del mismo, es muy habitual que los agricultores obvien esta técnica.

En cuanto a la pulverización, existen diferentes formas de transformar el volumen de caldo en una población de gotas. La que emplean las máquinas que se estudian en este trabajo se basa en el fenómeno de la pulverización hidráulica. Una corriente de un líquido a presión se hace pasar a la atmósfera a través de un orificio de pequeño tamaño con una geometría específica. La diferencia de tamaños entre la vena del líquido y el orificio, así como la diferencia de presiones, es lo que provoca la rotura de la vena líquida en millones de gotas. El dispositivo donde tiene lugar el fenómeno es la boquilla. Las gotas creadas de esta forma son más pequeñas cuanto mayor es la presión del circuito hidráulico. Cada boquilla tiene un rango de presiones de trabajo estipulado por el fabricante dentro del cual la distribución de tamaños de gotas especificada en el catálogo se considera fiable. Esto implica que debe configurarse la máquina para que su circuito hidráulico trabaje en el rango de presiones recomendado por el fabricante de la boquilla, pues en caso contrario no conseguiremos poblaciones de gotas con el diámetro elegido. Existen varios tipos de boquillas de pulverización hidráulica:

- Chorro plano o abanico: son un tipo de boquillas cuya salida provoca un chorro de gotas que, al chocar con una superficie plana, moja una sección elíptica en la que el semieje mayor es mucho más grande que el menor. Su uso es muy típico en barras de pulverización utilizadas en cultivos extensivos. Bajo la boquilla, la pulverización es mayor que en los extremos de la sección mojada, por lo que es necesario que los chorros se solapen en los extremos para tener una distribución más uniforme.
- Chorro cónico. Se subdividen en dos tipos: chorro cónico hueco y chorro cónico lleno. Al chocar el chorro con una superficie plana, las primeras mojan

principalmente una circunferencia, mientras que las segundas, un círculo. Si bien es imposible conseguir una distribución de gotas perfecta, la presentan muy uniforme, por lo que apenas es necesario el solape. Son ampliamente usadas en tratamientos fungicidas e insecticidas en cultivos arbóreos.

Las dos anteriores son, con mucho, las mayoritarias en máquinas empleadas en cultivos en exteriores. Dentro de ellas conviene mencionar las boquillas de baja deriva, que deben clasificarse no como una nueva categoría sino como una variante de las anteriores (pues pueden ser tanto de abanico como de cono). El sólo empleo de estas boquillas puede reducir la deriva significativamente (Doruchowski et al., 2017), por lo que su uso está en claro auge. Corresponden con varios diseños constructivos (Márquez, 2005), que buscan conseguir gotas de mayor tamaño, bien pulverizando a menores presiones, bien inyectando aire dentro de las mismas.

Aunque existen otros mecanismos de pulverización, sólo los nombraremos ya que este trabajo no se centra en ellos. En primer lugar, como alternativa a la pulverización hidráulica, tenemos la pulverización neumática, en la que el caldo se vierte en forma de chorro a baja presión dentro de una tobera por la que circula aire a alta velocidad (más de 80 m s^{-1} normalmente). El aire pulveriza la vena líquida en pequeñas gotas, las impulsa al cultivo, y además es capaz de provocar movimiento en las hojas del mismo. No debe confundirse este tipo de mecanismo con la tipología de pulverizadores que estudiaremos en este trabajo: los pulverizadores hidroneumáticos. Estos pulverizadores crean gotas en boquillas por pulverización hidráulica, pero luego esas gotas son arrastradas por corrientes de aire generadas en un circuito neumático independiente y que no es responsable de la formación de gotas.

En segundo lugar, tenemos la termonebulización, que consigue un tamaño de gota de unos $10 \text{ }\mu\text{m}$. Es una variante del anterior tipo en la que, tras pulverizar las gotas, éstas se evaporan en una cámara mediante la aplicación de calor, y posteriormente, se condensan, produciendo de este modo un tamaño menor a la pulverización inicial, similar a la niebla. Esta técnica es bastante empleado en invernaderos, se consigue una amplia cobertura foliar y no se necesita un vehículo para realizar el tratamiento. No es objeto de este trabajo.

Y finalmente, tenemos la pulverización centrífuga, en el que una vena líquida se deja caer sobre un disco giratorio que, por efecto de la fuerza centrífuga, se desplaza hasta el borde del disco. Cuando lo abandona, se fragmenta en gotas de muy pequeño diámetro. Se emplea en la técnica de tratamientos de ultra bajo volumen (ULV por sus siglas en inglés). Esta técnica requiere una regulación muy precisa de los equipos y mucha preparación técnica del aplicador, pues se trata de una técnica de alta precisión.

El que no se estudien explícitamente en este trabajo máquinas que empleen este tipo de pulverización, no quiere decir que no puedan ser abordadas por la técnica de la CFD. De hecho, a partir de las bases que se exponen más adelante, sería muy fácil realizar modelos de cálculo adaptados a estas tipologías de maquinaria.

3.2.2. Transporte de gotas

Tras la pulverización de las gotas, el siguiente reto es conseguir que éstas lleguen a su objetivo.

La forma más sencilla es confiar el transporte de las gotas a la propia energía cinética que adquieren durante el proceso de pulverización. La mayoría de los equipos de barras para aplicaciones en cultivos bajos funcionan bajo este principio.

Esta técnica tiene como gran inconveniente su poca capacidad para penetrar en cultivos de gran densidad foliar o alcanzar las partes altas de los cultivos arbóreos. Para superar dicho inconveniente, se desarrollaron pulverizadores que con un ventilador generan aire que transporta las gotas con más energía y agita las hojas del cultivo a tratar, facilitando la penetración en el mismo: los pulverizadores hidroneumáticos. Además, estos equipos permiten realizar el tratamiento fitosanitario con condiciones ambientales de viento de hasta $7-8 \text{ m s}^{-1}$, cuando con equipos sin asistencia de aire no es recomendable hacerlo con más de 3 m s^{-1} . Este sistema es ampliamente usado en cultivos arbóreos y este tipo de máquina va a ser el eje de este trabajo.

Finalmente nombraremos el transporte mediante asistencia electrostática. Esta técnica se basa en transmitir una carga eléctrica a las gotas de signo contrario a la que tiene el cultivo objetivo, de forma que se vean atraídas por él. En teoría se consiguen coberturas excelentes incluso en las zonas de difícil acceso, como el envés de las hojas. Y como efecto adicional, al estar cargadas todas las gotas con la misma polaridad, se repelen entre sí, por lo que disminuye el fenómeno de la coalescencia, mejorando la cobertura del tratamiento. La atracción que ejerce el objetivo sobre las gotas, minimiza las pérdidas por deriva. Por estas razones, se consiguen óptimos tratamientos con volúmenes de caldo por hectárea mucho menores (Salcedo et al., 2020) que con otras opciones. Esta técnica lleva estudiándose varias décadas, sin que haya tenido aún éxito comercial pese a sus aparentes ventajas. Los motivos que lo provocan son: la dificultad para que las cargas eléctricas en las gotas y el objetivo se formen adecuadamente (pues depende de muchos factores, como características físicas del caldo, estado y tipología de la planta, condiciones meteorológicas) y por las reticencias de los agricultores a trabajar con equipos que funcionan con altos voltajes.

3.3. Factores que afectan a la eficiencia de los tratamientos

En el desarrollo de un tratamiento fitosanitario influyen una gran cantidad de variables. La eficiencia del tratamiento (entendida como el porcentaje de producto llega al objetivo respecto del total aplicado con la máquina) depende de la interacción de todas ellas. Algunas variables son incontrolables, como las atmosféricas. Otras pueden ser controladas por el usuario, como la regulación adecuada de la máquina. A continuación, se realiza un repaso a los factores que más influencia tienen en el desarrollo de un tratamiento fitosanitario.

3.3.1. Variables meteorológicas

Viento

Sin lugar a dudas es la primera variable que tiene que ser nombrada; ya se ha comentado en apartados anteriores su influencia en la deriva, la cual ha sido ampliamente estudiada en el pasado (Goering y Butler, 1975; Maybank, Yoshida y Grover, 1978) y todavía hoy continúa siendo objeto de estudio (Al-Jumaili y Salyani, 2014; Duga et al., 2015a; Grella et al., 2017a; Grella et al., 2017b; Gil et al., 2018). La deriva se incrementa con la velocidad del aire, y depende del tamaño de las gotas, como se ha dicho anteriormente.

Temperatura

La temperatura tiene un efecto directo sobre la eficiencia de un tratamiento fitosanitario al generar evaporación de las gotas, siendo el riesgo más elevado a mayor temperatura. Pero también tiene dos efectos indirectos. Por un lado, aunque no llegue a evaporar por completo las gotas, puede disminuir su diámetro, por lo que las hace más susceptibles al viento (Hofman y Solseng, 2001). Por otro lado, la temperatura es en parte responsable, junto con la orografía del entorno, de la estabilidad atmosférica, por lo que indirectamente también es la responsable del viento.

Humedad relativa

Una humedad relativa baja favorece la evaporación de las gotas, teniendo así un efecto sinérgico con algunos de los efectos de la temperatura antes descritos (Thistle, 2004). Se considera que pulverizaciones por debajo de una humedad relativa del 50 % requieren de una atención especial (Bourodimos et al., 2019), sobre todo si van acompañadas de altas temperaturas.

Precipitaciones

Una lluvia después del tratamiento puede favorecer el lavado del producto, lo cual puede reducir considerablemente la eficacia de la aplicación. Por el contrario, algunos herbicidas de preemergencia (aspecto en el que esta tesis no está centrada) se ven favorecidos por la lluvia pues pueden mejorar la penetración del producto en el terreno, alcanzar así más semillas de malas hierbas aumentando de este modo la eficacia de la aplicación.

3.3.2. Variables asociadas a los ajustes del equipo de aplicación

Boquillas

Ya ha sido descrito en apartados anteriores el papel que juegan las boquillas en la aplicación de un tratamiento fitosanitario, pues son ellas las encargadas de generar las gotas en los pulverizadores hidroneumáticos. El tamaño de la población de gotas y su distribución en el espacio dependen de las características de las mismas. Sólo comentaremos que además de las características intrínsecas de las boquillas, es importante para la eficacia de los tratamientos la orientación y altura a la que se colocan en el pulverizador (Yates, Cowden y Akesson, 1983; Duga et al. 2015b).

Presión del circuito hidráulico de pulverización

Ya se ha comentado brevemente que, en las boquillas de uso más habitual en tratamientos a cultivos leñosos, que son las de pulverización hidráulica, una mayor presión en el circuito hidráulico de pulverización implica gotas más pequeñas y, por lo tanto, mayor riesgo de pérdidas por deriva y evaporación. Además, en el extremo contrario, una presión muy baja, provoca que el mecanismo de pulverización no sea correcto.

Caudal de aire

En los pulverizadores hidroneumáticos, el aire suministrado cumple un papel fundamental en el tratamiento. Sin embargo, su efecto parece depender de factores como el tipo de maquinaria que la genera. Mientras que algunos estudios (Cross et al., 2003; Duga et al., 2017) señalan que un caudal de aire bajo disminuye claramente la deriva, lo cual es positivo para el tratamiento, otros estudios realizados con otras máquinas indican que altos caudales de aire mejoran la deposición (Duga et al., 2015b, Salcedo et al., 2019).

Algunos modelos de equipos de aplicación disponen de deflectores ajustables por el usuario para orientar las corrientes de aire producidas. La inclinación y ajuste que se les da a estos deflectores también influye directamente (Celen, Arin y Durgut, 2008) sobre la eficacia del tratamiento.

Velocidad de avance del equipo

La velocidad de avance del equipo durante el tratamiento tiene un efecto directo sobre la calidad del mismo, ya que para un caudal constante de líquido pulverizado, a mayor velocidad de avance, menor cantidad aplicada por hectárea tratada. Pero la velocidad también tiene efectos indirectos que es interesante conocer. A mayor velocidad, más aumenta la componente transversal del viento sobre la población de gotas pulverizadas (en otras palabras, aumentan los esfuerzos cortantes), teniendo un efecto negativo sobre la dispersión de las gotas. Se han llegado a medir (Miller y Smith, 1997) incrementos de un 50% de deriva al pasar de realizar el tratamiento de 5 a 8 km h⁻¹. Una adecuada elección de boquillas (Tsay, Liang y Lu, 2004; Van de Zande et al., 2004) puede minimizar el efecto.

Elevadas velocidades a la hora de realizar el tratamiento también pueden tener como efecto indirecto, (Landry y Wolf, 2019) la producción de turbulencias de aire tras el paso de la máquina que afectan negativamente a las gotas pulverizadas.

3.3.3. Variables dependientes del cultivo

Propiedades de la superficie foliar

Existe una gran variabilidad en las características de la superficie foliar de los diferentes cultivos. Así, una superficie rugosa, pilosa, o cubierta de cera, va a determinar un comportamiento totalmente diferente a la deposición de las gotas pulverizadas. Por lo tanto, hay plantas que tienen más facilidad que otras para retener gotas en su superficie.

Características aerodinámicas

La resistencia que ofrezca el cultivo al paso del aire provoca una interacción con las corrientes de aire generadas por los pulverizadores hidroneumáticos, influyendo en el tratamiento de múltiples formas. Por un lado, el follaje frena la corriente de aire (Yi, 2008), con lo que puede variar la trayectoria de las gotas pulverizadas que están a merced de la corriente. El estado de la masa foliar, por otra parte, depende del tipo de cultivo, de su estado fenológico y, en el caso de los leñosos, del sistema de formación (Pergher y Petris, 2007; Duga et al., 2015b; Miranda-Fuentes et al., 2015; Pergher y Zuccchiatti, 2018). No obstante, parece que, a mayor masa foliar, mayor es la eficiencia del tratamiento (Pratt, Maber y Manktelow, 2000), debido a que aumenta el número de gotas atrapadas pese a la mayor resistencia aerodinámica presentada. Este apartado es tan relevante, que le dedicaremos un apartado entero en esta memoria, el 8, ya que su modelización con CFD es importante y, a su vez, compleja.

3.3.4. Otras variables

Considerando que este trabajo se centra en tratamientos por vía líquida, conviene mencionar finalmente dos propiedades del líquido que afectan al tratamiento: la viscosidad y la tensión superficial.

Las gotas pueden ser mayores a mayor viscosidad del líquido. La viscosidad del agua, que es el líquido con el que se preparan los caldos, disminuye con la temperatura, si bien su influencia es pequeña.

La tensión superficial, por otro lado, es la responsable última de la formación de las gotas. Su causa última está en las fuerzas de atracción moleculares del líquido. Es una fuerza que actúa en la superficie de los líquidos oponiéndose al aumento de la misma. Por lo tanto, a mayor tensión superficial, menor tamaño de gota. Pero además tiene un importante papel en la deposición de las gotas sobre la vegetación y en la escorrentía. Esta propiedad puede variarse dentro de un rango durante la preparación del caldo de aplicación mediante la adición de sustancias al mismo, como los coadyuvantes o los mojantes.

3.3.5. Consideraciones finales sobre las variables

El conjunto de variables que influyen en los tratamientos fitosanitarios hace que los experimentos en campo sean poco repetitivos, sobre todo teniendo en cuenta que algunas de ellas, como se ha dicho, son incontrolables. El estudio mediante CFD presenta ciertas ventajas frente a los ensayos de campo, como puede ser un control total de las variables simuladas, y un menor coste en tiempo y recursos para llevar a cabo decenas de pruebas, que como se puede intuir, serían necesarios para estudiar las complejas interacciones que tienen lugar entre las variables implicadas. Esta tesis pretende, como uno de sus objetivos, establecer metodologías que permitan desarrollar este tipo de estudios de la forma más práctica posible (equilibrio entre precisión de resultados y coste de realizar los modelos) en cualquier situación con cualquier maquinaria.

3.4. Terminología de pulverizadores

Este trabajo se centra en el análisis de equipos de aplicación de fitosanitarios que necesitan ser accionados mediante un tractor. Existen no obstante máquinas para realizar tratamientos fitosanitarios que técnicamente no son accionadas por un tractor pero que serían análogas, como los equipos autopropulsados, o los quads adaptados. Pero quedan fuera de este estudio los equipos manuales como pulverizadores de mano, de mochila, o de carretilla, pues no tiene sentido en ellos ni estudiar la asistencia del aire, ni la mezcla en el depósito, ni la eficacia del tratamiento, la cual va a depender principalmente de la pericia del aplicador.

Es importante establecer un criterio de nomenclatura, ya que a veces en la bibliografía, a una determinada tipología de máquina se le da un nombre, mientras que los agricultores y técnicos comerciales a esa misma máquina le dan otro nombre diferente. Para este trabajo se ha considerado lo siguiente:

- Pulverizador hidráulico: es aquel en el que la pulverización del caldo se produce por la presión hidráulica en las boquillas, y el transporte de las gotas se debe a la energía cinética adquirida por éstas durante su pulverización. El ejemplo típico sería un pulverizador de barra para cultivos herbáceos extensivos.
- Pulverizadores hidroneumáticos: son aquellos en los que las gotas se forman en las boquillas por presión hidráulica (como en el caso de los pulverizadores hidráulicos), pero su transporte se hace por medio de una corriente de aire (que complementa a la energía cinética de las gotas, que sigue existiendo). Comercialmente se les suele llamar atomizadores. Son propios de cultivos leñosos. El circuito neumático puede tener una variedad de formas: ventiladores con deflectores fijos, ventiladores con deflectores orientables, conductos individuales, etc.
- Pulverizadores neumáticos: son aquellos en los que las gotas se forman por efecto de una corriente de alta velocidad que choca con una vena líquida a baja presión. Comercialmente se denominan nebulizadores.

3.5. Descripción de las máquinas estudiadas en este trabajo

Este trabajo se centra en pulverizadores hidroneumáticos, pues las máquinas reales sobre las que se han realizado las modelizaciones CFD correspondían con esta tipología, pero podrían igualmente aplicarse a pulverizadores neumáticos, y en la parte que sea trasladable, a pulverizadores hidráulicos.

Profundizando en las máquinas estudiadas, este trabajo se centra, como ya se ha dicho, en un pulverizador hidroneumático de conductos verticales adaptado a la geometría del cultivo, representado en la Figura 2.



Figura 2. Pulverizador hidroneumático estudiado en este trabajo. Modelo IRIS (ILEMO HARDI S.A.U., Lleida, España). Arriba: vista general. Abajo: vista trasera, con sólo una pareja de bajantes desplegada.

La característica principal de este pulverizador, es la canalización del aire generado en una turbina en la parte trasera de la máquina a través de tuberías que terminan en conductos verticales de polietileno rígido que alojan una serie de toberas con deflectores orientables. En total existen cuatro conductos, cuyas toberas se oponen dos a dos. De esta manera, se pueden tratar dos filas de cultivo simultáneamente por los dos lados. Aplicable a cultivos en espaldera de dimensiones adecuadas, su diseño ha sido pensado para viñedo.

Este diseño general ha tenido varios rediseños por parte del fabricante, que ha buscado perfeccionarlo, por lo que dependiendo del año de fabricación, podemos tener modelos ligeramente diferentes en cuanto a número de bajantes, y sobre todo, toberas, boquillas u otros elementos.

En nuestro caso, la máquina que en concreto se analizó (y que tiene que considerarse como ejemplo demostrador, pues las metodologías desarrolladas en esta tesis se pueden aplicar con cualquier otro pulverizador hidroneumático), tiene las siguientes características:

- Las toberas se agrupan en grupos de 4 salidas.
- Se tienen 4 grupos por bajante, lo que hace un total de 16 salidas de aire por bajante.

- Cada grupo de toberas, tiene asociadas 2 boquillas pulverizadoras, lo que hace un total de 8 boquillas por bajante.
- Las salidas de aire de un mismo bajante, comparten un mismo plano, a diferencia de alguna versión posterior de la máquina en la que el último grupo de toberas podía ajustarse su posición dentro de un rango.

Para el estudio del sistema de agitación del depósito se empleó un modelo de pulverizador más convencional de ventilador trasero y flujo radial (Figura 3), ya que sin embargo, disponía de un depósito con un rompeolas y un cilindro horizontal para el paso de la transmisión, que lo hacía más interesante. Además la capacidad de este depósito es de 3,000 L frente a los 1,500 L del anterior, lo cual requiere de mayores necesidades de agitación y de un estudio más complejo.



Figura 3. Pulverizador hidroneumático en un laboratorio de maquinaria para proceder a estudiar su sistema de agitación. Modelo Melet 30902V (Garmelet, Zaidín, España).

En los correspondientes artículos que forman parte de los anexos se detallan más las características generales de estas máquinas que se acaban de describir.

4. Conceptos básicos sobre CFD

El presente apartado deja atrás la descripción de sustancias y elementos reales y se adentra en descripciones teóricas en las que se fundamenta la investigación, sirviendo de transición entre la realidad física descrita hasta ahora y los modelos informáticos que se expondrán después. Para ello, se van a establecer unas nociones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), que es la herramienta usada en la tesis, que permitan entender el desarrollo de los cálculos y su configuración. Antes tendremos que comenzar brevemente por cuestiones de mecánica de fluidos.

4.1. Ecuaciones de Navier-Stokes

La mecánica de fluidos es la rama de la física que se ocupa de estudiar los movimientos de los fluidos y las fuerzas que actúan sobre ellos. Se trata por lo tanto del fundamento último de este trabajo, pues está presente en la mayoría de fenómenos que conciernen a los pulverizadores agrícolas hidroneumáticos, como la pulverización de gotas de líquido, la generación de corrientes de aire o la agitación del líquido en los tanques.

El enfoque típico del estudio de la dinámica de sólidos, es seguir a un sólido durante su movimiento. Esta idea es teóricamente trasladable al estudio de la dinámica de fluidos, haciendo objeto del estudio a una partícula fluida en vez de a un sólido. Este es el llamado enfoque Lagrangiano, en el que se buscan unas funciones que describan la posición y propiedades de una partícula de fluido en cada instante.

Sin embargo, en la práctica, el enfoque anterior resulta problemático ya que se necesitaría estudiar una enorme cantidad de partículas para caracterizar un fluido. Por ello existe otro enfoque matemáticamente más ventajoso, en el cual lo que se estudia son las propiedades de un volumen determinado de fluido, sin importar qué partículas están dentro de dicho volumen en un instante dado. Esto es lo que se denomina enfoque Euleriano, que es mucho más habitual en mecánica de fluidos.

El estudio de las propiedades del fluido (como pueda ser la velocidad, la presión...) dentro del volumen no es inmediato, pues la derivada de una propiedad dentro de un volumen diferencial, debido precisamente al movimiento de las partículas que están en él, no es simplemente la derivada de la propiedad de las partículas que ocupan dicho volumen, sino la suma de la variación de la propiedad en el volumen (llamada derivada local) más la variación de la propiedad debido al cambio de posición de las partículas (llamado derivada convectiva). El teorema del transporte de Reynolds es la llave que nos permite pasar de una derivada Lagrangiana a una integral Euleriana, relacionando ambos enfoques.

Desarrollando estos conceptos (y aplicando un complejo aparato matemático) sobre propiedades como la masa, la cantidad de movimiento o la energía, se llegan a obtener las llamadas ecuaciones de Navier-Stokes, que son las que gobiernan los fluidos newtonianos (aquellos cuya viscosidad es constante en el tiempo), y que se representan en las ecuaciones 3 a la 7.

Ecuación de continuidad (conservación de la masa):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad [3]$$

Ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento (o momento cinético) en los ejes x, y, z:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \nabla \cdot \left(\mu \vec{\nabla} u \right) + S_{Mx} \quad [4]$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \nabla \cdot \left(\mu \vec{\nabla} v \right) + S_{My} \quad [5]$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \nabla \cdot \left(\mu \vec{\nabla} w \right) + S_{Mz} \quad [6]$$

Ecuación de conservación de la energía:

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho i U) = -p \nabla \cdot (U) + \nabla \cdot \left(k \vec{\nabla} T \right) + \Phi + S_i \quad [7]$$

Dónde:

ρ : densidad del fluido	i : energía térmica interna
t : tiempo	p : presión
U : vector velocidad $[u, v, w]$	k : conductividad térmica
u : componente en x del vector velocidad	T : temperatura
v : componente en y del vector velocidad	Φ : función de disipación
w : componente en z del vector velocidad	S_i : término de fuente/sumidero de energía interna
μ : viscosidad dinámica	
S_M : fuente/sumidero de cantidad de movimiento en la dirección x, y ó z	

Operadores matemáticos:

$\frac{\partial}{\partial t}$: derivada parcial respecto del tiempo

∇ :divergencia

$\vec{\nabla}$: gradiente

Resolver estas ecuaciones en problemas reales no es abordable sin aproximaciones numéricas con ayuda de ordenadores, y es aquí donde podemos desarrollar ya el concepto de CFD.

4.2. ¿Qué es la CFD?

La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) es el estudio de problemas en los que intervienen flujos de fluidos y fenómenos asociados como

reacciones químicas y transferencias de calor, por medio de simulaciones de ordenador (Versteeg y Malalasekera, 1995).

Aunque sus fundamentos matemáticos se remontan a más de un siglo atrás (Richardson, 1910), su llegada práctica no llega hasta la década de los 60, de la mano de la industria aeroespacial, que es la primera que la usa para el diseño de aviones y motores a reacción. Hoy es usada en infinidad de aplicaciones: aerodinámica, simulación de combustiones en cilindros de motores, ingeniería ambiental (dinámica atmosférica local, dispersión de contaminantes), aliviaderos de presas, etc.

Sin salir del campo agrícola (Bartzanas et al., 2013), la CFD puede ser usada para cuestiones tan dispares como el análisis del laboreo (interacción reja-suelo), diseño de ventilación y climatización en invernaderos (Granell, 2014), el diseño de componentes de maquinaria (por ejemplo sopladores de cosechadoras), y por supuesto, estudio de pulverizadores, cuestión sobre la que gira este trabajo.

De cualquier forma, la CFD sólo permite conseguir resultados aproximados. La continua mejora en los modelos numéricos incorporados a este tipo de software y el aumento de capacidad de procesamiento del hardware, hace que cada vez se puedan resolver problemas más complejos obteniendo mejores precisiones, pero no se debe olvidar que, pese al impresionante avance de esta técnica en los últimos 20 años, se debe ser cauto con los resultados obtenidos. No en vano, jocosamente algunos ingenieros bromean con que las siglas “CFD” corresponden en realidad con las palabras en inglés “Color Fluid Dynamics”, debido a que habitualmente con este tipo de software se obtienen resultados gráficos muy llamativos que pueden hacer perder la perspectiva de la situación: por muy bonitos a la vista que resulten pueden ser erróneos. Por ello la verificación de los modelos suele ser necesaria.

Se explicará a continuación una descripción somera de cómo resuelven los programas CFD las ecuaciones de Navier-Stokes, para posteriormente profundizar en el problema de la modelización de fluidos.

4.3. El mallado del dominio de cálculo

4.3.1. El método de los volúmenes finitos

Para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, los programas recurren a metodologías que transforman las ecuaciones diferenciales expuestas antes, a un sistema de ecuaciones lineales determinado. La metodología más habitual en los programas CFD hasta la fecha es el método de los volúmenes finitos (FVM). Este método consiste en dividir el dominio de cálculo en pequeños volúmenes de control individuales, resultando un conjunto de celdas llamado malla de cálculo. A continuación, se formulan las ecuaciones en cada celda y se aproxima el valor numérico de las variables estudiadas en su centroide, calculándose a partir de allí el valor de las variables en los límites de las celdas mediante interpolación (ver apartado 4.4.4). De esta forma se linearizan las ecuaciones obteniéndose un sistema de ecuaciones algebraicas que se resuelven por métodos iterativos, normalmente mediante el llamado método algebraico multimalla (AMG). Las condiciones de

contorno expuestas en los límites del problema permiten cerrar el sistema de ecuaciones de todo el sistema de celdas.

4.3.2. El problema del mallado

Como se ha dicho, una vez determinado el dominio geométrico del problema que se quiere modelizar, el siguiente e importante paso es proceder a su mallado en volúmenes finitos. Debe comentarse en un breve paréntesis que actualmente se están intentando desarrollar softwares de simulación de fluidos bajo enfoques netamente Lagrangianos, que resuelven los problemas sin necesidad de generar mallados, lo cual sería ciertamente interesante. Sin embargo, estos programas no resultan a día de hoy suficientemente robustos como para resolver cualquier tipo de problema con unas mínimas garantías. Se están usando para la simulación fluvial, diseño de aliviaderos de presas, u otros problemas similares de flujos líquidos, pero su empleo en otro tipo de problemas está limitado; por ejemplo, es muy difícil simular el problema de la turbulencia en corrientes recirculantes de aire bajo un enfoque Lagrangiano.

Por lo tanto, a día de hoy, la simulación de muchos problemas de fluidos debe recurrir en general a técnicas que necesitan un mallado previo del dominio de cálculo. Realizar este mallado no es un asunto trivial, ya que el éxito del cálculo numérico depende de las posiciones en las que las variables discretas son calculadas y éstas dependen a su vez de la malla. También dependen de la malla el tamaño del sistema de ecuaciones a resolver, siendo mayor cuantas más celdas tenga el modelo.

Idealmente, el resultado final calculado no debería de depender de la malla (Baker, 2005). Pero por un lado una pobre discretización nos condena a obtener resultados erróneos, mientras que un mallado muy denso (de celdas muy pequeñas), nos provoca que el tamaño de la matriz de ecuaciones a resolver sea tan grande que el problema no sea computacionalmente abordable. De tal forma que debe encontrarse un punto intermedio en el que se garantice que los resultados no dependan del tamaño de celdas diseñado para la malla, sin penalizar el tiempo de cálculo en exceso. Un estudio de sensibilidad del tamaño de las celdas suele ser recomendable en la mayoría de los casos.

También resulta importante la tipología de las celdas de cálculo. En este aspecto, tenemos dos posibilidades de discretización: las mallas estructuradas y las mallas no estructuradas. Las mallas estructuradas dividen el dominio de cálculo en bloques, subdividiendo posteriormente cada uno de ellos en celdas con cierta regularidad. Las celdas suelen ser hexaedros, en muchos casos regulares, con caras cuadradas.

Las mallas no estructuradas (Figura 4), por el contrario, discretizan todo el dominio de cálculo con celdas de forma arbitraria, apareciendo celdas tetraédricas. Las ventajas de este tipo de mallas es que se adaptan mucho mejor a geometrías complejas y son más rápidas de generar. Pero tienen el grave inconveniente de que la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes es menos precisa. Los métodos numéricos descritos que resuelven dichas ecuaciones parten de la hipótesis de que las celdas tienen cierta regularidad, por lo que todo lo que se aparte de dicha hipótesis genera errores numéricos que se van acumulando durante el cálculo.

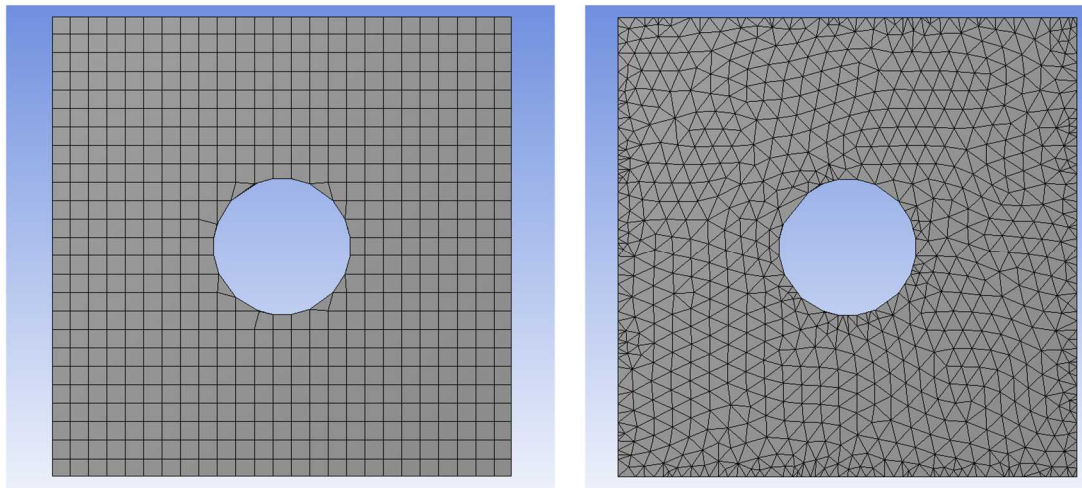


Figura 4. Izquierda: ejemplo de malla estructurada. Derecha: ejemplo de malla no estructurada.

En resumen, las mallas estructuradas son claramente preferibles a las no estructuradas. Sin embargo, la mayor parte de las veces no se pueden implementar, ya que las geometrías de los dominios de cálculo son complejas. Dentro de lo posible, conseguir unas mallas lo más regulares posible se ha convertido casi en una disciplina aparte del cálculo numérico a la que sirve (Baker, 2005); por ello se entiende que en muchas ocasiones los módulos de mallado sean programas totalmente independientes a los de CFD.

Otro aspecto crítico, además de la tipología de la malla, a la hora de realizar los mallados de cálculo es que el tamaño de los volúmenes finitos tiene que adaptarse al problema de estudio. Es necesario que las celdas del mallado sean más pequeñas cuanto mayor sea el gradiente de las propiedades del flujo que estamos estudiando para lograr que los errores numéricos por redondeo se mantengan en niveles aceptables. Sin embargo, si el gradiente sólo es grande en zonas puntuales del dominio geométrico de cálculo, discretizar todas las celdas por igual implicaría que todas sean igual de pequeñas, pudiendo hacer el cálculo inviable. Por ello es posible y conveniente que la distribución de las celdas no sea uniforme, pero la ratio de crecimiento entre dos celdas consecutivas no puede ser muy grande. Se recomienda un valor de 1.2 (Baker, 2005).

Además de en las zonas de gran gradiente de propiedades, también es imprescindible un mallado más fino allí donde la geometría del problema lo imponga por el nivel de detalle necesario a conseguir (en este trabajo se ha llegado a trabajar con celdas de décimas de milímetro para modelizar las boquillas inyectoras de los agitadores de un depósito de un pulverizador, en contraposición con celdas cien veces mayores ubicadas en el centro del depósito), o bien en las paredes del problema, por el especial tratamiento que ha de concedérsele a la disipación viscosa en estos contornos (ver apartado 4.4.3).

En resumen, realizar el mallado adecuado no es una tarea que deba ser menospreciada pues su realización correcta es un problema en sí mismo anterior al cálculo del flujo de fluidos propiamente dicho. Sería muy interesante disponer de

métodos robustos que no necesitaran un mallado del dominio de cálculo, pero a día de hoy este paso previo es casi ineludible en simulaciones informáticas de fluidos.

4.3.3. Opciones avanzadas: mallado adaptativo y mallado poliédrico

Pese a que el mallado no se suele realizar en el software CFD, sino en módulos específicos de mallado, ANSYS Fluent® (ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA), programa usado para el desarrollo de esta tesis, denominado también simplemente Fluent®, ofrece dos posibilidades para modificar el mallado inicialmente diseñado en otra aplicación que en ocasiones pueden ser ventajosas.

En primer lugar, debe nombrarse el mallado adaptativo. Esta técnica no debe confundirse con el mallado dinámico, descrito en el apartado siguiente.

El mallado tiene que ser más fino allí donde los gradientes de las variables de cálculo sean mayores. Pero tener una idea aproximada de dónde van a estar situadas estas zonas antes de calcular, es complicado por los muchos problemas a resolver. Fluent® ofrece la posibilidad de realizar un primer cálculo con un mallado grueso genérico para, posteriormente, detectar qué celdas están emplazadas en lugares en los que se dan grandes gradientes, ofreciendo al usuario la posibilidad de partir esas celdas “madre” en otras más pequeñas. El usuario tiene un control relativo sobre el proceso, pudiendo elegir la variable de la que se quiere estudiar sus gradientes, cuál es el criterio para estudiar dichos gradientes, y qué valores de gradiente quiere imponer como límite a partir del cual se procede a dividir una celda del mallado original. El proceso se resume gráficamente en la Figura 5.

También es posible lo contrario: fusionar celdas en las zonas en las que los gradientes son muy bajos y que, por lo tanto, no necesitan en teoría una gran densidad de celdas, de forma que se optimiza el número de celdas del mallado de cálculo. El proceso de mallado adaptativo puede mejorar si se hace varias veces consecutivamente, y se puede configurar al software CFD para que lo haga automáticamente, por ejemplo, cada determinado número de iteraciones de cálculo. Lo habitual es que las primeras adaptaciones requieran cambiar numerosas celdas, tengan un impacto notable en los resultados obtenidos, y provoquen cambios apreciables en los residuos de cálculo (explicados en el apartado 4.4.5). Pero después, una vez el cálculo va avanzando y la solución convergiendo, la influencia de sucesivas adaptaciones de malla sobre mallados ya adaptados es mínima.

Señalar en último lugar, que en Fluent® no es posible implementar un mallado adaptativo automático cada determinadas iteraciones de cálculo si éste es transitorio y se está realizando con varios núcleos de procesador o CPU en paralelo.

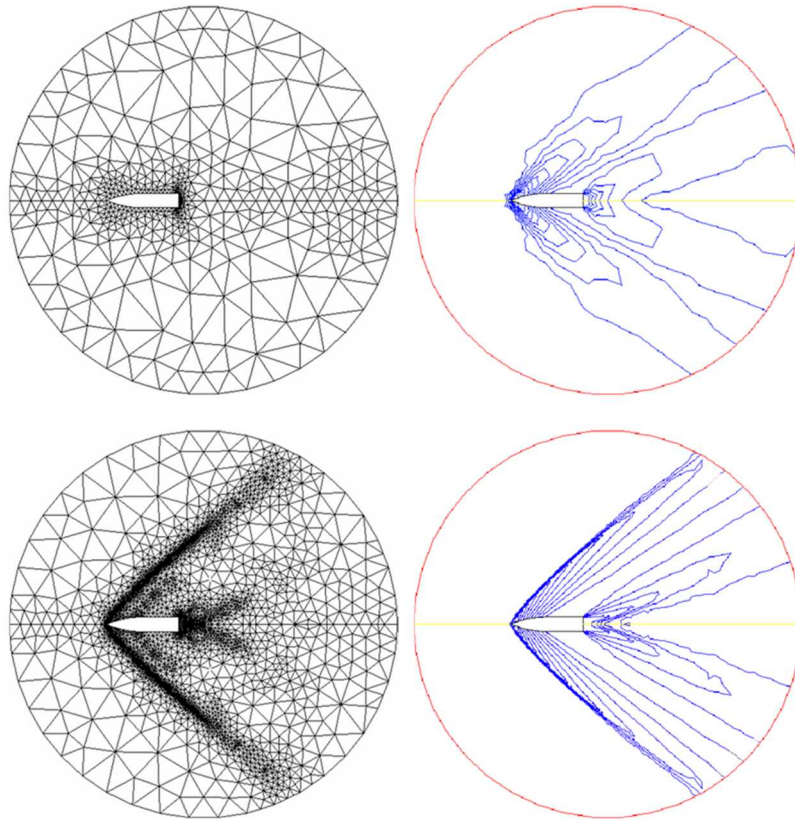


Figura 5. Proceso de mallado adaptativo en Fluent® para el caso del cálculo de presiones generadas por un proyectil. El cálculo se inicia con un mallado grueso (arriba, izquierda), obteniéndose un primer resultado (arriba, derecha). A partir de este resultado, se modifica la malla, haciéndola más fina (celdas más pequeñas) allí donde los gradientes de la variable calculada eran mayores (abajo, izquierda). Se puede proceder entonces al cálculo definitivo (abajo, derecha). (Fuente: ANSYS, 2009).

Otra herramienta de mallado disponible en Fluent® y que debe ser tomada en cuenta es el mallado poliédrico. Se ha hecho referencia a que las mallas estructuradas suelen ser de celdas hexaédricas, mientras que las no estructuradas, suelen ser tetraédricas. Fluent® posee un algoritmo mediante el cual pueden modificarse las celdas tetraédricas mediante diversas operaciones, dando lugar a lo que el programa denomina “malla poliédrica”, tal y como se puede ver en la Figura 6.

Las ventajas que defiende ANSYS (propietario del software) de este tipo de conversión son que mejora la calidad del mallado y que reduce significativamente el número de celdas, con lo que ello implica en cuanto a reducción de los tiempos de cálculo. La desventaja que señala la empresa desarrolladora es que, una vez realizada la conversión, el mallado no puede volver a su estado original, ni admite el empleo de herramientas que modifiquen el mallado nuevamente, como el mallado adaptativo. Tampoco admite cálculos con partes móviles como, por ejemplo, los de mallas deslizantes que son empleadas en esta tesis, y que se explican en el apartado 4.3.4.

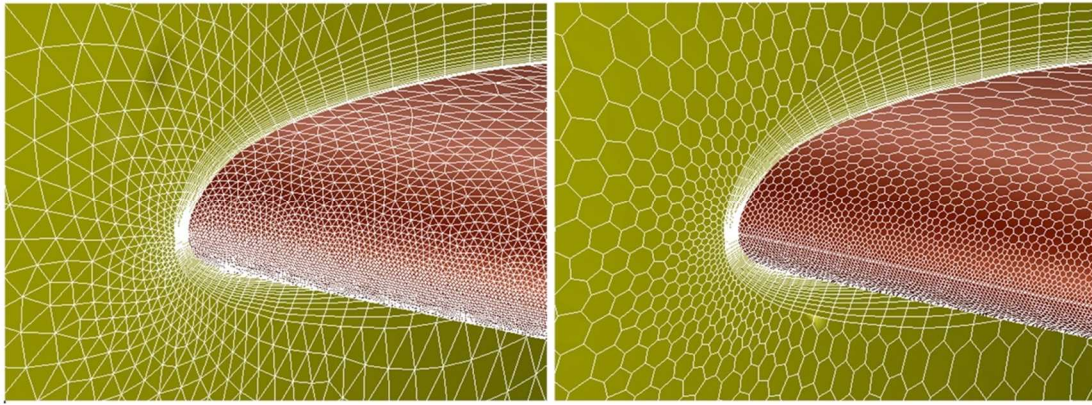


Figura 6. Izquierda: malla no estructurada inicial. Derecha: malla poliédrica elaborada a partir del mallado anterior automáticamente por Fluent®. (Fuente: ANSYS, 2009).

La experiencia en el uso de esta herramienta nos permite realizar comentarios adicionales. A diferencia de lo que sucede con el mallado adaptativo, aquí el usuario tiene poco o ningún control durante la conversión a malla poliédrica. Cuando se emplean estas herramientas, el usuario pierde total o parcialmente el control sobre el mallado (que ya no era elevado de partida), pero su empleo puede estar más que justificado si ello implica una reducción muy considerable de los tiempos de cálculo del problema. En teoría, los resultados obtenidos tras aplicar estas herramientas deberían ser mejores que los mallados en las que no se aplican, pero creemos es obligatorio realizar comprobaciones adicionales que lo aseguren.

En este trabajo se ha intentado no usar estas técnicas, prefiriendo usar mallados no estructurados (o mejor aún, mallados estructurados en los pocos casos que ha sido posible) suficientemente finos para realizar las simulaciones. Por un lado, el mallado adaptativo, según las investigaciones internas realizadas en el desarrollo de esta tesis, se puede usar con confianza en problemas de flujos estables que convergen rápidamente, pero no es una herramienta muy útil en problemas de flujos complejos, como los fuertemente convectivos, pues el remallado nunca termina de adaptarse, y lo único que se consigue es aumentar el número de celdas, la inestabilidad del cálculo, y el valor de los residuos. Sin embargo, el mallado poliédrico sí ha sido usado en la modelización de flujos bifásicos (Badules et al., 2020), ya que lograba disminuir drásticamente los tiempos de cálculo respecto de los mallados originales, sin tener efectos negativos sobre la estabilidad del cálculo y con resultados iguales a los mallados más finos.

4.3.4. Mallas móviles

Otro aspecto a conocer y describir sobre los mallados es la posibilidad ya apuntada de que éstos tengan partes móviles. Estos mallados son interesantes para simular fielmente en CFD máquinas con partes móviles o bien desplazamientos relativos de unas partes del cálculo respecto de otras.

Fluent® permite dos posibilidades para implementar movimiento en los mallados: los mallados dinámicos y los mallados deslizantes.

Los mallados dinámicos requieren, mientras un elemento del dominio de cálculo se mueve, que las celdas que en el instante de tiempo " t " simulaban el fluido existente delante de él, se destruyan o compriman de tal forma que en el instante de cálculo " $t+\Delta t$ " dejen al elemento avanzar, mientras que complementariamente, en el instante de tiempo " $t+\Delta t$ " se tienen que crear nuevas celdas de cálculo o expandirse las ya existentes detrás del objeto que se mueve con el propósito de no dejar un vacío en el mallado de cálculo. Se trata de una técnica complicada de implementar y que no ha sido utilizada en esta tesis.

Por el contrario, el empleo de las mallas deslizantes es mucho más sencillo y sí se les ha encontrado aplicación práctica en esta tesis. El empleo de esta técnica requiere definir al menos dos dominios de celdas diferentes en el mallado de cálculo, las cuales tienen que tocarse en un plano. Ninguna celda del mallado puede atravesar dicho plano. El movimiento se implementa simplemente indicándole al programa cuál es la velocidad, respecto de un eje que contiene dicho plano, de una zona de celdas (Figura 7). Lo mismo puede ser implementado sobre superficies cilíndricas, solo que, en ese caso, lo que se le indicaría al programa es la velocidad de giro de la zona que define el cilindro respecto a un punto (que será el centro de giro) en relación con la zona del mallado que envuelve a dicho cilindro.

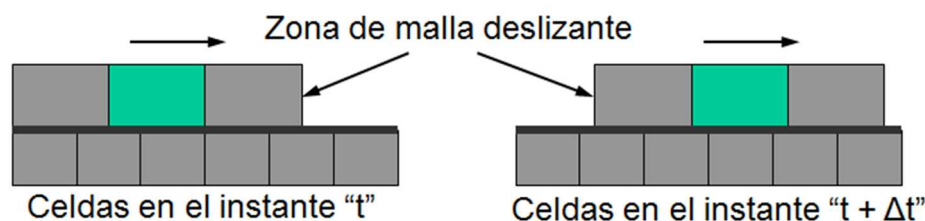


Figura 7. Esquema de malla deslizante. Un conjunto de celdas se mueve respecto de otras con las que comparten un plano de contacto. (Fuente: ANSYS, 2009).

El empleo de esta técnica, no obstante, tiene varios inconvenientes que deben conocerse. El más importante tal vez sea que aquellas zonas del plano de deslizamiento que, con el movimiento, se queden sin celdas en uno de los lados, adquirirán de facto la condición de contorno de "pared". En otras palabras, si un flujo intenta atravesar de forma transversal el plano de deslizamiento entre dos zonas de la malla, sólo lo logrará si hay celdas a ambos lados. Esto no es un tema trivial, ya que como se explicará en el apartado de simulación de tratamientos, obliga adoptar estrategias (apartado 9.2.1) que eviten esta circunstancia para reflejar más fielmente la realidad.

Además de esta limitación, debe tenerse en cuenta que, aunque los flujos pueden atravesar la superficie de deslizamiento siempre que haya celdas a ambos lados, el cálculo presentará una distorsión en el plano debida a la falta de continuidad entre los nodos de la malla. En la Figura 7, en el instante " t ", la celda superior central marcada, que es móvil, conecta uno de sus nodos con dos celdas de la parte inferior, que son fijas, mientras que en el instante " $t+\Delta t$ ", ya no conecta con ninguno. El cálculo será más preciso en el primer caso que en el segundo. Esta circunstancia,

comprobada en este trabajo, se minimiza (que no anula) disminuyendo la distancia entre vértices de celdas a ambos lados, ya que la interpolación que hace el programa para pasar los valores de las variables de un lado a otro del plano de deslizamiento tiene menos error. Dicho de otra manera, el error se reduce disminuyendo el tamaño de las celdas que tocan el plano de deslizamiento.

Conocidas estas limitaciones, esta técnica es muy usada para la simulación de ventiladores y rodets de bombas. En esta tesis además, se ha aplicado para simular el movimiento de avance de la máquina arrastrada por el tractor durante el tratamiento fitosanitario en un viñedo, estando este aspecto reflejado en el apartado que se centra en la simulación de tratamientos.

4.3.5. Comentarios sobre tiempos de cálculo

El tiempo de cálculo puede ser determinante a la hora de resolver un problema mediante CFD. El resultado debería ser independiente del mallado, por lo que una regla de buena práctica para realizar simulaciones CFD sería realizar un estudio de sensibilidad de la malla (Granell, 2014) y realizar los cálculos definitivos con el mallado que tenga las celdas más grandes de entre aquellos que presentan los mismos resultados.

El elegir el mallado con las celdas más grandes posibles (pero cuyos resultados de cálculo sean correctos) se debe a que cuanto mayor es el número de celdas de un mallado, más tiempo es necesario para realizar el cálculo.

Aunque cada problema CFD es diferente (sólo en función del modelo de viscosidad elegido (ver apartado 4.4.2) el tiempo puede variar notablemente), a modo ilustrativo, en la Figura 8 se representa el tiempo de cálculo necesario para realizar un cálculo demostrativo realizado en esta tesis en función del número de celdas del mallado. Si bien se observa que la correlación no es perfecta, existe una clara relación lineal entre número de celdas y tiempo de cálculo.

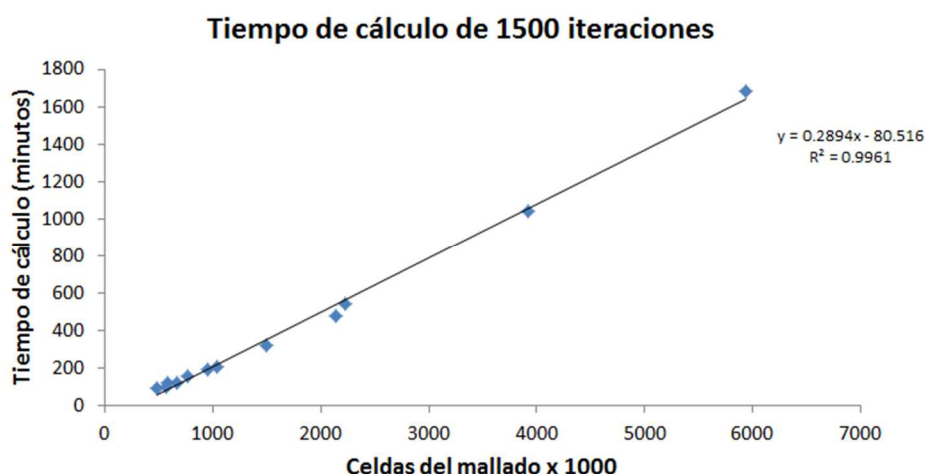


Figura 8. Tiempo de cálculo necesario para calcular 1,500 iteraciones en un problema CFD con un núcleo de un procesador convencional (Intel i7 4820k), en función del número de celdas del mallado.

Sin embargo, en problemas de dominio tridimensional (todos los abordados en esta tesis lo son) el número de celdas aumenta con la tercera potencia conforme se reducen sus dimensiones, por lo que, una pequeña disminución en el tamaño de la arista de las celdas implica un notable incremento del tiempo de cálculo necesario.

Nunca se debe perder la perspectiva del campo de aplicación del problema que estamos resolviendo mediante CFD. El desarrollo, por ejemplo, de un avión de combate de última generación, puede permitirse estudios CFD que requieran meses (o incluso años) de cálculo con superordenadores. La aplicación de la CFD a maquinaria de tratamientos fitosanitarios, lógicamente, sólo puede suponer un pequeño porcentaje del coste económico del programa de desarrollo y/o un tiempo limitado que en la práctica no puede ser mucho más de unos días para que todo el conjunto de pruebas y cálculos pueda desarrollarse en unas semanas. Con la actual potencia de los ordenadores domésticos podemos indicar (en líneas generales, pues depende del tipo de cálculo, ya que no es lo mismo uno estacionario que uno transitorio que requiera de saltos de tiempo muy pequeños) que modelos de menos de 500,000 celdas son fácilmente calculables pero modelos de más de 2,000,000 de celdas ya son excesivos.

Es en este contexto donde cobra sentido el empleo de las técnicas de mallado adaptativo o poliédrico indicadas anteriormente. Aunque deberían ser evitadas, por la pérdida de control sobre el mallado que suponen para el usuario del programa CFD, pueden ser necesarias al abordar problemas que requieran aligerar el número de celdas del mallado, siempre usando estas técnicas con reservas.

4.4. Bases teóricas de la CFD

En este apartado abandonaremos las consideraciones sobre el mallado del dominio computacional, y nos adentraremos en la descripción de las bases de física teórica que apoyan a la Dinámica de Fluidos Computacional, siendo los principales problemas el estudio de la turbulencia y el conseguir un cálculo convergente con resultados similares a la realidad.

4.4.1. El problema de la turbulencia

Como es bien conocido, pues se incide en ello en los primeros cursos de educación universitaria de cualquier ingeniería relacionada con la mecánica de fluidos, los flujos se dividen en dos tipos básicos: laminares y turbulentos (podría definirse un tercer tipo, el régimen de transición, cuando no está muy clara la pertenencia a uno u a otro tipo).

El parámetro que caracteriza el tipo de régimen de un flujo es el número de Reynolds - Re - (Reynolds, 1883) definido según la ecuación 8.

$$\text{Re} = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad [8]$$

Dónde:

ρ : densidad del fluido

v : velocidad media del flujo

L : longitud característica del flujo

μ : viscosidad dinámica del fluido

ν : viscosidad cinemática del fluido ($\nu = \mu/\rho$)

La longitud “ L ” (medida característica de la dimensión del flujo) puede ser el diámetro de la tubería por la que circula el fluido, el radio hidráulico para el agua de un canal, o el tamaño del vórtice más grande creado por un chorro.

Lo importante es conocer que el número de Reynolds es una ratio entre efectos inerciales y los esfuerzos viscosos de un flujo. Valores altos de Re implican que sobre el flujo dominan fuerzas de inercia y que por lo tanto se trata de un flujo turbulento, y valores bajos de Re , indican que dominan esfuerzos viscosos y que por lo tanto el flujo es más laminar. Si bien el régimen laminar se da en la naturaleza (por ejemplo, en la sangre en los pequeños vasos sanguíneos), todos los casos tratados en este trabajo son fuertemente turbulentos (Davidson, 2015), por lo que no se volverá a hacer mención sobre el régimen laminar, con excepción de los fenómenos que ocurren en la capa límite (apartado 4.4.3).

Si en un flujo turbulento se mide la velocidad con precisión en un punto a lo largo del tiempo de forma continua (Figura 9), observaremos como ésta no es constante, sino que oscila en torno a un valor medio.

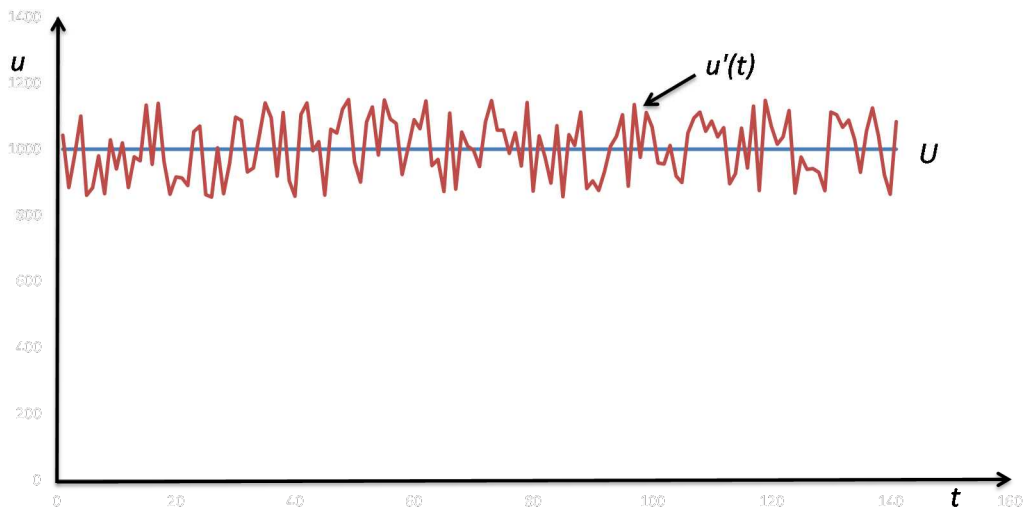


Figura 9. Evolución en el tiempo de la velocidad de un flujo medida en un punto fijo dentro de un flujo turbulento. (Fuente: elaboración propia a partir de Verstaag y Malalasekera, 1995, p. 42).

Esto es provocado por la presencia de vórtices que es lo que caracteriza precisamente al flujo turbulento. Usualmente los vórtices más grandes tienen unas dimensiones del mismo orden de magnitud que el flujo principal. Estos vórtices transfieren su energía a otros más pequeños, y éstos a su vez a otros más pequeños todavía, y así sucesivamente, en un proceso denominado cascada de energía;

durante estas transferencias, la energía apenas se disipa. Sin embargo, llegados a una escala muy pequeña, esto cambia, pues la viscosidad pasa a dominar el proceso, disipándose finalmente la energía turbulenta en forma de calor. La escala a la que esto ocurre se denomina escala de Kolmogorov, y representa el tamaño mínimo de un vórtice dentro del flujo, y es más pequeña cuanto más alto es el número de Reynolds del flujo.

Para resolver estrictamente las ecuaciones de Navier-Stokes, sería necesario que las celdas del mallado de volúmenes finitos tuviesen las dimensiones de la escala de Kolmogorov (concretamente la mitad), lo cual es un tamaño ciertamente pequeño, haciendo inviable la CFD en la práctica. Aunque para ese objetivo existe el método DNS (Direct Numerical Simulation), éste precisa de superordenadores y software específicos, quedando fuera de la aplicación de este trabajo y de la inmensa mayoría de aplicaciones en la ingeniería. Su ámbito se restringe a la comprobación y validación de otros métodos.

Sin embargo, puede razonarse que lo que nos interesa conocer son las propiedades medias del flujo, por lo que podemos evitar el cálculo detallado de estos vórtices realizando medias estadísticas de los mismos. Este es el fundamento de los modelos RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), que suponen la base de los programas CFD habituales incluido Fluent®. Esta simplificación permite aumentar el tamaño de las celdas y disminuye drásticamente el tiempo de cálculo, a costa de perderse la información de los vórtices.

A medio camino entre el DNS y la familia de modelos RANS estaría el modelo LES (Large Eddy Simulation), que pretende resolver numéricamente los vórtices más grandes del flujo, y adopta modelos estadísticos para resolver los más pequeños. Este modelo está disponible en Fluent® pero requiere mallados más finos que los modelos RANS, y mucha mayor potencia computacional, por lo que tampoco se ha usado en este trabajo, si bien su mayor precisión puede hacer que en el futuro, conforme aumenten la potencia de los ordenadores domésticos, tenga cada vez más uso.

4.4.2. Los modelos de turbulencia en los métodos RANS

Partiendo de la base de que las variaciones del flujo pueden analizarse estadísticamente, puede distinguirse una velocidad media del flujo y una variación en torno a dicho valor. Dicha variación, aunque fluctúa constantemente a lo largo del tiempo, se caracteriza normalmente por estar dentro de un rango. Por tanto, se puede plantear que el valor de una propiedad en un instante dado se descompone en un valor medio y una fluctuación. Si aplicamos esta idea por ejemplo a la velocidad en el eje x , tenemos la ecuación 9.

$$u = U + u' \quad [9]$$

Donde

u : vector velocidad en el eje x

U : valor medio de la velocidad

u' : fluctuación de la velocidad en torno al valor medio

Podríamos seguir con la metodología en las otras variables de las ecuaciones de Navier-Stokes, y sustituirlas en dichas ecuaciones, pero como se puede deducir, lo único que habríamos conseguido es aumentar el número de incógnitas a determinar, sin que por ello el sistema de ecuaciones quedase determinado. Esta paradoja se denomina problema de cierre de la turbulencia. La forma de resolver este obstáculo en los métodos RANS, es añadir más ecuaciones todavía, mediante parámetros adicionales, pero que cierren el sistema.

Concretamente, los métodos RANS establecen una relación entre el valor de las fluctuaciones y el tensor de esfuerzos de Reynolds, que representa a los esfuerzos viscosos que tienen lugar en un volumen determinado (en este caso, cada celda) originados por la interacción del fluido con la superficie del elemento estudiado. En esencia el tensor de Reynolds es el conjunto de fuerzas normales y esfuerzos cortantes que actúan sobre las caras de cada volumen de control.

En base a esto, los métodos RANS son una serie de modelos que se agrupan en a su vez en dos familias:

- Los que consideran que los esfuerzos de Reynolds son isotrópicos.
- Los que proponen una ecuación diferente para cada esfuerzo de Reynolds.

A los de la primera subfamilia se les denomina "métodos basados en la hipótesis de Boussinesq", y a los de la segunda, "Métodos basados en la hipótesis de los esfuerzos de Reynolds".

Debido a que con la hipótesis de Boussinesq se añaden menos ecuaciones que con la de los esfuerzos de Reynolds, haciendo por tanto más asequible computacionalmente la resolución del problema CFD, este método ha tenido una gran difusión en ingeniería, desarrollándose varios modelos que consiguen buenos resultados en muchas aplicaciones. Algunos de estos modelos son:

- Spalart-Allmaras: (Spalart y Allmaras, 1992) es un modelo simple y robusto que requiere relativamente poco esfuerzo computacional. Fue desarrollado para aplicaciones aeroespaciales, se desenvuelve bien en estudios de resistencia aerodinámica y altas velocidades de flujo que implican grandes gradientes de presión. Fuera de ese ámbito apenas es utilizado, y en este trabajo, no se ha probado nunca.
- k- ϵ estándar: (Launder y Spalding, 1972) ese modelo añade una ecuación para la energía cinética turbulenta (denominada k, en $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) y otra para la tasa de disipación viscosa de la energía turbulenta ϵ ($\text{m}^2 \text{s}^{-3}$). Es un modelo que puede tener limitaciones en flujos que se bifurcan (por ejemplo, al chocar con un obstáculo) o con recirculación. En todo caso, es hasta ahora el más usado en una gran variedad de problemas.
- RNG: (Yakhot et al., 1992) Mejora del modelo anterior pensado para flujos rotacionales.
- Realizable k- ϵ : (Shih et al., 1995) Otra variante del k- ϵ estándar que implementa ciertas restricciones matemáticas.

- $k-\omega$: (Wilcox, 1988) Este modelo tiene una base matemática diferente de los anteriores, e incide en la definición del flujo desde la capa límite (ver apartado siguiente), donde dominan los efectos viscosos.
- Transition SST: (Menter, 1994) combina lo mejor de los modelos $k-\epsilon$ (para la definición de las zonas alejadas de la pared) y $k-\omega$ (para la definición de las zonas cercanas a la pared). Necesita más esfuerzo computacional que los anteriores, pero está ganando mucha popularidad últimamente.

Sin embargo, la hipótesis de que los esfuerzos sean isótropos no es estrictamente cierta, por lo que en algunos problemas estos modelos no simulan correctamente los fenómenos turbulentos. En tales casos sería más adecuado adoptar la otra hipótesis. Dentro de la subfamilia de los esfuerzos de Reynolds, tenemos básicamente el modelo Reynolds Stress Model o RSM (Launder, Reece y Rodi, 1975), que es todavía más costoso de calcular que el Transition SST pues añade 7 ecuaciones (una por cada esfuerzo y una más para la disipación de la energía turbulenta). En teoría sería el mejor modelo, estando adaptado a flujos anisótropos, que son muy abundantes en la realidad, pero las simplificaciones que subyacen en su aparato matemático hacen que sus resultados no siempre sean satisfactorios.

Es oportuno comentar en este punto una reflexión que se ha extraído de los múltiples modelos que se han realizado durante la elaboración de este trabajo: cada problema CFD es diferente, por lo que no deben de tenerse prejuicios a la hora de elegir un modelo de turbulencia. No es buena idea descartar de antemano los modelos más sencillos o que *a priori* se crea no son adecuados para el problema estudiado; modelos de turbulencia en teoría más precisos y de mayor coste computacional, no tienen por qué dar resultados diferentes a otros más sencillos, o incluso pueden tener dificultades en la convergencia del cálculo iterativo en un problema dado.

La Figura 10 muestra de los modelos disponibles en Fluent®, muy similares a los de otros programas CFD comerciales.

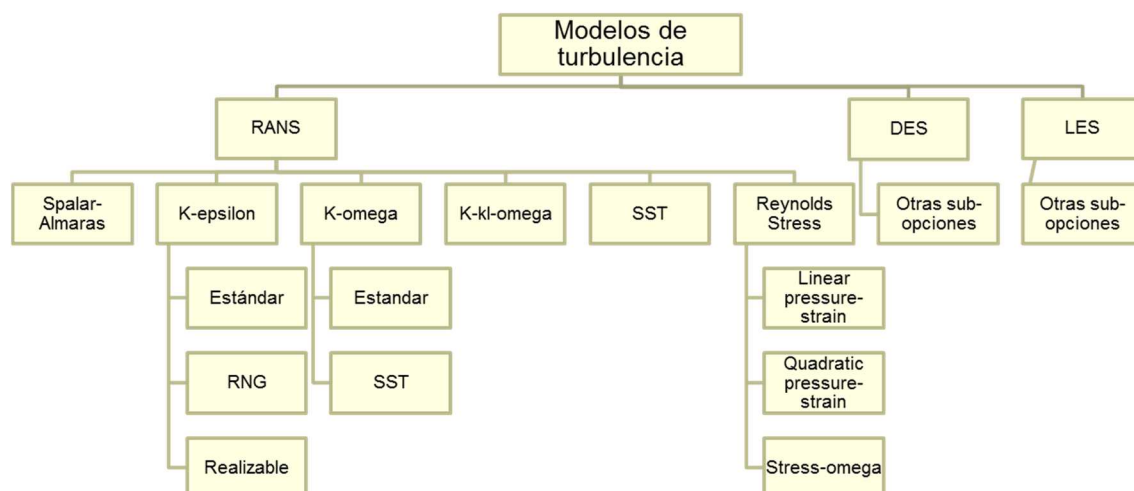


Figura 10. Organigrama de modelos de turbulencia disponibles en Fluent®.

4.4.3. Funciones de pared

Pese a que todos los problemas estudiados en este trabajo (y la mayoría de ellos en la vida real) corresponden a flujos turbulentos en presencia de límites físicos (superficies), existe una capa denominada “capa límite” donde el comportamiento del flujo no es estrictamente turbulento, llegando al extremo, justo en la superficie de la pared, donde dominan los fenómenos viscosos.

Las paredes son fuente de turbulencia (muchos de los vórtices se generan a raíz de su interferencia con el flujo), por lo cual es necesario un adecuado cálculo del flujo en estas capas para obtener un resultado aceptable del problema CFD. Sin embargo, el detalle que sería necesario en el mallado en las paredes del modelo, sería tan elevado que comprometería la viabilidad del cálculo. Algunos modelos de turbulencia, como el k- ω y sus derivados, hacen especial hincapié en la modelización de los flujos cercanos a la pared. Sin embargo, en otros modelos, como los de la familia k- ϵ o el RSM, esto no es así, por lo que se necesita un aparato matemático complementario al de la modelización de la turbulencia para resolver el flujo en las paredes. Esto recibe el nombre de funciones de pared.

En Fluent® existen actualmente varias posibilidades de modelos de pared a elegir de forma complementaria en aquellos modelos de turbulencia que lo requieran:

- Funciones de pared estándar.
- Funciones de pared escalables.
- Funciones de pared no equilibradas.
- Funciones de pared mejoradas.

En el cálculo de los flujos cercanos a las paredes mediante funciones en CFD, toma relevancia una variable denominada y^+ (pronunciado comúnmente en español como [i plus]) que es una relación entre velocidades y viscosidades, a una distancia dada de la pared, que se calcula según la ecuación 10.

$$y^+ = \frac{\rho u_t y}{\mu} \quad [10]$$

Donde

μ : viscosidad dinámica del fluido

ρ : densidad del fluido

u_t : velocidad del esfuerzo viscoso

y : distancia a la pared considerada

Experimentalmente se conoce (Versteeg y Malalasekera, 1995) que los efectos viscosos son dominantes en un espesor de capa de valor $y^+ = 11.067$.

A efectos prácticos, el modelo de pared de empleo más habitual es el estándar. Para su correcta implementación, se suele tener en cuenta que el mallado realizado sea tal que el nodo de las primeras celdas pegadas a la pared esté a una distancia “ y ” tal que

proporcione un valor " y^+ " por encima² de 30, lo que implica que la primera celda pegada a la pared sea del doble de tamaño (como mínimo) que la capa laminar, incluyendo por tanto también la capa de transición. De esta forma, todas las celdas salvo la primera pegada a la pared se garantiza sean turbulentas.

En resumen, para una correcta implementación de las funciones de pared estándar, se requiere de un adecuado mallado en las paredes para conseguir valores y^+ donde estas funciones operen correctamente. Para ello los módulos de mallado suelen tener herramientas para realizar mallados específicos en las paredes. Aun así, en algunos tipos de problemas CFD, puede no ser fácil conseguir valores de y^+ deseados con tamaños de celdas razonables (Blocken, Stathopoulos y Carmeliet, 2007).

En este trabajo, se ha tenido en cuenta la elección de un tipo de función de pared, o se ha realizado un mallado coherente en cuanto a valores de y^+ , en función del problema. Así, por ejemplo, en el cálculo de flujos de aire dentro del circuito neumático de un pulverizador, éste resulta ser un problema crítico, con lo que se optó por probar todos los modelos de pared disponibles y elegir el que mejores resultados ofrecía en el cálculo CFD respecto de los valores experimentales medidos. Para la simulación de las corrientes de aire generadas por los pulverizadores en la atmósfera, este aspecto, sin embargo, pasa a ser casi irrelevante, pues la interacción con el suelo es casi nula. En cuanto a la simulación de flujos en líquidos en los depósitos de los pulverizadores, se intentó realizar un mallado que consiguiera valores de y^+ por encima de 30 en todas las paredes del depósito; al no ser posible garantizarlo con tamaños de celda razonables (debido a los bajos valores de velocidad en las paredes en ciertas zonas, se necesitaban tamaños muy grandes), se optó por el empleo de funciones de pared escalables, que implementan un algoritmo que no permite que el valor de y^+ caiga por debajo de 11.067, calculando las celdas por encima de la primera como turbulentas. De forma complementaria se comprobó que, en cualquier caso, no se detectaban diferencias de resultados en las variables consideradas usando uno u otro tipo de función de pared.

4.4.4. Esquemas de discretización y acople presión-velocidad

Es necesario comentar brevemente cómo los programas CFD calculan los valores de las variables en los nodos de las celdas, dada su importancia e influencia en los resultados obtenidos. Como hemos dicho, actualmente el método más empleado en este tipo de programas para discretizar el dominio de cálculo es el método de los volúmenes finitos. En este método las variables de cálculo se obtienen en el centroide de cada celda. El problema matemático reside en que estos valores tienen que interpolarse a los nodos de las celdas para que el cálculo pueda desarrollarse en las sucesivas iteraciones. Según la Figura 11, las variables de cálculo se calcularían para los centroides C0 y C1.

² El valor de y^+ , tampoco puede tomar cifras exageradas para que el modelo sea correcto; como mucho, un orden de magnitud más que el mínimo deseable. Las cifras recomendadas para y^+ varían con el modelo de viscosidad; lo aquí indicado es recomendable para la familia k- ϵ .

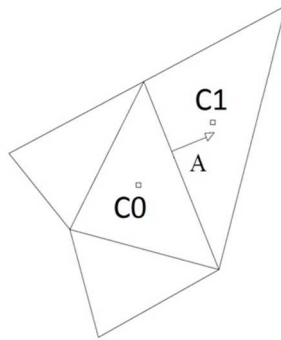


Figura 11. Esquema de celdas del mallado con sus centroides, C0 y C1.

La opción más sencilla de interpolar valores a los nodos de las celdas, es suponer que los valores en los nodos de una celda, son iguales a los de la variable en el centroide de una de las celdas contiguas. Esto se denominaría esquema de cálculo en primer orden (*first order upwind*). En ese caso, se supondría que los nodos de la cara “A” de la Figura 11, tendrían un valor igual a los del centroide de la celda situada flujo arriba en sentido perpendicular a la cara, es decir, en este caso, al punto C0. El problema que tiene este esquema de interpolación, es que los resultados que ofrece sólo son admisibles si el mallado es estructurado y el flujo está alineado con las celdas, por lo que, en la práctica, no se puede usar en casi ningún problema CFD, salvo para aproximar la solución en las primeras iteraciones de cálculo debido a su estabilidad.

Por lo tanto, para obtener resultados finales de una simulación, deben usarse siempre esquemas de interpolación de orden superior, pese a ser más inestables. El más habitual es el cálculo en segundo orden (*second order upwind*) según el cual, las variables de los nodos se calculan interpolando el valor de la variable en el centroide de la celda flujo arriba con el gradiente de dicha celda, por lo que se obtiene un valor diferente a los de los centroides y más acorde con la realidad.

Otros esquemas de orden superior serían el QUICK, el “Ley exponencial” (*Power Law*), o el PRESTO (para la presión, recomendado en flujos ciclónicos), que implementan diferentes algoritmos de interpolación con las celdas vecinas, que en función del tipo de problema CFD, proporcionan una convergencia más rápida o mayor estabilidad al cálculo respecto del esquema de segundo orden.

Otro aspecto del cálculo es cómo los programas CFD relacionan la presión con la velocidad. Lo suelen hacer relacionándolas a través de la ecuación de continuidad. Sin embargo, como se puede apreciar en la ecuación de Navier-Stokes para la conservación de la masa (ecuación 3), la presión no aparece explícitamente. Para relacionar estas variables, los códigos CFD tienen diferentes algoritmos. En la mayoría de los casos, es recomendable elegir el SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), que introduce el término de la presión dentro de la ecuación de continuidad. Los otros algoritmos disponibles (SIMPLEC, PISO) sólo son recomendables en casos específicos, como estudios de flujos laminares, o mallas muy distorsionadas, pudiendo ofrecer un cálculo más estable o rápido.

4.4.5. Convergencia del cálculo

El desarrollo del cálculo por el método de los volúmenes finitos requiere la resolución del mismo en múltiples iteraciones (habitualmente varios miles de ellas). El criterio que se sigue para controlar el proceso iterativo es el control de los llamados residuos de cálculo. Los residuos de cálculo se describen para cada variable estudiada (continuidad, momentos X, Y, Z, variables que cierran el problema de la turbulencia según el modelo adoptado y, en su caso, fracción volumétrica de la fase secundaria y energía), y representan la diferencia entre valores calculados entre dos iteraciones. Si el cálculo converge, estos residuos se van reduciendo (caso contrario, los residuos se hacen más grandes hasta que el programa aborta el cálculo al detectar la divergencia). A efectos prácticos, en cálculos estacionarios si se elige realizar el cálculo bajo la opción “precisión simple”, el criterio habitual es fijar un límite de 10^{-4} en el valor de los residuos calculados para considerar que el cálculo ha convergido y detener las iteraciones. Por otra parte, en cálculos transitorios, dicho criterio puede ser excesivamente exigente, y se suele considerar que el cálculo es satisfactorio si en cada salto de tiempo (se recomienda (Fluent, 2014) que un salto de tiempo se resuelva con 20 iteraciones), los residuos de cálculo disminuyan 3 órdenes de magnitud.

Sin embargo, existen problemas CFD en los que se observa que algún residuo nunca llega a los límites recomendados. En este caso, es el usuario del programa el que tiene que decidir cuándo es suficiente parar el cálculo, y si los resultados obtenidos son válidos (generalmente si suele ser recomendable una validación experimental, en este caso aún más). Suele ser recomendable no seguir con el cálculo cuando se compruebe que los residuos de cálculo, pese a tener en algunas variables valores por encima de 10^{-4} , están completamente estabilizados, es decir, no cambian significativamente con las iteraciones. De forma complementaria se pueden monitorizar directamente los valores de alguna propiedad del problema conforme tiene lugar el cálculo, como por ejemplo el valor de la velocidad del fluido en determinados puntos del mallado; cuando el valor sea estable por muchas iteraciones que se calculen, se puede dar por concluido el cálculo. La Figura 12 ilustra lo comentado.

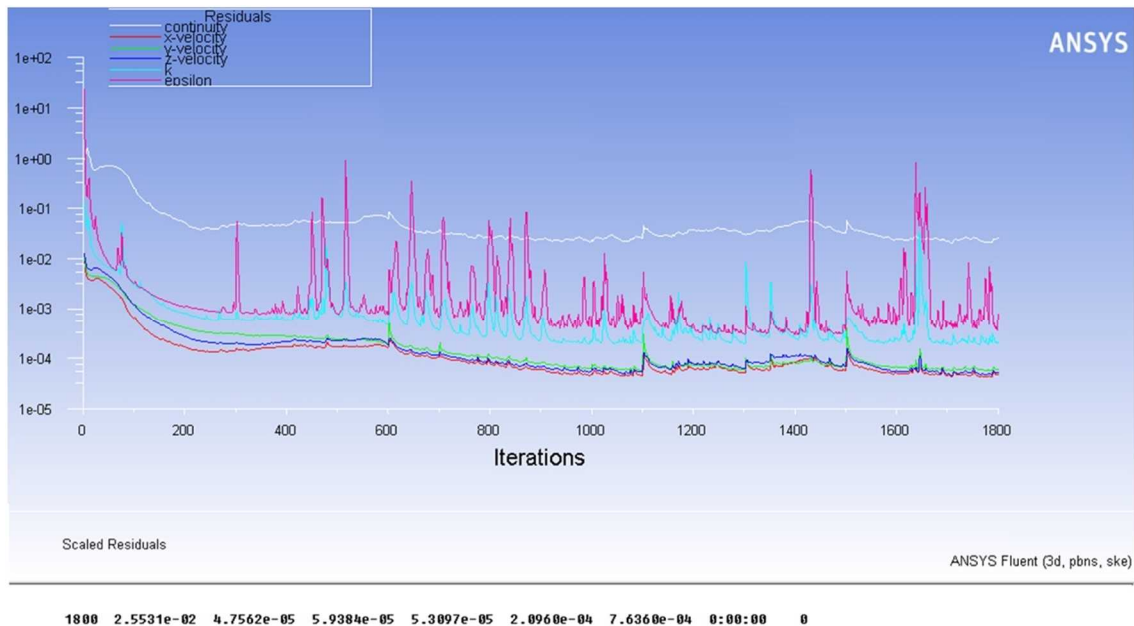


Figura 12. Ejemplo de residuos de cálculo en las diferentes iteraciones. En este caso, los residuos de turbulencia son inestables, aunque llegan a alcanzar valores inferiores a 10^{-4} , mientras que los valores de los residuos de la ecuación de continuidad, son más estables pero muy superiores a 10^{-4} .

4.5. Uso genérico del programa ANSYS Fluent®

Como último punto de este apartado, conviene explicar el uso general del programa usado para realizar las simulaciones CFD en esta tesis, que es similar a la de otros programas análogos.

En este trabajo se ha usado como software el programa Fluent® (ANSYS, Inc. Canonsburg, PA, USA) en sus versiones 15, 16 y 17³. El programa fue desarrollado en sus primeras versiones por la empresa Fluent Inc. Fluent® no es un programa que permita generar la geometría y mallado de un problema, sino un solucionador CFD. Era normal por lo tanto usar un programa diferente para realizar el mallado del problema a estudiar. En 2006 la empresa Fluent Inc. fue adquirida por la empresa ANSYS Inc., empresa puntera a nivel mundial en software de análisis por elementos finitos, en una política de expansión a otros mercados de simulación en ingeniería. A partir de ese momento pasó a tomar popularidad entre los usuarios de Fluent® el programa ANSYS ICEM-CFD® para diseñar las mallas de cálculo, ya que era proporcionado en el mismo paquete de software. Poco después ANSYS lanzó el software Workbench®, que es un entorno de trabajo que permite encadenar varios softwares cuyo uso lógico es ser empleados en cascada.

De esta manera cuando arrancamos el programa Workbench® y le indicamos que queremos resolver un problema con Fluent®, al usuario se le ofrece:

³ Se han usado varias versiones porque la investigación ha durado varios años, y el programa se actualizaba regularmente.

- Un primer módulo de generación de geometría. Este módulo admite la importación de la misma desde un programa CAD, que es lo que se ha usado en este trabajo de forma sistemática.
- Un segundo módulo, que se enlaza al primero, en el que se realiza el mallado. Este módulo es una evolución del antiguo software ICEM®.
- Tercer módulo, que toma el mallado realizado en el paso anterior, que consiste en el programa Fluent® propiamente dicho.
- Adicionalmente, se ofrece un cuarto módulo, de post procesamiento de datos, denominado CFD-Post®, que puede ser usado también con otro programa CFD ofrecido también por ANSYS, el CFX®. A diferencia de en el mallado, donde Fluent® no tiene herramientas de generación (sí de modificación, como se ha expuesto en el apartado 4.3.3), el programa sí es capaz de ofrecer al usuario algunos resultados del cálculo, pero el software CFD-Post® es más versátil.

En resumen, se sigue un esquema típico de uso de un programa de simulación de ingeniería que requiera un mallado:

geometría → mallado → cálculo → post-proceso

con la particularidad no presente quizás en otros softwares de otros campos de ingeniería de que en este caso cada paso se realiza con un programa diferente, si bien en las últimas versiones todos descansan sobre un programa que los enlaza denominado Workbench®.

Workbench® permite enlazar programas CFD con otro tipo de software presente en el paquete ANSYS, como por ejemplo con el módulo de cálculo mecánico, lo que permite, entre otros aspectos, complementar a los túneles de viento en el estudio de resonancia en puentes esbeltos (Szabo y Kristof, 2010), siendo por tanto una herramienta muy versátil aunque requiere de una formación muy avanzada para su uso.

El aprendizaje de la CFD y del software específico que lo desarrolla es una tarea muy costosa. Partiendo, como es el caso del autor de esta tesis doctoral, de amplios conocimientos en software de elementos finitos para ingeniería en otros ámbitos (ingeniería de estructuras, geotecnia, etc.) se necesitan varios meses de aprendizaje para llegar a manejar sólo una parte de la CFD que es la usada en esta tesis. Las capacidades de la CFD y del software utilizado son mucho mayores que las empleadas en esta investigación, pues no ha sido necesario usar ni los módulos de transferencia de calor por radiación, ni la transferencia de calor por convección, ni las reacciones químicas por combustión, ni mallas dinámicas, ni funciones definidas por el usuario, entre otras capacidades del programa. El conocimiento completo de la CFD es una tarea que puede llevar años.

Además, Fluent® presenta opciones que no están en los menús gráficos ni en el manual de usuario, sino que deben invocarse desde el panel de comando (estando por lo tanto ocultos), cuestión reservada a usuarios avanzados del programa.

5. Aplicación de la CFD a la maquinaria de aplicación de productos fitosanitarios

En este apartado se realizará una breve descripción del estado del arte correspondiente al empleo de la CFD en equipos de aplicación de productos fitosanitarios.

5.1. Generalidades

Como resumen del apartado anterior, cabe decir que en la actualidad la mayoría de los programas CFD se basan en el método de los volúmenes finitos, que en líneas generales se fundamenta en dividir el problema en varios sub-dominios, llamados "celdas", y resolver iterativamente en cada una de ellas las ecuaciones de Navier-Stokes discretizadas, pasando de un problema de cálculo diferencial a uno de álgebra lineal. La precisión en el cálculo depende entre otras variables del número de celdas en las que se haya subdividido el problema, la forma de las celdas del mallado, y los modelos de física teórica adoptados.

Las primeras aplicaciones prácticas de la CFD aparecen en la década de los 60 (Versteeg y Malalasekera, 1995) y se basaron en estudios aerodinámicos en el campo de la ingeniería aeroespacial, pero con el aumento de la potencia computacional, se hace posible la introducción en los problemas de situaciones cada vez más complejas, como transporte de fases dispersas, flujos bifásicos, radiaciones...

La CFD se convierte así en una herramienta que permite sustituir en gran parte a las simulaciones en túneles de viento o a la toma de datos experimentales en muchas aplicaciones, encontrando cada vez más usos aparte de la aerodinámica: análisis y diseño de reactores químicos, ingeniería medioambiental, dispersión de contaminación (Hong et al., 2011), etc.

En torno al año 2000, la potencia de los ordenadores comerciales comienza a permitir la expansión de la CFD para el estudio de muy diversos campos, entre los que se encuentra la aplicación de tratamientos agrícolas con pulverizadores, que hasta entonces se abordaban experimentalmente, o de forma excepcional, con complejos modelos matemáticos (Teske, 1996; Teske, Thistle y Schou, 2011; Ako, 2011). Desde entonces esta línea de desarrollo ha sido seguida por varios equipos de investigación a lo largo del mundo, desde diferentes enfoques.

Dado que en las simulaciones por ordenador se pueden controlar todas las variables y permiten obtener un amplio conocimiento del problema estudiado, la CFD se revela como una herramienta interesante con aplicación posterior directa tanto en la mejora del diseño de los nuevos pulverizadores como en el de la propia metodología del tratamiento en campo.

5.2. CFD y tecnología de aplicación de productos fitosanitarios

El estudio de pulverizadores agrícolas mediante CFD se está aplicando activamente desde hace unos 15 años. Principalmente los campos más analizados han sido el

estudio de los flujos de aire producidos por diversos pulverizadores hidroneumáticos y, en menor medida, la predicción de la deriva. También han sido objeto de estudio la interacción aire-planta, y otros modelos más complejos que comprenden la interacción aire-planta-partículas.

Pese a ser otro campo con evidente interés, el uso directo de la CFD en el diseño industrial de las máquinas o de sus elementos, es, hasta ahora, muy limitado. En los siguientes apartados vamos a detallar los avances más significativos de estudios anteriores de otros autores.

5.2.1. Estudio de flujos de aire en pulverizadores hidroneumáticos

Como se ha explicado en el apartado 3.4 los pulverizadores hidroneumáticos, comúnmente conocidos como atomizadores, son un tipo de pulverizadores ampliamente usados en cultivos frutales que generan corrientes de aire que arrastran las gotas líquidas del producto a aplicar. La corriente de aire cumple una doble misión: transportar las gotas hasta el objetivo, y agitar la masa foliar del cultivo, permitiendo que se mojen las hojas interiores, cuestión que sería difícil de conseguir con un pulverizador hidráulico convencional al proteger las hojas exteriores a las interiores a modo de paraguas.

El uso conceptualmente más sencillo de la CFD aplicado a pulverizadores hidroneumáticos consiste en el estudio mediante ordenador de los flujos de aire generados por cada tipo de máquina. La estrategia para implementar este problema consiste hasta la fecha en la toma de datos experimentales de velocidad del aire a la salida de las toberas del sistema neumático, estando la máquina parada. Los modelos CFD habituales consisten en un ortoedro (Delele et al., 2005) que simula el espacio de aire existente a un lado de la máquina. El flujo del ventilador se introduce como condición de contorno del modelo en uno de los laterales. La geometría regular del modelo, fácil de subdividir en celdas de forma estructurada y en la que no se representa la geometría de la máquina, simplifica el modelo y reduce el tiempo de cálculo.

Varios tipos de máquinas (Figura 13) se han estudiado con esta metodología (Dekeyser et al., 2013): ventilador único, ventiladores en el mismo plano y/o toberas orientables.

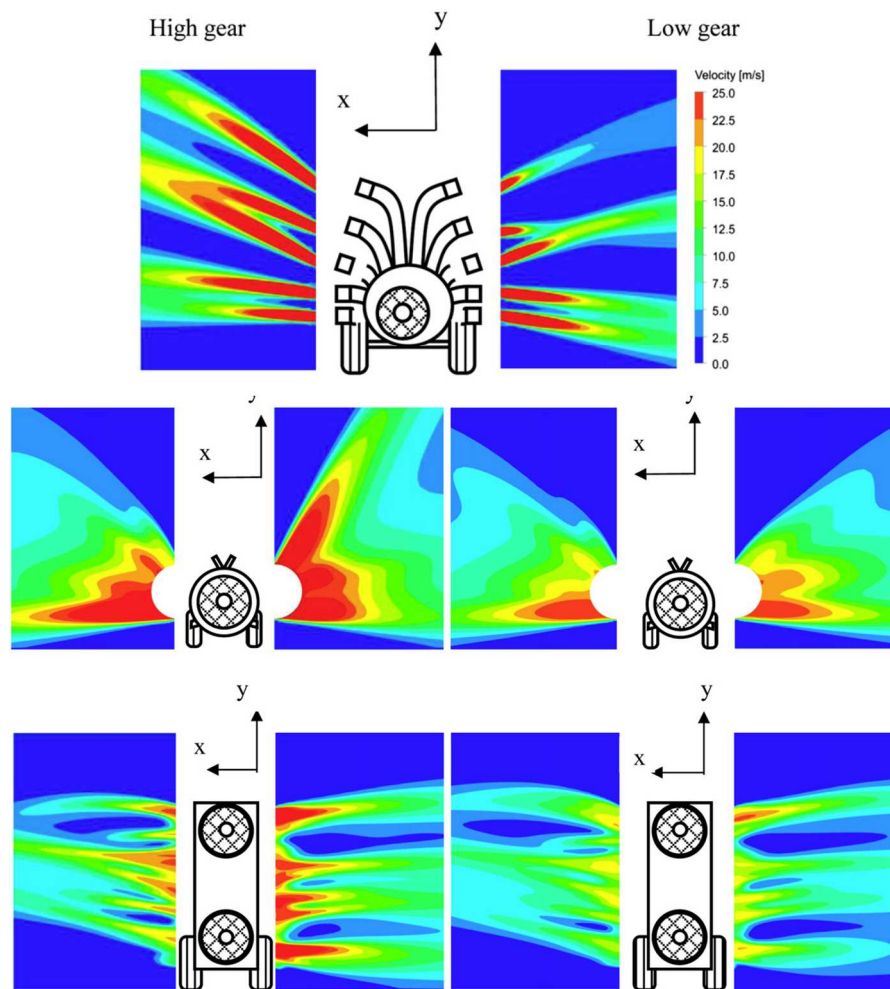


Figura 13. Flujos de aire generados por varios modelos de pulverizadores hidroneumáticos (Fuente: Dekeyser et al., 2013).

Para estudiar diferentes flujos de aire producidos por la misma máquina (por ejemplo, según la Figura 14, para diferentes revoluciones del ventilador) es necesario volver a recoger datos experimentales y variar las condiciones de contorno del modelo.

La modelización de la velocidad de avance de la máquina, se suele realizar introduciendo en el mallado un viento de la misma velocidad que la de avance de la máquina, pero de dirección opuesta; es decir, de esta forma, el modelo CFD, es, en realidad, estático. Esta estrategia, podríamos denominarla coloquialmente, “túnel de viento”, ya que se basa en imitar por simulación informática lo que se lleva a cabo en ese tipo de instalaciones para el estudio de aerodinámicas de coches, aviones, etc.

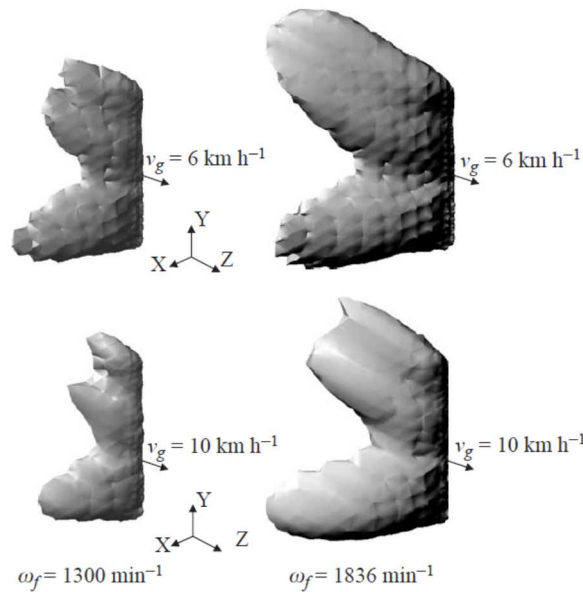


Figura 14. Visualización de los flujos de aire generados (envolvente de velocidad 7.5 m s^{-1}) por un pulverizador hidroneumático típico de ventilador trasero a diferentes velocidades de tratamiento y con diferente régimen de giro del ventilador (Fuente: Delele et al., 2005).

No existe problema, no obstante, para disponer dentro del mallado la representación de la máquina dentro del dominio de cálculo (García-Ramos et al., 2015) aunque las corrientes de aire se introducen como condición de contorno.

5.2.2. Diseño de pulverizadores

Otro uso de la CFD en pulverizadores consiste en aplicarlo en su diseño, con anterioridad al estudio pormenorizado de los flujos de aire una vez fabricado. El potencial de esta técnica es evidente, y se extendería al diseño de las toberas, del ventilador, de la voluta de la turbina o de cualquier otra parte de la máquina.

Su uso por parte de los fabricantes de maquinaria es limitado actualmente, pero en el ámbito de la investigación se han realizado varios prototipos. De esta forma, mediante CFD (Molari, Benini y Ade, 2005) se ha estudiado el diseño de un pulverizador de tipo túnel con reciclador (elemento cuyo objeto es disminuir la deriva) para ayudar en la construcción del prototipo, y posteriormente, para implementar mejoras y estudiar la posición idónea de las boquillas. Las mediciones reales realizadas con el prototipo fueron similares a los cálculos previos realizados con ordenador. La CFD demostró ser una herramienta que permitió acelerar el diseño y mejora de los pulverizadores.

Un tema muy diferente y problemático es el diseño de boquillas de pulverización mediante CFD. El mecanismo de formación de las gotas requiere de modelos tan detallados por el poco diámetro de las gotas que no es viable por ahora (con ordenadores convencionales) abordar un modelo completo del fenómeno desde que la vena líquida está a punto de salir de la boquilla hasta que se han formado todas las

gotas. Sí que ha sido posible el estudio dividiéndolo en fases, siendo los resultados de cada uno las condiciones de contorno del siguiente. Así, mediante CFD, se pudo modelizar adecuadamente (Altimira et al., 2009) el comportamiento del líquido desde que salía de la boquilla hasta que comenzaba a hacerse inestable (Figura 15) y romper en gotas. También se han desarrollado estudios con CFD de la fase posterior a la formación de las gotas (Nadeem et al., 2019) pero esto plantea serios requerimientos de capacidad computacional.

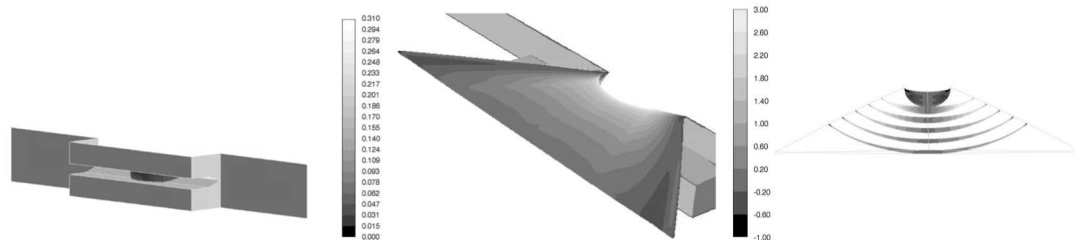


Figura 15. Geometría de boquilla analizada y resultados de espesor de lámina líquida y velocidades antes de que rompa en gotas realizado mediante CFD. (Fuente: Altimira et al., 2009).

Sin embargo, si se conocen las características iniciales de las gotas pulverizadas, mediante otros modelos CFD mucho más sencillos (modelos Euler-Lagrange) se puede simular la interacción de éstas con las corrientes de aire del pulverizador (Musiu, Qi y Wu, 2019) para determinar las características de la nube de gotas pulverizadas y por tanto, estudiar cual es la posición óptima de la boquilla en la máquina.

Otra línea de trabajo se ha centrado en la modelización mediante CFD de la agitación del líquido necesaria dentro de los depósitos (Figura 16) de los pulverizadores (Ucar et al., 2001; Chen et al., 2006; Micheli, Padilha y Scalón, 2015). Sin embargo, las conclusiones a las que se llegaron en estas investigaciones no fueron muy concluyentes.

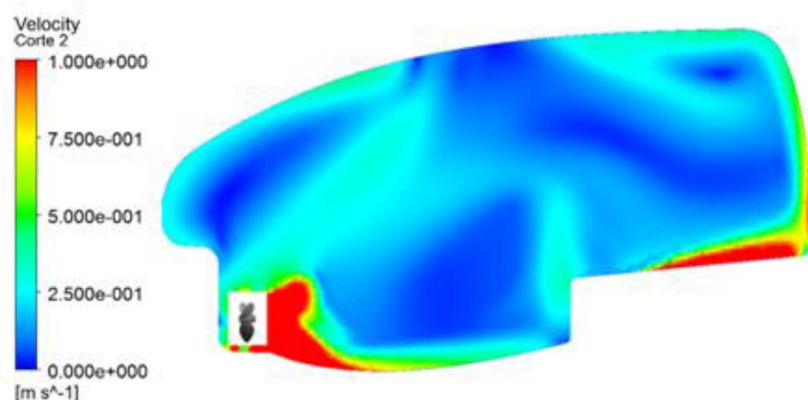


Figura 16. Plano de velocidades en un depósito calculado con CFD. (Fuente: Micheli, Padilha y Scalón, 2015).

5.2.3. Estudio de la deriva

El desarrollo de modelos CFD más complejos permite la introducción de fases dispersas como, por ejemplo, añadir al flujo de aire las gotas de caldo generadas por las boquillas. Se puede estimar la trayectoria de estas gotas, así como predecir su evaporación, impacto contra objetos, etc. Si al modelo se le introduce, además, la presencia de viento, se concluye que la CFD podría ser teóricamente una herramienta útil para predecir la deriva.

En el caso de pulverizadores hidráulicos de barra, se han desarrollado metodologías sencillas (Baetens et al., 2009) para ayudar al aplicador a tomar la decisión sobre la conveniencia o no de realizar el tratamiento con un pulverizador de barra según las condiciones ambientales. Los modelos CFD (Figura 17) sirvieron para validar dicho método, ahorrando así tiempo y costes en toma de datos experimentales, ya que se simulaban de forma mucho más ágil condiciones de viento, tipos de boquillas y altura de barra. Similares estudios se han realizado más recientemente para ciertos pulverizadores hidroneumáticos (Duga et al., 2017).

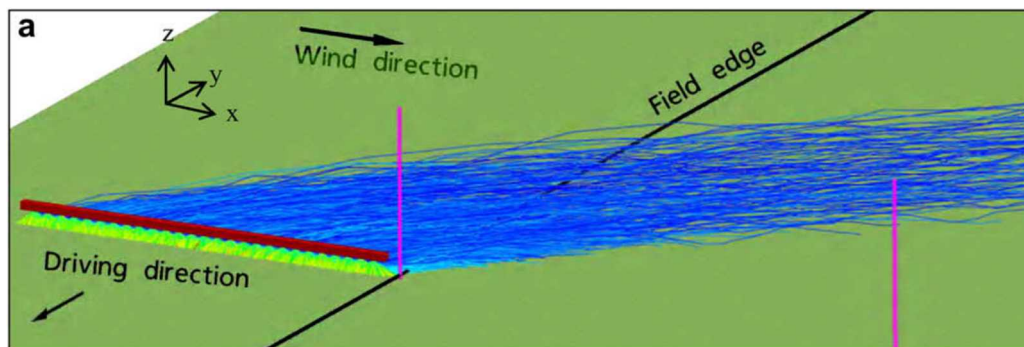


Figura 17. Modelo en CFD de la deriva de gotas aplicadas con un pulverizador hidráulico de barra, con viento transversal durante la aplicación. (Fuente: Baetens et al., 2009).

Existe una limitación concerniente al número de trayectorias de gotas estudiadas. Cuantas más gotas se estudien, más precisos son los resultados obtenidos del cálculo, pero éste requiere de más potencia computacional, pudiendo llegar a ser inviable si se pretende estudiar millones de trayectorias. Por eso debe encontrarse previamente en cada modelo el número idóneo de gotas que pueden ser estudiadas para que, sin que se sobrecargue en exceso el cálculo, se alcancen resultados de precisión aceptable. Generalmente esto, al igual que el tamaño de las celdas del mallado CFD, se determina por tanteos, incrementando el número de gotas estudiadas en varias simulaciones consecutivas. Se considera que el modelo es adecuado cuando un incremento significativo de gotas estudiadas no conlleva cambios en los resultados calculados.

No obstante, es evidente que estos estudios teóricos quedan limitados por obviar un aspecto fundamental en los tratamientos: el cultivo. En el caso de cultivos arbóreos o arbustivos esto contempla múltiples condicionantes, como marco de plantación, tipo de formación y densidad de vegetación.

5.2.4. Interacción aire-planta y características aerodinámicas de las mismas

La introducción del cultivo en los modelos CFD se ve limitada por la capacidad de procesamiento de los ordenadores, pues complica el cálculo enormemente, lo cual se suma al mayor esfuerzo computacional que requiere el estudio de partículas individuales o un tamaño de celda suficientemente pequeño para que el cálculo tenga una precisión aceptable. Por ello se han adoptado diferentes estrategias, adaptándolas a cada cultivo.

Así, por ejemplo, en vid, se ha simulado las plantas emparradas en CFD como un subespacio poroso que ofrece una cierta resistencia aerodinámica al paso del aire (Da Silva et al., 2006).

Otra estrategia de implementación de plantas en CFD, más apropiada para árboles frutales, es la modelización de los troncos y ramas principales como sólidos, y las hojas y las ramas pequeñas como un medio poroso (Figura 18) envolviendo a los troncos y ramas principales.

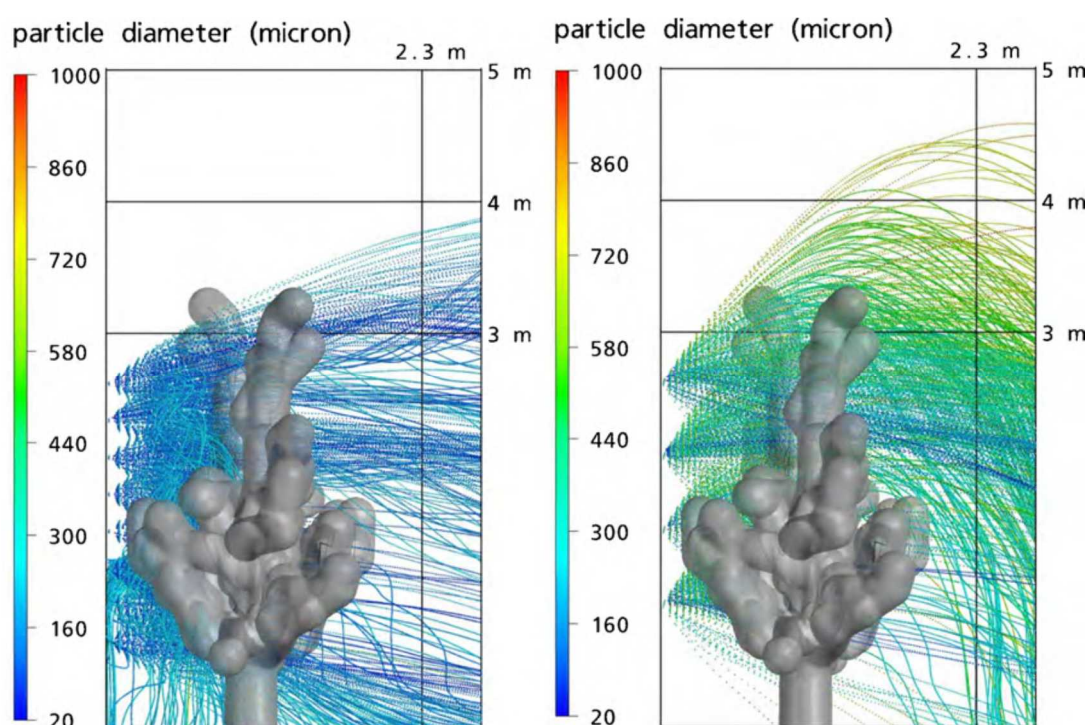


Figura 18. Árboles frutales modelizados en CFD como espacios porosos envolviendo a troncos y ramas principales, para el estudio de trayectorias de gotas con dos modelos de pulverizadores hidroneumáticos diferentes. (Fuente: Endalew et al., 2010c).

La estimación de las propiedades aerodinámicas de las plantas se ha realizado con éxito mediante plantas artificiales y/o en túneles de viento (Endalew et al., 2009) con modelos a escala. Los modelos realizados permiten describir el comportamiento aerodinámico de los árboles y el porcentaje de gotas interceptadas.

Esta estrategia de modelización es adecuada para ciertos tipos de árboles frutales, pero se ha visto inadecuada en otros casos. En árboles de muy alta densidad foliar, como los cítricos, que requieren el empleo de pulverizadores hidroneumáticos que movilizan grandes caudales de aire, una medición experimental de velocidades de

aire en el plano de soplado determinó la creación de vórtices sobre la primera fila de árboles (Salcedo et al., 2013). Con el fin de estudiar con detenimiento la deriva en este caso particular, se determinó que la mejor modelización de las plantas en este caso era como un sólido (al menos para la primera fila de árboles), ajustando su tamaño y la formulación de la viscosidad del aire.

La última opción para modelizar las plantas en modelos CFD sería teóricamente plantear la geometría detallada de hojas, brotes y ramas. Se ha intentado realizar para un emparrado de kiwi (Connell, Endalew y Verboven, 2011), y las ventajas respecto de otras modelizaciones son evidentes: quedaría resuelto implícitamente el cálculo de la resistencia aerodinámica de las plantas al flujo de aire, no sería necesaria la calibración de espacios porosos ni la adopción de otras estrategias de modelización. El futuro probablemente seguirá este camino, pero en la actualidad, esta estrategia conlleva un modelo tan detallado que implica la adopción de un número de celdas y una malla tan irregular, que el cálculo es inviable con ordenadores convencionales. Hasta la fecha no se han conseguido resultados útiles.

En resumen, en la pasada década (Figura 19) se ha logrado en ciertos casos integrar sobre geometrías de árboles estudios de deriva (Endalew et al., 2010a) y de interacción con corrientes de aire generadas por diferentes modelos de pulverizadores (Endalew et al., 2010b), pero cabe puntualizar que sin implementar el movimiento del equipo de aplicación.

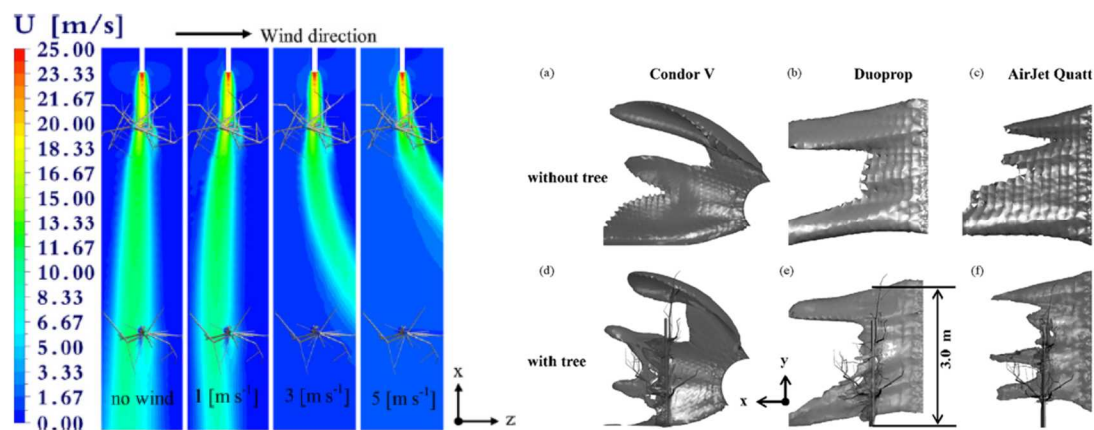


Figura 19. Izquierda: estudio de la deriva en un tratamiento sobre dos filas de árboles frutales, con diferentes velocidades de viento (Fuente: Endalew et al., 2010a). Derecha: estudio de flujos de aire de diferentes modelos de pulverizador (uno, dos y cuatro ventiladores en el mismo plano), sin y con interacción con los mismos árboles (Fuente: Endalew et al., 2010b).

Los resultados han demostrado que el comportamiento de los flujos de aire varía considerablemente considerando la interacción con las plantas que se tratan respecto del funcionamiento de la máquina trabajando en vacío. Este aspecto, por su importancia, será ampliado específicamente en el apartado 8 de esta memoria.

5.3. Tendencias actuales

Respecto del estudio de los tratamientos, la evolución lógica de todas las aplicaciones anteriores es la integración de todas ellas de forma simultánea en modelos completos y considerando el movimiento de la máquina. Esto ha estado limitado (y sigue estándolo) por la potencia computacional disponible. En función de su progreso, es previsible se alcance paulatinamente más detalle y modelos más complejos.

Parte de esta tesis avanza en este aspecto, como se detalla en el apartado 9 de la memoria, que aborda la simulación de tratamientos. En paralelo, otros investigadores (Hong, Zhao y Zhu, 2017b) han implementado modelos (Figura 20) en los últimos años en los que intervienen los cultivos, el viento atmosférico, el movimiento de la máquina y la pulverización de las gotas. Este tipo de análisis permite obtener una gran cantidad de información que puede volcarse en una base de datos. Sobre esta base de datos, se puede hacer un software amigable de consulta para los usuarios de estas máquinas (Hong, Zhao y Zhu, 2018), aunque el proyecto está en fase inicial y se necesitan muchas más simulaciones CFD para completar las casuísticas.

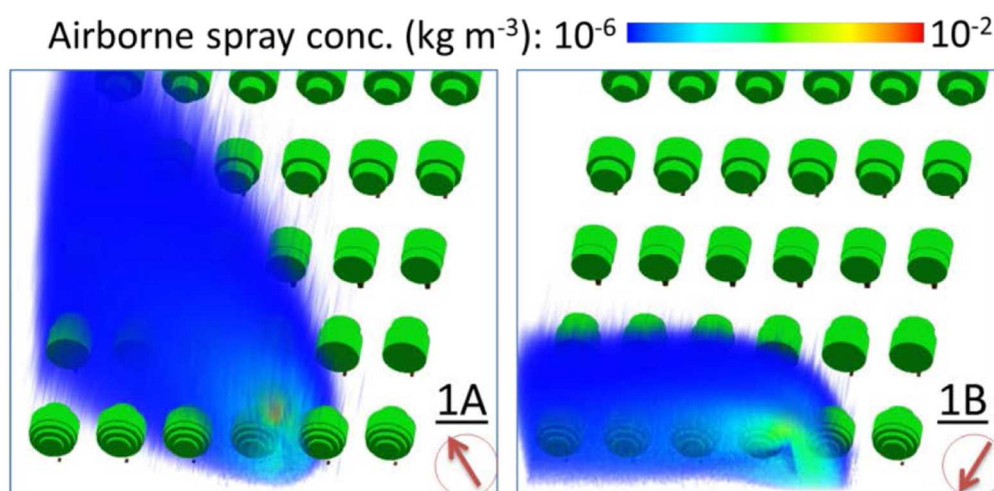


Figura 20. Modelización mediante CFD de la pulverización sobre un cultivo de manzanos bajo diferentes condiciones de viento (Fuente: Hong, Zhao y Zhu, 2017b).

También se puede destacar actualmente el empleo de la CFD en máquinas que se apartan de lo tradicional en materia de aplicación de tratamientos fitosanitarios, como, por ejemplo, los drones. Este tipo de equipos (Figura 21) está siendo objeto de numerosos estudios en todo el mundo en el ámbito de la investigación usando CFD (Yang et al., 2018) si bien debe recordarse que la aplicación de tratamientos por vía aérea tiene actualmente fuertes restricciones legales en España.

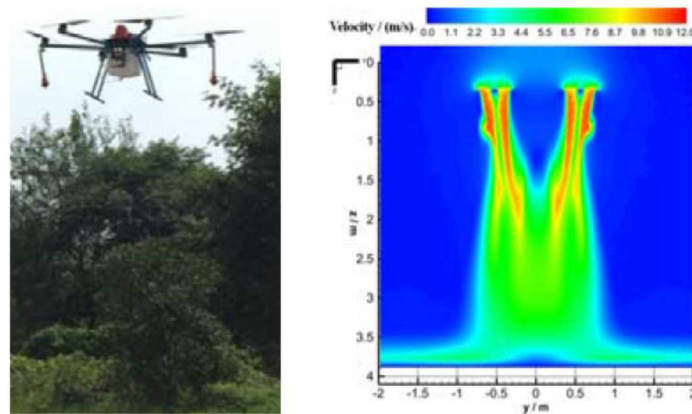


Figura 21. Simulación de un dron empleado en la pulverización de árboles mediante CFD. A la izquierda imagen real del dron simulado; a la derecha, plano de velocidades de aire provocadas por las hélices (Fuente: Yang et al., 2018).

Otro estudio que va más allá de la simple implementación del movimiento de las máquinas sería la introducción en el modelo de la máquina completa (Figura 22) interactuando en él, (es decir, no limitarse a introducir las corrientes de aire o las gotas de líquido pulverizado como condición de contorno). De esta forma el estudio de las turbulencias que precisamente provocan los pulverizadores y la maquinaria necesaria para su funcionamiento durante la aplicación, quedaría implícito. Resulta relativamente sencillo, con el estado del arte actual, estudiar la aerodinámica de una máquina para realizar tratamientos a cultivos (Galamboš, Dorić y Ružić, 2016; Landry y Wolf, 2019), pero siempre adoptando la estrategia “túnel de viento” en el que la máquina en el modelo en realidad no se desplaza hacia delante y su movimiento es simulado parcialmente en CFD por una corriente de aire en la parte frontal de la máquina, lo cual permite estimar las turbulencias que crearía la máquina real.

La implementación de la máquina real en movimiento en una simulación CFD, es una tarea que requeriría de mallas dinámicas (ver apartado 4.3.4) lo que complicaría el cálculo enormemente.

En cuanto a profundizar en la modelización aerodinámica del cultivo, se trata de un tema muy complejo como se detallará en otros apartados de esta memoria. El siguiente desafío a abordar en este aspecto debería ser continuar en el avance de la implementación de geometrías detalladas de hojas y brotes. Existen programas informáticos de generación automática de plantas, que simplificarían notablemente la tarea de la creación de la geometría. Sin embargo, la actual limitación en este campo proviene de que se crearían modelos de un elevado número de celdas, muy pequeñas, no siendo viable su cálculo con los ordenadores actuales. Yendo un paso todavía más allá, el potencial de la CFD permite su interacción con modelos de mecánica de medios continuos. Esto quiere decir que teóricamente se podría modelizar la agitación y el movimiento de las hojas, brotes y ramas, debidas a las propias corrientes de aire del pulverizador o viento atmosférico, con lo que no solo quedaría resuelto el problema de la resistencia al flujo de aire a través del follaje de la vegetación, sino que se modelizarían los vórtices y remolinos con mejor

aproximación. Esta técnica se ha ensayado para simular efectos aerolásticos en puentes esbeltos (Szabo y Kristof, 2010), pero añadiría una complicación más al cálculo, que sería la necesidad de establecer cálculos transitorios con saltos de tiempo mucho más pequeños que los que se necesitan para simular el avance de la maquinaria, que se sumarían a la mucha mayor cantidad de celdas en las que habría que dividir el espacio del problema. Todo ello redundaría en una necesidad de potencia computacional que no sólo no se prevé alcanzar de forma económica en las próximas décadas, sino que tal vez requiera saltar a otro tipo de computación no basada en chips de transistores semiconductores.

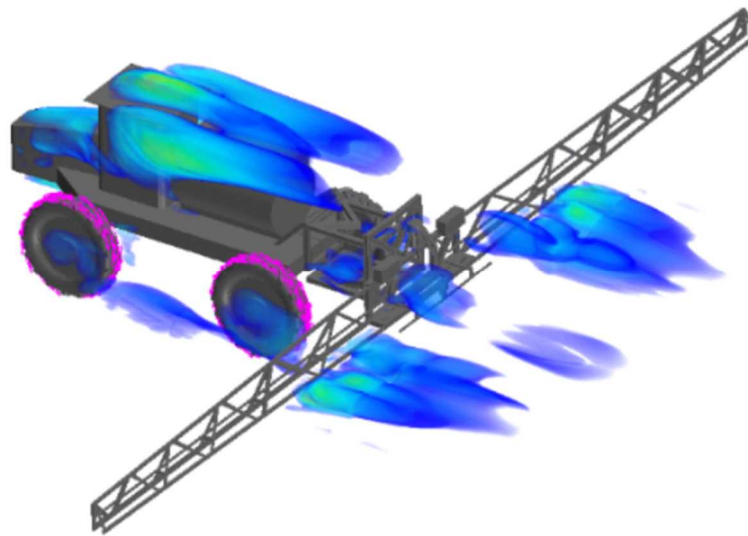


Figura 22. Energía cinética turbulenta calculada mediante CFD provocada por un pulverizador autopropulsado durante su trabajo (Fuente: Landry y Wolf, 2019).

Respecto al diseño industrial de la maquinaria, la CFD podría ser una herramienta sumamente útil. Hasta ahora su uso ha sido muy marginal, pero su potencial es enorme. Podría ayudar a mejorar casi cualquier aspecto relacionado con el diseño y desarrollo de los pulverizadores hidroneumáticos. El objetivo final de todos estos estudios y técnicas, no puede ser otro que el avanzar en la optimización de los tratamientos.

Realizadas todas las explicaciones anteriores concernientes a tratamientos fitosanitarios, maquinaria, CFD y aplicaciones, que suponen un estudio de la situación de partida, los próximos apartados de la memoria va a entrar ya de lleno en describir la investigación realizada.

Los resultados de la investigación, ya han sido publicados en revistas especializadas en forma de artículos, los cuales forman el compendio que compone esta tesis, y que se adjuntan en los anexos. El orden de exposición va a ser el recorrido que hace el líquido “desde el depósito hasta la planta”.

6. CFD y depósitos de los pulverizadores

Este apartado es el primero en el que se muestra explícitamente la investigación realizada. Está dedicado al estudio de la agitación en el depósito de los pulverizadores.

6.1. Introducción

El depósito es donde se guarda y transporta el caldo de aplicación. También, donde éste toma forma, pues inicialmente, lo que se tiene es agua limpia, por un lado, y el producto o a lo sumo una papilla de producto por otro. El responsable de la homogeneidad del caldo es el sistema de agitación del depósito.

6.1.1. Preparación de los caldos

En el apartado 3.1 de esta memoria, se mencionó que actualmente los productos fitosanitarios mayoritarios son aquellos pensados para ser aplicados en forma líquida, aunque ello no quiere decir que éstos sean líquidos.

Por un lado, tenemos las formulaciones solubles, que como su nombre indica, se disuelven en el agua dando lugar a mezclas homogéneas que, una vez realizadas, no requieren agitación o en todo caso la requieren muy leve. Estas formulaciones pueden ser en forma sólida (por ejemplo, polvos solubles) o líquida (líquidos solubles). Este tipo de formulaciones serían las preferibles, pero no suelen estar disponibles en muchas sustancias activas.

Por otro lado, tenemos las formulaciones dispersables. De forma análoga al grupo anterior, se subdividen comercialmente en sólidos dispersables y líquidos en suspensión. Los líquidos en suspensión forman suspensiones estables en las que el líquido del producto está disperso en el agua, pero en todo caso se recomienda agitar el caldo para asegurarse de este aspecto (Vázquez, 2003). En cuanto a los sólidos dispersables, que son un porcentaje muy significativo de los productos comercializados (por ejemplo, los polvos mojables), no se disuelven en el agua, y a diferencia de los líquidos en suspensión, dan lugar a caldos inestables que requieren de agitación continua para garantizar su homogeneidad, ya que tienen tendencia a sedimentar. No es pues un aspecto banal, si bien el agricultor lo da por supuesto; debe ser el fabricante de la máquina de aplicación el que garantice que la mezcla es homogénea.

Finalmente, tendríamos otro tipo de formulaciones, como los líquidas emulsionables, que son líquidos que no se mezclan con el agua pero que a diferencia de los líquidos en suspensión no sólo no forman caldos estables, sino que una vez hecho éste puede “cortarse” (separación de las fases), o las suspensiones oleosas.

Las recomendaciones generales teóricas sobre preparación de caldos serían las siguientes: en el caso de polvos mojables se recomienda, en un recipiente aparte de pocos litros de capacidad, preparar una papilla con un poco de agua y sin que se formen grumos, filtrar esa papilla para retirar los posibles grumos que no se hayan podido evitar, y añadir al depósito del pulverizador cuando éste está a 1/3 de su

capacidad y con el sistema de agitación ya funcionando. Cinco minutos antes de realizar el tratamiento, se termina de llenar el depósito sin desconectar el sistema de agitación; la agitación no debería detenerse desde ese momento, ni en el transporte del equipo a la parcela.

Para los sólidos solubles, es suficiente con añadirlos cuando el depósito está a la mitad de su capacidad, pero desde entonces hasta el final del llenado debe mantenerse en funcionamiento la agitación, y esperar hasta 5 minutos antes de empezar la aplicación. Durante el tratamiento no es imprescindible mantener activado el sistema de agitación, pero sí recomendable.

Para líquidos solubles o emulsionables, las recomendaciones serían como el del caso anterior salvo que el producto puede verse al depósito con éste lleno.

En resumen, sea cual sea la forma comercial del producto, todos tienen un aspecto común, que es la recomendación de esperar hasta cinco minutos desde que el depósito está lleno y con el producto añadido antes de empezar el tratamiento, para garantizar su homogeneidad.

6.1.2. Generalidades sobre sistemas de agitación

Los depósitos de los pulverizadores (también llamados “cuba” en muchos lugares), cumplen, como se ha dicho, con la función de preparar el caldo mediante su homogenización continua, almacenamiento durante la aplicación, y transporte hasta la parcela si procede.

El tamaño de los depósitos, considerando cualquier pulverizador accionado por tractor, varía desde los 200 L (para pequeños pulverizadores hidráulicos suspendidos) hasta los 6,000 L (para grandes equipos arrastrados), pero en el caso de los pulverizadores hidroneumáticos como los estudiados en este trabajo, lo normal será trabajar en el rango de los 1,500-3,000 L. Para el aplicador, conviene que la capacidad del depósito sea lo más grande posible, ya que más volumen implica menos paradas y menos tiempo en reponer el caldo empleado. Sin embargo, en cultivos frutales, debe tenerse en cuenta que el tamaño condiciona la maniobrabilidad y por lo tanto está supeditado al marco de plantación del cultivo, que también limita la tipología y potencia del tractor.

Cuanto mayor es el volumen del depósito, más difícil es la gestión de la agitación, por lo que depósitos del tamaño máximo indicado son de difícil diseño para el fabricante (que tiene que garantizar que el sistema de agitación es suficiente) o requieren de soluciones específicas.

El sistema de agitación más común es el de “agitación hidráulica por retorno”. La bomba (elemento que proporciona presión al circuito de líquido del pulverizador) toma un caudal de caldo de la zona de apurado (depresión o cavidad que se diseña en el depósito en la parte inferior del mismo) mayor a lo demandado por las boquillas de pulverización; la parte no pulverizada, vuelve al depósito por un sistema de retorno y se utiliza para provocar la agitación del caldo. El primer requisito para que el sistema tenga éxito, es que el volumen retornado por minuto tiene que ser como mínimo el 5 % del depósito, siendo preferible por lo menos que llegue hasta el 10 %

(Vázquez, 2003). Por lo tanto, a mayor volumen del depósito, mayor tiene que ser la capacidad de la bomba. El segundo requisito es que el caudal retornado sea repartido en el depósito de forma adecuada. Generalmente esto se hace mediante boquillas que canalizan el líquido en el interior del depósito, soliendo intensificar el resultado con el efecto Venturi. La ubicación de varias de estas boquillas es necesaria en depósitos grandes. Es deseable disponerlas en el fondo, de manera que estén cubiertas de caldo la mayor parte del tiempo, pues así son más eficaces y se evita la formación de espuma.

Otra posibilidad es la agitación hidráulica con una bomba auxiliar. En esta ocasión, el pulverizador tendría dos circuitos de líquido, cada uno con una bomba: uno para la pulverización hidráulica y otro para la agitación. Pero a efectos prácticos, en el interior del depósito, ambos sistemas son indistinguibles.

Nombraremos finalmente dos opciones más de agitación, absolutamente minoritarias en pulverizadores agrícolas:

- La agitación hidromecánica, que consiste en que una bomba dentro del depósito es la encargada de agitar el caldo.
- Agitación mecánica, que consiste en una serie de hélices, paletas o similares que mueven el contenido del depósito.

En este trabajo se han realizado modelos CFD que corresponderían con los dos primeros sistemas, si bien, no habría dificultad teórica para desarrollar con CFD simulaciones informáticas de los otros dos sistemas, aunque vaticinamos que la agitación hidromecánica podría tener limitaciones por grandes requerimientos computacionales al ser conveniente modelizar la bomba (que sería un elemento complejo con elevada necesidad de mallado con celdas muy pequeñas) de forma exacta⁴.

6.1.3. Ensayos de agitación. Problemática

Debido a la importancia de la agitación en la formación del caldo de aplicación, los fabricantes deben garantizar según la norma ISO 16119-3 (ISO, 2013) que la concentración del producto entre diferentes puntos del depósito no varía en más de un +/- 15 %. El procedimiento de ensayo experimental también está normalizado, y se recoge en la norma ISO 5682-2 (ISO, 1997), pero su puesta en práctica plantea problemas logísticos no desdeñables. Por este motivo existen propuestas alternativas (más adelante explicadas), y los fabricantes de pulverizadores demandan que se sigan investigando nuevas metodologías que permitan certificar que se alcanza la homogeneidad exigida de forma más sencilla y barata que las que implican las normas ISO.

En primer lugar, debe procederse a explicar en qué consiste el ensayo de agitación descrito en la norma ISO 5682-2. Este es el ensayo prescrito para máquinas nuevas, y

⁴ Aunque se podrían implementar simplificaciones sustituyendo los álabes y rodets convenientemente por condiciones de contorno adecuadas.

que, por lo tanto, los fabricantes deben por defecto realizar antes de lanzar un modelo al mercado.

El ensayo consiste, en síntesis, en lo siguiente:

- En primer lugar, se llena el depósito del pulverizador que se quiere ensayar con agua limpia.
- Posteriormente, se añade una cantidad tal de oxiclورو de cobre, que consiga una concentración del 1% en peso.
- El sistema de agitación se activa durante 10 minutos.
- Pasado ese tiempo, deben recogerse muestras del caldo en tres niveles diferentes.
- A continuación, el depósito se deja reposar (con el sistema de agitación apagado) durante 16 horas.
- Pasado ese tiempo, se vuelve a activar el sistema de agitación otros 10 minutos, y se vuelve a coger muestras en tres niveles diferentes.

Los problemas que plantea en la práctica este ensayo, son varios. En primer lugar, es necesario un espacio acondicionado con todo lo necesario para llevarlo a cabo (véase, a modo de recordatorio, la Figura 3). En segundo lugar, se necesita una cierta infraestructura auxiliar para recoger las muestras de líquido del interior del depósito. En este sentido, es preciso que el recipiente con el que tomemos las muestras sólo tome caldo de los puntos concretos en los que se tienen que realizar las mediciones de concentración. Para recoger las muestras siempre en los mismos puntos, es casi imprescindible introducir dentro del depósito algún elemento, que permitan a las personas que realicen el ensayo determinar con precisión los lugares de extracción de muestras. Estos elementos pueden ser por ejemplo bastidores, que deben fabricarse o adaptarse para cada depósito que se ensaya. Por otra parte, una vez recogidas las muestras, se necesita un mínimo de material de laboratorio para poder determinar la homogeneidad del caldo, como por ejemplo matraces aforados en los que verter las muestras, estufas para acelerar el secado del agua de las muestras, y balanzas de precisión para determinar la masa de oxiclورو de cobre de cada muestra tomada.

De cualquier forma, existe otro problema mucho más grave que sólo se percibe cuando se realiza el ensayo: no siempre se obtienen resultados concluyentes. En algunos casos (García-Ramos et al., 2018) realizar el ensayo con una concentración de oxiclورو significativamente menores al 1% indicado en la norma mostró resultados más coherentes.

La problemática expuesta a la hora de recoger las muestras y/o determinar las concentraciones que se tienen en la práctica al seguir fielmente la norma ISO 5682-2, han propiciado que muchos investigadores propongan métodos alternativos. Uno de los más sencillos es el empleo de medidores de turbidez (Ozkan y Ackerman, 1999; Vondricka y Schulze, 2009), lo que evitaría el aforamiento, secado y pesado de las muestras de oxiclورو. También se ha propuesto la toma de imágenes en depósitos

transparentes (Tamagnone et al., 2012), lo cual plantea un serio problema pues puede ser más costoso fabricar un prototipo de depósito transparente que optar por otro tipo de ensayo. Por otro lado, también se ha propuesto estudiar las velocidades del líquido dentro del depósito con el sistema de agitación funcionando, y establecer una relación entre éstas y la homogeneidad de la mezcla (Micheli, Padilha y Scalon, 2015). Las medidas obtenidas con algunos de estos métodos pueden ser muy precisas, pero no evitan el inconveniente de necesitar una infraestructura auxiliar (Figura 23) similar a la necesaria para llevar a cabo el ensayo ISO 5682-2, que debe ser fabricada y/o ajustada para cada depósito.

A todo esto hay que añadir la dificultad de aplicación de la metodología propuesta por la norma ISO para personal no especializado, así como el tiempo necesario para completar el proceso, estimado en más de 88 horas (Gil et al., 2018).



Figura 23. Elementos auxiliares necesarios para llevar a cabo mediciones en un depósito de pulverizador hidroneumático.

En resumen, el hecho de que se busquen alternativas a un ensayo normalizado es indicio claro de que la ejecución del estándar plantea problemas. Sin embargo, tanto el ensayo de referencia, como todas las alternativas descritas, presentan un grave inconveniente aún no mencionado: todos necesitan que el depósito esté construido. La CFD podría suponer una gran ventaja respecto a todo lo anterior, pues no necesitaría fabricar ningún prototipo para probar el funcionamiento de un sistema de agitación, lo que podría suponer un ahorro para los fabricantes al poder descartar diseños no satisfactorios sin necesidad de fabricarlos.

6.1.4. Simulaciones CFD previas

La idea de usar la CFD para estudiar el sistema de agitación de los depósitos de pulverizadores hidroneumáticos no es nueva. Los primeros estudios al respecto (Ucar et al., 2001; Chen et al., 2006) se centraron en la medición de velocidades dentro del depósito y su comparación con modelos CFD. Más recientemente (Micheli, Padilha y Scalon, 2015) se intentó correlacionar las velocidades estimadas mediante un modelo CFD con las concentraciones de la mezcla de un depósito de pulverizador estudiado experimentalmente.

Hasta el momento, todos estos estudios comparten haber llegado a resultados poco concluyentes. Apuntan en la dirección de que la CFD puede ser útil, pero los resultados obtenidos no siempre se aproximan a las mediciones reales. Es habitual que sólo un tercio de los puntos medidos presenten resultados similares a los obtenidos con simulaciones CFD. Ello contrasta con el uso de la CFD en simulaciones de flujos de aire, donde para el estudio de pulverizadores hidroneumáticos, se han obtenido muy buenas aproximaciones.

6.2. Metodología y planteamiento del estudio

Realizada la aproximación al problema del estudio de la agitación en depósitos de pulverizadores hidroneumáticos, nos centraremos en explicar las aportaciones a la materia que se han realizado desde el seno de este trabajo.

En primer lugar se realizó un ensayo experimental (García-Ramos et al., 2018) en el que se estudiaron tanto las velocidades como las concentraciones en un depósito de 3,000 L de un pulverizador hidroneumático comercial, cuyos resultados se recogen en el siguiente artículo JCR que se adjunta en los anexos como parte del compendio de la tesis:

García-Ramos, F.J., Badules, J., Bone, A., Gil, E., Aguirre, J., Vidal, M. (2018). "Application of an acoustic Doppler velocimeter to analyse the performance of the hydraulic agitation system of an agricultural sprayer". *Sensors* (11), p. 3715.

Las características del depósito se han explicado someramente en el apartado 3.5 y se profundiza en el correspondiente artículo; solo cabe hacer hincapié en que disponía de cuatro agitadores tipo Venturi, los cuales podían funcionar bien los cuatro simultáneamente, o bien los dos de mayor caudal, dispuestos en extremos opuestos del depósito.

La batería de ensayos realizados comprendieron las mediciones de las velocidades en diferentes puntos del interior del depósito con diferentes configuraciones del equipo de agitación (presiones del circuito de líquido de retorno y agitadores en funcionamiento) con tres niveles diferentes de líquido (1,000, 2,000 y 3,000 L), mientras que los ensayos de medición de concentración de oxiclورو de cobre se realizaron siempre partiendo de 3,000 L, si bien se probaron diferentes concentraciones y formas de obtener las muestras.

6.2.1. Estudio de velocidades en el depósito mediante CFD

Tras la toma de datos experimentales explicada en el apartado anterior, se modelizó el sistema en CFD obteniendo los valores de velocidad del fluido en diferentes puntos del depósito. Los resultados obtenidos se explican en otro artículo adjunto que forma parte del compendio:

Badules, J., Vidal, M., Boné, A., Gil, E., García-Ramos, F.J. (2019). "CFD Models as a tool to analyze the performance of the hydraulic agitation system of an air-assisted sprayer". *Agronomy*, 9, p. 769.

De forma interna a la investigación, se probaron varios modelos de viscosidad para determinar cuál ofrecía resultados más precisos respecto de las mediciones reales. El resultado de dichas pruebas internas, fue que todos los modelos de viscosidad probados (familia k- ϵ , familia k- ω , k-kl- ω , SST, RSM) ofrecieron resultados similares. Por este motivo, se concluyó que este aspecto no era crítico, y se eligió el modelo estándar k- ϵ por ser uno de los de menor tiempo de cálculo, y haber sido uno de los más habituales hasta hace unos años en la bibliografía especializada. Recientemente este método está recibiendo críticas, y se observa un auge a favor del uso del modelo SST (que requiere significativamente más tiempo de cálculo, en torno a un 70% más en el problema estudiado), pero podemos afirmar que en esta investigación este último modelo proporcionaba resultados prácticamente idénticos.

Otro aspecto que en otras investigaciones resulta crítico, es el modelado de pared. Con la elección del modelo de viscosidad estándar k- ϵ , es necesario (apartado 4.4.3) establecer una función de pared y además, realizar un cuidado mallado en los límites del modelo, con el fin de mantener unos valores de y^+ adecuados durante el cálculo. Debido a la baja velocidad del fluido en ciertas paredes, se observó cómo en éstas era imposible obtener valores de y^+ por encima de 30 con tamaños de celda razonables. Este hecho se incrementaba además con el volumen de líquido en el depósito, pues se demostró, tanto experimentalmente como por medio de la simulación CFD, que la velocidad media del líquido disminuía cuanto mayor era el volumen de líquido en el tanque. Por lo tanto, se optó por realizar un mallado que implicase valores de y^+ por encima de 30 en aquellas zonas de las paredes del depósito fuertemente influenciadas por las corrientes de los agitadores (rompeolas y fondo bajo los chorros principales producidos por los agitadores), pero se renunció a conseguir lo mismo en otras zonas, a fin de no implementar mallados con tamaños de celdas inadecuados. Para paliar los efectos de tener zonas de pared con valores de y^+ por debajo de 30, se optó por calcular con funciones de pared escalables. En todo caso, de similar manera a lo observado con la elección de modelos de viscosidad, la elección de un tipo de función de pared u otra, no implicó cambios en los valores de velocidad calculados en la simulación, por lo que cabe concluir, que éste no es un aspecto crítico.

En cuanto al mallado, además de las precauciones tomadas en las paredes, se probaron, como debe ser regla de buena práctica, varios tamaños de celda. En todo caso, una conclusión obtenida de los estudios internos realizados fue que, contrariamente a la regla establecida en cálculos por volúmenes finitos u otros métodos numéricos similares, un mallado más denso no tiene porqué ofrecer mejores resultados que otro más laxo. Aunque en teoría los resultados tendrían que ser más exactos, debe tenerse en cuenta también cómo se desarrolla el cálculo. En el caso estudiado, el cálculo con 4 agitadores era especialmente crítico, y se mostraba muy inestable en el transcurso de las iteraciones (es decir, ciertos residuos de cálculo no se estabilizaban ni seguían un patrón claro), tendencia que era más acusada con mallados más finos. Esto se materializaba en algunos cálculos en que mallados de más celdas daban resultados peores (más alejados de las mediciones experimentales) que otros de menos celdas.

6.2.2. Estudio de concentraciones en el depósito mediante CFD

Otra alternativa para estudiar la agitación mediante CFD en los tanques de pulverizadores hidroneumáticos, es realizarlo bajo un enfoque bifásico, lo cual es una aproximación directa a lo propuesto por el ensayo ISO 5682-2.

De lo que se trataría en este caso, no sería describir las corrientes generadas y las velocidades del caldo en el depósito, sino la concentración de fase secundaria en varios puntos de control. Esto ha sido publicado en el siguiente trabajo que forma parte del compendio de artículos de esta tesis doctoral:

Badules, J., Vidal, M., Boné, A., Gil, E., García-Ramos, F.J. (2020) "Biphasic computational fluid dynamics modelling of the mixture in an agricultural sprayer tank". *Molecules*, 25, p. 1870.

A la hora de abordar este tipo de cálculos (flujos bifásicos), ANSYS Fluent® nos ofrece cuatro posibilidades diferentes, tres de ellas correspondientes a modelos Euler-Euler, y una a un modelo Euler-Lagrange. Estas modelizaciones bifásicas se explican en el artículo de referencia, y a él nos remitimos, si bien señalamos aquí para mayor claridad que los modelos Euler-Euler abordan el cálculo de la fase primaria y las secundarias bajo enfoque Euleriano (véase apartado 4.1), mientras que el modelo Euler-Lagrange, aborda la fase primaria con enfoque Euleriano y la secundaria bajo enfoque Lagrangiano, es decir, como partículas discretas.

Como se explica en el artículo publicado, de los tres modelos Euler-Euler, uno de ellos no es viable (el VOF, Volume Of Fluid), ya que su cálculo para el problema planteado exige tiempos de cálculo con ordenadores convencionales de, literalmente, varios años.

Los otros tres modelos, serían a priori posibles. En la Figura 24 se representa un cálculo demostrativo existente en la bibliografía, en el que se realiza una simulación mediante un modelo Euler-Lagrange y también mediante un modelo Euler-Euler, llegando aparentemente a los mismos resultados.

Sin embargo, este trabajo, como se expone en el artículo correspondiente, no ha sido capaz de llegar a resultados similares que pongan en igual nivel ambos tipos de modelos bifásicos.

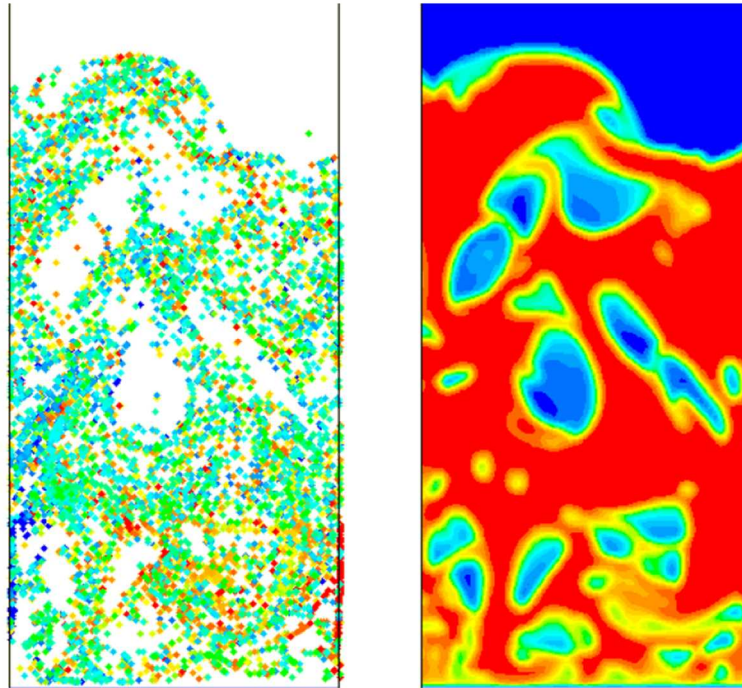


Figura 24. Simulación de un flujo bifásico con modelo Euler-Lagrange (izquierda) y del mismo con un modelo Euler-Euler (derecha). (Fuente: Ma y Srinivasa, 2008).

6.2.3. Modelado de los agitadores

Un aspecto no explicado en lo publicado que resulta muy importante, y que es común a ambas líneas de modelos (monofásicos y bifásicos), es el modelado de los agitadores de los depósitos. No nos estamos refiriendo al modelado de las toberas o canalizaciones, pues esto es una cuestión meramente geométrica, en la que sólo conviene obviar aquellos elementos minúsculos que incrementen la necesidad de mallado sin aportar nada relevante a la hidrodinámica del fluido del depósito. Nos estamos refiriendo al modelado de la condición de contorno de entrada del fluido.

Dado que es muy complicado medir con precisión la velocidad del fluido a la salida de la boquilla del agitador, los datos que dispondremos más habitualmente serán el caudal aportado por la boquilla en función de la presión de trabajo (fácilmente medible con un caudalímetro dispuesto en el conducto que alimenta la boquilla) y el orificio de la boquilla. Es incluso probable, que estos datos sean proporcionados por el fabricante del propio agitador, el cual nos proporcionará directamente datos de caudal inyectado en función de la presión del circuito de líquido del pulverizador.

El error en que se debe evitar caer, es introducir como condición de contorno en el modelo CFD el caudal en el diámetro de la boquilla como una velocidad media en toda el área del orificio. Si hacemos esto obtendremos como resultado unas velocidades en el depósito muy inferiores a las reales. ¿Qué es lo que estaría ocurriendo? Pues que, en la realidad, la velocidad del fluido a la salida de la boquilla del agitador es muy superior, por el simple efecto del estrangulamiento que sufre la vena líquida al pasar de un conducto a un orificio. En los modelos desarrollados en

esta tesis, los resultados fueron razonables en comparación con los medidos experimentalmente, cuando se modelizó el orificio de la boquilla con una superficie del 60 % de la real. Esta cifra no resulta sorprendente, ya que coincide con un valor típico de coeficiente de descarga de un orificio.

6.3. Resultados

6.3.1. Comparación de velocidades reales con modelos CFD

Si se observa la publicación de Badules et al. (2019), una de las conclusiones es que las simulaciones CFD predicen correctamente los valores medios de velocidad del fluido y las corrientes generadas, pero la desviación estándar es mucho mayor, lo que implica que la correlación punto a punto, es baja (con un error medio del 45%), aspecto similar a lo descrito en investigaciones previas (Ucar et al., 2001). El análisis de la Figura 25 permite hacernos una idea de lo que sucede.

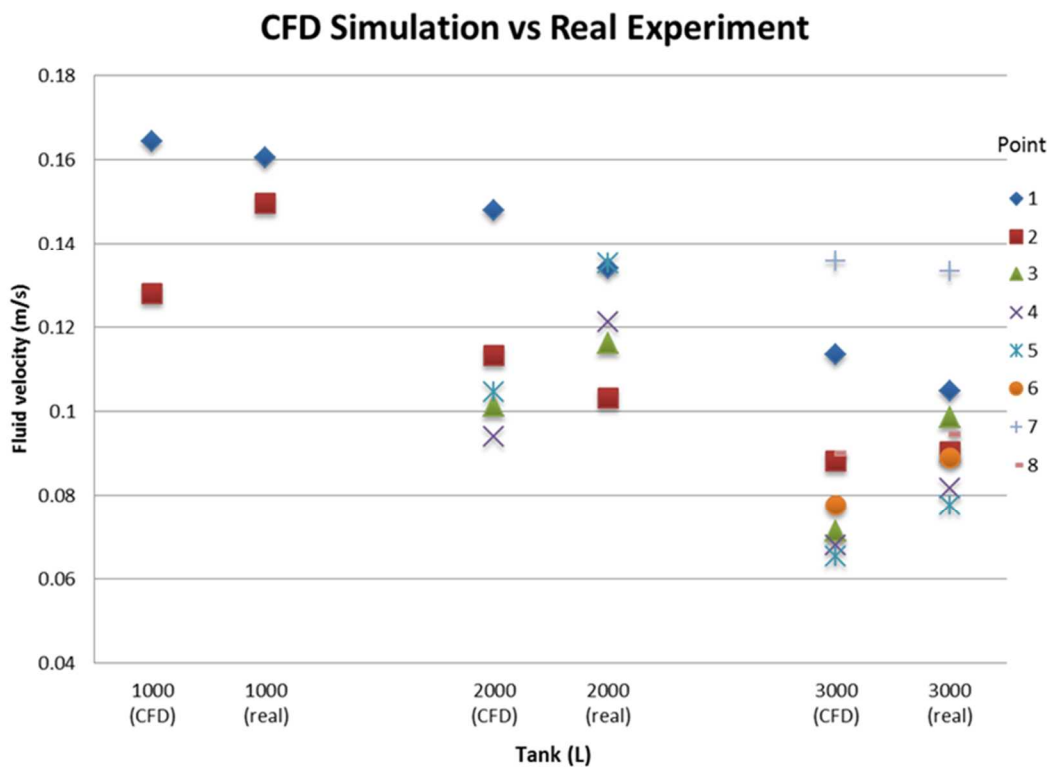


Figura 25. Velocidades medias por puntos de medición en los modelos CFD y en las mediciones experimentales de velocidad de fluido. Se han realizado medias por secciones, presiones del circuito hidráulico, y número de agitadores funcionando.

Como se puede observar, son muy pocos los puntos donde la velocidad medida coincide con la estimada en la simulación CFD. Sin embargo, dos aspectos llaman la atención:

- Las medias de velocidad de todos los puntos sí son similares si se comparan mediciones reales y simulación CFD (aspecto ya estudiado en el artículo).

- Los patrones que siguen tanto la simulación como la realidad son, en ocasiones, muy similares.

Además, en todas las simulaciones, el rango de velocidades es mayor que en las mediciones experimentales. Esto no ocurre con las modelizaciones de aire, que pueden obtener buenas aproximaciones entre realidad y simulaciones CFD punto a punto (Badules et al., 2018). Cabe por tanto sugerir que la CFD, al simular agua, si bien logra estimar de forma correcta la circulación general del fluido y las velocidades medias, magnifica las velocidades en ciertos puntos y las minimiza en otros con respecto de la realidad. Para alcanzar más precisión punto a punto, se podría explorar en un futuro la posibilidad de calcular con modelos de viscosidad diferentes a los RANS. Sin embargo, según las pruebas que se realizaron en esta investigación, métodos como el LES debían calcularse con mallados muy finos, en modo transitorio y con pequeños saltos de tiempo, lo que implicaba tiempos de cálculo inasumibles para este trabajo.

6.3.2. Estudio de concentraciones en CFD. Tiempos de cálculo

En cuanto al estudio de concentraciones mediante CFD, de forma complementaria a los resultados expuestos en el artículo adjuntado en los anexos, sólo es relevante hacer un comentario adicional sobre los tiempos de cálculo.

El conjunto de simulaciones CFD realizadas se han limitado a la simulación de los 10 primeros minutos de agitación establecidos en la norma ISO 5682-2. Las simulaciones partían de la suposición de tener el depósito con agua limpia (fase primaria) en el instante inicial, a la que se le añadía, por una de las bocas superiores del depósito, el producto a disolver (fase secundaria). Si analizamos los tiempos de cálculo de los dos modelos Euler-Euler (*Eulerian* y *Mixture*) que mejores resultados han proporcionado en las simulaciones (Badules et al., 2020), para diferentes mallados de volúmenes finitos probados en la investigación, obtenemos la Tabla 3.

Tabla 3. Horas de cálculo de varios modelos CFD.

Nº de celdas	Horas de cálculo	
	Mixture	Eulerian
1,046,289	43.3	76.0
487,337	23.3	53.3
122,609	8.0	40.0

Los tiempos recogidos en la Tabla 3 se han obtenido calculando con un núcleo de un procesador Intel i7 4820k en un ordenador con 16 GB de RAM.

Cualquiera de las simulaciones referidas es perfectamente asumible, pues tendríamos resultados en como mucho unos tres días. Por lo tanto, el tiempo de cálculo no es un factor limitante para la simulación de los 10 primeros minutos de agitación del tanque. Aún más, con un número mayor de licencias del programa de cálculo CFD, se puede plantear un cálculo en paralelo con varios núcleos, con ayuda de la tarjeta gráfica, o con un clúster de computación que reduciría estos tiempos de cálculo.

Sin embargo, el problema se nos plantea si quisiéramos desarrollar informáticamente todo el ensayo ISO 5682-2, ya que, tras los 10 primeros minutos de agitación, deberíamos simular 16 horas de reposo, en los que el soluto sedimentaría parcialmente.

Esto nos plantearía varias dificultades. En primer lugar, para una correcta aplicación de la ley de Stokes en la simulación CFD, se debería modelizar muy exactamente el tamaño de partícula del oxiclورو de cobre, que probablemente no será constante, cuestión que como se razona en el artículo publicado no es estrictamente necesario conocer para la simulación de los 10 minutos de agitación iniciales. Además, y en segundo lugar, a la vista de los tiempos de cálculo de los primeros minutos de agitación, para simular 16 horas probablemente necesitaríamos varias semanas de cálculos de ordenador, lo cual parece poco práctico, sobre todo si estamos hablando de un fabricante que desee obtener datos sobre un diseño de depósito que esté desarrollando.

En resumen, aunque la simulación de los primeros 10 minutos de agitación muestra una información muy valiosa, la simulación de las siguientes 16 horas no parece asumible. Si se quisiera simular los últimos 10 minutos del ensayo ISO 5682-2, proponemos una alternativa. Si en la simulación de los primeros 10 minutos, se considera que el producto se vierte por una de las bocas superiores, se podría plantear, para los últimos 10 minutos, iniciar la simulación suponiendo que el producto está totalmente sedimentado en el fondo del depósito, cuestión que no será real, pero deja el cálculo del lado de la seguridad. El sistema de agitación debería ser capaz de arrastrar esos sedimentos y conseguir una mezcla homogénea en el caldo del depósito. Esto nos ahorraría la simulación de las 16 horas de reposo del depósito.

6.3.3. Patrones en los modelos Euler-Lagrange

Como se concluye en el artículo (Badules et al., 2020), las simulaciones realizadas con modelos Euler-Lagrange (DPM) no han sido satisfactorias para el fin que se propuso. Las concentraciones de fase dispersa, nunca llegaron a hacerse homogéneas en los modelos CFD planteados, existiendo zonas con una muy alta concentración, y zonas con muy baja o inexistente. Sin embargo, hay un hecho llamativo, y es que dichas concentraciones (erróneas) parecen distribuirse siguiendo patrones claros y definidos en las simulaciones CFD.

Así, por ejemplo, para el depósito concreto que se estudió, se puede observar (Figura 26) como el comportamiento es diferente en las dos subcámaras en que se divide el depósito separadas por un rompeolas.

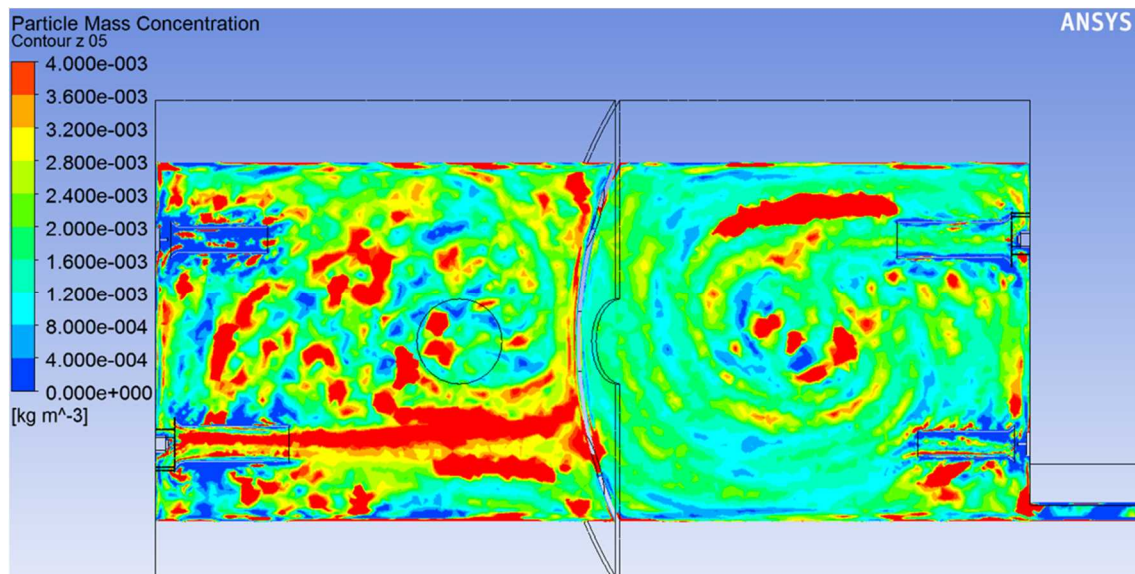


Figura 26. Patrones de fase dispersa en un plano horizontal de un depósito, considerando un modelo Euler-Lagrange, con dos agitadores en funcionamiento.

El hecho de que el rompeolas del depósito estudiado sea un casquete esférico, hace que el depósito no sea simétrico. En una subcámara, el patrón de la fase dispersa se distribuye formando espirales, mientras que en la otra, se observa una alineación en el chorro del agitador en funcionamiento (en la Figura 26 sólo funcionan los agitadores que se observan abajo a la izquierda y arriba a la derecha). Si bien se insiste en que los datos sobre concentración de fase dispersa calculados de este modo no son correctos, podemos decir a modo de anécdota que este tipo de cálculos podrían tener una pequeña utilidad marginal para establecer la hidrodinámica de las corrientes de agitación de forma más intuitiva y rápida que analizando vectores de velocidad en el líquido del depósito.

6.3.4. Velocidades y flujos bifásicos

Debe realizarse una breve anotación sobre la complementariedad de los modelos monofásicos y bifásicos. Podría pensarse que los modelos monofásicos, como los que se han desarrollado para estimar las velocidades en el depósito, son redundantes respecto de los bifásicos, ya que estos últimos proporcionan más información (velocidades y concentraciones de fase dispersa) que los primeros que sólo pueden proporcionar información de velocidades.

Sin embargo, los modelos bifásicos son más complejos y por lo tanto se ven sometidos a errores de redondeo durante las iteraciones, que no solo afectan al cálculo de la fase dispersa (Badules et al., 2020), sino al resto de variables de cálculo. Esto debe obligarnos a ser muy prudentes con los modelos bifásicos, hasta el punto de que para la estimación de velocidades en un fluido (aspecto que ya hemos dicho en el que de por sí hay poca correlación punto a punto) tendremos más errores con modelos bifásicos que con monofásicos. Por lo tanto, si lo que se quiere es estudiar las velocidades del fluido en el depósito, los modelos monofásicos son más adecuados.

7. Estudio CFD de corrientes de aire generadas por pulverizadores

La modelización mediante CFD de las corrientes de aire generadas por un pulverizador hidroneumático ha sido objeto en la última década de numerosos estudios, como ha sido relatado en el apartado 5.2.1. Aunque dichos estudios en sí mismos sólo adquieren su utilidad cuando son integrados en estudios generales de comportamiento del pulverizador en condiciones de trabajo, son ineludiblemente el primer paso que hay que dar para caracterizar el funcionamiento de la pulverización de estas máquinas.

7.1. Introducción

El objetivo inicial que se planteó en este trabajo al abordar esta línea de investigación fue realizar una modelización de las corrientes de aire generadas por una tipología muy específica de pulverizador hidroneumático, con conductos verticales adaptados a la geometría del cultivo (Figura 28), para posteriormente, realizar simulaciones informáticas del tratamiento aplicado por dicha máquina en varias condiciones de campo.

Tras aplicar las metodologías habituales de todos los estudios que nos precedían, se observó cómo dichos métodos no proporcionaban resultados aceptables. Por ello, se tuvo que buscar una metodología alternativa que ofreciera resultados satisfactorios en la máquina estudiada como ejemplo en este trabajo. Antes de explicar los fundamentos de esta nueva forma de simular las corrientes de aire en los pulverizadores hidroneumáticos, debe explicarse cómo otros investigadores venían haciéndolo de manera habitual hasta la fecha, y porqué dicha metodología no funciona en el caso analizado. Quizás la mejor manera de hacerlo, sea haciendo referencia a uno de esos trabajos. Nos basaremos, a modo de ejemplo, en la metodología utilizada en uno de estos estudios (Salcedo, 2015), que esquemáticamente se muestra en la Figura 27. Bajo esta metodología, las corrientes de aire se caracterizan mediante medición con anemómetros colocados a cierta distancia de la máquina en funcionamiento. Las coordenadas donde se coloca el aparato de medición, se trasladan a los modelos CFD como condición de contorno de entrada de aire, introduciendo en el programa en cada zona vectores de velocidad igual a los medidos experimentalmente.

Resulta por lo tanto una estrategia sencilla, intuitiva y que ha demostrado funcionar en muchos casos. Para el modelo CFD, en esta metodología, la máquina “no existe”, sólo importan las corrientes de aire que genera. Y esto tiene una enorme ventaja, que es la posibilidad de emplear mallas estructuradas (ver apartado 4.3.2) ya que se huye de modelizar la compleja geometría que tiene el pulverizador. Esto proporciona cálculos rápidos y estables.

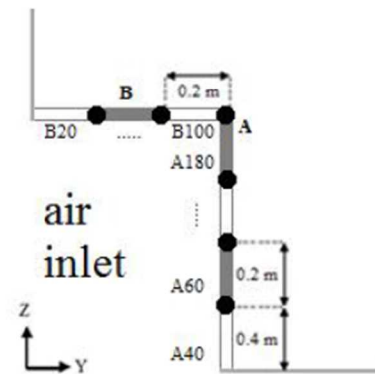
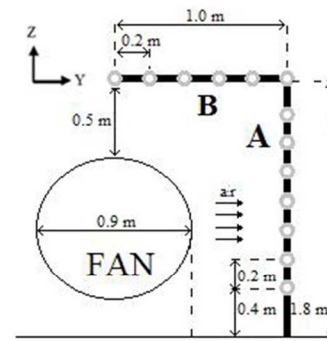


Figura 27. Ensayo de un pulverizador hidroneumático. Arriba, izquierda: pulverizador estudiado. Abajo, izquierda: anemómetro de tres dimensiones usado para medir las corrientes de aire a cierta distancia del ventilador. Arriba, derecha: discretización de las zonas de medición de las corrientes de aire. Abajo, derecha: conversión de lo anterior en condición de contorno para el modelo CFD. (Fuente: Salcedo, 2015).

7.1.1. Limitaciones de la metodología clásica

Como se ha dicho, la metodología explicada no funciona en todas las tipologías de maquinaria, como, por ejemplo, en el pulverizador representado en la Figura 28 que es el usado en este estudio. No es el pulverizador hidroneumático típico que está en el pensamiento colectivo (pues ese lugar lo ocupan los de ventiladores axiales traseros), pero su utilización es habitual en cultivos en seto por su adaptación a la geometría del cultivo. Es una subtipología dentro de los pulverizadores hidroneumáticos que está teniendo mucho auge en el cultivo de vid en espaldera; solo en España hay miles de hectáreas con esta forma de cultivo, y muchas grandes fincas y bodegas la han adoptado ya.



Figura 28. Pulverizador con conductos verticales para cultivos en espaldera analizado en este trabajo. Izquierda: demostración de funcionamiento. Derecha: detalle de uno de los bajantes, en los que se pueden ver las 4 zonas de salida de aire (toberas) y las boquillas de pulverización hidráulica, 2 por tobera, en total 8 por bajante.

¿Qué hace especial a este pulverizador, para que la metodología clásica no funcione? Varios son los factores que se suman. Por un lado tenemos la mayor complejidad de las corrientes generadas por este tipo de pulverizadores, y por otro, la necesidad de estudiar los flujos a una distancia menor de la máquina, ya que ésta inevitablemente, por la tipología del cultivo, se acerca mucho más a las plantas. Este aspecto, es provocado por la interacción aire-planta, y será explicado en apartado 8 de esta memoria.

En un pulverizador de otro tipo, la variación del vector velocidad del aire, tanto en módulo como en dirección, entre dos puntos muy próximos situados a una cierta distancia de la máquina (unos 0.5 m en el experimento de la Figura 27) es poco significativa. Por ello una caracterización de las velocidades del flujo de aire cada 0.1 o incluso 0.2 m puede dar resultados satisfactorios. Sin embargo, esto no es trasladable a la máquina de la Figura 28. Las toberas de salida de aire de esta máquina normalmente trabajan a unos 0.7 m de las partes exteriores de los setos de cultivo, por lo que la condición de contorno de entrada de aire del modelo CFD, lógicamente debe ponerse a una distancia prudencialmente alejada, pues de lo contrario, el modelo CFD es imposible que refleje la realidad ya que estaríamos simulando el aire prácticamente sobre el cultivo, ya dentro de la zona de interacción con el mismo (cuestión que será explicada en esta memoria cuando tratemos el tema de la interacción entre cultivo y pulverizador), cuando las mediciones experimentales para obtener los datos de velocidad de aire se habrían obtenido con la máquina trabajando en vacío.

Entre puntos distanciados entre sí 0.2 m situados a 0.15 m de distancia de las toberas, las corrientes de aire que produce este pulverizador tienen módulo y dirección muy diferentes. La situación sólo hace que empeorar si en vez de intentar caracterizar el flujo a cierta distancia de la máquina, lo hacemos en las mismas

toberas, pues podemos pasar en apenas 4 cm de distancia, de medir velocidades de más de 25 m s^{-1} , a menos de 5 m s^{-1} .

7.1.2. Necesidad de una nueva metodología

Puede pensarse que el problema se soluciona simplemente reduciendo el intervalo de mediciones experimentales para caracterizar el flujo generado con todo lujo de detalle, desde los 0.1-0.2 m habituales, a lo que fuese necesario, por ejemplo, 0.01 m. Pero en el caso analizado, la máquina mide unos 2 metros de altura. No sólo serían necesarias, por tanto, tomar 200 mediciones, sino que es necesario garantizar que la posición del anemómetro es la exacta en cada medición. Y a más discretización en la toma de datos experimental, la introducción de dichos datos en el modelo CFD como condición de contorno, resulta mucho más costosa.

Nunca debemos perder la perspectiva de que el uso de la CFD para el estudio de los pulverizadores hidroneumáticos nos debe de aportar ciertas ventajas respecto de realizar los experimentos reales. Y una de estas ventajas es el ahorro de tiempo y coste económico. Si el diseño del modelo en CFD resulta una tarea que requiere de muchos recursos, tantos o más que el diseño experimental, debe plantearse, sin rubor, que el empleo de la CFD no es adecuado para los fines perseguidos.

Lo anterior cobra aún más importancia a la hora de explicar la primera limitación de la metodología clásica (independientemente de la discretización en la toma de datos para caracterizar el flujo): en el caso de que un pulverizador hidroneumático pueda proporcionar varios caudales de aire, se requieren tomar datos experimentales para cada caso a estudiar. Y eso es muy corriente, ya que es habitual que los pulverizadores hidroneumáticos tengan varias marchas de ventilador, álabes de ángulo variable, o simplemente, la toma de fuerza de los tractores suele funcionar a diferente régimen de giro (540 o $1,000 \text{ min}^{-1}$.) en función de las necesidades y del cultivo. Por lo tanto, en la máquina analizada, se necesitarían numerosas mediciones experimentales para caracterizar un pulverizador funcionando bajo varios regímenes de caudal de aire.

Existe, además, otra limitación importante de esta metodología, evidente, pero implícita: es condición necesaria que la máquina exista para poder caracterizar los flujos de aire que genera. Por tanto, no sirve a un fabricante para poder ensayar un nuevo diseño de ventilador, deflectores, etc. antes de fabricarlo.

7.2. Nueva metodología propuesta

Explicada la situación a la que conduce el empleo de la metodología clásica en caracterización de corrientes de aire de pulverizadores hidroneumáticos, cabía preguntarse si se podía idear una metodología alternativa. La respuesta fue afirmativa, y la estrategia a seguir consistió básicamente en emplear el potencial de la CFD para que fuese el propio software el que calculase las corrientes de aire. Este es un camino totalmente diferente al anterior, en el que la clave no es la caracterización experimental de las corrientes de aire que posteriormente se introducen en el programa CFD, sino la geometría de la máquina, que es lo que se

introduce en el programa CFD, a partir de la cual el programa se encarga de simular el flujo.

Esta estrategia de modelización de corrientes de aire es más general, y supone una de las contribuciones de esta tesis al avance de la aplicación de la técnica de la CFD a pulverizadores hidroneumáticos. Los aspectos más relevantes de lo explicado han sido publicados en el siguiente artículo JCR, adjuntado como anexo:

Badules, J., Vidal, M., Boné, A., Llop, J., Salcedo, R., Gil, E. and 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, pp.166-174.

En lo que sigue ofreceremos no obstante explicaciones adicionales.

El principal problema con que nos vamos a encontrar para ejecutar esta metodología, es que la geometría de la máquina nos va a provocar un modelo de volúmenes finitos de malla no estructurada, de cálculo costoso e inestable. Como puede verse en la Figura 29, un mallado tipo de uno de los conductos verticales de polietileno rígido de la máquina de la Figura 28 es muy complejo; inevitablemente, algunas celdas son de baja calidad (es decir, tienen una forma muy irregular), lo que determina un cálculo en el que los residuos tienden a no ser estables, sobre todo en lo que se refiere a las incógnitas relativas a la viscosidad del flujo. Es tarea del operador del programa CFD, estimar el tamaño de celda, características del mallado, modelo de viscosidad, modelo de pared si procede, etc., que proporcionan resultados aceptables.

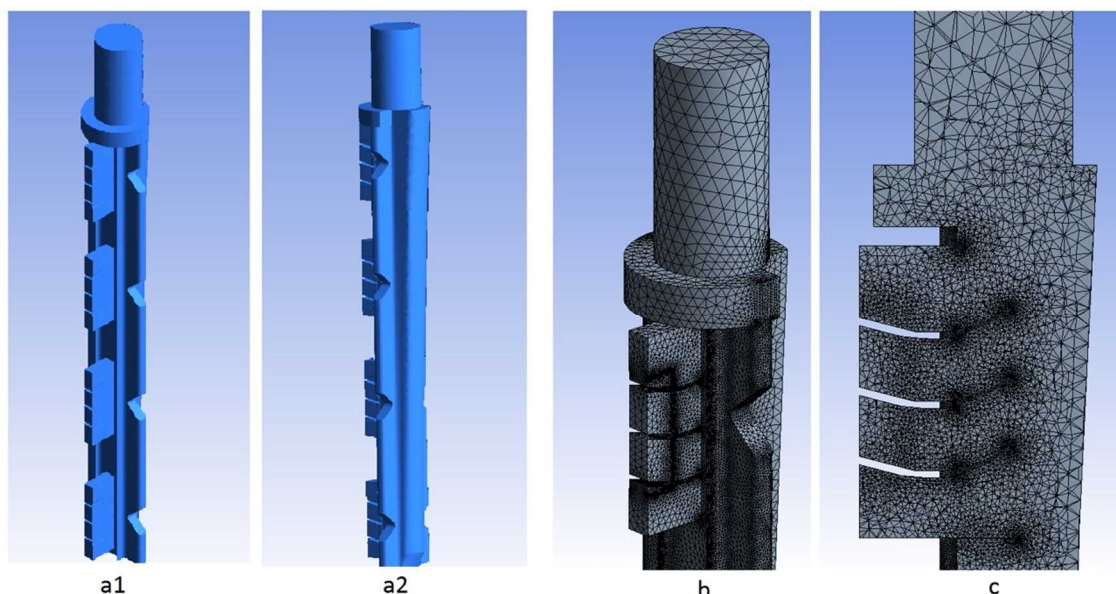


Figura 29. Modelo en CFD de un bajante de la máquina de la Figura 28. Izquierda (a1 y a2): modelo sólido en perspectiva, de uno de los bajantes (se modeliza solo el hueco interior por donde circula el aire). (b): detalle en perspectiva del modelo de volúmenes finitos de la parte superior del bajante, en el que se aprecia el detalle de la tobera superior, que contiene 4 subcanales de flujo orientables. (c): corte transversal del modelo de volúmenes finitos en la tobera superior, en el que se puede apreciar la complejidad del mallado.

En las simulaciones realizadas, cuando se estudió el flujo de aire producido dentro de los conductos del pulverizador hidroneumático con conductos verticales, debido a la extrema complejidad de la geometría de la máquina, se estudiaron explícitamente varios modelos de viscosidad y de funciones de pared, siendo por tanto una de las conclusiones del estudio qué modelos eran los más aptos.

Superados los obstáculos del mallado y modelos de física teórica a elegir, el uso de este modelo es sumamente sencillo. La condición de contorno de entrada de aire, es la parte superior circular, que simula el final del tubo de alimentación del circuito neumático. Simplemente se debe introducir el caudal (o velocidad del fluido), y el programa CFD calculará cómo se distribuye el aire por las toberas de la máquina. Simular un caudal de aire diferente proporcionado por la máquina es tan simple como variar el módulo de la condición de contorno. El caudal proporcionado por el ventilador puede obtenerse mediante aforado del mismo (ISO, 2000), o bien mediante sencillas técnicas como medición de velocidades en el interior del conducto del circuito neumático con un anemómetro de hilo caliente introducido en él.

7.3. Resultados y aplicación

A la vista de la Figura 29, puede pensarse que lo que se obtiene con ese modelo es simplemente la distribución del aire a la salida exacta de las toberas, pero lo que nos interesa es el flujo que se proyecta en el aire entre la máquina y el cultivo. Esto es cierto, pero a partir de este mallado, pueden añadirse celdas adicionales que simulen el aire entre estos dos elementos, o bien, considerar un mallado más simple de celdas estructuradas, cuya condición de contorno de entrada de aire sea la solución calculada en la condición de contorno de salida de aire de este primer modelo. Es decir, el cálculo se dividiría en varias etapas, en las que la solución de una sería la condición de contorno de entrada de la siguiente.

Esto se explica en el artículo de referencia (Badules *et al.*, 2018) y se emplea para la simulación del tratamiento en apartados posteriores. Debe mencionarse, no obstante, que debido a los efectos de la interpolación, cada etapa nueva que se introduzca en el cálculo, es una fuente de errores. Un cuidado mallado de las celdas que hacen de condición de contorno tanto de entrada como de salida de aire en las etapas de cálculo consecutivas, así como la limitación del número de etapas (no existe razón para realizar más de tres, pues sólo con tres se puede modelizar desde la máquina al cultivo), permiten limitar los errores de forma que éstos queden dentro de un margen tolerable. El fenómeno que provoca los errores es el mismo que el descrito en el apartado 4.3.4: la falta de conexión exacta entre nodos de celdas de las etapas, provoca que el programa tenga que interpolar valores.

En cuanto a los modelos de viscosidad y funciones de pared admisibles si proceden, los resultados obtenidos indican que hay varias posibilidades que ofrecen resultados razonables, mientras que otras se muestran muy inestables. Por ejemplo, el modelo $k-\epsilon$ estándar y modelos de pared mejorados, dan buenos resultados.

7.3.1. Aplicación a pulverizadores de flujo radial

Pudiera pensarse, tras las explicaciones dadas, que la nueva metodología propuesta es muy adecuada para pulverizadores con toberas canalizadas mediante tuberías, pero resulta inaplicable a pulverizadores típicos de ventiladores axiales que generan un flujo radial, como el de la Figura 27. Nada más lejos, aunque evidentemente se deben tener en cuenta reglas de modelado en CFD adicionales.

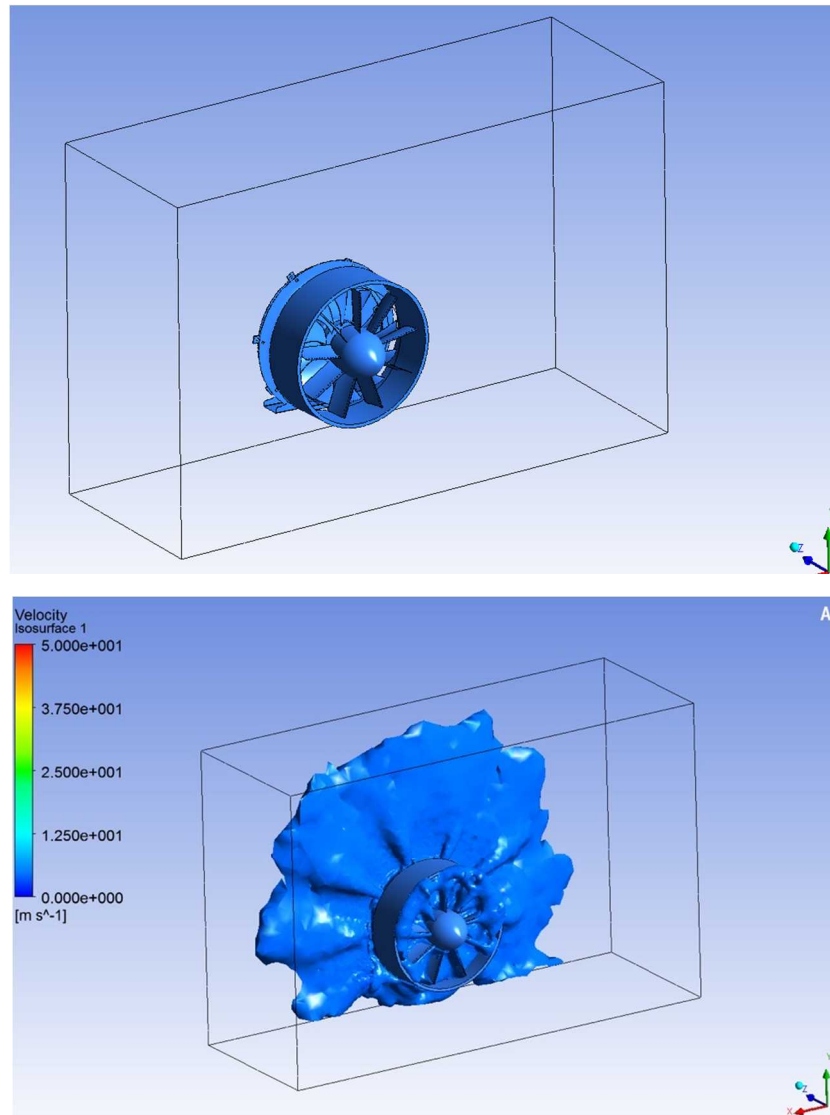


Figura 30. Arriba: geometría de un ventilador, voluta, deflectores y disco canalizador de un pulverizador hidroneumático. Abajo: isosuperficie de flujo de aire de velocidad 4 m s^{-1} calculado por el programa CFD a un determinado régimen de vueltas del ventilador.

Si queremos aplicar esta técnica, la geometría del ventilador del pulverizador debe ser introducida en el modelo CFD. Además, se debe indicar al programa CFD la velocidad de giro del mismo. De esta forma obtendremos implícitamente el caudal de aire producido por el ventilador, y no solo eso, sino que probar un caudal de aire diferente es tan sencillo como indicar al programa una velocidad de giro diferente. Para que el ventilador pueda girar dentro del modelo de volúmenes finitos, es

necesario que éste esté integrado en una región de celdas que formen un sólido cilíndrico, diferenciadas del resto de celdas del modelo, y emplear la técnica de las mallas deslizantes descrita en el apartado 4.3.4 para modelar la zona de contacto entre esas dos regiones de celdas. Con esta estrategia, podemos obtener resultados como los de la Figura 30.

Los problemas adicionales que nos podemos encontrar al aplicar esta técnica son, por un lado, la necesidad de simplificar elementos de geometría muy complejos que si fuesen representados complicarían el mallado (y por tanto el cálculo) sin que influyan en el flujo generado, como por ejemplo los elementos del buje del ventilador o la tornillería. Por otro lado, para implementar el giro del ventilador, es muy conveniente realizar un cálculo transitorio. Y a mayor velocidad de giro, convendrá que el salto de tiempo sea más pequeño, del orden de milésimas de segundo para ventiladores de diámetros cercanos al metro.

Para caracterizar un flujo creado por un ventilador a altas revoluciones (digamos unas $3,000 \text{ min}^{-1}$) sólo es necesario modelizar en CFD unas décimas de segundo de giro o a lo sumo, unos pocos segundos. Pero si tenemos un modelo de varios millones de celdas, ello puede suponer varios días de cálculo con un ordenador convencional.

Podría no aplicarse un cálculo transitorio si usamos concretamente el software ANSYS Fluent®, ya que este código CFD es capaz de aproximar el flujo generado por un ventilador o turbina sin necesidad de realizar cálculo transitorio, sólo a partir de indicar la velocidad de giro, ya que tiene algoritmos que permiten realizar dicha estimación. Esto disminuye el tiempo de cálculo drásticamente, pero la propia empresa suministradora de software indica que se obtiene más precisión con un cálculo transitorio. El problema se puede ver en la Figura 31; el algoritmo que emplea el programa ofrece buenos resultados lejos del ventilador, pero en las inmediaciones del mismo, la influencia de las aspas es demasiado grande, tendiendo a crear "picos" de velocidad y presión en sus cercanías.

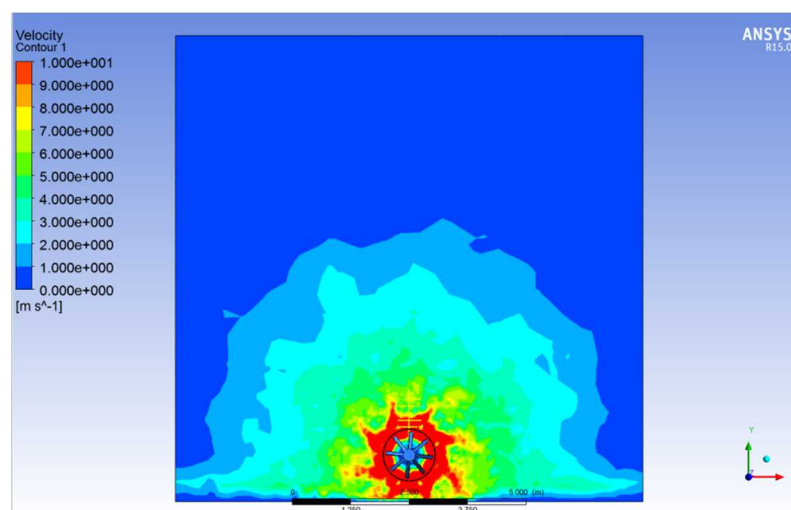


Figura 31. Velocidades de un hipotético ventilador de 8 aspas, calculadas sin empleo de cálculo transitorio. Cerca del ventilador, y de las aspas, los resultados muestran distorsión.

Realmente, este fenómeno ocurre, y si dispusiésemos de aparatos de medición continua suficientemente precisos, capaces de registrar valores cada diezmilésima de segundo, se podría medir como la velocidad y la presión, a una distancia infinitesimal del ventilador, no es constante (además de por las fluctuaciones debidas al flujo turbulento), sino que aumentaría y disminuiría con el paso de las aspas. Pero está claro que esta "foto fija" no representa la realidad dinámica del flujo, en el que el continuo barrido de las aspas, proporciona al flujo una mayor uniformidad a la representada.

En definitiva, excepcionalmente podría emplearse esta estrategia sin cálculo transitorio si queremos caracterizar el flujo de aire a cierta distancia del ventilador, pues podría ser una aproximación razonable. En otro caso, tendremos que recurrir ineludiblemente a cálculos transitorios de pequeño salto de tiempo, con lo que el cálculo necesitará, previsiblemente, de varios días para realizarse. Debido a ello, puede ser opinable que la metodología clásica es ventajosa en tiempo respecto a lo que aquí se propone, y todavía más si no se disponen de los planos del fabricante de la máquina para representar fielmente la geometría del pulverizador en el programa CFD. Sin embargo, para un fabricante que desee probar un nuevo diseño de deflectores, ventiladores, etc., sin fabricar un prototipo previo, no hay otro camino que el aquí expuesto, el cual es evidentemente mucho más ventajoso que construir el prototipo y probarlo después con metodologías clásicas.

7.3.2. Ventajas e inconvenientes

Recapitularemos el contenido del artículo publicado y lo que se ha comentado adicionalmente exponiendo las ventajas e inconvenientes de la metodología diseñada frente a la metodología clásica. Mientras el método habitual proporciona mallados sencillos, pero requiere de una toma de datos experimental y un modelado de condiciones de contorno en el modelo CFD más arduo, lo que se propone ahorra tiempo en estos aspectos, aunque ese tiempo debe invertirse en la realización del mallado y comprobación de convergencia del cálculo con diversos modelos de turbulencia. Pero una vez superada esta dificultad, la metodología desarrollada en esta tesis es más flexible para simular diferentes caudales de aire, pues la segunda requiere de tomar nuevas medidas experimentales para caracterizar cada caudal de aire.

Para un fabricante, las ventajas van más allá. Es una oportunidad para probar sus diseños antes de ser fabricados, pues éstos pueden saltar de la oficina técnica al simulador CFD sin necesidad de construir ningún prototipo. En este caso, los resultados obtenidos de la simulación no pueden verificarse experimentalmente, con lo que las simulaciones CFD deben ser confirmadas cuando se fabrique el primer prototipo. Pero aún sin llegar a producir ninguna máquina o pieza, puede ser muy útil para verificar diferencias de funcionamiento entre diferentes diseños de elementos concretos, como por ejemplo deflectores, álabes, etc.

Para máquinas ya fabricadas, permite simular varios caudales de aire sin necesidad de tomar datos experimentales con cada ajuste de la máquina. Sí es necesario tomar datos experimentales de una configuración concreta (una que proporcione un caudal de aire conocido o verificable) para validar que el modelo ofrece resultados fiables; si

bajo una configuración determinada la simulación es válida, no es necesario probar experimentalmente las demás, pues se supone que todas lo serán. El ahorro de tiempo respecto de la metodología clásica puede ser muy considerable, no sólo por reducir significativamente el número de mediciones experimentales (pues ya sólo es necesario realizar un limitado número de ellas, obviándose la caracterización sistemática del flujo), sino también a la hora de realizar el modelo CFD en lo que respecta a la introducción de las condiciones de contorno.

Estas ventajas, que son enormes respecto de la metodología clásica, sin embargo, no son gratuitas. En primer lugar, esta metodología es muy sensible a la precisión del modelo geométrico que se introduzca al programa CFD. Pequeñas variaciones en la geometría simulada, pueden suponer una gran diferencia en los resultados obtenidos. Este inconveniente sin embargo no es mucho mayor al que se tiene al tener que garantizar la posición en la que los flujos son caracterizados con el anemómetro en la metodología anterior, y puede ser totalmente ignorado si partimos de una geometría en tres dimensiones generada por el propio fabricante de la máquina en un programa CAD, caso que ocurrirá siempre que se esté probando el diseño antes de su fabricación. Caso diferente es que la geometría tenga que obtenerse a partir de una máquina ya fabricada y no se tenga acceso a los planos del fabricante. En este caso se deberá obtener la geometría dibujándola a partir de mediciones que se hagan sobre la máquina, lo cual puede no ser sencillo.

8. El problema de la interacción planta-máquina y su modelado en CFD

Este apartado de la memoria supone una transición entre el estudio de las corrientes de aire mediante CFD, y la simulación en CFD de los tratamientos. Para ello, se debe estudiar la modelización en CFD de las plantas. Esta sección es necesaria en la memoria ya que este aspecto es clave y no resultó posible explicarlo con detalle en los artículos que forman el compendio.

8.1. Interacción aire-cultivo

Las corrientes de aire, recién generadas por la máquina agrícola, a una distancia despreciable de la misma, son independientes del entorno en el que se encuentre el pulverizador; siempre tendrán, en un punto dado que se encuentre a distancias infinitesimales del pulverizador, el mismo módulo y vector (obviando la pequeña oscilación provocada por la turbulencia del flujo). Sin embargo, al chocar estas corrientes con un obstáculo, como por ejemplo un cultivo, su comportamiento vendrá determinado en gran medida por las características aerodinámicas del mismo (ver apartado 3.3.3). En el caso extremo de un obstáculo sólido, el flujo se verá totalmente influenciado por éste y será poco relevante la velocidad y dirección con la que la línea de corriente salió de la máquina. Es cierto que tan sólo los troncos de los cultivos leñosos se pueden considerar obstáculos sólidos pero, no obstante, la gran densidad foliar de muchos cultivos frutales o viñedos en estado fenológico avanzado, les confiere una gran resistencia al paso del aire lo que, a efectos prácticos, les confiere características aerodinámicas similares a los objetos sólidos. El fenómeno es muy complejo, y la densidad foliar es el principal factor que determina el comportamiento del aire dentro de la planta (Bache y Johnstone, 1992). Podemos concluir que, entre la máquina y el cultivo, el aire se verá influenciado por la interacción entre ambos elementos, tanto más por uno o por otro conforme estemos cerca de uno de ellos.

Podemos enlazar aquí con una cuestión dejada abierta en el apartado 7.1.1. Si la distancia típica entre la salida de aire de un pulverizador hidroneumático determinado y el cultivo para el que se ha empleado su uso fuese de 0.6 m (por ejemplo, el pulverizador de la Figura 28), no es del todo correcto caracterizar el flujo generado por la máquina a una distancia de 0.5 m realizando las mediciones “en vacío” (es decir, con la máquina dentro de un laboratorio, sin interaccionar con el cultivo), y luego realizar una simulación en CFD en la que se simule ese aire, y a la vez, un cultivo a 0.1 m de distancia, que sería la medida real a la que estaría. Se estaría simulando un aire que no tendría por qué tener las características reales en las condiciones de la simulación, ya que por estar muy cerca del cultivo, se vería influenciado por el mismo en mayor o menor medida dependiendo de las características aerodinámicas de la planta. Esta metodología sería válida si el cultivo estuviese por ejemplo a 2 metros de la salida de aire (perfectamente posible con otros pulverizadores y cultivos), pues una medición a 0.5 metros de la máquina estaría prudentemente lejos del cultivo, por lo que la influencia de éste aún no sería muy marcada, pero se concluye que, en todo caso, conviene caracterizar siempre el aire de un pulverizador lo más cerca posible de la máquina, lo que vuelve a reforzar

las ventajas de la metodología de caracterizar el aire generado a partir de la geometría del pulverizador y no de mediciones empíricas.

Insistimos pues, en que toda simulación de un pulverizador hidroneumático mediante CFD debe comenzar por la caracterización de las corrientes de aire que genera. Sin embargo, una simulación de las condiciones de tratamiento, nunca podrá ser completa si no se introduce en ella elementos que simulen el cultivo, o lo que es lo mismo, que interactúen con las corrientes de aire.

8.1.1. Revisión bibliográfica del problema CFD-cultivo

Probablemente una de las primeras reseñas de importancia en cuanto a modelado del cultivo mediante CFD sea de mediados de la década de los 2000 (Da Silva et al., 2006). En dicho estudio, se investigaba la resistencia aerodinámica de un seto artificial de vid, comparándose los resultados experimentales con una simulación CFD, en la que el seto se modelaba mediante un medio poroso, es decir, el seto era una región de celdas del modelo de volúmenes finitos en las que regía la ley de Darcy, por la cual se define (ecuación 11) el caudal de un fluido que puede atravesar un medio poroso en función de su permeabilidad:

$$q = -K \vec{\nabla} h \quad [11]$$

Dónde:

q: caudal del fluido

K: conductividad hidráulica o permeabilidad

$\vec{\nabla} h$: gradiente de presión

La Ley de Darcy se formuló para el estudio del movimiento del agua en terrenos saturados, siendo por lo tanto una pieza fundamental de la mecánica de suelos. Es válida para medios homogéneos e isótropos en los que las fuerzas inerciales del flujo sean despreciables (lo que implica que sean laminares). Evidentemente estas condiciones no se dan en el problema que se está abordando aquí, sin embargo, la modelización de medios porosos está implementada en todos los programas CFD, y dado lo sencillo de la aproximación, ha sido usada sistemáticamente para simular plantas en estudios anteriores.

Posteriormente, otras investigaciones avanzaron en la caracterización aerodinámica de árboles frutales aislados (Endalew et al., 2009), como se expone en la Figura 18 y en la Figura 19. En este tipo de modelizaciones, los troncos y ramas de mayor diámetro se modelan directamente como sólidos, mientras que los brotes más flexibles y las hojas, se simulan como un medio poroso que envuelve las ramas de mayor diámetro. Esta metodología intenta introducir en los modelos CFD algo de anisotropía en el cultivo, realizando una mejor aproximación a la realidad respecto del seto artificial estudiado en la investigación anterior (en el cual, la disposición de las hojas era regular, lo que confería unas características bastante homogéneas al seto de estudio). Sobre la base de esta idea se han elaborado modelos en los que se estudió mediante CFD la interacción aire-troncos (Endalew et al., 2010a; Endalew et al., 2010b), que es mucho más sencillo que con medios porosos, si bien la tendencia

que se está observando tiene más popularidad actualmente (Hong, Zhao y Zhu, 2017a) es obviar los troncos y ramas más gruesos y simular directamente toda la copa de los árboles como medios porosos.

Finalmente, deben recordarse investigaciones realizadas sobre cultivos de muy alta densidad foliar como los cítricos (Salcedo, 2015), en el que se llegó a la conclusión de que la correcta modelización de la interacción aire-planta requería considerar en los modelos CFD como sólidos a los árboles que recibían directamente el flujo de las corrientes de aire de los pulverizadores, con ligeros ajustes en cuanto a sus dimensiones.

Por lo tanto, pese a las limitaciones existentes, todas las investigaciones en la materia basan la modelización de los cultivos en CFD en simulaciones que van desde los medios porosos hasta directamente el uso de sólidos. La hipótesis que podría plantearse, es que la resistencia del medio poroso (su permeabilidad al paso de un flujo de aire) debería tener relación con la frondosidad del cultivo, de tal forma que cultivos con pocas hojas (por ejemplo, al inicio de la primavera si se trata de frutales de hoja caduca) tendrán poca resistencia aerodinámica, mientras que los de muy alta frondosidad, se comportarán prácticamente como sólidos.

8.1.2. Estudio de setos homogéneos en CFD

Como primer paso para la simulación de setos u otras plantas en CFD, nos encontramos con la necesidad de establecer valores que definan correctamente la resistencia aerodinámica de los cultivos. Para ello, nos basamos en el experimento del seto artificial de vid (Da Silva et al., 2006), intentando replicar la parte informática CFD mediante el programa ANSYS Fluent®. En el experimento en cuestión, se simuló un seto de 0.7 m de ancho, situado a 0.5 metros del suelo. La salida del aire se situaba a sólo 0.4 metros de las plantas, y la medición de las corrientes de aire se realizó 0.1 m antes y después de las plantas. El aire introducido es una corriente uniforme de 7 m s^{-1} , que tras atravesar el seto reduce su velocidad a 2 m s^{-1} .

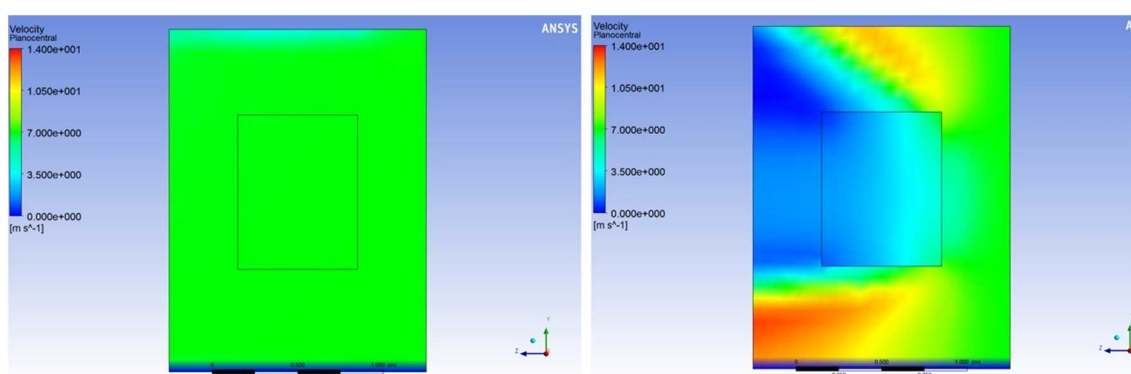


Figura 32. Simulación de una corriente uniforme de aire de 7 m s^{-1} en CFD. El aire se simula con sentido de derecha a izquierda. Izquierda: flujo libre (la resistencia del seto es 0). Derecha: choque contra un medio poroso rectangular que simula un seto de un cultivo.

En la Figura 32 se representa la simulación en CFD de la corriente de aire sin seto y con seto tras haber configurado éste con la adecuada resistencia porosa. La visión de la imagen justifica todas las advertencias previas realizadas sobre la importancia de

modelizar el cultivo en simulaciones CFD, y el sentido de dedicar unas páginas al tema en la memoria de esta tesis.

El comportamiento del aire no tiene nada que ver en los dos casos. La presencia del seto obliga al aire a bifurcarse, de tal forma que aunque es frenado significativamente dentro del seto, sufre una gran aceleración sobre y por debajo del mismo. De cualquier forma, este ejemplo proveniente de un cálculo muy sencillo (nunca las corrientes de aire generadas por un pulverizador hidroneumático van a ser tan simples) también justifica lo dicho anteriormente: el módulo de velocidad en la cara del seto es diferente al que se mediría en la misma posición del espacio si éste no existiera, pero conforme nos acercamos al origen del aire (es decir, nos alejamos del seto), la influencia del cultivo disminuye. Por ello conviene caracterizar las corrientes de aire del pulverizador lo más cerca posible de la máquina.

Por otro lado, si modificamos las resistencias aerodinámicas al alza o la baja del seto en el modelo CFD realizado, obtenemos que el comportamiento puede variar significativamente. Si configuramos el parámetro de resistencia viscosa al doble o a la mitad de lo que se ha determinado que replicaba la simulación de referencia (Da Silva et al., 2006) y cuyo valor es $5,000,000 \text{ m}^{-2}$, obtenemos (Figura 33) que el comportamiento del seto pasa a ser prácticamente el de un muro, o bien un mero elemento que frena la velocidad del aire al pasar por él.

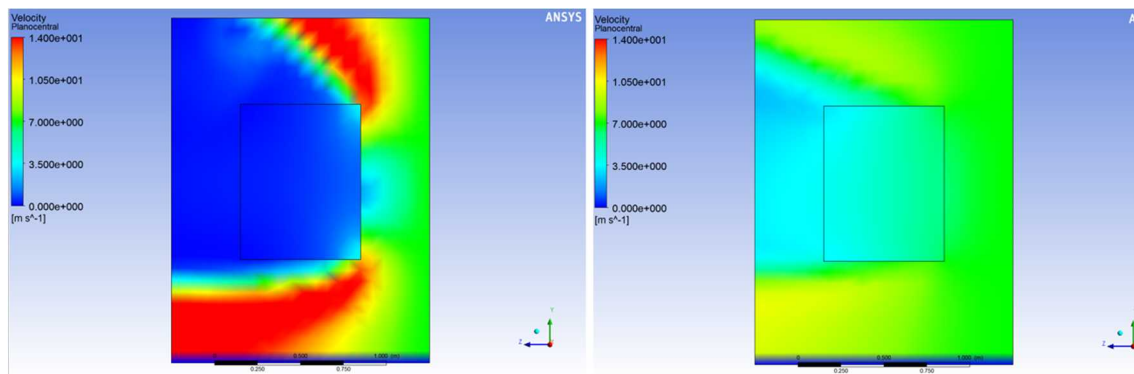


Figura 33. Izquierda: simulación de seto de gran resistencia aerodinámica (resistencia viscosa de $10,000,000 \text{ m}^{-2}$), cuyo comportamiento es prácticamente el de un sólido. Derecha: simulación de un seto de poca resistencia aerodinámica (resistencia viscosa de $2,500,000 \text{ m}^{-2}$), implica una disminución de la velocidad del aire al ser atravesado, pero sin llegar a detener la corriente.

8.1.3. Estudio aerodinámico de plantas reales

Una vez realizada una aproximación preliminar de plantas homogéneas a partir de la bibliografía, se realizó un estudio aerodinámico de plantas reales, concretamente un cultivo de vid en espaldera.

Para ello se dispusieron en el 2016 en un campo de cultivo experimental situado en las proximidades del laboratorio de maquinaria agrícola de la Escuela Politécnica Superior de Huesca, varios bastidores metálicos (Figura 34) antes de la brotación en primavera. Una vez desarrollado el cultivo, se fueron extrayendo bastidores llevándolos al laboratorio, donde se sometían al aire generado por uno de los

bajantes de la máquina de la Figura 28 estudiada en este trabajo, con lo que de esta forma se estudió un pulverizador real interaccionando con un cultivo real.

Se realizó este experimento en diferentes fechas (14 de junio, 15 de julio y 29 de agosto) para cubrir diferentes estadios de desarrollo del cultivo.



Figura 34. Bastidores instalados en un seto en espaldera de vid experimental para su posterior estudio aerodinámico.

La metodología seguida se puede visualizar en parte en la Figura 35. En el laboratorio se dispuso un segmento de seto a una distancia controlada de la salida de aire de la máquina, concretamente 60 cm. Las mediciones de velocidad de aire, se realizan con un anemómetro de hilo caliente Testo 0635.1041 con un registrador modelo 445 (Testo SE & Co. KGaA, Lenzkirch, Germany).

En cada seto ensayado se realizaron diversas mediciones: en un plano a 30 cm por delante del seto (entre éste y el origen del aire); en un plano a 30 cm por detrás; mediciones “en vacío”, y mediciones con seto. En las mediciones con seto, en el plano 30 cm detrás de éste, se observó que en ocasiones eran inestables, de lo que se deduce que las corrientes de aire generadas no sólo eran muy turbulentas, sino que también eran influenciadas por el movimiento de las hojas y brotes. Como valor de velocidad en cada punto de medida, se tomó la media de las medidas tomadas durante un periodo de 15 segundos con una frecuencia de 1 segundo. Las mediciones se realizaron en puntos determinados del espacio, fácilmente determinables gracias a la ayuda de bastidores metálicos complementarios que permitían situar la cabeza de medición del anemómetro en los puntos deseados.

Si bien la máquina original que es utilizada en esta toma de datos, la forman dos parejas de bajantes contrapuestos, para el experimento fue desmontada y sólo se

empleó uno de ellos (como se observa en la Figura 35), lo cual facilitó la toma de datos, pues de otro modo, en el plano medio, donde los chorros de aire procedentes de ambos bajantes chocarían, y que es donde se instaló el segmento de seto, resultaría muy difícil medir la corriente de aire.

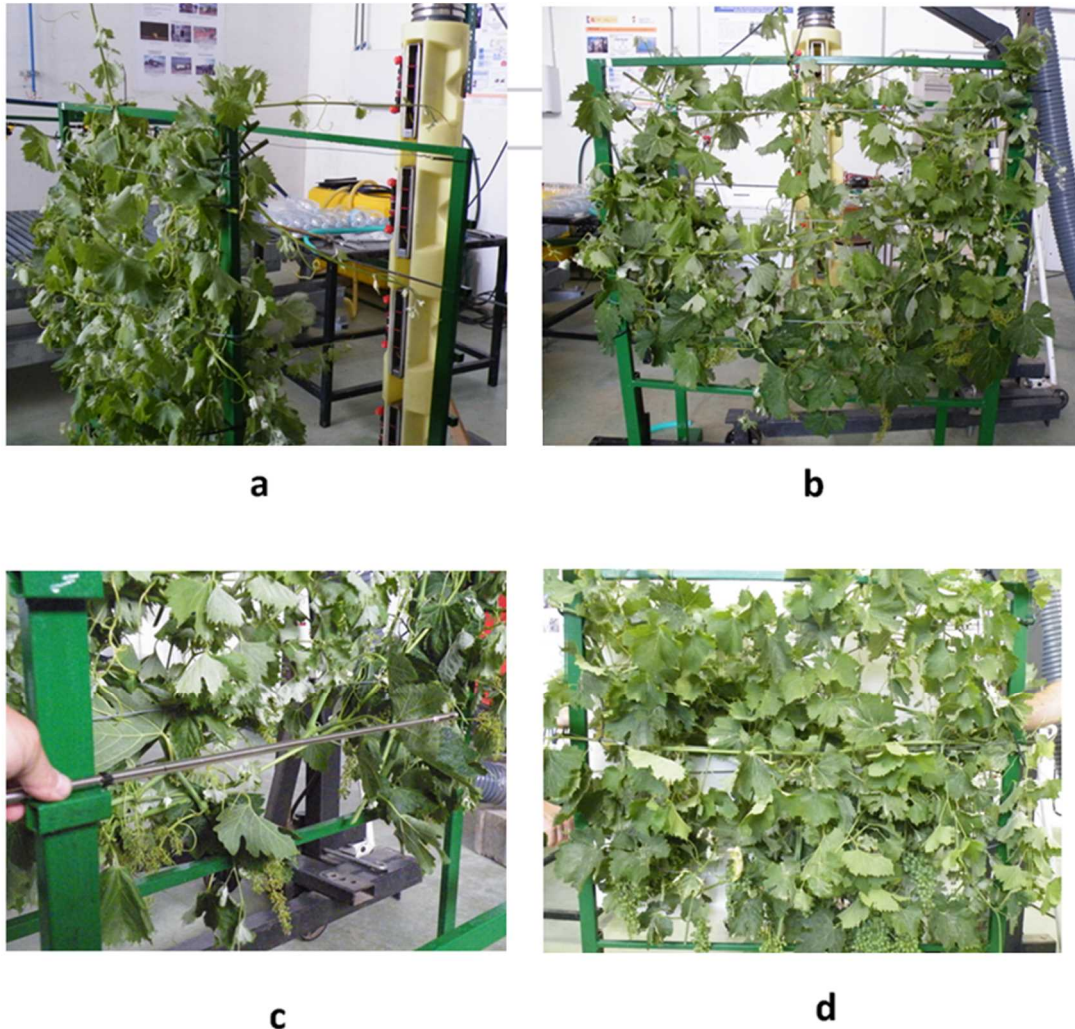


Figura 35. Mediciones de laboratorio realizadas con varios segmentos de espaldera de vid. (a): disposición de la máquina (conducto de pulverizador hidroneumático estudiado) respecto del cultivo. (b): vista frontal de uno de los setos experimentados, en junio. (c): medición de la velocidad de aire con un anemómetro de hilo caliente, en el que las posiciones de medida se controlan gracias a un bastidor auxiliar. (d): ejemplo de vid en julio. Se observa mayor índice de área foliar que el mes anterior.

8.1.4. Tratamiento de datos

Una vez realizadas las mediciones, éstas se agruparon según los puntos donde fueron tomadas, pues en las mismas coordenadas del espacio se tenían mediciones sin seto y con seto de tomas de datos en tres fechas diferentes. Por lo tanto, se podrían calcular ratios entre velocidad con seto y velocidad sin seto.

La hipótesis de partida para realizar el experimento, era que es lógico pensar que la disminución de velocidad del aire, dependa de la frondosidad del cultivo que sea

atravesado por la corriente. De esta forma, cada segmento de seto se dividió en nueve zonas iguales, recolectándose las hojas de vid por separado. Las hojas se dispusieron extendidas en una mesa, se fotografiaron cenitalmente, y posteriormente, se procesó informáticamente dicha fotografía con un programa específico de tratamiento de imágenes (*ImageJ*, programa de dominio público creado por el National Institutes of Health, USA) para calcular su área total.

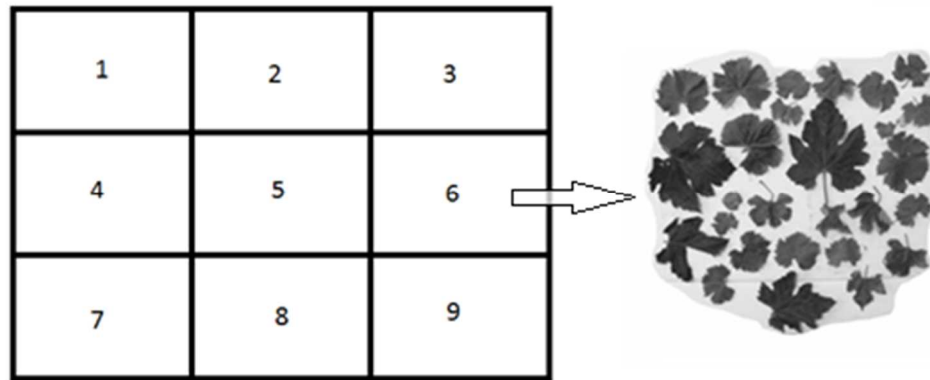


Figura 36. División de cada segmento de seto experimentado en 9 partes de idéntica superficie, para la medición posterior del área foliar de cada una de ellas.

De esta forma, según el punto de medición del aire y del segmento de seto experimentado, se pudo determinar una pareja de valores área foliar – ratio de velocidades con seto/sin seto, cabiendo esperar encontrar algún tipo de correlación o tendencia negativa entre ambas, es decir, que a más área foliar, más bajo el ratio.

Al final de los experimentos se llegó a tener 150 parejas de datos. La representación de los mismos se muestra en la Figura 37. En el eje X se representa el área total de hojas medida en cada zona según el esquema de la Figura 36, en la que todas las divisiones tienen la misma área. Se trata de una medida en metros cuadrados de hoja, no se refiere por lo tanto al índice de área foliar. El dato simplemente muestra medidas comparables dentro del experimento. En el eje Y se representa la ratio ya mencionado, en tanto por cien:

$$\frac{\text{Velocidad tras el seto}}{\text{Velocidad en vacío}}$$

La representación de los resultados nos lleva a comprender la complejidad del problema que estamos tratando. Si bien se podría decir que se observa una cierta tendencia a que la velocidad de la corriente de aire disminuye conforme aumenta el área de hojas que tienen que atravesar (cuestión que proponíamos como hipótesis), no se puede decir que exista ninguna correlación clara e inequívoca, pues la distribución de datos forma una nube de puntos sin un patrón claro.

Sin embargo, lo más llamativo sin duda, es la gran cantidad de puntos cuyo ratio es mayor al 100 %, lo que implica que se han medido velocidades mayores (incluso del triple de valor en casos extremos) con seto que sin él. Esto en principio es contra

intuitivo, pues la interposición de un elemento que ofrece resistencia al paso del aire entre el origen de la corriente y el punto de medición, debería de proporcionar valores de velocidad más bajos que si la medición se hiciera sin este elemento.

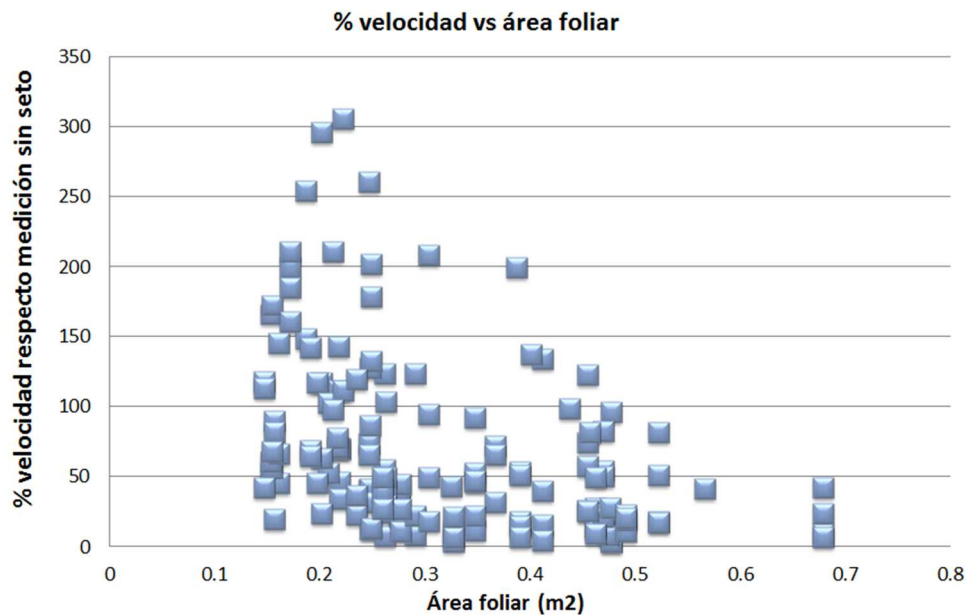


Figura 37. Porcentaje de velocidad medida en puntos determinados tras setos de vid respecto de velocidades medidas sin seto, en relación con el área foliar que tiene que atravesar la corriente de aire. No existe un patrón claro, y hay muchas medidas que dan más velocidad con seto que sin él.

La explicación a esta aparente paradoja se justifica en los datos de la Figura 32 y la Figura 35 (b) y (d). Como hemos dicho, cuando una corriente de aire choca contra un objeto que presenta una gran resistencia aerodinámica, obliga a la corriente a variar su curso, pudiendo provocar su bifurcación y posterior aceleración por encima y por debajo del objeto (no estamos hablando de otra cosa que del fenómeno que provoca la sustentación aerodinámica de los aviones). Por otro lado, los cultivos reales no constituyen un medio homogéneo. Si se observan la Figura 35 (b) y (d), se verá que hay zonas de densidad foliar mayor, mientras que otras están prácticamente sin hojas, sobre todo en el estado fenológico de junio. Por lo tanto, el fenómeno de choque de la corriente de aire contra una zona de fuerte resistencia aerodinámica, y subsiguiente aceleración de la corriente por un hueco cercano (al canalizarse por una sección más pequeña), ocurre a menor escala dentro del seto. Aunque el choque con un medio poroso provoque que la corriente de aire, de media, se frene, localmente puede acelerarse.

Los datos experimentales encontrados nos llevan a razonar, que no es posible predecir el comportamiento aerodinámico de un seto de vid real, sobre todo si es poco frondoso, simplemente partiendo de su área foliar pues no sólo influye el área de hojas, sino su distribución en el espacio.

8.1.5. Modelos simplificados de cultivos y plantas artificiales

En conclusión a los apartados anteriores, necesitamos modelar de alguna manera el cultivo en el modelo CFD para que el estudio del tratamiento con pulverizadores hidroneumáticos se aproxime a la realidad. Pero la modelización de la aerodinámica de un cultivo real con las metodologías habituales hasta ahora no proporcionan resultados prácticos, por lo que debemos optar por:

- Retroceder y volver a modelos simplificados (Da Silva et al., 2006), que es la tendencia actual (Salcedo, 2015; Hong, Zhao y Zhu, 2017a).
- Implementar modelos más complejos (Connell, Endalew y Verboven, 2011), pero que renuncien a una reproducción fiel de la realidad.

La primera estrategia, es la que se usará en este trabajo para abordar la simulación de tratamientos con pulverizadores hidroneumáticos en CFD, por lo que será pertinente dar más detalles de ella en el siguiente apartado de la memoria.

En cuanto a la segunda opción, aunque muy interesante, en la práctica plantea colosales necesidades de potencia computacional, lo que de momento la hace inviable. Esta opción se basaría en la idea de modelar elementos de plantas, no sólo el tronco y las ramas principales, sino también las hojas. En este aspecto, sería de gran utilidad programas existentes de generación de modelos informáticos de plantas artificiales, que podrían ser transformados a diferentes formatos CAD, y de allí a CFD. No tendríamos la irregularidad que podríamos encontrar en la naturaleza, pero sería una aproximación muy buena a la realidad. Como ventaja añadida, este tipo de modelos, no necesitarían divagar sobre las características aerodinámicas de la planta, ni averiguar coeficientes de permeabilidad para implementar en medios porosos que simulen la vegetación, pues la interacción planta-aire sería implícita en el modelo.

Aunque esta vía fue explorada en este trabajo, rápidamente se abandonó debido a la descomunal potencia computacional que requería. El mallado de un modelo de 1,000 hojas llevó 8 horas con un procesador Intel i7 4820k antes de abortar por problemas. Teniendo en cuenta que el mallado requiere mucho menos tiempo que el cálculo, se concluyó que esta vía requiere un salto en la tecnología de procesadores no disponible para uso práctico en la actualidad.

8.2. Comportamiento aerodinámico de parcelas completas de cultivo

Si como hemos razonado, el estudio de la aerodinámica de una planta, presenta grandes incertidumbres, la simulación CFD de toda una parcela de cultivos leñosos, supone ampliar la escala del problema. La interacción de las corrientes generadas por un pulverizador hidroneumático con varias filas de cultivo de árboles ya ha mostrado (Salcedo, 2015) que crea remolinos y corrientes recirculantes que a priori resultaban impredecibles.

Si adaptamos los sencillos modelos de la Figura 32 o los de la Figura 33 en la que los setos de vid son medios porosos, pero suponemos cuatro filas consecutivas de setos, modelizados en CFD, y simulamos que sopla un viento transversal a los setos y de

velocidad uniforme de 10 m s^{-1} , obtenemos la distribución vectorial de viento reflejada en la Figura 38.

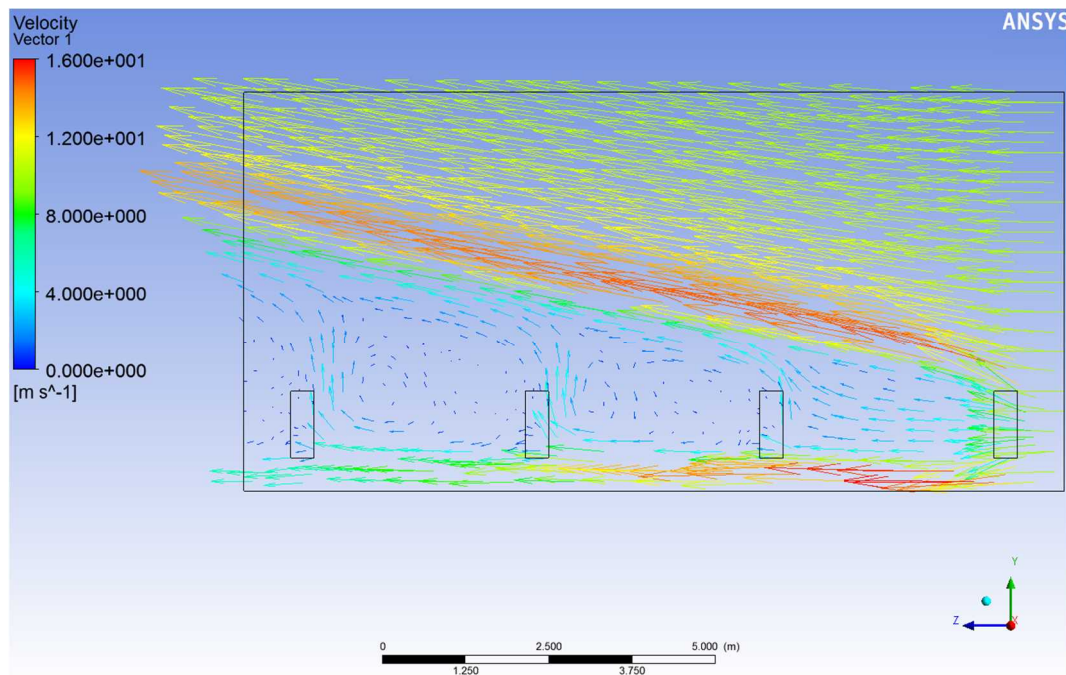


Figura 38. Vectores de velocidad de viento transversal al incidir sobre varias filas de setos uniformes.

Lo relevante del sencillo modelo expuesto es que, a partir de la segunda fila de cultivo, las filas a barlovento hacen de resguardo frenando considerablemente la velocidad. Además, se crean remolinos entre las filas de cultivo, de forma que la dirección del viento puede dejar de ser horizontal en algunas caras de cultivo. Anteriores estudios (Mochida et al., 2008) ya habían demostrado cómo cambiaba el patrón del viento tras atravesar un árbol. Modelos con más elementos (Belcher, Jerram y Hunt, 2003) demuestran que el flujo del viento cerca del suelo en el interior de un bosque es muy complejo.

Adelantándonos a lo que será la modelización computacional del tratamiento fitosanitario, la conclusión que se puede extraer es que la simulación CFD de deriva provocada por el viento en cultivos leñosos es más compleja de lo que en principio se podría prever. En los modelos en los que se han realizado estas aproximaciones (Endalew et al., 2010a; Hong, Zhao y Zhu, 2017b) se ha simulado un viento genérico actuando junto al pulverizador hidroneumático. Vista la Figura 38, estos modelos sólo pueden tomarse como válidos para la primera fila de cultivo exterior del campo, pues nada tiene que ver el viento que actúa sobre estas filas, respecto de las del interior de la parcela, salvo que el viento sople justo en dirección alineada con el desplazamiento de la máquina y las filas.

Por lo tanto, un estudio de la influencia del viento en las pérdidas de eficiencia dentro de la parcela, requeriría que el pulverizador hidroneumático se simulara dentro del mallado de volúmenes finitos, y no como condición de contorno (lo cual requeriría a su vez del empleo de mallados dinámicos muy complejos) o bien, realizar un cálculo en varias etapas, en el que la primera etapa calcularía el perfil vertical del

viento tipo dentro de la parcela tras haber sido frenado por las filas de cultivo, y la segunda etapa, tendría ese resultado como condición de contorno de entrada de aire, además de lo que se defina para el pulverizador hidroneumático, aunque se perdería cierta información sobre la interacción real entre el viento atmosférico y la máquina.

8.3. Modelos Lagrangianos en CFD y captura de gotas

Explicada la problemática de la interacción aire-planta y su implementación en modelos CFD, debe hacerse además una introducción a la problemática de simular en CFD otra interacción, la que ocurre entre las plantas y las gotas pulverizadas.

Como se explicó en la introducción del apartado 3, la mecánica de fluidos en general adopta un enfoque Euleriano para determinar las variables estudiadas. Sin embargo, las características de las gotas de líquido pulverizado tienen ciertas semejanzas con las de un sólido (por ejemplo, son elementos discretos, cuyo movimiento puede predecirse estudiando las fuerzas que actúan sobre ellas de forma individual), por lo que un enfoque Lagrangiano no sólo es posible, sino que es ventajoso para estudiar la dinámica de una gota. De tal forma, los programas CFD, implementan módulos de cálculos de fases dispersas en los que se aplica este enfoque, acoplándolo al cálculo de la fase dispersante, la cual se sigue estudiando bajo enfoque Euleriano.

Una vez una gota de líquido es introducida en un modelo CFD, ésta puede sufrir múltiples destinos, pues los programas informáticos tienen implementados gran cantidad de algoritmos que permiten simular casi cualquier situación real. Para el caso de un flujo aire-gotas, como sería el caso de una pulverización realizada por un pulverizador hidroneumático, la gota puede evaporarse por efecto de la temperatura y/o baja humedad relativa, puede romperse en gotas más pequeñas, puede fusionarse con otras gotas para dar lugar a gotas más grandes (coalescencia), la gota puede ser esférica o puede deformarse por efecto de las fuerzas que actúen sobre ella, etc. En cuanto a su interacción con el aire, las fuerzas que actúen sobre la gota, determinarán en cada momento la dirección y trayectoria que tome en cada instante, aunque los programas CFD permiten introducir variables estocásticas en el cálculo para dar más variabilidad a las trayectorias recorridas por las gotas. Sin pretender ser exhaustivo, lo que se quiere decir es que los programas CFD permiten introducir una gran cantidad de modelos de física teórica en el estudio de gotas pulverizadas.

La naturaleza del problema que queremos tratar aquí es mucho más sencilla, y tiene como objetivo analizar cómo interaccionan, en los modelos CFD, las gotas pulverizadas con el cultivo simulado.

Si la trayectoria de la gota toca con un límite del modelo (entrada, salida o pared), pueden configurarse 3 posibles opciones principales (Figura 39):

- *Escape*: la gota desaparece del modelo; actúa como si atravesara la condición de contorno.
- *Reflexión*: la gota rebota en la condición de contorno del modelo aplicando las leyes del choque elástico.

- *Evaporación*: la gota se evapora; desaparece del modelo como gota pero su masa queda como fase gaseosa.

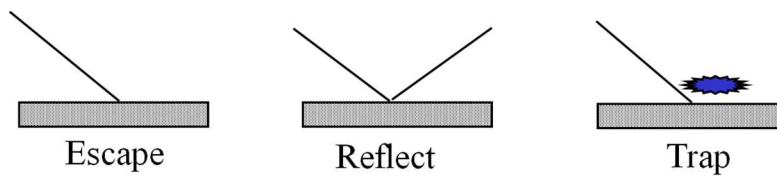


Figura 39. Posibilidades de una gota en un modelo CFD al tocar con una condición de contorno. (Fuente: Bakker, 2004).

La condición de contorno es diferente para la fase primaria que para la dispersa. Es decir, una zona de celdas, puede tener condición de salida para la fase primaria, pero a la vez establecer reflexión para las partículas que la toquen.

No es sencillo configurar (aunque sí posible), el fenómeno del escurrimiento que se daría con gotas muy gruesas o con un mojado excesivo de una superficie, pero la opción "Escape" se considera suficiente para los objetivos buscados, pues el software CFD puede registrar para cada gota aspectos como:

- Lugar exacto de impacto.
- Tamaño, diámetro y peso de la gota impactada.
- Vector velocidad en el momento de impacto.
- Tiempo transcurrido desde que la gota ha sido pulverizada hasta que ha impactado con la condición de contorno estudiada.
- En el caso de haber gotas en el modelo procedentes de varios orígenes de pulverización diferentes, origen de la misma. De hecho, cada gota en el modelo, está numerada, y por lo tanto se tiene control total de dónde salió, trayectoria seguida, y punto final de impacto.

Esta información, está disponible en ficheros que pueden ser tratados fácilmente con hojas de cálculo. De un modo más amplio, se puede establecer un plano interior al mallado de volúmenes finitos, y configurar el programa para que nos proporcione una información similar, tan solo que en vez de impactos se computarán gotas que atraviesan dicho plano (las gotas no pueden, en principio, desaparecer al atravesar un plano arbitrario dentro del mallado).

De esta forma, el estudio de las gotas que se pierden directamente al suelo, o bien las gotas que se pierden por deriva por encima del cultivo, no plantea dificultad.

El problema entonces radica en cómo estimar la captura de gotas dentro de zonas porosas que simulan el cultivo, y que realmente nos va a servir para estudiar la eficacia del tratamiento. Algunas investigaciones (Da Silva et al. 2006; Endalew et al. 2010b; Hong, Zhao y Zhu, 2017b) referencian haberlo conseguido, y aún más, indican haber establecido funciones de probabilidad de captura para permitir que algunas

gotas puedan atravesar el medio poroso que simula el cultivo, sin ser atrapadas por éste, como lo serán muchas de sus gotas compañeras. Sin embargo, en este trabajo no se ha encontrado la forma de replicar dicha metodología mediante configuración del software.

No somos los primeros que nos hemos encontrado con la misma dificultad, pues otras investigaciones (Salcedo, 2015) afrontaron el problema realizando capturas de imagen de varios instantes del cálculo (en los que las gotas simuladas se representaban como puntos de diferentes colores en función de su diámetro), y procediendo posteriormente a un análisis informático de dichas imágenes, si bien cabe decir que, en este caso, el modelo CFD era bidimensional; esta metodología parece inviable en modelos tridimensionales como lo son todos los realizados en este trabajo.

Una forma técnicamente viable, aunque costosa, de estimar capturas de gotas en medios porosos de simulaciones CFD, sería mediante el análisis en post-proceso de los ficheros de cálculo generados que contengan información sobre gotas que atraviesan un plano interior del modelo. Si bien las referencias dadas no informan explícitamente de la metodología seguida, un análisis minucioso de alguna de ellas (Hong, Zhao y Zhu, 2017b) hace pensar que sus medios porosos no capturan fase dispersa dentro del modelo CFD (ver Figura 20, las gotas no son capturadas por el cultivo en el modelo CFD), y que por lo tanto, sus estimaciones de captura provienen del tratamiento matemático post-proceso de los resultados del modelo. Probablemente ésta sea la metodología más adecuada pues no distorsiona el modelo, pero el análisis de los datos puede llevar bastante tiempo.

La opción de modelizar el cultivo mediante sus hojas explicado anteriormente, solucionaría este problema de modo implícito, pues las hojas serían directamente límites del mallado de volúmenes finitos, pero a día de hoy esto no es todavía computacionalmente abordable por ordenadores convencionales.

9. Simulación CFD de tratamientos con pulverizadores hidroneumáticos

9.1. Introducción

Tras haber explicado las metodologías de modelización del aire generado por los pulverizadores hidroneumáticos mediante CFD, y la necesidad y complejidad de introducir los cultivos en las simulaciones, expondremos finalmente la metodología desarrollada en este trabajo para realizar la simulación de un tratamiento. Estas simulaciones pueden ser de gran ayuda pues con menos coste y menos tiempo pueden proporcionar mucha información sobre cuál es la mejor manera de configurar la máquina para realizar el tratamiento, sustituyendo a un complejo y costoso programa de ensayos de campo, así como también puede ayudar al fabricante de la máquina a mejorarla si está en fase de diseño.

Los resultados de simulación desarrollada en el marco de esta tesis han sido publicados en la siguiente referencia en revista especializada (no indexada en JCR) que se incluye como parte del compendio:

Badules, J., Gil, E., García-Ramos, F. J., (2020) "Simulation of pesticide application in vineyards using CFD: Study of off-target losses and treatment optimization". *Aspects of Applied Biology*, nº 144, pp. 229-239.

En los siguientes apartados de esta memoria daremos explicaciones adicionales y complementarias que permitirán explicar con mayor profundidad la metodología ideada.

Comenzaremos diciendo que, para abordar un estudio de este tipo, son varios los aspectos críticos que hay que solventar. Lo primero es resolver la modelización de la máquina. Como se ha explicado reiteradamente en esta memoria, el primer paso para simular el tratamiento realizado por un pulverizador hidroneumático, es la modelización de las corrientes de aire generadas por éste. En estas simulaciones se trabajó con la máquina de la Figura 28, cuya modelización del aire (Badules et al., 2018) ya había sido validada. Esta máquina, como se ha explicado, no admite la metodología clásica en CFD de modelado de aire en pulverizadores hidroneumáticos, por lo que es inmejorable como "demostrador metodológico" del estudio, ya que constituye uno de los casos más extremos en los que aplicar esta técnica.

Una modelización completa de un tratamiento realizado por un pulverizador hidroneumático, también tiene que considerar el movimiento de la máquina y además permitir el flujo de aire entre el modelo y el exterior del modelo.

En cuanto a las gotas, su introducción en este tipo de simulaciones CFD se basa típicamente en la aplicación de un modelo Euler-Lagrange, en el que, al estudio de las corrientes de aire bajo enfoque Euleriano, se le acopla el movimiento de partículas discretas estudiadas bajo enfoque Lagrangiano (véase Badules et al., 2020, en los anexos, para detalles sobre modelos bifásicos). Este modelo recibe el nombre de Discrete Phase Model (DPM). Se trata de un modelo muy contrastado para el estudio

de partículas líquidas o sólidas dentro de gases⁵. El modelo DPM admite la configuración de múltiples sub-modelos de física teórica para abarcar una gran variedad de casuísticas⁶, pero para el estudio de tratamientos aplicados con pulverizadores hidroneumáticos no es necesaria tanta sofisticación.

Cabe concluir diciendo que, si bien estos modelos requieren de un conocimiento avanzado de la técnica CFD, presentan ciertas ventajas frente a los estudios experimentales donde, por ejemplo, para realizar un balance de masas del líquido pulverizado (cuestión muy fácil de realizar informáticamente), se deben recurrir a diferentes dispositivos para realizar estimaciones (Moltó, Garcerá y Chueca, 2011) o bien a ensayos de laboratorio que no es sencillo trasladar al campo (Roten et al., 2016).

9.2. Metodología de simulación

Bajo este epígrafe se concreta cómo se han solventado los problemas descritos, es decir, la metodología de la introducción en CFD de las corrientes de aire de la máquina, el movimiento de la misma al desplazarse por el campo y la pulverización de las gotas y el seto, lo que supone una aplicación práctica de apartados anteriores de la memoria.

9.2.1. La modelización de la máquina

De forma ya explicada en el apartado 7.2, se modelizó la geometría de las conducciones que canalizan el aire generado. Como condiciones de contorno, se definió una entrada de aire en la parte superior, y como salida del modelo CFD, se definieron las toberas a presión atmosférica. De esta manera, el programa CFD pudo calcular las velocidades a la salida de la máquina.

En las simulaciones desarrolladas, el movimiento de la máquina se consiguió mediante el empleo de “mallas deslizantes” (apartado 4.3.4). De esta manera, las celdas que representaban el aire y el cultivo, permanecerían fijas. La implementación de este movimiento es muy sencilla en el programa usado, pues simplemente se indica una velocidad y una dirección de desplazamiento al grupo de celdas que representaban la máquina.

Etapas de mallado

La compleja geometría de la conducción de aire, provocó un complejo mallado en el modelo de volúmenes finitos, tal y como puede verse en la Figura 40. Esto hizo aconsejable dividir el cálculo en varias etapas (Badules et al., 2018), de manera que el mallado del aire en el exterior de la máquina y el cultivo pudiera ser más simple (estructurado), y el cálculo, más ágil. Se evita así que el complejo mallado de las

⁵ A diferencia del estudio de partículas dentro de líquidos, que como se ha visto en el apartado 6.3 de la memoria, no siempre es un modelo satisfactorio.

⁶ Por ejemplo, puede modelizar la ignición de las gotas de combustible en el interior de un cilindro de un motor.

conducciones de aire de la máquina dificulte el cálculo del tratamiento fitosanitario al hacer inestables las iteraciones.

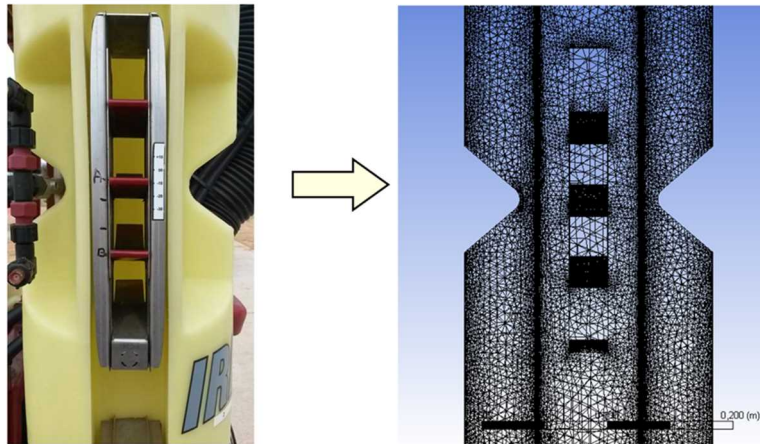


Figura 40. Detalle de un grupo de 4 toberas (izquierda) y su correspondiente mallado en volúmenes finitos (derecha).

Rigurosamente hablando, cada conducción de la máquina tiene 16 salidas de aire, y si tenemos en cuenta que cada línea de cultivo es tratada simultáneamente por dos conducciones, una por cada lado, tenemos que sobre el cultivo inciden simultáneamente 32 chorros de aire.

Al dividir el cálculo en varias etapas, lo que hacemos realmente es imponer como condición de contorno de entrada de aire de la etapa “n+1”, los resultados calculados en los contornos de salida de aire de la etapa “n”. Este traspaso de flujos entre etapas se realiza gracias a archivos informáticos generados por Fluent® (denominados “*profiles*”). En la etapa “n”, se generan archivos en cada salida de aire, en el que está la información del vector velocidad en cada nodo de las celdas que conforman dicha condición de contorno. Este archivo, se carga como condición de contorno de entrada en la etapa siguiente. La aplicación sin más de esta metodología, nos llevaría a tener que generar 32 salidas de resultados diferentes, y cargarlas en la nueva etapa. Teniendo en cuenta que, como se explicará, se han realizado 45 simulaciones diferentes, podríamos tener que haber realizado esta operación 1,440 veces. Este problema es análogo a lo que ocurre con la metodología clásica de modelización de aire en CFD anteriormente descrito, en el que se deben cargar a mano en el modelo informático las velocidades medidas en la toma de datos experimental. Por este motivo, se pensó en una sencilla estrategia que simplificó notablemente el trabajo, y que se representa en la Figura 41.

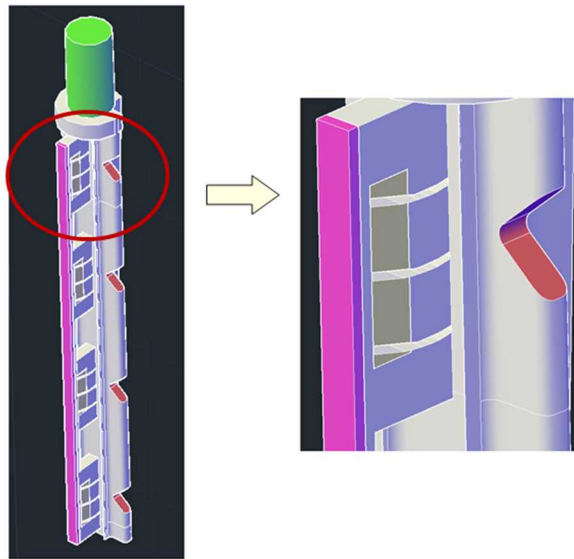


Figura 41. Izquierda: modelización CAD de una de las conducciones de la máquina estudiada, con 4 grupos de 4 toberas de salida de aire. Derecha: detalle del grupo de toberas superiores, donde se puede apreciar la transición entre etapas de cálculo, estando representada en rosa la región que será la siguiente etapa.

Lo que se hizo no fue obtener el resultado justo en la salida de aire de la máquina, sino a 1 cm de la misma. Esta diferencia es irrelevante a efectos prácticos, y permitió crear una única condición de contorno que unificó las 16 toberas de cada conducción, por lo que, para definir el aire producido por la máquina en el mallado de simulación de pulverización, no hubo que cargar al programa informático 32 archivos de resultados, sino sólo 2 (una por conducto).

En nuestro caso, el inicio de la segunda etapa de cálculo (y a lo que se le impuso el movimiento y la condición de malla deslizante), fue la región representada en la Figura 41 en rosa: se logró reducir el complejo mallado de la conducción de aire de la máquina, a un simple ortoedro en forma de pletina alargada.

Cabe comentar que los puntos donde el Fluent® define los vectores velocidad de aire en la etapa inicial, difícilmente coinciden con los puntos de los vértices de las celdas de la segunda etapa. El programa CFD usado soluciona el problema mediante la interpolación de los valores, aunque ello provoca una fuente de errores. Ya se ha explicado anteriormente en esta memoria (apartado 4.3.4), que un mallado fino en estas regiones de transición minimiza el problema. Una vez pasados los valores de velocidad a la segunda etapa, éstos quedan fijados a los vértices, y puede por tanto plantarse un movimiento por mallas móviles sin problema.

Regiones adicionales de celdas

El problema de esta simulación es que un plano que se ha definido como de deslizamiento entre regiones de celdas, y que no presente celdas a los dos lados, se comporta como pared en el programa CFD usado. Por lo tanto, para realizar un modelo más real, debe garantizarse que, en las cercanías de la máquina, siempre

haya celdas que permitan que tanto las corrientes de aire como las gotas con trayectorias no esperadas, puedan abandonar correctamente el dominio de cálculo. Esto es bastante sencillo simplemente disponiendo una región de celdas adicional (Figura 42) alrededor de la zona de entrada de aire al modelo CFD de estudio de la pulverización, de la cual obligatoriamente han de estar separadas físicamente (aunque sea sólo unos centímetros) para que Fluent® sea capaz de diferenciar las dos zonas. Esto apenas supone un incremento de celdas al modelo y por lo tanto no tiene demasiada relevancia en el tiempo de cálculo ni en la estabilidad del mismo.

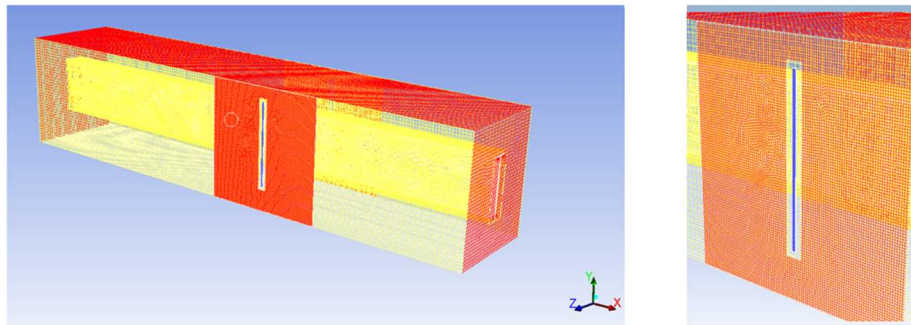


Figura 42. Modelo de malla para simulación de pulverización. Izquierda: modelo completo en perspectiva, en la que se puede ver uno de los lados. Derecha: detalle de la zona de entrada de aire. Las zonas rojas representan condición de contorno de salida de aire; las azules, son zonas de entrada de aire; las amarillas, son planos de deslizamiento entre celdas del mallado. La zona azul, corresponde con la geometría rosa representada en la Figura 41, siendo el enlace entre la etapa 1 (modelado de las corrientes de aire generada por la máquina) y la etapa 2 (simulación de la pulverización).

No parece que esta precaución sea necesaria en otra tipología de pulverizadores que no sean similares al aquí estudiado, pues es prácticamente imposible que una gota o una corriente de aire retrocedan hasta la posición de la máquina.

Sin embargo, si se quisiera estudiar un viento externo al tratamiento (por condiciones meteorológicas), obligatoriamente tendría que realizarse por medio de una región de celdas como la descrita.

9.2.2. Gotas y boquillas de pulverización

En cuanto a la forma específica de introducir las gotas, el programa ofrece varias opciones, cada una de ellas con ventajas e inconvenientes. Algunas de ellas se pueden observar en la Figura 43. La forma más sencilla, es indicar un punto x, y, z , un vector director y una velocidad de salida: las gotas se inyectarían en el punto definido, con la dirección y velocidad elegida. Otra opción es definir dos puntos del modelo, de forma que las gotas se inyectarán entre ambos en el número indicado. A esto se le llama opción “grupo”.

Otra opción es la definición de un cono, lo que representa muy fidedignamente a las boquillas de cono hueco.

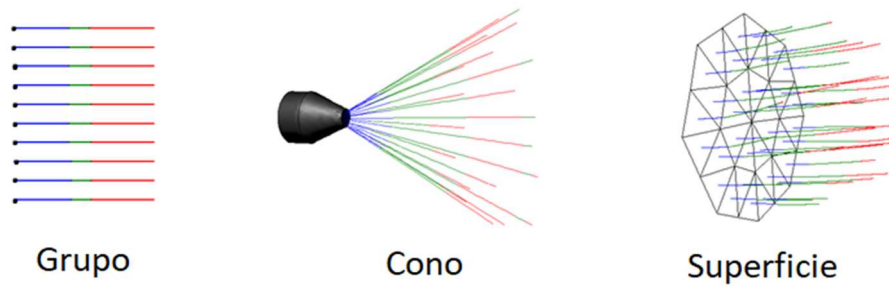


Figura 43. Diferentes posibilidades de definición de inyecciones de partículas en el modelo DPM de Fluent®. (Fuente: Bakker, 2004).

Otra posibilidad que podría ser interesante para introducir las gotas, es la inyección por superficie. En este caso, el programa inyecta una gota en el centroide de cada cara de un conjunto de celdas que forman una superficie especificada, normalmente definida con una condición de contorno. Esto es trascendental, ya que si a la superficie elegida como de inyección de gotas, se le aplica un movimiento (por ejemplo, por mallas deslizantes), tenemos que se puede configurar un cálculo transitorio en el que las gotas se introduzcan al modelo siguiendo a las corrientes de aire, también en movimiento. Esto contrasta con la opción de pulverización en cono, que sólo puede definirse en un punto determinado del espacio (el vértice del cono, es decir, el orificio de pulverización de la boquilla).

Por lo tanto, no existe en el programa usado un modelo perfecto para modelizar boquillas de cono hueco (que son las habituales en los pulverizadores hidroneumáticos como el aquí estudiado) en simulaciones transitorias con movimiento de la máquina, ya que por un lado, este tipo de boquillas pueden definirse fielmente en el programa CFD pero no admiten movimiento, mientras que las opciones que permiten movimiento de los elementos que pulverizan las gotas en el modelo, están muy lejos de representar un cono hueco.

La solución adoptada, fue escoger, de cualquier forma, la modelización de boquillas de cono hueco, ya que era lo más cercano a la realidad. Por ello se definieron 16 boquillas (8 por conducto) en 16 puntos concretos del espacio, especificando un ángulo de cono, y caudal, tomando como base los datos de una boquilla comercial de cono hueco (Albuz ATR 80 naranja) y contrastado experimentalmente el dato de caudal. La velocidad de salida de las gotas no es muy influyente en el modelo, pero se ha tomado como valores de referencia los datos de varios estudios de caracterización de gotas (Nuyttens et al., 2005; Vulgarakis et al., 2016).

La fuerte limitación de que las boquillas quedaran fijas, mientras que recordemos, a las corrientes de aire (es decir, la máquina), se les implementó un movimiento (por medio de la opción “mallas deslizantes”), hace que el modelo, fuese, en general, erróneo. Sólo hubo un instante, en todo el cálculo transitorio, en el que las posiciones de las boquillas pulverizadoras, y la máquina, coincidían con la realidad.

La estrategia empleada fue, por lo tanto, limitar la pulverización de las gotas, sólo a ese preciso instante, ya que una inyección continua hubiese hecho imposible la

alineación de las 16 boquillas definidas con la posición de las corrientes de aire generadas, dada la inamovilidad de la posición de las boquillas en el modelo.

Para los objetivos del estudio, esto no representó ningún problema: lo que se estudia con la metodología DPM son gotas individuales, por lo tanto, es indiferente que éstas se hayan pulverizado en el modelo en uno o varios instantes, ya que eso no es trascendente.

Lo que sí fue importante (y crítico) fue la elección del momento de pulverización. Podría pensarse que lo más sencillo hubiese sido imponer la pulverización en el instante $t=0$ de la simulación, pero en dicho momento, por la propia naturaleza del cálculo CFD, los resultados de velocidades de aire serían erróneos por la razón de que la simulación no habría realizado un mínimo de iteraciones que hubiesen aproximado los residuos de cálculo a valores aceptables (en otras palabras, el cálculo no ha convergido de forma mínimamente satisfactoria), y además, los resultados no mostrarían aún el carácter dinámico de las corrientes de aire implementado por el movimiento de avance de la máquina. Por lo tanto, es imprescindible que el modelo realice algunas iteraciones previas a la pulverización de las gotas simulando la máquina en movimiento.

En el modelo realizado, se eligió pulverizar las gotas tras 50 saltos de tiempo (lo que, considerando 20 iteraciones por salto, implica 1,000 iteraciones). El movimiento se implementó desde el inicio de las iteraciones. Por lo tanto, cuando empezó el cálculo, las corrientes de aire estaban atrasadas respecto de la posición en la que se definieron las boquillas. La ubicación de las boquillas en el modelo, debió ser calculada para que justo a las iteraciones elegidas, estuviesen perfectamente posicionadas con las corrientes de aire (es decir, que estuvieran a la misma distancia de ellas en el modelo que en la máquina real). Una vez pulverizadas las gotas, las corrientes de aire siguieron avanzando, mientras que las boquillas, siguieron fijas, por lo que se volvió a tener un modelo erróneo. Sin embargo, este hecho volvía a ser irrelevante, pues no se volvió a inyectar gotas a la simulación CFD.

9.2.3. La modelización del seto

Como síntesis a las conclusiones extraídas de la problemática expuesta en el apartado 8 de esta memoria, en este trabajo se ha optado por modelizar el seto de vid como si fuese un sólido. El comportamiento de las corrientes de aire, en cuanto a dirección y trayectorias, es muy similar al que se tendría respecto de considerar un medio poroso de gran resistencia aerodinámica y además, simplifica enormemente el post proceso de los datos de gotas pulverizadas. Por lo tanto, es una aproximación razonable al estudio de la vid en estado fenológico avanzado.

Para el estudio de un estado fenológico de poco desarrollo, sería más correcto el estudio de un medio poroso, el cual no tiene ninguna complicación técnica de implementación en la simulación, ni implica empeorar significativamente el tiempo de cálculo, la estabilidad o convergencia del mismo. El gran problema es que no se ha encontrado una metodología directa para obtener resultados de impactos de gotas en medios porosos, por lo que se requiere desarrollar técnicas de análisis de datos en post proceso de los resultados.

9.2.4. Consideraciones sobre configuración del cálculo

Como modelo de viscosidad, se eligió el modelo estándar $k-\epsilon$ y las funciones de pared estándar. A este modelo de viscosidad se le achaca no adaptarse bien a flujos que se bifurcan (apartado 4.4.2), pero sin embargo ha sido el usado satisfactoriamente por investigaciones en setos de vid (Da Silva et al., 2006). En nuestro caso, por la configuración de conductos verticales opuestos de la máquina, las corrientes de aire no sólo chocan con un obstáculo sólido sino que, tras rodearlo, sus restos chocan entre sí, por lo que no hay bibliografía que demuestre que otro modelo sea ventajoso en casos como éste. El modelo SST que últimamente se está popularizando en simulación CFD de pulverizadores, fue probado sin obtener resultados significativamente diferentes, pero necesitando un mayor tiempo de cálculo. En lo que se refiere a modelos de pared, no es un aspecto crítico ya que las únicas que existen son el suelo (donde las velocidades de aire son despreciables) y por la configuración elegida para modelizar la planta, el propio seto.

Por otra parte, las partículas inyectadas en la simulación CFD, se definieron (Figura 44) como partículas inertes⁷ y de agua líquida. Se despreció el cálculo de las deformaciones de las gotas (se consideran siempre esféricas). También se despreció la introducción de variables estocásticas, que dan más variación en el cálculo de trayectorias. Además, se configuró que la fase primaria interaccionara con la fase Lagrangiana (pues el programa, permite que no sea así si se desea, lo cual puede ser interesante para ciertos tipos de cálculos) y se estableció que el cálculo de las trayectorias de las gotas se sincronizara con las iteraciones del cálculo transitorio.

El cálculo se realizó bajo esquemas de discretización de segundo orden para presiones, cantidad de movimiento y viscosidad, y con el algoritmo SIMPLE.

9.2.5. Variables estudiadas

Una vez que se ha descrito suficientemente las características del modelo, describiremos las variables de estudio que se han tenido en cuenta en las simulaciones. Estas se han reducido a tres: velocidad de trabajo de la máquina, tamaño de gotas pulverizadas, y caudal de aire suministrado por el circuito neumático de la máquina. Se han considerado 3 velocidades, 3 tamaños de gota y 5 caudales de aire, lo que combinado nos da un total de $3 \times 3 \times 5 = 45$ configuraciones diferentes. Se han realizado todas estas simulaciones, con un tiempo de cálculo habitual de 1.25 horas por simulación, con un modelo de unas 300,000 celdas.

No se ha considerado la acción de vientos exteriores, pues en una primera aproximación CFD del estudio de un pulverizador hidroneumático, lo lógico es determinar el funcionamiento del pulverizador sin considerar esta variable, para encontrar su configuración óptima, ya que el viento difícilmente va a provocar otra cosa que más ineficiencia.

⁷ El programa admite otras configuraciones pensando en la posibilidad de simular reactores químicos, cámaras de combustión de motores, etc.

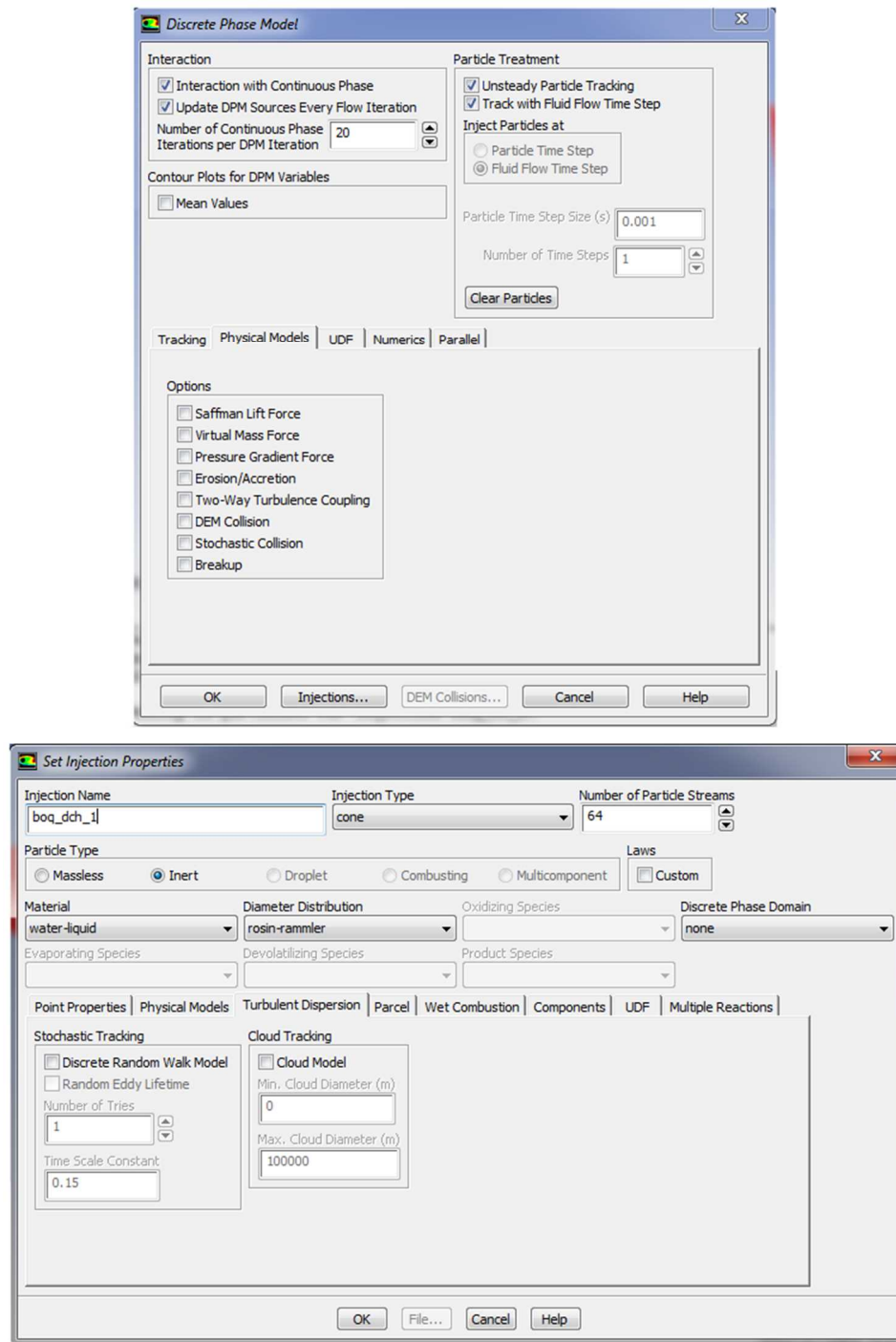


Figura 44. Configuración de las gotas pulverizadas en una boquilla.

Una vez encontrada la configuración óptima, se podría pasar, en otros estudios a implementar viento exterior para determinar hasta qué punto sería tolerable realizar un tratamiento en condiciones meteorológicas no favorables, pero este cálculo tiene las extremas dificultades señaladas en el apartado 8.2.

Velocidad de avance

Como base se tuvo en cuenta un valor de 6 km h^{-1} , que es una velocidad muy prudente para este tipo de máquinas. A partir de allí, se ha considerado también

simular con valores de 4.5 km h^{-1} y 7.5 km h^{-1} . El valor inferior, es demasiado bajo considerando el uso real de estas máquinas, cuyos usuarios, si es posible, las conducen a velocidades incluso superiores a 7.5 km h^{-1} , pese a que como se concluye en este estudio (Badules, Gil y García-Ramos, 2020), no es deseable. Pero lo que se quería con la simulación era estudiar unos valores tipo de las variables que permitieran detectar tendencias.

Un aspecto clave de las velocidades de avance en el modelo CFD es su influencia en el tiempo de simulación. Si se quisiera estudiar un mismo tiempo bajo las tres velocidades, el modelo de mayor velocidad tendrá que representar una mayor longitud de seto (y por tanto tener más celdas); de hecho, necesitaríamos un modelo de volúmenes finitos para cada velocidad estudiada. Dado que esto no es muy práctico, para emplear un único modelo de volúmenes finitos, el tiempo total de simulación tiene que ser diferente para cada velocidad, y coincidir con el tiempo que tarda la máquina en recorrer la longitud de dicho modelo.

Una consecuencia de esto es que el recorrido total de la máquina viene determinado por la velocidad más alta que se simule. Tiene que ser tal, que permita a la mayor parte de las gotas abandonar el modelo bien por los límites exteriores (deriva), bien por depositarse en el suelo, bien por impactar contra el cultivo simulado. Las pruebas realizadas nos permiten decir que, con la máquina estudiada, es necesario simular al menos 2 segundos adicionales tras la pulverización de las gotas. En la Figura 45 se representa el porcentaje que, en cada décima de segundo, impacta contra el cultivo, en tres simulaciones tipo a tres velocidades diferentes. Aunque el tiempo de deposición depende lógicamente de los otros factores (tamaño de gota, caudal de aire), como se puede ver, pasados los 2 segundos desde la pulverización, el impacto contra el seto es ya muy poco probable.

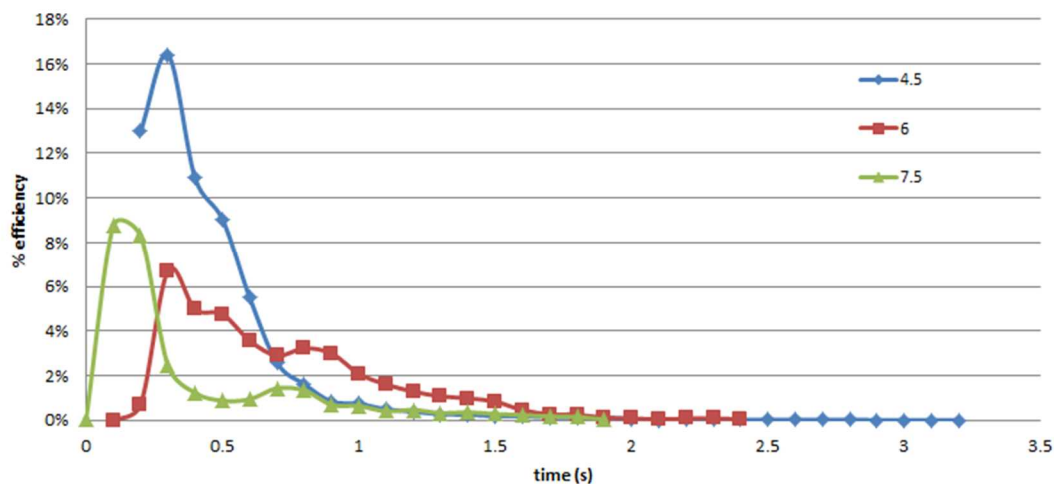


Figura 45. Porcentaje de gotas pulverizadas que impactan contra el área del seto de cultivo en tres simulaciones a diferente velocidad (4.5 , 6 y 7.5 km h^{-1}).

Las mismas simulaciones revelan que pasados 2 segundos, incluso 3 ó 4, pueden existir gotas que no han abandonado el modelo. Se trata de gotas de pequeño diámetro, cuya trayectoria las va a llevar contra el suelo, pero su velocidad de caída es muy baja. No merece la pena alargar el tiempo de cálculo ya que eso implicaría

más que duplicar el tiempo de simulación sin que se obtuvieran resultados significativos en lo que se refiere a eficiencia del tratamiento (entendida como cantidad de líquido pulverizado que se deposita en el cultivo). El pequeño volumen de gotas pulverizadas que tras dos segundos no ha alcanzado el seto, puede ser asignada del lado de la seguridad a pérdidas directamente, sin desviarnos apenas de la realidad.

Una última consideración tiene que realizarse sobre la velocidad de avance de la máquina en el modelo, y es su influencia sobre la definición del salto de tiempo definido. Podemos optar por dos estrategias:

- Asumir un mismo salto de tiempo para todas las velocidades, por lo que las velocidades más altas acabarán la simulación con menos iteraciones (pues las dimensiones del modelo, van a ser iguales para todas las velocidades).
- Asumir un salto de tiempo diferente para cada velocidad, de forma que se pueda configurar el cálculo para que cualquier velocidad simulada se realice con las mismas iteraciones.

Entendemos que lo correcto es la segunda opción, y además, lo que debe primar a la hora de calcular el salto de tiempo, es la distancia recorrida entre dos de estos saltos, no el tiempo en sí. Si entre dos saltos de tiempo, la máquina recorre 1 metro, es evidente que el cálculo no puede ser correcto. Si por el contrario, es de 1 milímetro, los cambios entre iteraciones serán muy suaves, lo que redundará en una excelente convergencia del modelo, pero pagaremos el precio de un enorme tiempo de cálculo. Por lo tanto, debe encontrarse un punto intermedio que permita llegar al compromiso de no ser un salto muy drástico para las iteraciones pero que no ralentice mucho el tiempo de simulación. En esta tesis se ha determinado que, un máximo de desplazamiento de 2.5 centímetros entre dos saltos de tiempo es tolerable, proporcionando simulaciones suficientemente rápidas (de poco más de 1 hora, como se ha dicho).

Por lo tanto, el salto de tiempo se ha calculado de la siguiente forma: primero se divide la longitud del modelo para 2.5 cm, lo que nos da el número de saltos de tiempo que tendrán todos los modelos por igual; y a continuación, se calcula en función de la velocidad de avance de la máquina, cuánto tiempo se tardan en recorrer esos 2.5 cm. Así, por ejemplo, para las simulaciones con velocidad de 4.5 km h^{-1} , el salto de tiempo será de 0.02 s, mientras que para las de 7.5 km h^{-1} , será de 0.012 s.

Diámetros de gotas

Para las simulaciones realizadas, se definieron poblaciones de gotas cuya VMD era de 150, 250 y 350 μm , que seguían una distribución Rosin-Rammler⁸ de 20 diámetros diferentes. Una población de gotas de VMD de 350 μm es más grande de lo habitual con este tipo de maquinaria, pero de igual manera que con ciertos valores de

⁸ ANSYS Fluent® incorpora la distribución Rosin-Rammler para definir una población de gotas, pero solicita al usuario el valor VMD de la misma (y no el diámetro característico de la distribución), que suele ser el dato aportado por el fabricante de las boquillas de pulverización.

velocidad de desplazamiento, se ha querido tener en las simulaciones valores no convencionales para detectar tendencias.

También debe definirse el diámetro mínimo y el máximo que se desea se modelice, y el parámetro de distribución de la función. En las simulaciones realizadas, se definieron unos diámetros mínimo y máximo de gota simulada tales que, considerando un parámetro de distribución de 3.5 (Fluent, 2014) sólo se despreciaron los diámetros de gota que constituyen el 1% del líquido pulverizado con gotas más pequeñas y el 1 % pulverizado con gotas más grandes.

Fluent® permite definir que las gotas sufran durante el cálculo algunos fenómenos físicos como ruptura, coalescencia, o evaporación. En estos casos el diámetro de gotas cambiaría conforme se fueran calculando las iteraciones, y la definición dada al tamaño de las gotas sólo corresponderían al momento inicial de inyección en el modelo. Por considerar que, a efectos de demostración, es suficiente con el estudio de 20 diámetros diferentes, estas opciones no se han activado en los cálculos expuestos.

Caudales de aire

En las simulaciones se han probado 5 caudales de aire diferentes en los bajantes, concretamente de 670, 860, 1050, 1,245 y 1,435 m³ h⁻¹ por cada conducto vertical. Sin embargo, la introducción de estos caudales en las simulaciones CFD (concretamente, en la etapa 1 de la simulación), se ha realizado definiendo una velocidad media en la sección (condición de contorno) de entrada al modelo; considerando un diámetro de tubo de 13 cm, esos caudales corresponden con unas velocidades medias de 14, 18, 22, 26 y 30 m s⁻¹.

Como ya se ha explicado, estos caudales se introducen en una etapa de cálculo (Figura 29) que simula las conducciones verticales, obteniéndose como solución al problema las componentes vectoriales de la velocidad en los nodos de las celdas de volúmenes finitos que conforman la condición de contorno de salida de aire, la cual está a un centímetro de las toberas. Esta solución se exporta a archivos informáticos, que se cargan a un segundo modelo (Figura 42) como condición de contorno de entrada. Se necesitan 10 simulaciones de conductos diferentes (5 caudales para el conducto derecho y otros tantos para el izquierdo).

9.3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se encuentran en el artículo publicado (Badules, Gil y García-Ramos, 2020) que se adjunta en este trabajo. No obstante, se exponen a continuación algunos aspectos complementarios a lo que recoge la publicación.

En la Figura 46 se observa el modelo de la Figura 42 en pleno cálculo, con las corrientes de aire generadas por la máquina en movimiento, mientras que en la Figura 47 se pueden observar las trayectorias de las gotas recién pulverizadas en la simulación.

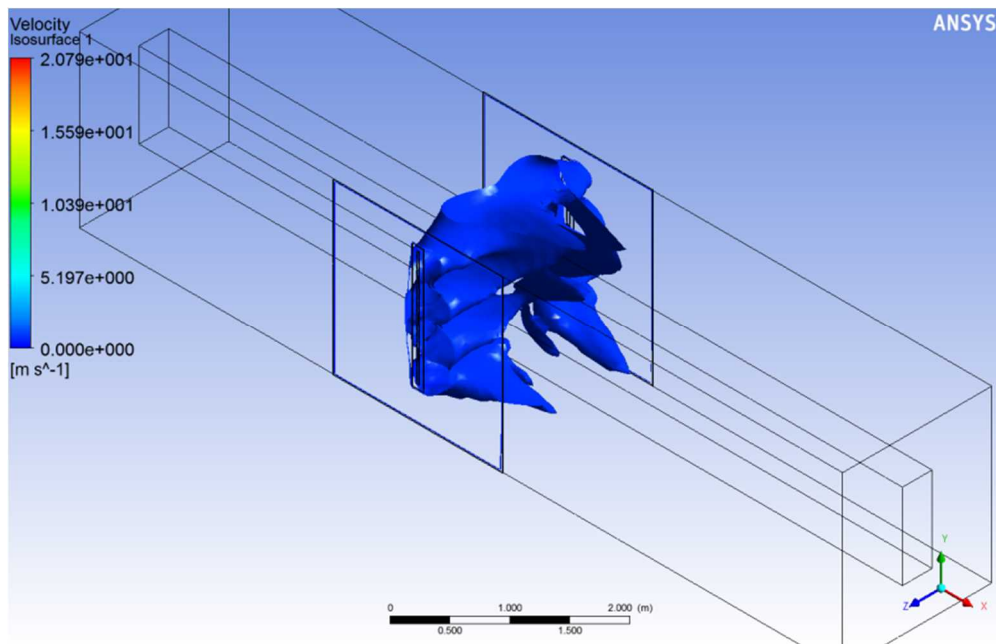


Figura 46. Captura de imagen de la simulación en un momento intermedio de la misma, en el que se aprecian las corrientes de aire de velocidad mayor a 4 m s^{-1} .

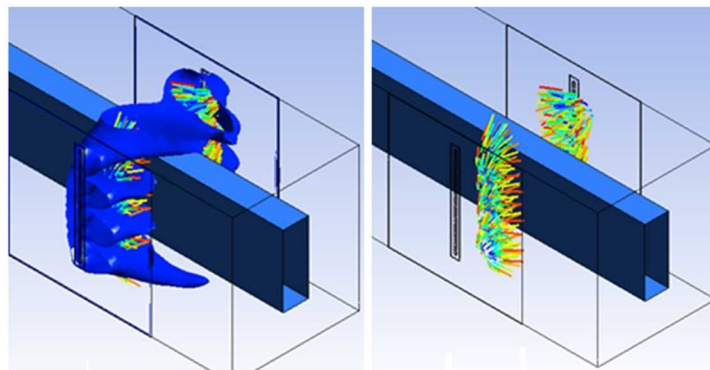


Figura 47. Trayectoria de gotas simuladas recién pulverizadas. Izquierda: interactuando en el seno de las corrientes de aire. Derecha: representación sin corrientes de aire para mejor visualización.

En cuanto a los resultados en sí, para la máquina estudiada, en la Figura 48 se representa el porcentaje de líquido pulverizado que alcanza, en cada simulación CFD, la espaldara de vid, respecto del caudal de aire proporcionado por la máquina. Los aspectos a destacar son varios:

- Existe una clara correlación positiva entre caudal de aire y líquido que se pulveriza en el área del cultivo.
- Las diferencias entre tratamientos son muy significativas. Esto implica que, para la máquina estudiada, diferentes configuraciones del tratamiento pueden desembocar en grandes diferencias en la eficacia, pudiendo llegar a una eficiencia de sólo el 10 %.

- La eficiencia máxima teórica que se alcanza en las simulaciones es de poco más del 60 %, lo cual no parece muy satisfactorio, aunque el dato no es sorprendente si se compara con estimaciones de otros autores (Moltó, Garcerá y Chueca, 2011) que estiman aún menos porcentaje depositado en el cultivo objetivo.

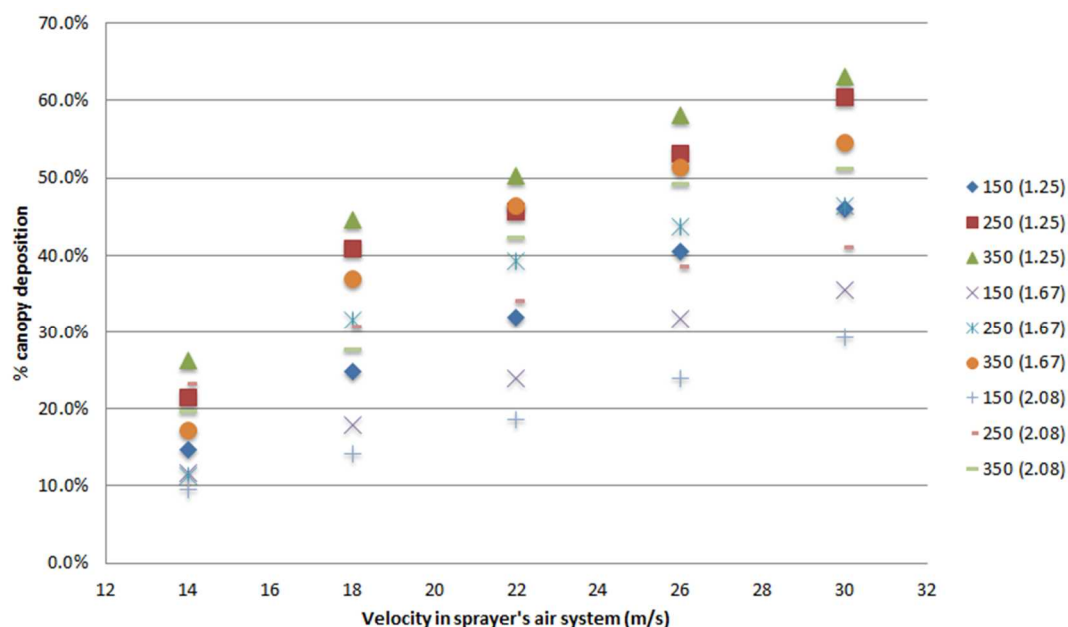


Figura 48. Porcentaje de líquido pulverizado que teóricamente alcanza el seto de vid en los modelos, en función del caudal de aire suministrado por el pulverizador. Cada tratamiento distingue el diámetro medio de partícula pulverizada (150, 250 o 350 μm) y la velocidad de desplazamiento de la máquina (1.25, 1.67 o 2.08 m s^{-1}).

Si, por otra parte, representamos las pérdidas al suelo en estos mismos tratamientos, obtenemos la Figura 49, en la cual se observa claramente una correlación negativa entre estas pérdidas y el caudal de aire.

Estos resultados son coherentes con lo esperado, indicando que, a mayor caudal de aire, menos pérdidas al suelo.

Los impactos contra el seto y las pérdidas al suelo se obtienen de forma directa en el modelo, pues ambos son condiciones de contorno en los que a las partículas discretas se les ha definido la condición de “escape” (Figura 39). El programa se configura para que exporte⁹ a un archivo de texto importable a hoja de cálculo los datos de cada impacto de gota en estas zonas del modelo.

⁹ : Aunque esta memoria no pretende ser un manual de uso avanzado del programa ANSYS Fluent®, comentaremos que esta opción debe activarse antes de realizar el cálculo, en el siguiente menú:

Results→Reports→Discrete Phase→Sample

Se abrirá una ventana llamada “Sample trajectories”, donde se deben seleccionar las condiciones de contorno donde se quieren estudiar los impactos, y las boquillas cuyas gotas pulverizadas queremos estudiar. Se debe seleccionar la opción “start”, y acabado el cálculo, volver a la ventana para seleccionar “stop”. Se escribirán los archivos en el directorio donde el programa realiza los cálculos. con una extensión que el programa llama “dpm”, pero que en realidad son archivos de texto clásicos “txt” que pueden manejarse con hoja de cálculo tras un proceso de importación.

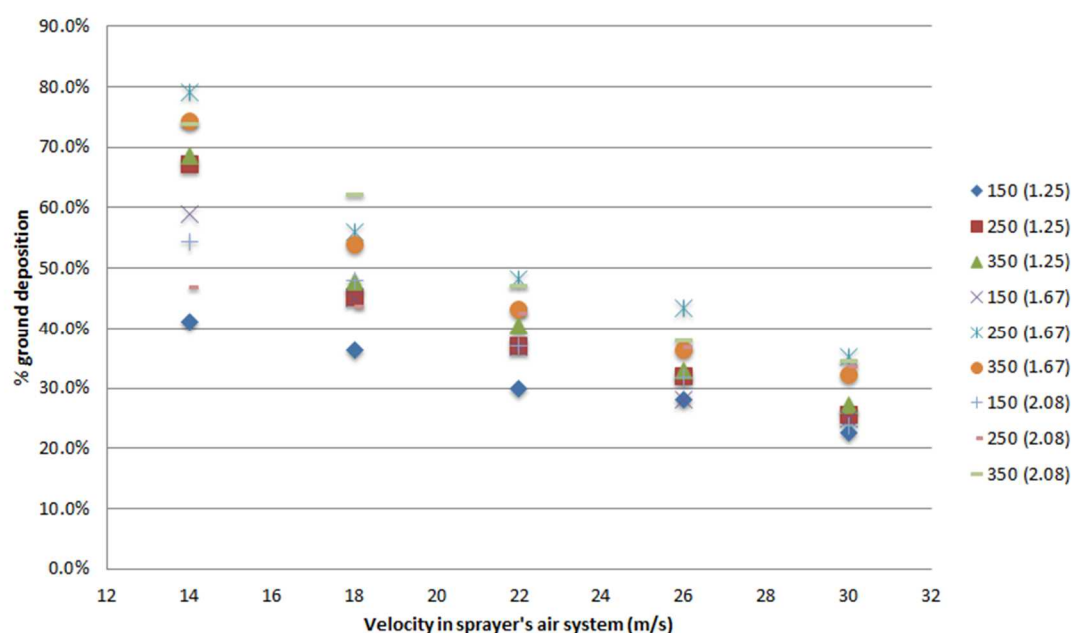


Figura 49. Porcentaje de líquido pulverizado que se pierde en el suelo en los modelos, en función del caudal de aire suministrado por el pulverizador. Se representa el diámetro medio de partícula pulverizada (150, 250 o 350 μm) y la velocidad de desplazamiento de la máquina (1.25, 1.67 o 2.08 m s^{-1}).

Por simplicidad, las pérdidas por deriva, se obtienen por diferencia. De esta forma, las gotas que no han abandonado el modelo tras terminar la simulación se imputan a este apartado.

También debe decirse, que tal y como se ha planteado el modelo, los impactos contra el seto de la simulación CFD no constituirían la eficiencia real sino su máximo teórico, pues es habitual que un porcentaje de las gotas pulverizadas contra el seto puedan atravesarlo sin ser capturados por ninguna hoja.

Con todas estas precauciones, si representamos las pérdidas por deriva calculadas en las simulaciones, obtenemos la Figura 50, la cual es muy diferente a las dos anteriores. En ella no se ve ninguna correlación. Esto puede resultar extraño, pues cabría esperar que, a más caudal de aire, más pérdidas por deriva. Pero en la máquina estudiada, de bajantes verticales adaptados al cultivo en seto, parece que al chocar las corrientes de aire entre sí, éstas se contrarrestan, con lo que a efectos de deriva, a diferencia de en las máquinas de ventiladores que proporcionan un flujo radial, sería indiferente el aire suministrado por la máquina.

Si se analizan más pormenorizadamente los gráficos podemos obtener conclusiones adicionales, como que tratamientos realizados con boquillas que pulverizan tamaños de gotas más grandes, son más eficientes que las que pulverizan diámetros más pequeños, y que tratamientos a velocidades de desplazamiento menores son más eficientes que los que se hacen a gran velocidad.

Todas estas conclusiones deben ser acotadas a la máquina estudiada. No se puede generalizar que convenga realizar un tratamiento con un pulverizador hidroneumático con el máximo caudal de aire disponible. Sí se puede decir, no obstante, que eso es lo que conviene con esta máquina, y probablemente con las de

tipología análoga. Esto contrasta con pruebas de campo realizadas no con la misma máquina, pero sí muy similar (Valero et al., 2012) en el que no se llegaban a resultados concluyentes en cuanto a la influencia del caudal de aire, si bien, las pruebas de campo no valoraban la eficiencia, si no el recubrimiento¹⁰. Adicionalmente, trabajos realizados en campo con la misma máquina sí que demostraron la influencia de la corriente de aire en la deposición de producto en la hojas (Gil et al., 2015).

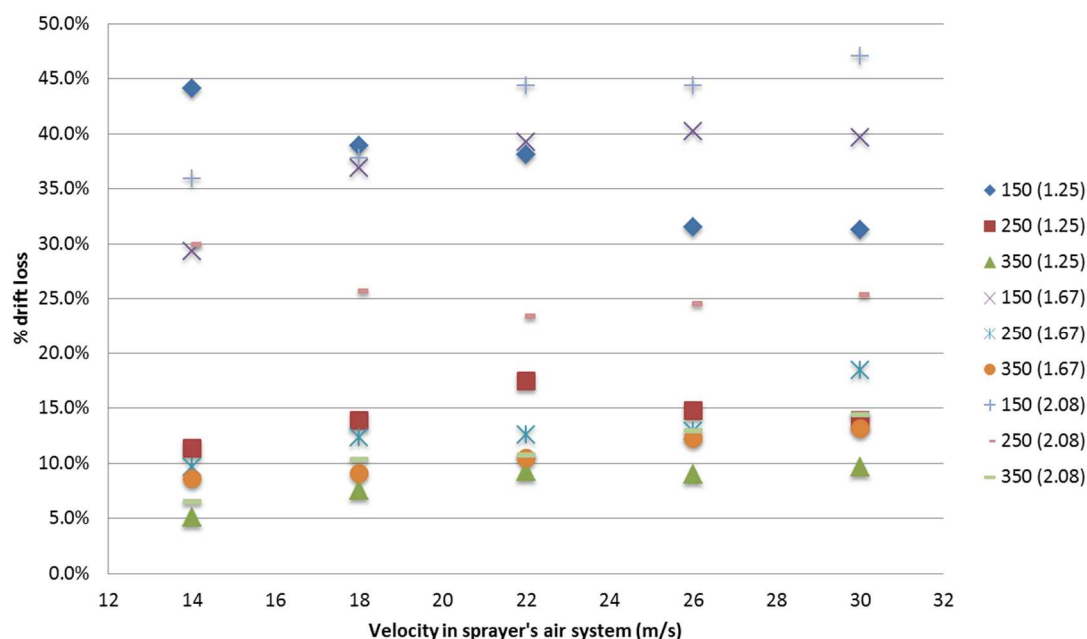


Figura 50. Porcentaje de líquido pulverizado que se pierde por deriva en los modelos, en función del caudal de aire suministrado por el pulverizador. Se representa el diámetro medio de partícula pulverizada (150, 250 o 350 μm) y la velocidad de desplazamiento de la máquina (1.25, 1.67 o 2.08 m s⁻¹).

Similares precauciones deben tomarse con las conclusiones sobre el tamaño de gota. El resultado de las simulaciones, indica que son preferibles los tamaños gruesos, pero los tamaños máximos simulados (VMD de 350 μm) han sido mayores de lo que es habitual emplear en este tipo de tratamientos. Por lo tanto, las recomendaciones a dar serían que se tratase de usar los tamaños de gota más grandes posibles, siempre que se compruebe que ello no implica pérdidas por escurrimiento y que se da una cobertura suficiente (porcentaje de superficie mojada respecto del total) de las hojas.

En cuanto a la velocidad, se apunta a que un aumento de la velocidad de desplazamiento, tiene como efecto sobre las corrientes de aire que genera la máquina, un aumento de las fuerzas cortantes (Miller y Smith, 1997) que actúan sobre las mismas. De esta forma, las corrientes se deforman, y al componer

¹⁰ Cabe decir, en este aspecto, que las simulaciones informáticas y las pruebas de campo, son perfectamente complementarias, ya que es muy difícil estimar el recubrimiento con una simulación CFD (ya que de las miles de millones de gotas pulverizadas, sólo se estudian unas pocas decenas de miles), mientras que en los ensayos de campo, no es sencillo medir la cantidad de líquido pulverizado que alcanza el cultivo.

vectorialmente la resultante, la corriente pasa de ser perpendicular a la máquina, a oblicua. Este efecto aumenta con la velocidad y cuanto más elevada es, más capacidad de transporte de gotas pierden las corrientes de aire. Este puede ser el motivo por el que pruebas de campo con máquinas similares realizadas a baja velocidad (Valero et al., 2012) no aprecian cambios sustanciales en la cobertura de la pulverización sobre el cultivo con diferentes caudales de aire.

Este efecto es muy visible en las simulaciones CFD observando una vista cenital del modelo de isosuperficie de velocidades de aire (Figura 51). A velocidades de desplazamiento bajas, las corrientes generadas no se ven influenciadas apenas por la velocidad de desplazamiento, por lo que la resultante es prácticamente perpendicular a la máquina. Sin embargo, a altas velocidades de desplazamiento de la máquina, el flujo de aire se distorsiona (este resultado ya ha sido obtenido implícitamente en estudios anteriores (Delele et al., 2005), véase la Figura 14, lo que parece tener según las simulaciones un efecto negativo en la eficiencia del tratamiento.

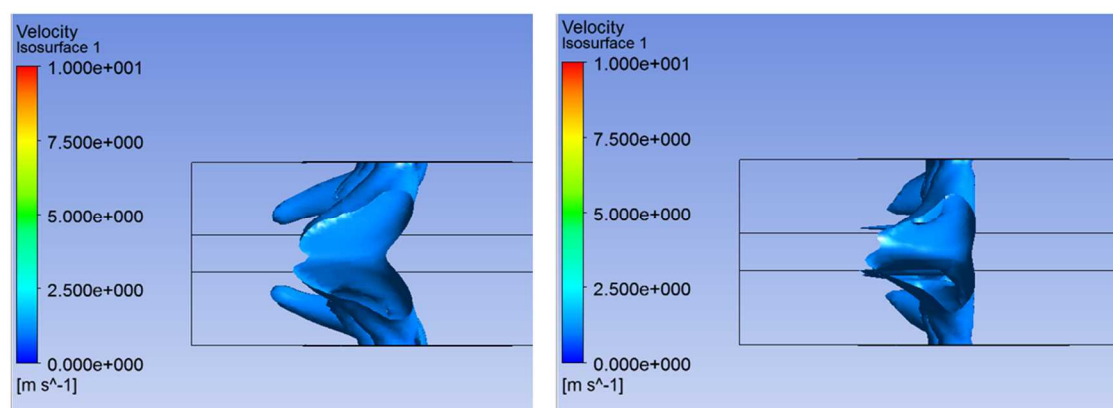


Figura 51. Vista cenital de isosuperficies de velocidad de corrientes de aire 1.5 m s^{-1} . Izquierda: máquina desplazándose a 7.5 km h^{-1} . Derecha: máquina desplazándose a 4.5 km h^{-1} . El caudal de aire generado por la máquina es el mismo en ambos casos.

Varias son las implicaciones de estos resultados. Por un lado, se demuestra que la utilidad de los clásicos modelos CFD estáticos es limitada, pues obviar el movimiento de la máquina supone no tener en cuenta un factor fundamental que afecta a la eficacia de los tratamientos.

Pero por otro, en la práctica, nos vamos a encontrar que la conclusión del estudio no va a ser del agrado de los operadores de los pulverizadores, pues éstos desean manejarlos a la mayor velocidad posible para poder incrementar la ratio hectáreas tratadas/jornada laboral, pues ello hace disminuir los costes operacionales de la máquina. Por ello es más sensato recomendar, si por razones de rendimiento de trabajo, se va a realizar el tratamiento a altas velocidades de desplazamiento, que se configure la máquina para emplear el mayor caudal de aire posible.

No obstante, la combinación alta velocidad con mayor caudal de aire, implica una demanda de potencia al tractor mayor de lo habitual. En cultivos frutales o viñedo, sin embargo, la potencia de los tractores está limitada a su tipología, con tamaños

reducidos adaptados a los anchos de calle y potencias máximas en el entorno de los 110 CV.

9.4. Estudio individualizado de boquillas y deposición

De forma complementaria, el estudio realizado permitió conseguir una información adicional sobre los tratamientos que no estaba entre los objetivos iniciales. El hecho de que los modelos CFD permitan evaluar de forma individualizada la trayectoria y destino final de cada gota simulada, hace que los resultados se puedan agrupar de muchas formas como, por ejemplo, por lugar de impacto, por tamaño de gota o por boquilla de origen.

Estudiando esto último, llegamos a conclusiones interesantes. En la Figura 52 se adjunta un esquema de las boquillas de un bajante, con su eficiencia individual teórica calculada, en la simulación de mayor rendimiento de las 45 realizadas. Como se puede concluir, las boquillas centrales, logran depositar más del 85 % del líquido pulverizado sobre el cultivo considerado (una espaldera de vid de 1 x 0.35, situado a 0.5 metros sobre el suelo); sin embargo, el rendimiento de las otras boquillas, especialmente de la inferior, es francamente malo.

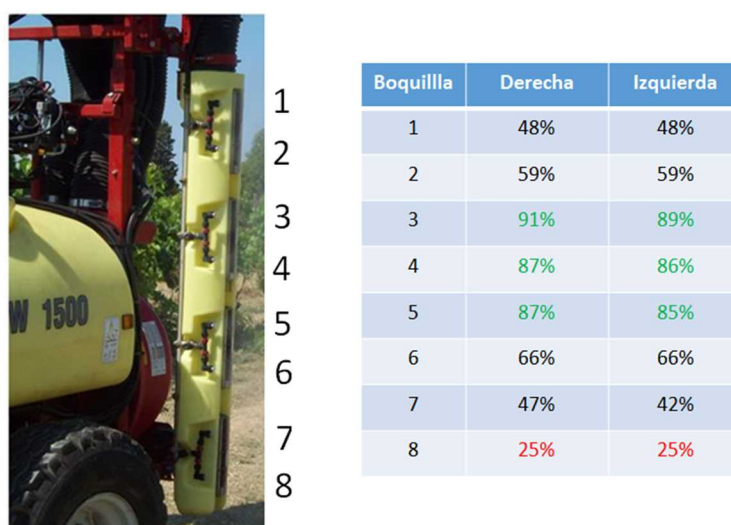


Figura 52. Imagen de un conducto de la máquina estudiada con las boquillas al lado de las toberas de salida de aire, y eficiencia teórica calculada de cada una de ellas.

Por lo tanto, este tipo de análisis por medio de simulaciones CFD, permite detectar errores en el diseño de la máquina, como en este caso la posición y orientación de la boquilla 8. Esto debería ser de grandísima utilidad para el fabricante, pues podría corregir el diseño antes de fabricar la máquina, o establecer, en su defecto, indicaciones concretas al usuario para no usar determinadas boquillas salvo que las dimensiones de su cultivo lo aconsejen.

Si, por otro lado, analizamos la deposición en función de la altura del seto (aspecto viable ya que los resultados de las simulaciones CFD ofrecen los lugares de impacto

de cada gota en el seto, por lo que se puede manejar fácilmente con una hoja de cálculo), también tenemos resultados inesperados. Si para un tratamiento dado, se agrupan el volumen de gotas impactadas cada 2 centímetros de altura del seto de la espaldadera de vid, obtendremos un gráfico similar al de la Figura 53 izquierda.

Aunque un tratamiento puede ser perfectamente satisfactorio con el patrón obtenido, sobre todo si se emplean productos sistémicos (la planta los distribuye por su sistema vascular), las máquinas deberían diseñarse para intentar obtener un patrón más uniforme (de hecho, este aspecto ya fue corregido por el fabricante en la siguiente versión de la máquina). Para establecer una hipótesis sobre el porqué de esta distribución, puede observarse el esquema de la Figura 53 derecha. Las zonas del seto donde la deposición cae bruscamente, coinciden con las zonas del seto donde la incidencia de las corrientes de aire es baja. Dicho de otro modo, las gotas parecen que se agrupan dentro de las corrientes de aire generadas por la máquina. Por lo tanto, uno de los objetivos que se debería marcar el fabricante a la hora de diseñar un pulverizador hidroneumático, es que el aire generado sea lo más uniforme posible en las cercanías del cultivo.

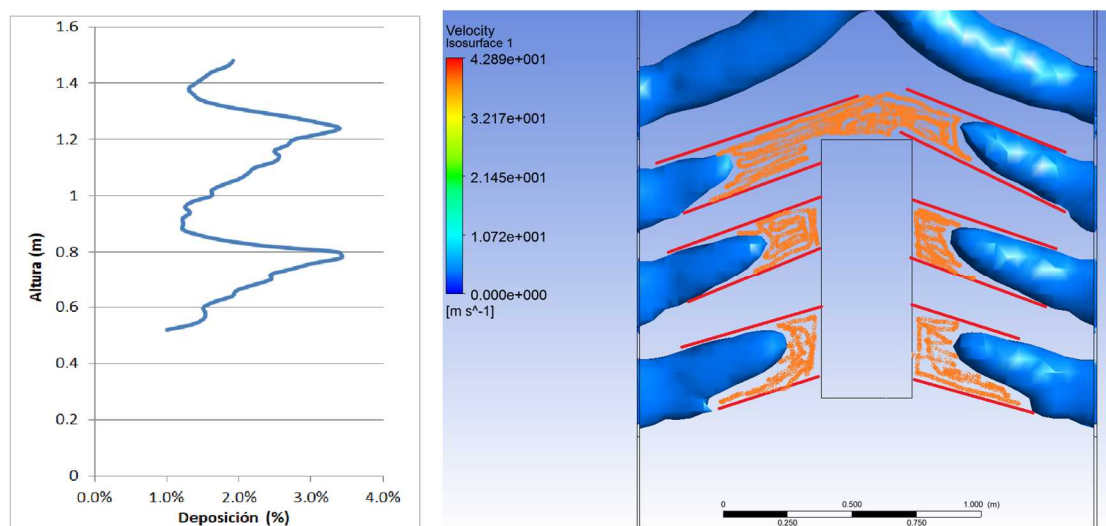


Figura 53. Izquierda: deposición en porcentaje respecto del total de líquido pulverizado que alcanza el seto a lo largo de su altura, por tramos de 2 cm. Derecha: vista transversal del seto con isosuperficie de velocidad de aire generado por la máquina; se representan esquemáticamente las líneas de corriente principales, que nacen en los grupos de toberas. Se infiere una relación entre deposición y corrientes de aire.

En cuanto al estudio de la deposición por diámetros de gota, sólo merece la pena mencionar que se observó cómo pese a que se pulverizó en las simulaciones una distribución Rosin-Rammler, lo que llegó al cultivo no guardó exactamente la misma función de distribución, pues las gotas pequeñas tienen menor probabilidad de llegar al objetivo que las medianas o grandes. Esto era esperable según lo expuesto (Badules, Gil y García-Ramos, 2020), pues se determinó que la pulverización sobre el cultivo mejoraba al aumentar el VMD de la población de gotas pulverizadas.

10. Conclusiones generales

Se recogen a continuación las conclusiones específicas de toda la investigación, que incluye los artículos que forman el compendio de esta tesis.

Las simulaciones CFD del flujo dentro de un depósito en agitación, permiten simular satisfactoriamente el comportamiento general del caldo de una forma más sencilla que de forma experimental. La velocidad media del fluido en el depósito, aumenta cuando lo hace la presión hidráulica de las boquillas de agitación o disminuye el nivel (volumen) de líquido en el depósito. Sin embargo, el número de agitadores dispuestos y/o en funcionamiento no guarda relación directa con la velocidad del líquido en el interior del depósito, pues aquí intervendría como variable la disposición de los mismos: muchos agitadores mal dispuestos pueden agitar peor que pocos bien dispuestos.

La determinación exacta de las velocidades del fluido punto a punto, sin embargo, no es satisfactoria mediante CFD. Menos de un 40 % de los puntos analizados obtienen valores admisibles en la simulación respecto de la realidad. Dado que los valores medios de todo el líquido en el depósito sí son similares a los reales, y la varianza es mucho mayor en la simulación, se concluye que la CFD, para el estudio de líquidos en depósitos de pulverizadores, sobreestima el valor de la velocidad en algunos puntos, subestimándola en otros, de tal forma que, aunque el error promedio ronda el 45 %, unos errores se compensan con otros. Pese a ello la CFD, puede tener utilidad detectando errores de diseño como agitadores mal alineados, rompeolas con pasos erróneamente emplazados, etc.

Dadas estas limitaciones, para un estudio complementario de la agitación del depósito mediante CFD, se puede abordar un enfoque bifásico en el que se analice explícitamente el proceso de mezcla entre producto y agua de dilución. De todos los modelos de física teórica posibles para analizar flujos multifásicos, sólo son satisfactorios algunos Euler-Euler (es decir, los que estudian la fase primaria y la secundaria de forma Euleriana), siendo el más recomendable el denominado “mixture” (o mezcla) ya que obtiene resultados satisfactorios con menor tiempo de cálculo. Este tipo de simulaciones informáticas, pueden imitar al ensayo ISO normalizado de agitación para equipos nuevos, en los que a un depósito lleno con agua limpia se vierte una determinada cantidad de producto, se agita durante 10 minutos, y posteriormente se toman muestras en tres niveles diferentes.

La CFD tiene como ventaja, respecto de la metodología experimental, que se puede monitorizar la concentración de la mezcla en varios puntos a lo largo del tiempo de agitación. Esto permite evaluar la eficacia del sistema de agitación de forma muy sencilla, pues será tanto mejor cuanto menos tiempo tarde en alcanzar la homogeneidad en todos los puntos del depósito. Este conocimiento puede tenerse en la propia fase de diseño del depósito, mediante simulaciones informáticas, sin necesidad de construir ningún prototipo.

Respecto del estudio de flujos de aire producidos por el circuito neumático de los pulverizadores hidroneumáticos, la metodología clásica consistente en medir experimentalmente la velocidad del flujo de aire producido por la máquina en

determinados puntos, para luego ser introducida en un modelo CFD como condición de contorno, no es adecuada si la distancia entre el cultivo y la máquina es escasa (del orden de 0.5 metros). En estas circunstancias, es más conveniente aplicar otra metodología, desarrollada en esta tesis, en la que el aire se define a partir de la geometría de la máquina. El papel de la CFD cambia; no se usa para volcar en el modelo de volúmenes finitos el aire medido experimentalmente como si fuese una condición de contorno, sino que se utiliza la CFD para calcular el flujo y difusión del aire producido dentro de la máquina. De esta manera, se obtiene su caracterización informática desde la misma salida del pulverizador.

A diferencia del estudio de flujos de líquidos, y análogamente a la metodología clásica de caracterización de corrientes de aire, se obtienen errores de menos del 25 %, cifra satisfactoria considerando la precisión habitual de los modelos CFD. Esta metodología, permite reducir la toma de datos experimental a sólo un mínimo imprescindible para comprobar que el modelo se ajusta a la realidad, y permite simular diferentes caudales de aire sin necesidad de nuevas mediciones de velocidades.

El principal problema de esta metodología, es que pequeñas variaciones en la geometría del modelo CFD, pueden provocar grandes diferencias en los resultados obtenidos. Por ello, se debe partir de una geometría lo más exacta posible (siendo lo ideal tener los planos del propio fabricante) y, además, el experto en CFD que desarrolle el modelo informático, debe simplificar en los mallados sólo aquellos elementos de la máquina que no tengan influencia en la formación de las corrientes de aire.

Una vez que se tengan caracterizadas en CFD las corrientes de aire producidas por un pulverizador hidroneumático, puede procederse a realizar simulaciones informáticas del tratamiento, pero antes debe establecerse cómo se van a representar las plantas de cultivo. Este tema es muy importante, pero muy complejo. Trasladar la realidad del comportamiento aerodinámico de una planta, a una simulación CFD, es una tarea de complejidad extrema que *a priori* no lo parece. Aunque a largo plazo, si aumenta la capacidad de cálculo de los ordenadores, se podrán implementar modelos más realistas de cultivos de forma generalizada, hasta la fecha, a efectos prácticos de simulaciones CFD, el problema se aproxima con simplificaciones, bien asimilando los cultivos a medios porosos, bien modelizándolos directamente como sólidos si sus características aerodinámicas son asimilables debido a la alta densidad foliar.

Una vez resuelta la modelización del cultivo, ya sería posible abordar la simulación CFD del tratamiento. Este tipo de simulaciones tiene grandes ventajas respecto de los ensayos experimentales. Por ejemplo, permiten librarse de la falta de control sobre las variables ambientales que influyen significativamente en el tratamiento (temperatura, humedad relativa, viento, etc.). También permiten realizar decenas de pruebas con diferentes configuraciones de tratamiento en tiempo razonable (unos pocos días), cuestión que sería inviable con ensayos experimentales. Y, además, mediante CFD se puede realizar un balance de masas del producto pulverizado de forma relativamente sencilla.

Todo esto permite encontrar una configuración teórica óptima que maximice la eficacia del tratamiento, proporcionando información difícil de obtener de otra forma. Para la máquina utilizada en el estudio, por ejemplo, de conductos verticales adaptada al cultivo, la influencia del caudal de aire soplado es muy baja en las pérdidas por deriva, ya que, por el propio diseño intrínseco de la máquina, las corrientes de un bajante contrarrestan al del opuesto. Sin embargo, el caudal de aire sí tiene importancia en el porcentaje de líquido pulverizado que alcanza el cultivo, siendo mayor a mayor caudal. La velocidad de avance de la máquina, por el contrario, resulta perjudicial en la máquina estudiada. De esta forma, tratamientos con bajos caudales de aire pueden ser satisfactorios si se realizan a bajas velocidades de avance de la máquina, pero no si se requiere realizarlos a alta velocidad. En este aspecto, se puede recomendar contrarrestar la pérdida de eficacia por la velocidad de arrastre de la máquina configurando ésta y el tractor para que generen el máximo caudal de aire posible, aunque eso requiere una mayor demanda de potencia. En la máquina estudiada, también conviene usar boquillas que pulvericen tamaños de gotas grandes (en torno a las 350 μm) antes que finas, ya que se consigue más porcentaje de líquido pulverizado sobre el área del seto de cultivo.

Este tipo de análisis mediante simulaciones informáticas con CFD, también proporciona información adicional prácticamente imposible de obtener experimentalmente, como por ejemplo la eficacia de cada boquilla. En la máquina estudiada, se ha estimado un porcentaje máximo teórico de líquido pulverizado al área de cultivo de en torno a un 60 % del total. Sin embargo, algunas boquillas tienen una eficiencia de más del 85 %, mientras que otras menos del 30 %. Este conocimiento permite al fabricante mejorar el diseño, y al usuario de la máquina ya fabricada, adoptar estrategias para mejorar el tratamiento como por ejemplo disponer un tapón en las boquillas más ineficientes y cuyas gotas pulverizadas no alcanzan mayoritariamente el cultivo.

En resumen, y generalizando para toda la investigación realizada, conociendo las limitaciones de la CFD, ésta es una herramienta que puede facilitar el estudio de los pulverizadores hidroneumáticos, consiguiendo mejores diseños en las máquinas y estudiar cuál es su mejor configuración para maximizar la eficacia de los tratamientos para conseguir disminuir la necesidad de aplicación de productos y ahorrar costes.

11. Propuesta de trabajos futuros

Esta investigación no puede finalizar sin especificar cuáles son las orientaciones que en el futuro se tendrían que dar a otras investigaciones que continúen o profundicen en la que se acaba de presentar.

Comenzando con el estudio de agitación del tanque, el análisis de la mezcla bifásica ha resultado muy satisfactorio, pero no tanto el de la hidrodinámica de la agitación. Pese a que la CFD predice correctamente el mecanismo de agitación, corrientes principales, y valores medios de velocidad del fluido, lo cual ciertamente es interesante para el fabricante en la fase de diseño, la fiabilidad punto a punto de los valores de velocidad estimados en las simulaciones numéricas es baja. El hecho de que menos de un 40 % de los puntos analizados tengan una precisión admisible, y que esta cifra sea similar a estudios similares que nos precedieron, parecen sugerir que la CFD tiene limitaciones con los modelos de viscosidad RANS para el estudio de fluidos líquidos en elementos como los depósitos de los pulverizadores agrícolas. Avanzar en este aspecto, requeriría explorar el cálculo con modelos de viscosidad LES, pero si al hecho de ser por sí más costoso de resolver, le añadimos que requiere mallados más finos, tenemos que la limitación para avanzar en este aspecto, es la potencia de los ordenadores. Este inconveniente se va a repetir con varias de las propuestas que se van a hacer.

En cuanto a los modelos bifásicos, idealmente las soluciones en cuanto a datos hidrodinámicos deberían converger hacia las obtenidas en modelos monofásicos. Una vez que la potencia de los ordenadores permitiera realizar modelos CFD con modelos de viscosidad más sofisticados y con muchas más celdas de modo razonablemente rápido (unos días de cálculo como mucho), serían los modelos indiscutiblemente más ventajosos. Un área de estudio sería comprobar bajo qué condiciones ambos tipos de modelos llegan a obtener los mismos valores de velocidad punto a punto, y además, estas velocidades coinciden con un alto porcentaje de las mediciones reales.

Otro aspecto en el que para avanzar se necesitaría un salto cualitativo en la capacidad de cálculo, sería en el estudio de plantas más reales. Todas las bases de este análisis ya están fundamentadas, y la metodología desarrollada teóricamente. Se necesitan modelos CAD de plantas con sus hojas, y proceder a calcular mallados que explícitamente contengan estas hojas. No sería necesario estudiar la permeabilidad aerodinámica de las plantas, ni emplear estrategias complejas para estimar la captura de gotas, pues estos aspectos quedarían resueltos implícitamente en el modelo.

¿Cuándo se podrá realizar este paso? Según la Ley (heurística) de Moore, la potencia de los ordenadores se ha venido duplicando cada dos años en las últimas décadas. De esta forma, a principios de la próxima década (2030), los ordenadores tendrán 100 veces la potencia de los que se han usado para realizar este trabajo, mientras que para finales de la misma década podríamos estar hablando en teoría de 1,000 veces más. Estas cifras de potencia computacional permitirían sin duda, establecer un nuevo rango de mallados y modelos de física teórica que superarían las limitaciones de los actuales. Sin embargo, las limitaciones de los materiales de la tecnología actual de procesadores (que es el factor limitante en el cálculo), hace que dicha ley esté a

punto de dejar de cumplirse, si no lo ha hecho ya. De hecho, uno de los ordenadores con los que se ha trabajado, adquirido hace 5 años, tiene unas características sólo sensiblemente peores a los que se pueden adquirir por similar precio a día de hoy. El estancamiento en materia de procesadores parece evidente; es más o menos claro que la tecnología de procesadores de transistores de silicio está en las últimas etapas de desarrollo. Y a la vez, la computación cuántica, que parece podría ser el relevo, está en etapas muy incipientes y muy lejos de los mercados domésticos.

En todo momento, esta investigación se ha basado en el empleo de ordenadores convencionales al alcance de cualquiera (con un coste aproximado de 1,000 €), ya que la utilidad práctica del estudio planteado es para un sector de la economía cuyo margen de beneficio está muy ajustado, por lo que se planteó que los recursos empleados tenían que ser del orden de los disponibles para las empresas fabricantes, pues ellas pueden ser las que más aprovechen este estudio y lo continúen. Si se quisiera avanzar ya mismo, se podría hacer en el ámbito de la universidad mediante el empleo de clústeres de cálculo o supercomputación. En cualquier otro caso, es utópico plantearse cualquier avance en este tipo de cálculos en un mínimo de 10 años.

Otro aspecto, que presenta la misma limitación, y que esta tesis ni siquiera ha llegado a valorar, es el diseño de las boquillas de pulverización. Para realizar simulaciones CFD de tratamientos es suficiente, como se ha hecho aquí, conocer los tamaños de gota y distribución de las mismas, información que los fabricantes proporcionan tras analizarlas con diversas tecnologías como el LIDAR. Pero sin duda sería una herramienta interesante para ellos disponer de metodologías que permitan simular el funcionamiento de dichas boquillas antes de fabricarlas. Las bases para realizar estos estudios CFD están claras, pero se necesita más potencia de cálculo para poder realizarlos.

De esta manera, vamos, en lo que queda, a realizar propuestas que sí pueden desarrollarse con la tecnología actual disponible en ordenadores comunes.

En primer lugar, tendríamos la aplicación de la metodología de simulación de aire desarrollada en esta tesis (a partir de la geometría de la máquina y no a partir de las mediciones experimentales) a pulverizadores hidroneumáticos clásicos, de ventilador trasero que proporcionan un flujo radial. Este cálculo, aunque computacionalmente más costoso que en el caso de pulverizadores de toberas o aire canalizado, sigue siendo viable con ordenadores convencionales actuales. Con este tipo de cálculos se podría fácilmente comprobar la variación en el flujo que produce un cambio de régimen de giro en el ventilador, así como el efecto de disponer deflectores u otros elementos de canalización del flujo. Podría convertirse en una metodología estándar para los fabricantes en fase de diseño, muy útil sobre todo para descartar diseños poco satisfactorios sin necesidad de fabricar prototipos.

Otro campo de avance, que no requiere desarrollar ninguna técnica más a las que se han descrito, es el estudio de la evaporación de las gotas y su influencia en la eficiencia del tratamiento. Este fenómeno depende de la humedad relativa y de la temperatura, y hace disminuir el tamaño de las gotas hasta el extremo de vaporizarlas por completo. Aún en el caso de no vaporizarlas, la disminución del

tamaño, puede ocasionar que las gotas queden más a merced de la deriva por el viento externo o a las corrientes de aire del propio pulverizador. La introducción de este fenómeno en las simulaciones CFD, requiere activar el cálculo de la ecuación de la energía (ecuación 7), pero en las pruebas internas realizadas al respecto en esta investigación, no se ha encontrado que ello implique aumentos considerables de tiempo de cálculo ni problemas de convergencia adicionales durante las iteraciones.

Este estudio puede tener mucho interés en determinados casos, por ejemplo, en viñedo, en explotaciones grandes y en las condiciones de muchas zonas vitivinícolas de España. Es un hecho que las olas de calor son más habituales de lo que eran hace varias décadas, y a la vez, muchos de los tratamientos a realizar en viñedos tienen que realizarse en los meses de verano. Si bien se está observando una tendencia a trabajar en las primeras horas de la mañana o incluso de madrugada para algunas tareas, esta gestión puede no ser viable en grandes explotaciones, en las que por razones de extensión y maquinaria disponible, no sea posible trabajar íntegramente en las horas más propicias del día. Disponer un estudio que cuantifique si existe unas condiciones de temperatura y humedad relativa a partir de las cuales la eficiencia del tratamiento cae drásticamente podría ser muy interesante para poder tomar decisiones económicas, como alquilar maquinaria complementaria para conseguir realizar los tratamientos en las horas más frescas, cambiar las boquillas de pulverización por otras que pulvericen tamaños de gota mayores, etc.

También sería interesante explorar la posibilidad de establecer metodologías que permitieran aproximar la cobertura (porcentaje de área de las hojas que resulta cubierta de gotas) mediante CFD. La CFD no tiene dificultad en estimar la cantidad de líquido pulverizado que alcanza el cultivo (hacer un balance de masas de la pulverización), en contraposición a la determinación experimental. Sin embargo, no se puede calcular de forma directa la cobertura de las hojas con CFD. Esto es debido a que es computacionalmente imposible estudiar en modelos Euler-Lagrange todas las gotas pulverizadas: sólo es posible estudiar decenas, o en todo caso cientos de miles de gotas que, siendo una cantidad grande, es ridícula en comparación con los más de 100 millones de gotas de 250 μm que pueden salir de 1 L de líquido. Pero sí se puede controlar cuantas “gotas modelo” atraviesan un determinado plano, que podría asimilarse a unas dimensiones de una hoja. Esta superficie de control, de medidas similares a una hoja, podría disponerse en varias orientaciones para cubrir un rango de posiciones de hojas. Debería comprobarse en estudios experimentales si sería posible determinar alguna correlación simple entre datos obtenidos en CFD y realidad en este parámetro.

Otros frentes que quedan abiertos y en los que se puede avanzar con los ordenadores actuales son los estudios de deriva por viento externo y profundizar en modelos de captura de gotas en medios porosos de CFD.

La modelización de las plantas como medio poroso es una estrategia con fecha de caducidad en varias décadas, pues cuando los ordenadores puedan realizar mallados complejos que contengan las hojas del cultivo, dejará de tener sentido. Sin embargo, para realizar simulaciones CFD de cultivos de poca densidad foliar, a día de hoy son imprescindibles. Pueden ser (con las debidas cautelas) válidos para la caracterización aerodinámica en CFD, pero tienen problemas para implementar la captura de gotas.

Se ha sugerido (Endalew et al., 2010c) que la alteración por parte del usuario de los factores fuente/sumidero de las ecuaciones de Navier-Stokes puede dar buenos resultados para este fin. Pero no se conoce que esta metodología se haya podido replicar, ni por parte del autor de este trabajo ni por otros investigadores. La propuesta que se hace iría pues más bien en el sentido de desarrollar algoritmos, bien en lenguajes de programación, bien integrados en hojas de cálculo, que permitan automatizar el post-proceso de datos, que suponemos es lo que realizan otros autores (véase Figura 20 de Hong, Zhao y Zhu, 2017b, donde las plumas de gotas pulverizadas, aparentemente atraviesan los medios porosos con los que se han definido las copas de los árboles simulados). Dado que no parece posible que los medios porosos capturen gotas en los modelos DPM, se podrían establecer “planos de control” en el modelo, que monitoricen las gotas cuando sean atravesados por éstas. Estos planos estarían en el interior de las copas o setos de vegetación. Concretamente, se debería poder comparar el punto de paso de la gota por el plano, con las coordenadas de los árboles. Debería ser el algoritmo el que de forma automática determinase qué gotas serían atrapadas, dónde y cuáles no. Así se podría determinar qué gotas acaban en el suelo, e incluso si hay alguna gota que es capturada por otra fila de cultivo.

Finalmente, tenemos el estudio del aire atmosférico y su influencia en la deriva en el interior de la parcela considerando las filas de cultivo. Si bien existen ya estudios previos aparentemente similares en este aspecto (Endalew et al., 2010a; Hong, Zhao y Zhu, 2017b), creemos con lo razonado en el apartado 8.2 que el problema es mucho más complejo y requiere de más estudios en este aspecto, pues si el viento no sopla en dirección longitudinal a las filas de cultivo, dentro de la parcela no tiene nada que ver con el exterior. También la topografía de la parcela puede resultar determinante a la hora de alterar el perfil de velocidades del viento. Como se apuntó en el correspondiente apartado, el avance podría venir por dos frentes diferentes: por el estudio del viento en el interior de la parcela, o bien por el desarrollo de mallas dinámicas que permitan introducir la simulación del pulverizador en movimiento dentro del mallado, a la vez que el viento pueda introducirse fácilmente desde una condición de contorno que representaría el exterior de la parcela. Ambos caminos son difíciles, ya que no sería fácil en el primero, implementar las corrientes convectivas que probablemente se darán entre (o sobre) las filas de cultivos, mientras que el segundo requiere de mayor tiempo de cálculo, mallados con mayor número de celdas y además probablemente presentará problemas de convergencia.

El desarrollo de las propuestas realizadas que no necesitan más potencia de cálculo, es suficiente para al menos, realizar varias publicaciones en revistas técnicas como las presentadas como compendio en esta tesis.

12. Referencias

Ako, P. (2011). *Development of a model to predict spray deposition in air-carrier sprayer applications*. Doctoral thesis. University of Florida.

Altimira, M., Rivas, A., Larraona, G.S., Anton R. y Ramos, J.C. (2009). "Characterization of fan spray atomizers through numerical simulation". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, pp. 339–355. DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.12.006.

Al-Jumaili A. y Salyani, M. (2014). "Wind Effect on the Deposition of an Air-Assisted Sprayer". *2014 ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting*. Montreal, Quebec, Canada, 13 – 16 July.

ANSYS. (2009). *Training Manual. Introduction to FLUENT. Release: 12.0. 1st Edition* Canonsburg, Pennsylvania: ANSYS Inc.

Bache, D.H. y Johnstone, D.R. (1992). *Microclimate and Spray Dispersion*. Hemel Hempstead, United Kingdom: Ellis Horwood.

Badules, J., Gil, E. y García-Ramos, F.J. (2020) "Simulation of pesticide application in vineyards using CFD: Study of off-target losses and treatment optimization". *Aspects of Applied Biology*, 144, pp. 229-239.

Badules, J., Vidal, M., Boné, A., Llop, J., Salcedo, R., Gil, E. y 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, pp.166-174.

Badules, J., Vidal, M., Boné, A., Gil, E. y García-Ramos, F.J. (2019) "CFD Models as a tool to analyze the performance of the hydraulic agitation system of an air-assisted sprayer". *Agronomy*, 9 (11), p. 769.

Badules, J., Vidal, M., Boné, A., Gil, E. y García-Ramos, F.J. (2020) "Biphasic computational fluid dynamics modelling of the mixture in an agricultural sprayer tank". *Molecules*, 25, p. 1870.

Baetens, K., Ho, Q.T., Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Endalew, A.M., Hertog M.L.A.T.M., Nicolaï, B., Ramon, H. y Verboven, P. (2009). "A validated 2-D diffusion–advection model for prediction of drift from ground boom sprayers". *Atmospheric Environment*, 43, pp. 1674–1682.

Bakker, A. (2004). *Applied Computational Fluid Dynamics. Lecture 15 - Discrete Phase Modeling*. Fluent Inc. Disponible en www.bakker.org/dartmouth06/engs150/15-dpm.pdf [consultado en mayo de 2017]

Baker, T. (2005). "Mesh generation: Art of Science?" *Progress in Aerospace Sciences*, 41, pp. 29-63. DOI:10.1016/j.paerosci.2005.02.002.

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

Belcher, S. E., Jerram, N. y Hunt J.C.R. (2003). "Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements". *Journal of Fluid Mechanics*, 488, pp. 369-398 DOI:10.1017/S0022112003005019.

Blocken, B., Stathopoulos, T. y Carmeliet, J. (2007). "CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wallfunction problems". *Atmospheric Environment*, 41(2), pp. 238-252.

Bor, Y.J. (1995). "Optimal pest management and economic threshold". *Agricultural Systems*, 49 (2), pp. 113-133. DOI: 10.1016/0308-521X(94)00043-Q.

Bourodimos, G., Koutsiaras, M., Psiroukis, V., Balafoutis, A. y Fountas, F. (2019). "Development and field evaluation of a spray drift risk assessment tool for vineyard spraying application". *Agriculture*, 9, (181). DOI: 10.3390/agriculture9080181

Celen, I.H., Arin, S. y Durgut, M.R. (2008). "The effect of the airblast sprayer speed on the chemical distribution in vineyard". *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11, pp. 1472-1476.

Chen, M., Niao, B., Pan, J., Li, Q. y Gao, C. (2006). "Improvement of the flow rate distribution in quench tank by measurement and computer simulation". *Materials Letters*, 60, pp. 1659-1664.

Chen, Y., Ozkan, H.E., Zhu, H., Derksen, R.C. y Krause, C.R. (2013). "Spray deposition inside tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer". *Transactions of ASABE*, 56 (6), pp. 1263-1272. DOI 10.13031/trans.56.9839.

Comisión Europea. (2020). "Estrategia 'de la granja a la mesa' para un sistema alimentario justo, saludable y respetuoso con el medio ambiente". Disponible en <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0381>. [Consultado el 28-09-2020].

Connell, R.J., Endalew, A.M. y Verboven, P. (2011). "CFD Modelling of Kiwifruit Vines and Leaves: A method of handling multiple thin surfaces". *19th International Congress on Modelling and Simulation*, Perth, Australia, 12–16 December.

Cooper, J. y Dobson, H. (2007). "The benefits of pesticides to mankind and the environment". *Crop Protection*, 26 (9), pp. 1337-1348. DOI: 10.1016/j.cropro.2007.03.022

Cross, J.V., Walklate, P.J., Murray, R.A. y Richardson, G.M. (2003). "Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 3. Effects of air volumetric flow rate". *Crop Protection*, 22, pp. 381-394.

Da Silva, A., Sinfort, C., Tinet, C., Pierrat, D. y Huberson, S. (2006). "A Lagrangian model for spray behaviour within vine canopies". *Journal of Aerosol Science*, 37, pp. 658-674.

Davidson, P.A. (2015). *Turbulence: an introduction for scientists and engineers*. (2nd ed.) Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.

Dekeyser, D., Duga, T.A., Verboven, P., Endalew, M.A., Hendrickx, N. y Nuyttens, D. (2013). "Assessment of orchard sprayers using laboratory experiments and computational fluid dynamics modelling". *Biosystems Engineering*, 114, pp. 157-169.

Delele, M.A., De Moor, A., Sonck, B., Ramon, H., Nicolai, B.M. y Verboven, P. (2005). "Modelling and validation of the air flow generated by a cross flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed". *Biosystems Engineering*, 92 (2), pp. 165–174.

DEFRA (2011). *Options for the development of a model for evaluation of bystander and resident exposures to pesticides used in orchard, hop and bush fruit application*. Research Project Final Report. London: Department for Environment Food and Rural Affairs.

Duga, A.T., Dekeyser, D., Ruysen, K., Bylemans, D., Nuyttens, D., Nicolai, B.M. y Verboven, P. (2015a). "Numerical Analysis of the Effects of Wind and Sprayer Type on Spray Distribution in Different Orchard Training Systems". *Boundary-Layer Meteorology*, 157, pp. 517–535. DOI: 10.1007/s10546-015-0064-2.

Duga, A.T., Delele, M.A., Ruysen, K., Dekeyser, D., Nuyttens, D., Bylemans, D., Nicolai, B.M. y Verboven, P. (2017). "Development and validation of a 3D CFD model of drift and its application to air-assisted orchard sprayers". *Biosystems Engineering*, 154, pp. 62-75. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.010.

Duga, A.T., Ruysen, K., Dekeyser, D., Nuyttens, D., Bylemans, D., Nicolai, B.M. y Verboven, P. (2015b). "Effects of sprayer design, training system and tree canopy characteristics". *Crop Protection*, 67, pp. 200-213. DOI: 10.1016/j.cropro.2014.10.016.

Doruchowski, G., Świechowski, W., Masny, S., Maciesiak, A., Tartanus, M., Bryk, H. y Hołownicki, R. (2017). "Low-drift nozzles vs. standard nozzles for pesticide application in the biological efficacy trials of pesticides in apple pest and disease control". *Science of The Total Environment*, 575, pp. 1239-1246. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.200.

Endalew, A.M., Debaer, C., Rutten, N., Vercammen, J., Delele, M.A. y Ramon, H. (2010a). "A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow". *Computers and Electronics in Agriculture*, 71, pp. 128-136.

Endalew, A.M., Debaer, C., Rutten, N., Vercammen, J., Delele, M.A. y Ramon, H. (2010b). "A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying - part II: validation for different sprayer types". *Computers and Electronics in Agriculture*, 71, pp. 137-147.

Endalew, A.M., Debaer, C., Rutten, N., Vercammen, J., Delele, M.A. y Ramon, H. (2010c). "Modelling pesticide flow and deposition from air-assisted orchard spraying in orchards: a new integrated CFD approach". *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, pp. 1383-1392.

Endalew, A.M., Hertog, M., Delele, M., Baetens, K., Persoons, T., Baelmans, M., Ramon, H., Nicolaï, B. y Verboven, P. (2009). "CFD modelling and wind tunnel validation of airflow through plant canopies using 3D canopy architecture". *International Journal of Heat Fluid Flow*, 30, pp. 356–368.

Fluent. (2014). *ANSYS Fluent Documentation 15.0*. Canonsburg, Pennsylvania: ANSYS Inc.

Galamboš, S., Dorić, J. y Ružić, D. (2016). "Wind effects on the agricultural spraying using CFD simulations". *International Congress Motor Vehicles & Motors 2016*, Kragujevac, Serbia, 6-8 October.

García-Ramos, F.J., Badules, J., Bone, A., Gil, E., Aguirre, J. y Vidal, M. (2018). "Application of an acoustic Doppler velocimeter to analyse the performance of the hydraulic agitation system of an agricultural sprayer". *Sensors*, (11), p. 3715.

García-Ramos, F.J., Malón, H., Aguirre, J., Boné, A., Puyuelo, J. y Vidal, M. (2015). "Validation of a CFD Model by Using 3D Sonic Anemometers to Analyse the Air Velocity Generated by an Air-Assisted Sprayer Equipped with Two Axial Fans". *Sensors*, 15, pp. 2399-2418.

Gil, E., Balsari, P., Gallart, M., Llorens, J., Marucco, P., Andersen, P.G., Fàbregas, X. y Llop, J. (2014) "Determination of drift potential of different flat fan nozzles on a boom sprayer using a test bench". *Crop Protection*, 56, pp. 56-68. DOI: 10.1016/j.cropro.2013.10.018.

Gil, E., Campos, J., Ortega, P., Llop, J., Gras, A., Armengol, E., Salcedo, R. y Gallart, M. (2019). "DOSAVIÑA: Tool to calculate the optimal volume rate and pesticide amount in vineyard spray applications based on a modified leaf wall area method". *Computers and Electronics in Agriculture*, 160, pp. 117-130. DOI: 10.1016/j.compag.2019.03.018.

Gil, E., Llop, J., Gallart, M., Valera, M. y Llorens, J. (2015). "Design and evaluation of a manual device for air flow rate adjustment in spray application in vineyard". *SuproFruit 2015-13th Workshop on Spray Application in Fruit Growing*. Lindau (Germany), 15-18 Jul.

Gil, E., Llorens, J., Gallart, M., Gil-Robles, J. y Miranda-Fuentes, A. (2018). "First attempts to obtain a reference drift curve for traditional olive grove's plantations following ISO 22866". *Science of The Total Environment*, 627, pp. 349-360. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.229.

Gil, E., Salcedo, R., Campos, J., Llop, J., Ortega, P. y Gallart, M. (2018). "Orchard sprayer's evaluation according ISO 16119-3. Need to support manufacturer's procedure". *Aspects of Applied Biology*, 137, pp. 37-43.

Goering, C.E. y Butler, B. (1975). "Paired field studies of herbicide drift". *Transactions of ASAE*, 18, pp. 27-34.

Granell, R. (2014). *Análisis del flujo ambiental y propuesta metodológica para simulaciones CFD aplicadas a la ventilación natural de invernaderos*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en <https://riunet.upv.es/handle/10251/37194> [consultado en octubre de 2019].

Grella, M., Gallart, M., Marucco, P. y Gil, E. (2017a). "Ground deposition and airborne spray drift assessment in vineyard and orchard: the influence of environmental variables and sprayer settings". *Sustainability*, 9(5), p.728. DOI:10.3390/su9050728.

Grella, M., Gil, E., Balsari, P., Marucco, P. y Gallart, M. (2017b). "Advances in developing a new test method to assess spray drift potential from air blast sprayers". *Spanish Journal of Agricultural Engineering*, 15(3), p. e0207. DOI: 10.5424/sjar/2017153-10580

Hofman, V. y Solseng, E. (2001). "Reducing spray drift". Publication AE-1210. North Dakota State University Extension Service. Fargo (North Dakota, USA). Disponible en <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/ageng/machine/ae1210.pdf> [consultado en junio de 2020].

Hong, S.W., Lee, I.B., Seo, I.H. y Bitog, J.P.P. (2011) "CFD modelling of livestock odour dispersion over complex terrain, part II: Dispersion modelling". *Biosystems Engineering*, 108, pp. 265-279. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2010.12.008.

Hong, S.W., Zhao, L. y Zhu, H. (2017a). "CFD simulation of airflow inside tree canopies discharged from air-assisted sprayers". *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, pp. 121-132. DOI:10.1016/j.compag.2017.07.011.

Hong, S.W., Zhao, L. y Zhu, H. (2017b). "CFD simulation of pesticide spray from air-assisted sprayers in an apple orchard: tree deposition and off-target losses". *Atmospheric Environment*, 175, pp. 109-119. DOI:10.1016/j.atmosenv.2017.12.001.

Hong, S.W., Zhao, L. y Zhu, H. (2018). "SAAS, a computer program for estimating pesticide spray efficiency and drift of air-assisted pesticide applications". *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, pp. 58-68. DOI:10.1016/j.compag.2018.09.031.

ISO. (1997). *Equipment for crop protection - Spraying equipment - Part 2: Test methods for hydraulic sprayers; ISO 5682-2*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

ISO. (2000). *Equipment for crop protection - Test methods for air-assisted sprayers for bush and tree crops; ISO 9898:2000*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

ISO. (2005). *Equipment for crop protection - Methods for field measurement of spray drift; ISO 22866:2005*. Geneva, Switerland: International Organization for Standardization.

ISO. (2013). *Agricultural and forestry machinery - Environmental requirements for sprayers - Part 3: Sprayers for bush and tree crops; ISO 16119-3*. Geneva, Switerland: International Organization for Standardization.

Landry, H. y Wolf, T.M. (2019). "An investigation of airflow patterns created by high-clearance sprayers during field operations". *Canadian Biosystems Engineering/Le génie des biosystèmes au Canada*, 61, pp. 2.01–2.12. DOI:10.7451/CBE.2019.61.2.01.

Launder, B. y Spalding, D. (1972). *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. London: Academic Press. <https://doi.org/10.1002/zamm.19730530619>.

Launder, B.E., Reece, G.J. y Rodi, W. (1975). "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulent Closure". *Journal of Fluid Mechanics*, 68, pp. 537-566.

Ma, J. y Srinivasa, M. (2008). "Particulate modeling in ANSYS CFD". *2008 International ANSYS Conference*. Disponible en <https://dokumen.tips/documents/2008-international-ansys-conference-international-ansys-conference-macroscopic.html> [consultado en marzo de 2019].

Márquez, L. (2005). "El control de la deriva en la aplicación de fitosanitarios. Las boquillas de baja deriva". *Agrotécnica*, 4, pp. 38-43.

Maybank, J., Yoshida, K. y Grover, R. (1978). "Spray drift from agricultural pesticide applications". *Journal of the Air Pollution Control Association*, 28, pp. 1009-1014.

McConnell, L.L., Kelly, I.D. y Jones, R.L. (2016). "Integrating Technologies to Minimize Environmental Impacts". *Agricultural Chemicals and the Environment: Issues and Potential Solutions* (2), pp. 1-19. DOI: 10.1039/9781782626916-00001

Menter, F.R. (1994). "Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows". *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. Disponible en <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19960044572.pdf> [consultado en enero 2020]

Micheli, G.B., Padilha, A. y Scalón, V.L. (2015). "Numerical and experimental analysis of pesticide spray mixing in spray tanks". *Engenharia agrícola*, 35(6), pp. 1065-1078. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p1065-1078/2015>.

Miller, P.C.H. y Smith, R.W. (1997). "The effects of forward speed on the drift from boom sprayers". *The 1997 Brighton Crop Protection Conference- Weeds*. Brighton (UK). 17-20 November, pp. 399-406

Ministerio de la Presidencia. (2013). *Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios*. Boletín Oficial del Estado.

- Miranda-Fuentes, A., Rodríguez-Lizana, A., Gil, E., Agüera-Vega, J. y Gil-Ribes, J. (2015). "Influence of liquid-volume and airflow rates on spray application quality and homogeneity in super-intensive olive tree canopies". *Science of the Total Environment*, 537(15), pp. 250-259. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.012.
- Mochida, A., Tabata, Y., Iwata, T. y Yoshino, I. (2008). "Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, pp. 1667–1677. DOI:10.1016/j.jweia.2008.02.055.
- Molari, G., Benini, L. y Ade, G. (2005). "Design of a recycling tunnel sprayer using CFD simulations". *Transactions of the ASAE*, 48(2), pp. 463–468.
- Moltó, E., Garcerá, C. y Chueca, P. (2011). "Balance de masas en las aplicaciones de fitosanitarios en cítricos". *Levante agrícola. Revista internacional de cítricos*, 405, pp. 79-87.
- Musiu, E.M., Qi, L. y Wu, Y. (2019). "Evaluation of droplets size distribution and velocity pattern using Computational Fluid Dynamics modelling". *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, 104886. DOI:10.1016/j.compag.2019.104886.
- Nadeem, M., Nguyen-Quang, T., Diallo, C., Venkatadri, U. y Havard, P. (2019) "Contribution to spraying nozzle study: A comparative investigation of imaging and simulation approaches". *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. Vol. 56(1), pp. 215-224. DOI:10.21162/PAKJAS/19.7750.
- Nuytens, D., Sonck, B., Schampheleire, M., Steurbaut, W., Baetenes, K., Verboven, B., Nicolaï, B. y Ramon, H. (2005). "Laser-based Characterisation of Agricultural Sprays". *VIII Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing*. Barcelona, 29 jun – 1 jul, pp. 217-229
- Ostlie, K.R. y Pedigo, L.P. (1987). "Incorporating Pest Survivorship into Economic Thresholds". *Bulletin of the Entomological Society of America*, 33 (2), pp. 98-102. DOI: 10.1093/besa/33.2.98
- Ozkan, H.E. y Ackerman, K.K. (1999). "Instrumentation for measuring mixture variability in sprayer tanks". *Applied Engineering in Agriculture*, 15 (1), pp. 19-24.
- Parlamento Europeo. (2009a). *Directiva 2009/128/CE. Marco de la actuación comunitaria para conseguir un uso sostenible de los plaguicidas*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Parlamento Europeo (2009b). *REGLAMENTO (CE) Nº 1107/2009 relativo a la comercialización de productos fitosanitarios y por el que se derogan las Directivas 79/117/CEE y 91/414/CEE del Consejo*. Diario Oficial de la Unión Europea
- Pergher, G. y Petris, R. (2007). "Canopy structure and deposition efficiency of vineyard sprayers". *Journal of Agricultural Engineering*, 38 (2), pp. 31-38. DOI:10.4081/jae.2007.2.31.

Pergher, G. y Zucchiatti, N. (2018). "Influence of canopy development in the vineyard on spray deposition from a tunnel sprayer". *Journal of Agricultural Engineering*. 49 (3) pp. 164-173. DOI:10.4081/jae.2018.801.

Pratt, J.P., Maber, J.F. y Manktelow, D.W.L. (2000). "The effect of canopy development and sprayer position on spray drift from a pipfruit orchard". *New Zealand Plant Protection*. 53, pp. 241-247.

Reddy, P.P. (2016). *Sustainable Crop Protection under Protected Cultivation*. Singapore: Springer.

Reynolds, O. (1883). "On the experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 174, pp. 935-982. DOI:10.1098/rstl.1883.0029.

Richardson, L. (1910). "The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, pp. 307-357. DOI:10.1098/rsta.1911.0009.

Roten, R.L., Post, S.L., Werner, A., Hewitt, A.J. y Safa, M. (2016). "Volumetric validation of mass balance using a computational phase Doppler approach for disc core nozzles". *Crop Protection*, 79, pp. 128-134. DOI: 10.1016/j.cropro.2015.10.018.

Salcedo, R. (2015). *Modelos CFD para el flujo del aire y la distribución de las gotas de un turboatomizador durante las aplicaciones en cítricos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Salcedo, R., Granell, R., Garcerá, C., Palau, G., Moltó, E. y Chueca P. (2013). "Validation of a CFD model of the effect of an orange tree canopy on the air flow produced by an air-blaster sprayer". *12th International Workshop on Sustainable Plant Protection Techniques in Fruit Growing (SuproFruit2013)*. IVIA, Valencia (Spain), 26-28 June. pp: 95-97.

Salcedo, R., Pons, P., Llop, J., Zaragoza, T., Campos, J., Ortega, P., Gallart, M. y Gil, E. (2019). "Dynamic evaluation of airflow stream generated by a reverse system of an axial fan sprayer using 3D-ultrasonic anemometers. Effect of canopy structure". *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104851. DOI: 10.1016/j.compag.2019.06.006.

Salcedo, R., Llop, J., Campos, J., Costas, M., Gallart, M., Ortega, P. y Gil, E. (2020). "Evaluation of leaf deposit quality between electrostatic and conventional multi-row sprayers in a trellised vineyard". *Crop protection*, 127, 104964. DOI: 10.1016/j.cropro.2019.104964.

Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. y Zhu, J. (1995). "A new k- ϵ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows". *Computers and Fluids*, 24(3), pp. 227-238.

- Spalart, P. y Allmaras, S. (1992). "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows". *American Institute of Aeronautics and Astronautics 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, USA. 6-9 Jan. DOI: 10.2514/6.1992-439.
- Szabo, G. y Kristof, G., (2010). "Three-dimensional numerical flutter simulation". *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)* Chapel Hill, North Carolina, USA. 23-27 May.
- Tamagnone, M., Balsari, P., Bozzer, C. y Marucco, P. (2012). "Assesment of parameters needed to design agitation systems for sprayer tanks". *Aspects of Applied Biology*, 114, 167-174.
- Teske, M.E. (1996). "An introduction to aerial spray modeling with FSCBG". *Journal of the American Mosquito Control Association*, 12(2), pp. 353-358.
- Teske, M.E., Thistle, H.W. y Schou, W.C. (2011). "A review of computer models for pesticide deposition prediction". *Transactions of the ASABE*, 54(3), pp. 789-801.
- Thistle, H.W. (2004). "Meteorological concepts in the drift of pesticides". *International Conference on Pesticide Application for Drift Management*. Waikoloa (Hawaii, USA), 27-29 October, pp. 156-162.
- Tsay, J.R., Liang, L.S. y Lu, L.H. (2004). "Evaluation of an air-assisted boom spraying system under a no-canopy condition using CFD simulation". *Transactions of ASAE*, 47(6), pp. 1887-1897.
- Ucar, T., Fox, R.D., Ozkan, H.E. y Brazee, R.D. (2001). "Simulation of jet agitation in sprayer tanks: comparison of predicted and measured water velocities". *Transactions of the ASAE*, 44, (2), pp. 223-230.
- Valero, C., Diezma, B., Moya, A., Correa, C., Garrido, M., Gracia, C., Fernández, E. y Barreiro, P. (2012). "Hardi Iris-2, calidad visible". *Vida Rural*, julio 2012, pp. 16-26.
- Van de Zande, J.C., Stallinga, H., Michielsen, J.M.G. y Van Velde, P. (2004). "Effects of sprayer speed on spray drift". *International Conference on Pesticide Application for Drift Management*, Waikoloa (USA), 27-29 October, p. 339.
- Vázquez, J. (2003). *Aplicación de productos fitosanitarios. Técnicas y equipos*. Madrid: Ediciones Agrotécnicas.
- Versteeg, H.K. y Malalasekera, W. (1995). *An introduction to Computational Fluid Dynamics. The finite volume method*. Harlow, Essex, United Kingdom: Longman Scientific & Technical.
- Vondricka, J. y Schulze, P. (2009). Measurement of mixture homogeneity in direct injection systems. *Transactions of the ASABE*, 52(1), pp. 61-66.
- Vulgarakis, S., Cointault, F., Vangeyte, J., Pieters, J.G. y Nuytens, D. (2016). "Spray Droplet Characterization from a Single Nozzle by High Speed Image Analysis Using an In-Focus Droplet Criterion". *Sensors*, 16 (2), p. 218. DOI:10.3390/s16020218.

Wilcox, D.C. (1988). "Re-assessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models". *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 26, pp. 1299-1310.

Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. y Speziale, C.G., (1992). "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique". *Physics of Fluids*, 4(7), pp. 1510-1520.

Yang, F., Xue, X., Cai, C., Sun, Z. y Zhou, Q. (2018). "Numerical simulation and analysis on spray drift movement of multicopter plant protection Unmanned Aerial Vehicle". *Energies*, 11, p. 2399. DOI:10.3390/en11092399.

Yates, W.E., Cowden, R.E. y Akesson, N.B. (1983). "Nozzle orientation, air speed and spray formulation affects on drop size spectrums". *Transactions of ASAE*, 26(6), pp. 1638-1643.

Yi, C. (2008). "Momentum transfer within canopies". *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, pp. 262-275.

ANEXO

Artículos publicados

Información de las publicaciones:

Publicación: *Sensors*
ISSN: 1424-8220
Año publicación: 2018
DOI: 10.3390/s18113715
Factor de impacto (JCR): 3.031
Cuartil (área): Q1 (Instruments & instrumentation)
Q2 (Chemistry, Analytical)

Publicación: *Agronomy*
ISSN: 2073-4395
Año publicación: 2019
DOI: 10.3390/agronomy9110769
Factor de impacto (JCR): 2.603
Cuartil (área): Q1 (Agronomy)
Q2 (Plant sciences)

Publicación: *Molecules*
ISSN: 1420-3049
Año publicación: 2020
DOI: 10.3390/molecules25081870
Factor de impacto (JCR): 3.267
Cuartil (área): Q2 (Biochemistry & Molecular Biology; Chemistry, Multidisciplinary)

Publicación: *Computers and Electronics in Agriculture*
ISSN: 0168-1699
Año publicación: 2018
DOI: 10.1016/j.compag.2017.09.026
Factor de impacto (JCR): 3.171
Cuartil (área): Q1 (Agriculture, multidisciplinary)
Q2 (Computer science, Interdisciplinary applications)

Publicación: *Aspects in Applied Biology*
ISSN: 0265-1491
Año publicación: 2020
Número: 144, International Advances in Pesticide Application
Páginas: 229-239

Article

Application of an Acoustic Doppler Velocimeter to Analyse the Performance of the Hydraulic Agitation System of an Agricultural Sprayer

F. Javier García-Ramos ^{1,*}, Jorge Badules ¹, Antonio Boné ¹, Emilio Gil ² , A. Javier Aguirre ³  and Mariano Vidal ¹

¹ Escuela Politécnica Superior, University of Zaragoza, 22071 Huesca, Spain; jbadules@hotmail.com (J.B.); anbone@unizar.es (A.B.); vidalcor@unizar.es (M.V.)

² Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología, Universitat Politècnica de Catalunya, 08860 Castelldefels, Spain; emilio.gil@upc.edu

³ CPIFP Montearagón, 22071 Huesca, Spain; angeljavieraguirre65@gmail.com

* Correspondence: fjavier@unizar.es; Tel.: +34-914-239-301

Received: 2 October 2018; Accepted: 29 October 2018; Published: 31 October 2018



Abstract: An acoustic Doppler velocimeter (ADV) was used to analyse the impact of an agricultural sprayer's agitation system settings on fluid velocities inside the tank. A 3000 L capacity sprayer equipped with a 4-nozzle hydraulic agitation system was used. ADV measurements were carried at 32 points inside the tank under the following settings: circuit pressures of 8, 10, or 12 bar; water level in the tank of 1000, 2000, or 3000 L; 2 or 4 active nozzles. An agitation test with a concentration of 0.4% copper oxychloride was employed to analyse the concentration of active matter as a function of tank fill level and number of active nozzles. All parameters significantly affected the fluid velocity, which increased with increasing pressure, but decreased with increasing water level in the tank and an increased number of active nozzles. Concentration tests showed greater active matter concentrations when higher velocities were recorded by the ADV. The ADV was shown to be a useful tool for the rapid assessment of fluid velocities; in the future, it could be used to validate the design of agitation systems, and to estimate their capacity to ensure an adequate level of active matter concentration in the fluid.

Keywords: fluid velocity; nozzle; tank; copper oxychloride

1. Introduction

Air-assisted sprayers used in fruit orchards are designed to distribute a uniform dose of pesticide over the entire canopy. Many researchers have studied the influence of the main working parameters on treatment performance, including air flow, fluid pressure, nozzle type, volume of vegetation, forward velocity, etc. To date, the analysis of these parameters has assumed that the concentration of active matter in the tank is uniform. To guarantee this uniformity, tanks of agricultural sprayers are normally equipped with hydraulic agitation systems.

These systems consist of one or several nozzles (jet agitation systems) which, working at a specific pressure, introduce a flow rate into the tank, generating turbulent flow. The mixing quality depends on different factors, including the geometry of the tank, the quantity of water in the tank, nozzle locations, nozzle flow rates, system pressure, and the time available for mixing.

Currently, the experimental procedures used for evaluating the mixing quality of the agitation systems in new agricultural sprayer tanks are based on the standard ISO 5682-2 [1,2], which specifies the methods of testing and assessing the performance of agitation systems in hydraulic sprayers. This standard requires, after a fixed mixing time, sampling from several locations to measure

the concentration of active matter. For the case of sprayers in use, ISO 16122 [3] requires only a visual assessment.

Alternative methods to evaluate the performance of agitation systems have been considered by different studies [4] and fall under two different approaches: the assessment of liquid turbulence inside the tank using three electronic flow meters and measurement of the concentration of a solid tracer (glass microspheres) mixed in the water. [5] used digital images taken through a transparent tank to analyse the deposition of particles from a suspension of copper oxychloride. In other investigations [6–8], several commercial turbidity meters have been tested for potential use in determining mixing efficiency by measuring the concentration of solids in the liquid.

The study of agitation systems should allow for analysing the effect of set variables (pressure, number of nozzles, nozzle flow, nozzle position, liquid level in the tank) on the concentration of active material in the sample. Performing this type of study according to the ISO 5682-2 standard, for different pressure configurations, nozzle types, etc., would be prohibitively expensive and time consuming; instead, equipment manufacturers require rapid measurement methods that can validate the modelling carried out in the design phase. An ideal experimental test method would be one that provides information to allow manufacturers to quantify the same parameters used by engineers in the design phase, which in most cases are the estimated flow velocity at different points of the sprayer tank by using computational fluid dynamics (CFD). For this purpose, different studies have investigated fluid velocities inside spray tanks using CFD, and these values have been validated by experimental measures [9–11]. As an additional step in this line of work, some researchers [12] CFD modelled the movement of fluid in the 4000 L tank of an agricultural sprayer and attempted to correlate the velocity of the fluid with the concentration of active matter, obtaining inconclusive results.

Fluid velocities inside the tank provide useful information regarding the operation of the agitation system, and there are different technologies available for velocity measurements, including: particle image velocimeters [13], laser Doppler velocimeters [11], hot-film anemometers [10], acoustic Doppler velocimeters (ADV) [14], electromagnetic current meters [15], and electronic flow meters [4]. In most cases, acoustic Doppler velocimetry has been the preferred method [13,16,17] because it is relatively low cost, can record at a relatively high frequency (up to 100 Hertz (Hz)), can measure three dimensional instantaneous velocity measurements, and is non-intrusive because it has a relatively small sampling volume according to the instrument selected. Furthermore, calibration is invariant [15].

ADVs are commonly used for fluid flow characterization and for the determination of suspended solids and turbulence [14]; they have been used in a habitual way for the measurement of velocities in river beds, lakes, and natural water environments [18]. ADVs operate on the principle of Doppler shift. Two acoustic pulses of different duration are transmitted, separated by a time interval, and the energy backscattered by particulate matter in a sampling volume at a short distance from the probe tip is recorded after each pulse. The velocity is then calculated as a function of the phase lag between the return signals [19]. ADV measurements are contaminated by Doppler-instrument noise [13], or by spikes, which are random outliers that can occur owing to interference of previous pulses reflected from the flow boundaries or due to the presence of bubbles, sediments, etc. in the flow [20]. Therefore, the signal must be carefully analysed and, if necessary, data cleaning techniques applied to ensure signal quality. Nonetheless, research conducted working with ADV velocimeters [21], stated that mean flow measurements may be reliably obtained less than 10 mm from the fluid boundaries.

The use of a three-dimensional velocity measuring device inside the tank of an agricultural sprayer under different working conditions (pressure, number of nozzles, position of nozzles, etc.) would make it possible to know the effect of the regulation parameters on the operation of the system and, in this way, estimate the efficiency of the agitation system on the basis of these conditioning factors. Therefore, the objective of this work was to study the applicability of using an ADV to investigate the operation and efficiency of a hydraulic agitation system in the tank of an agricultural sprayer according to different working parameters.

2. Experimental Design

2.1. Tank Characteristics

This study was carried out using an air-assisted sprayer with a nominal capacity of 3000 L (GarMelet S.L., Huesca, Spain). The geometry of the tank was cylindrical, and the inside was divided into two interconnected parts (Figure 1) separated by a breakwater wall with several orifices to facilitate fluid circulation. The agitation system consisted of four nozzles placed on the bottom of the opposite sides of the cylinder, two in each side. The inside geometry of the tank is shown in Figure 1.

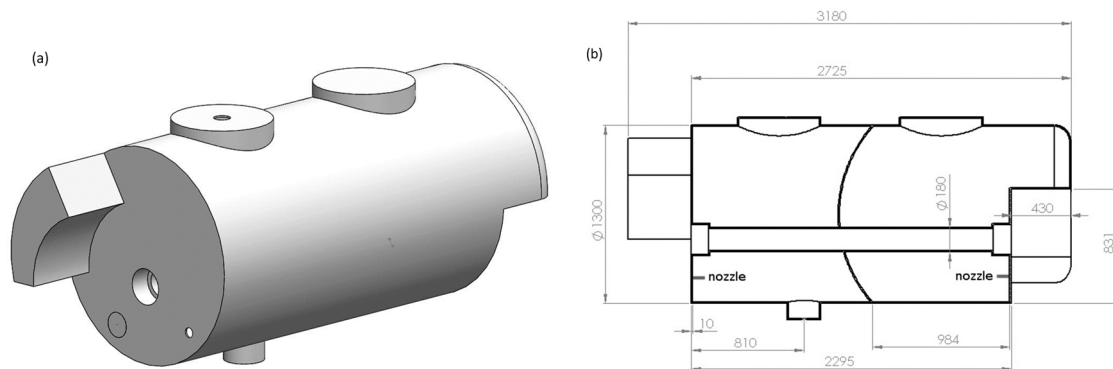


Figure 1. Geometry of the sprayer tank with a 3000 L of capacity. (a) Exterior 3-dimensional (D) view; (b) Internal longitudinal section, 2D view, with two interconnected parts. Dimensions in millimetres.

2.2. Agitation Nozzles

The nominal flow rate of the agitation nozzles was measured for different working pressures (8, 10, and 12 bars). The sprayer was equipped with four Venturi type hydraulic agitation nozzles (Figure 2). In this sense, the nominal flow rate provided by the nozzle, thanks to the Venturi effect, produced an actual flow rate in the Venturi outlet of approximately 40 times the nominal flow of the hydraulic nozzle located inside the Venturi body.

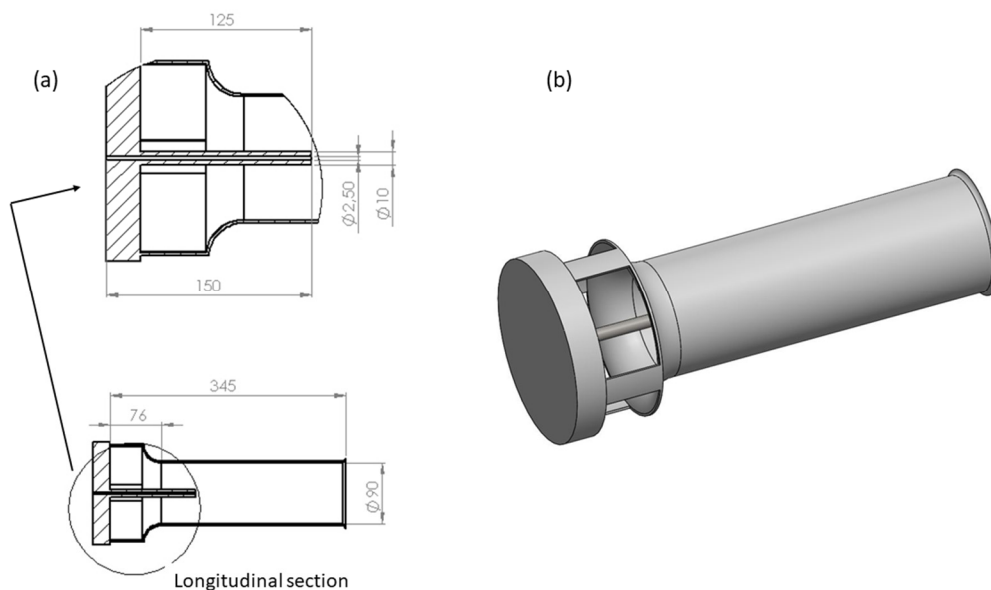


Figure 2. Geometry of the Venturi agitation nozzles. (a) Longitudinal section; (b) Three-dimensional (3D) view. Dimensions in millimetres.

Table 1 shows the nominal flow rates provided by a single nozzle for the different working pressures considered. The flow rate of the agitation system nozzles was measured in the laboratory.

For this goal, the nozzles were disassembled from the machine and the flow rate of a single nozzle was quantified for 30 s at different working pressures (8, 10 and 12 bar). Subsequently, the rest of the nozzles were tested in a similar way to the pressure of 10 bar to check that the nominal flow did not show variations between nozzles.

Table 1. Nominal flow rate provided by a single nozzle of the agitation system at different working pressures.

Pressure (bar)	Flow Rate (L/min)
8	8.48
10	9.52
12	10.41

2.3. Acoustic Doppler Velocimeter

A 3-dimensional (D) microacoustic Doppler velocimeter (3D MicroADV 16 megaHz (MHz) by Sontek, San Diego, CA, USA) was used to carry out the velocity measurements. The probe head included one acoustic transmitter and three acoustic receivers (Figure 3). The remote sampling volume in which the ADV took velocity measurements was located 5 cm from the tip of the acoustic transmitter. Table 2 shows the technical characteristics of the probe. The MicroADV consists of the acoustic sensor, the stem (or cable) and the signal conditioning module.

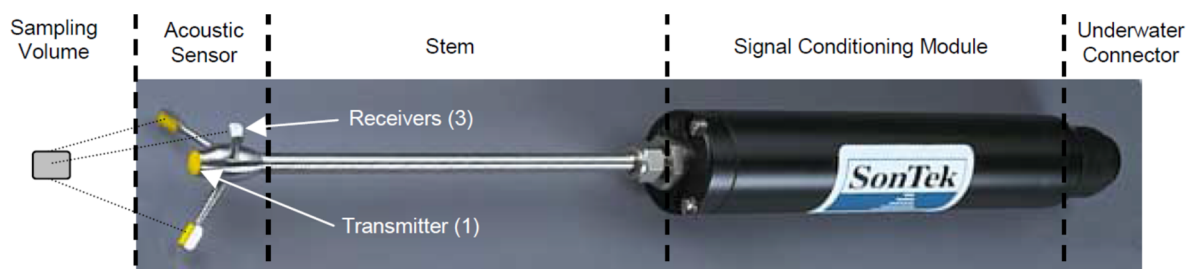


Figure 3. Three-dimensional Sontek Micro acoustic Doppler velocimeter (ADV) 16 megaHertz (MHz).

Table 2. Technical characteristics of the 3D Sontek Micro acoustic Doppler velocimeter (ADV) 16 MHz.

Parameter	Configuration
Sampling rate (Hz)	0.1 to 50
Sampling volume (cm ³)	0.09
Distance to sampling volume (cm)	5.0
Resolution (cm/s)	0.01
Programmable velocity range (cm/s)	3, 10, 30, 100, 250
Accuracy	1% of measured velocity, ± 0.25 m/s

2.4. Fluid Velocity Measurements

An experimental factorial design was carried out with 3 independent variables for the configuration of the agitation system: water level in the tank (1000, 2000, or 3000 L); number of active nozzles (2 or 4); and working pressure of the agitation circuit (8, 10, or 12 bar).

Velocity measurements were made in four circular sections of the tank, with eight measuring points in each section distributed at three heights (Figure 4), and working with water inside the tank. These measurements were carried out considering the different combinations of the variables (pressure, number of nozzles and tank filling level). In this way, Table 3 reflects the measurements made for the different variable configurations. When the system worked with two nozzles, these were on opposite sides of the tank.

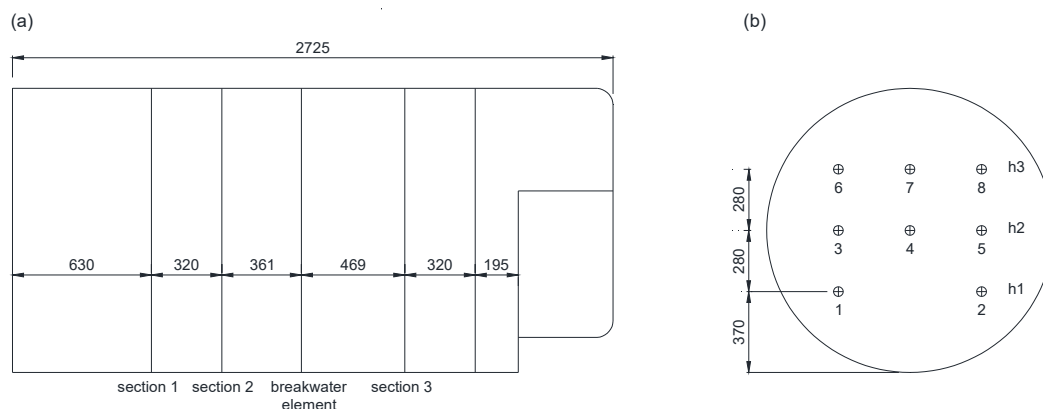


Figure 4. (a) Cross sections of where velocity measurements were made inside the tank (dimensions in millimeters); (b) Velocity measurement points within each of the four sections.

Table 3. Factorial design of experimental velocity measurements inside the tank according to the configuration variables and the location of the measurement.

Level of Water Inside the Tank (L)	Pressure (bar)	Number of Nozzles	Measurement Section (Figure 2)	Measurement Points in Each Section (Figure 2)	Height of the Measurement Point
1000	8, 10, 12	2, 4	s1, s2, s3, s4	1, 2	h1
2000	8, 10, 12	2, 4	s1, s2, s3, s4	1, 2, 3, 4, 5	h1, h2
3000	8, 10, 12	2, 4	s1, s2, s3, s4	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	h1, h2, h3

Velocity measurements were taken using the ADV at a frequency of 50 Hz. The agitation system was configured in terms of working pressure, number of nozzles activated, and water level in the tank. A mechanical implement specifically designed to position the ADV at the different measuring points was used. Sections 1 and 2 of the tank were accessed from the front filler neck and Sections 3 and 4 from the rear filler neck (Figure 4). The tank was first filled to the required water level. Subsequently, the ADV was placed at its measuring point. Finally, the parameters of pressure and number of nozzles were established, and the agitation system was left working for 3 min to achieve stabilization of fluid flow. After fluid flow was stabilized, data were collected for 20 s at each measuring point. The procedure was repeated for each measuring point and configuration of the agitation system.

Measures provided by the ADV with a correlation of less than 70% were eliminated [19]. The correlation parameter, which varies from 0 to 100, is an indicator of the relative consistency of the behavior of the scatterers in the sampling volume during the sampling period. ADV's collect data at a higher sampling rate than the sample reporting period, and the correlation parameter indicates the consistency of the multiple measurements that take place within each sampling period [22]. The signal-to-noise ratio was always greater than 20 dB, such that the signal did not cause increased noise in the velocity data. Under these conditions, noise in data output should be about 1% of the velocity range setting [19].

Finally, data were averaged to obtain a single data per second, thus reducing the number of data to 20 for each measuring point and system configuration. The vector module was taken as the representative value of the velocity, independent of its direction. It is foreseeable that agitation systems that produce velocity flows directed against the bottom of the tank could improve agitation. To confirm this fact, comparative tests of product concentration/deposition would be necessary considering agitation systems that generate different directions of fluid flow.

2.5. Efficiency of the Agitation System

A test was carried out to analyse the efficiency of the agitation system. Copper oxychloride was added to the tank at a theoretical concentration of 0.4%. The sprayer was regulated at a pressure of 10 bar and the number of activated nozzles was set to 2 or 4. For each number of nozzles, five samples of

20 mL were taken at the outlet of the sprayer with the following volumes in the tank: 1000 L, 2000 L, and 3000 L. A total of 30 samples were collected. The concentration of copper oxychloride for each sample was measured by weighing after drying with precision scale at a temperature of 105 °C.

3. Results and Discussion

3.1. Effect of Independent Variables on Fluid Velocity

Considering the entire data set, the absolute velocity of the water varied between 0.69 and 37.37 cm/s. The mean velocity was 11.22 cm/s with a standard deviation of 5.95 cm/s.

The fluid velocity variable did not show a normal distribution based on the results of the Kolmogorov-Smirnov test ($K-S = 0.080$; $p < 0.001$). Therefore, to analyse the effects of regulation parameters of the agitation system (independent variables) on water velocity at the different measuring points inside the tank, the nonparametric Kruskal-Wallis test (SPSS Statistics v22, IBM, Armonk, NY, USA) was used. In this sense, the main independent variables of regulation of the agitation system were level of water inside the tank (1000, 2000, or 3000 L), the pressure of the nozzle circuit (8, 10, or 12 bar), and the number of nozzles working simultaneously (2 or 4).

The fluid velocity values corresponded to the resulting absolute velocities of the three Cartesian coordinates (module of the velocity vector) measured by the ADV. Table 4 shows the results of the Kruskal-Wallis test in relation to the effect of the main independent variables on the fluid velocity. All variables had a significant effect on fluid velocity.

Table 4. Kruskal-Wallis test. Effect of the independent variables (level of water inside the tank; pressure of the nozzle circuit; number of nozzles working simultaneously) on the fluid velocity.

Independent Variable	Settings	Dependent Variable	Chi-Square	Degrees of Freedom	Significance Level
Level of water (L)	1000, 2000, 3000	Fluid velocity	630.226	2	<0.001
Pressure (bar)	8, 10, 12		40.601	2	<0.001
Number of nozzles	2, 4		99.886	1	<0.001

Considering the effect of the level of water inside the tank (1000, 2000 and 3000 L) and the pressure of the agitation circuit, Figure 5 shows the mean fluid velocity according to the level of water and the pressure. The fluid velocity decreased significantly as the water level in the tank increased. Considering mean values of all data, the fluid velocities for 1000, 2000 and 3000 L were 15.18, 12.19, and 9.61 cm/s, respectively. This fact shows that the lowest velocity values were produced when the tank was full. Results are in accordance with those obtained by [23] who used an ADV velocimeter in an aquaculture circular tank and, considering similar inlet flow rates, obtained higher velocities with the lower levels of water in the tank.

This fact must be considered in future design and validation phases in such way that the most demanding conditions for the agitation system occur when the tank is full. This effect was repeated for the different working pressures (Figure 5) and for the different number of nozzles of the agitation system (Figure 6).

The pressure of the agitation circuit also had a significant influence on the fluid velocity, with higher velocities generally occurring as the pressure increased (Figure 5). These data were consistent with those obtained by [10], who measured fluid velocity using a hot-film anemometer at nine points inside a sprayer tank of 1136 L, working with four nozzles, and registered fluid velocity increments between 40% and 130% as the system pressure increased from 2.07 to 4.70 bar.

The number of active nozzles in the agitation system also significantly affected the fluid velocity (Figure 6); with 4 nozzles activated the velocities were lower than those with 2 nozzles (11.95 vs. 10.45 cm/s). This fact reflects that the location of the nozzles within the tank can affect the fluid velocity more significantly than does the number of nozzles activated. In this case, the nozzles were located on opposite sides of the tank so the effect of increasing the number of nozzles did not result in an increase

in velocity. However, [10], who worked with 8 nozzles in the agitation system, registered a 14.8% velocity increase compared with that for 4 nozzles, although in this case all of the nozzles were aligned in the lower part of the tank, placed on the same work plane. This fact reinforces the importance of properly locating nozzles inside the tank, and the usefulness of velocity measurement systems, such that tested here, to validate this location.

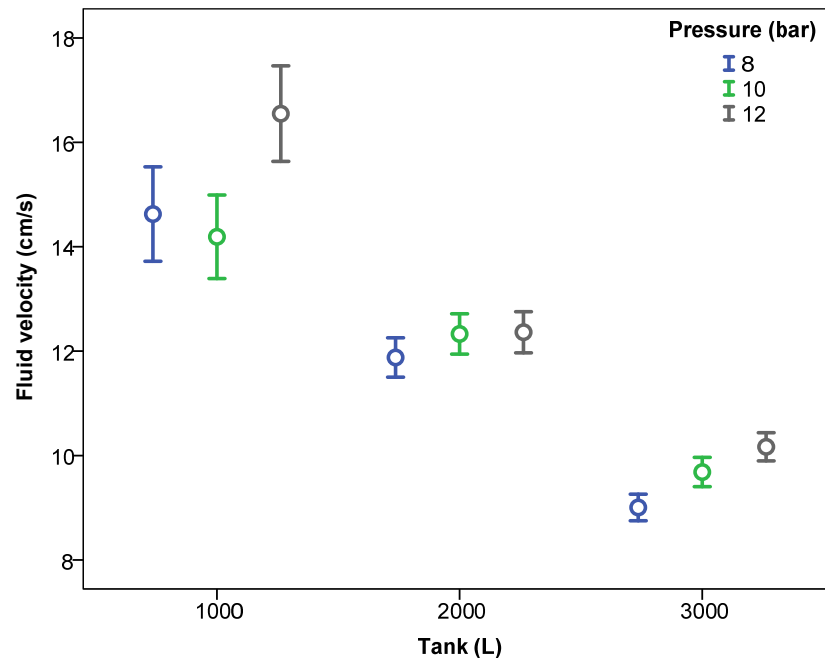


Figure 5. Fluid velocity (mean $\pm$ 95% confidence interval) according to the level of water in the tank and pressures of the nozzle circuits.

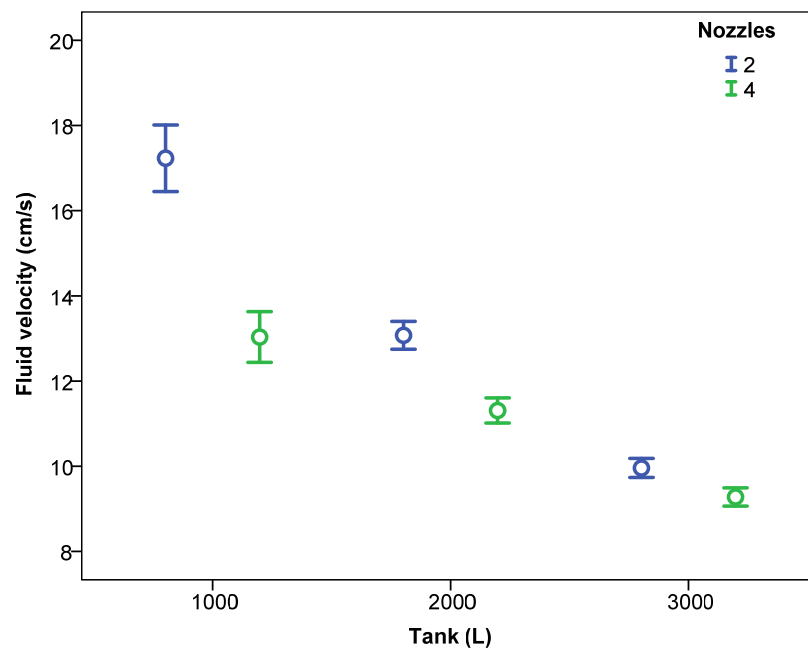


Figure 6. Fluid velocity (mean $\pm$ 95% confidence interval) according to the level of water in the tank and the number of active nozzles.

3.2. Effect of Measurement Point Position

The position of the measuring point inside the tank had a significant influence on the fluid velocity. Table 5 shows the results of the Kruskal-Wallis test in relation to the effect of measuring point position (section, height, and measurement point) on the fluid velocity. All variables had a significant effect on fluid velocity.

Table 5. Kruskal-Wallis test. Effect of the variables related to the position of the measurement point (section, height, measurement point) on the fluid velocity.

Independent Variable	Settings	Dependent Variable	Chi-Square	Degrees of Freedom	Significance Level
Measurement section	1, 2, 3, 4	Fluid velocity	575.110	3	<0.001
Height of the measurement point (mm)	1 (370) 2 (650) 3 (930)	Fluid velocity	78.422	2	<0.001
Point of measurement	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	Fluid velocity	286.155	7	<0.001

Considering the system as a function of the tank fill level, for all working pressures and number of nozzles, Figures 7 and 8 show the fluid velocity as a function of the height and the section. There was no repetitive pattern in relation to the effect of the measurement height. Thus, for 2000 L capacity, height 2 recorded higher velocity values than did height 1, a trend that was reversed when the tank was full. In relation to the measurement section, Sections 3 and 4 had lower velocity values compared with Sections 1 and 2. In this case, the behaviour was repetitive, regardless of the tank fill level, with Section 2 having the highest velocities, followed by Section 1, then Sections 3 and 4. Thus, the influence of inner tank partitioning (Figure 2) on the recorded velocity values was clear.

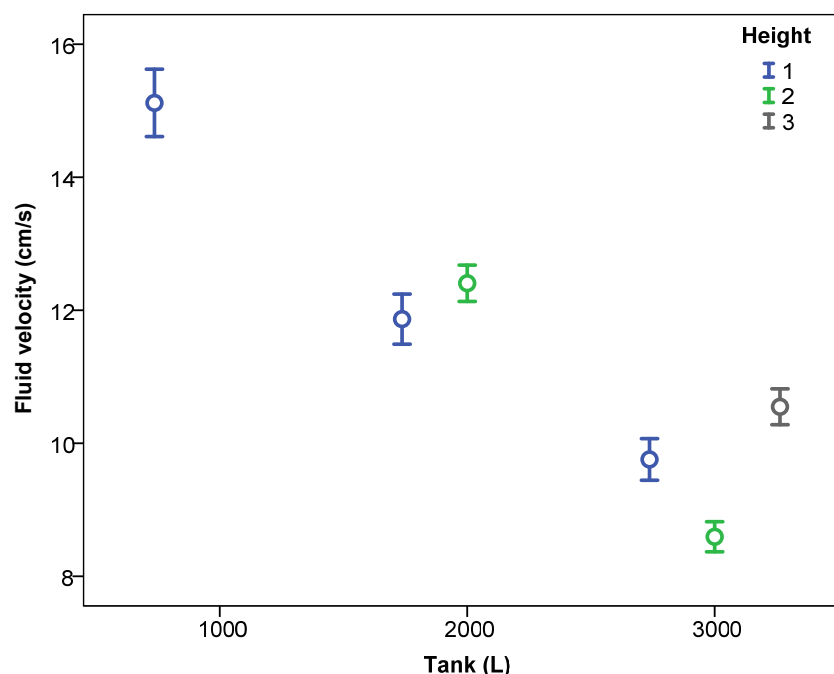


Figure 7. Fluid velocity (mean $\pm$ 95% confidence interval) according to the level of water in the tank and the height of the measurement point.

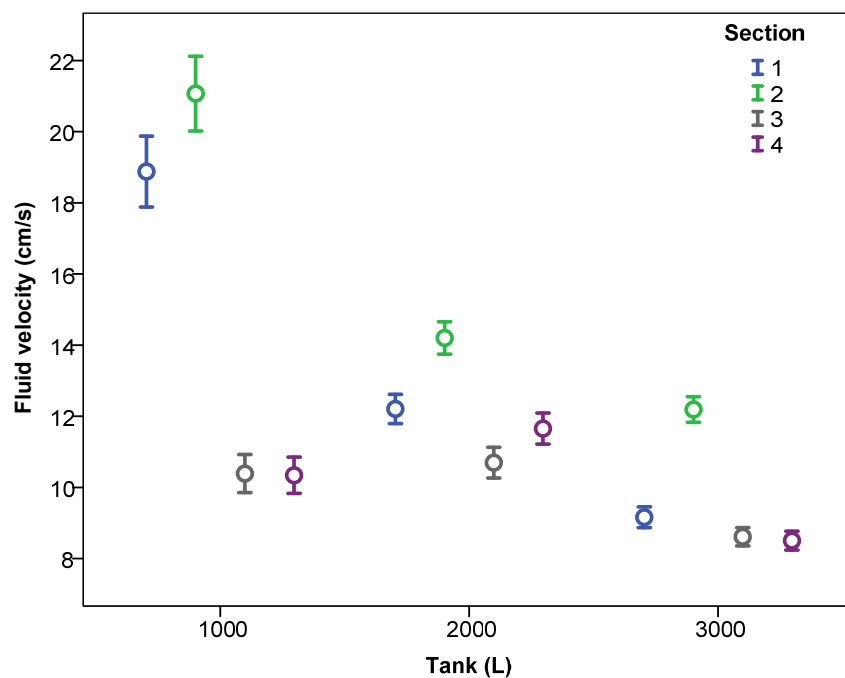


Figure 8. Fluid velocity (mean $\pm$ 95% confidence interval) according to the level of water in the tank and the section of the measurement point.

Considering the eight measuring points for each section (Figure 9), the behaviour was very variable; in general, for any configuration of the system, most of the points belonging to the lower zones (1 and 2 for height 1) and upper zones (7 and 8 for height 3) showed more variable behaviour; moreover, this behaviour was different for the different sections. In general, measuring points belonging to intermediate heights (3, 4, and 5) maintained more similar velocity values independent of the measuring section.

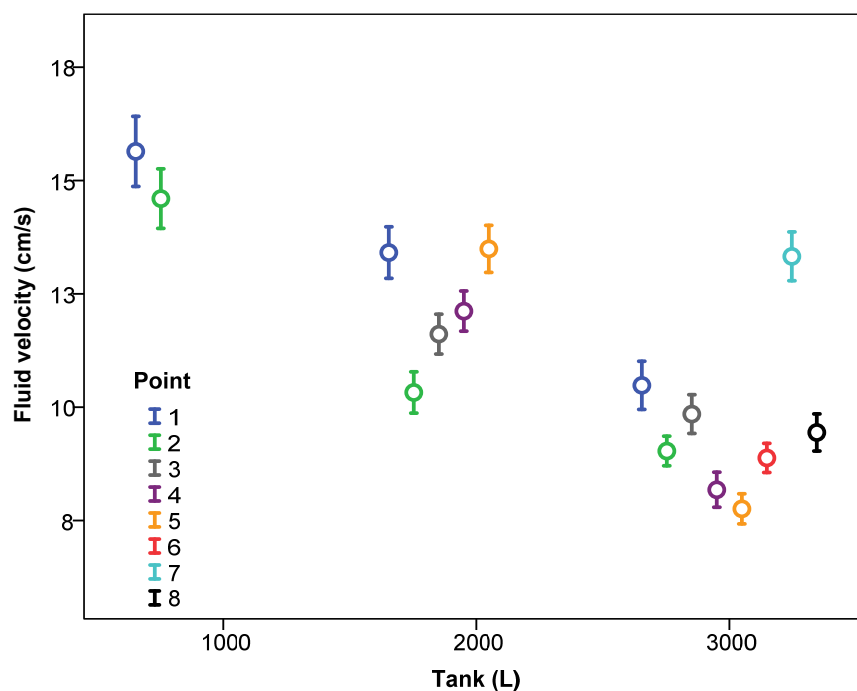


Figure 9. Fluid velocity (mean $\pm$ 95% confidence interval) at the measurement points of the four sections (all data included).

3.3. Efficiency of the Agitation System

The level of water inside the tank had a significant influence on the concentration of copper oxychloride. However, the effect of the number of activated nozzles was not significant. Table 6 shows the results of the univariate general linear model developed (SPSS Statistics v22) considering a significance level of 0.05.

Table 6. Univariate general linear model of the concentration of copper oxychloride according to the level of water into the tank (1000, 2000, 3000 L) and the number of nozzles (2, 4).

Origin	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Root Mean Square	F	Significance
Revised model	0.013a	5	0.003	19.663	<0.001
Interception	5.882	1	5.882	45,798.799	<0.001
Tank level	0.012	2	0.006	47.252	<0.001
Nozzles	0.000	1	0.000	2.954	0.099
Tank* nozzles	0.000	2	5.487×10^{-5}	0.427	0.657
Error	0.003	24	0.000		
Total	5.898	30			
Total corrected	0.016	29			

a $R^2 = 0.804$ (Adjusted $R^2 = 0.763$).

The average copper oxychloride concentrations were 0.446% for 2 nozzles and 0.439% for 4 nozzles. Although these differences were not significant, there was a tendency to obtain lower concentrations of active matter with 4 nozzles for each of the three tank fill levels (1000, 2000, and 3000 L), as shown in Figure 10.

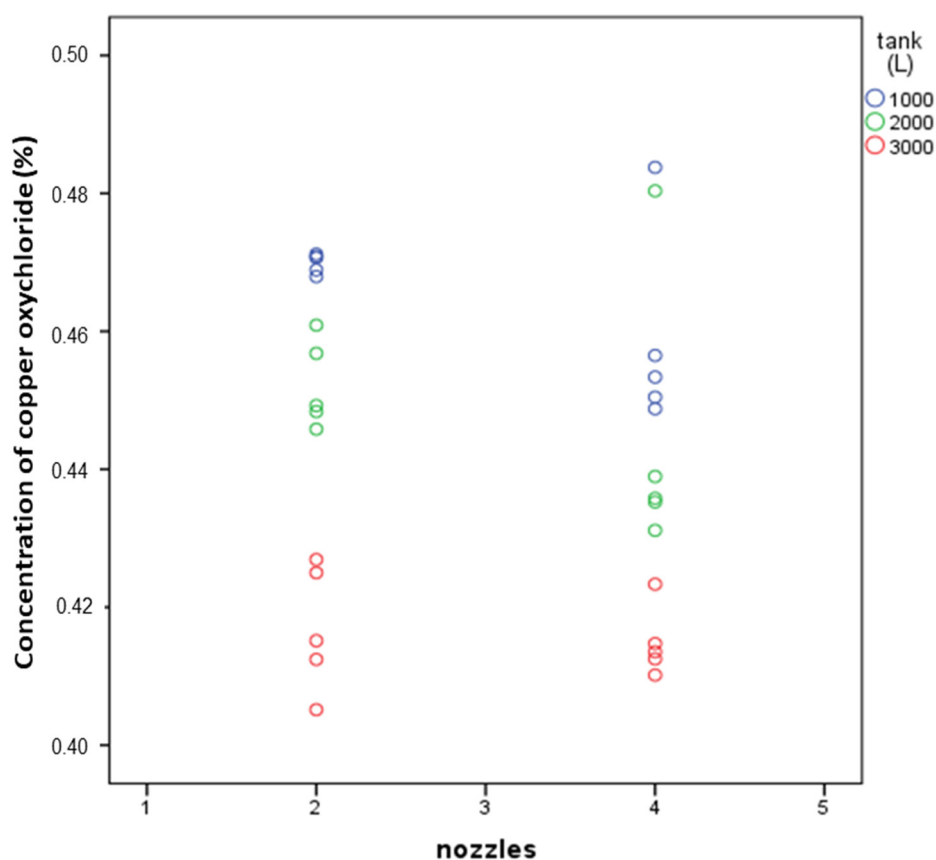


Figure 10. Concentration of copper oxychloride as a function of the number of nozzles and the level of water in the tank. Pressure of the agitation system: 10 bar.

Table 7 shows the average velocities (considering all measurement points) and concentrations of copper oxychloride for tank fill levels of 1000, 2000, and 3000 L, and for two or four nozzles at a working pressure of 10 bar. The velocity values show a clear correlation with copper oxychloride concentration (linear correlation, $R^2 = 0.87$; polynomial correlation, $R^2 = 0.96$), with higher velocity values associated with higher concentrations. The coefficient of variation for the oxychloride concentration was 5.07%, which is a good value showing a great uniformity, for all fill level and nozzle number configurations. This indicates that the working velocity range for 10-bar regulation (9.38 to 15.96 cm/s) was sufficient to ensure a suitable mixture in the tank.

Table 7. Fluid velocity inside the tank and concentration of copper oxychloride at the outlet of the sprayer as a function water level inside the tank and the number of activated nozzles.

Pressure (bar)	Level of Water Inside the Tank (L)	Number of Nozzles	Fluid Velocity (cm/s)	Copper Oxychloride Concentration (%)	Variation of Copper Oxychloride Concentration (%)
10	1000	2	15.9693	0.4699	17.45
		4	12.4986	0.4586	14.65
	2000	2	13.1345	0.4522	13.05
		4	11.5460	0.4443	11.07
	3000	2	9.9866	0.4169	4.22
		4	9.3831	0.4148	3.70

Xiongkuy et al. [24] concluded that the efficacy of agitation was improved by increases in both flow rate and working pressure; similar conclusions were obtained by other researchers [5]. In turn, it can be concluded that an increase in fluid velocity will produce an improvement in the efficacy of the agitation system.

Our tests showed higher concentrations of active matter for higher fluid velocities within the tank. This fact could indicate a greater ability of the system to mobilize active matter when fluid velocities are higher, reducing the deposition. However, differences in concentrations were low (Table 7) and further tests must be carried out to validate the results.

Independently, ADV velocimeters appears as a useful tool to set minimum velocity levels to guarantee acceptable coefficients of variation in the values of active matter concentration. This would require previous tests of active matter concentration, which, once carried out, would serve as correlation data for the practical use of ADV sensors as an indirect tool to estimate the efficiency of the agitation system.

4. Conclusions

ADV technology was successfully used to measure fluid velocities inside the tank of an agricultural sprayer. This technology has made it possible to evaluate the effect of sprayers' hydraulic agitation system control parameters (i.e., water level inside the tank, hydraulic circuit pressure, and number of active nozzles) on fluid velocity. ADV is able to measure the flow speed near the bottom and boundaries of the tank because the total height of the sampling volume of the sensor is 9 mm.

All control parameters had a significant influence on the fluid velocity. Fluid velocities increased with increasing working pressure, but decreased as the tank fill level increased and as the number of active nozzles increased. In addition, the concentration of active matter in the fluid increased with increase of fluid velocity.

ADV technology makes it possible to validate the design of agitation systems in agricultural sprayers and to estimate the efficiency of these systems in order to guarantee the concentration of active matter in the fluid.

Author Contributions: F.J.G.-R., J.B., and M.V. have contributed to all phases of the work (experimental design, testing, data analysis, and report writing). E.G. contributed to the experimental design, data analysis and report writing. A.J.A. contributed to the data analysis and review. A.B. contributed to the experimental design and testing.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Gar Melet S. L. for their assistance with this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funding sponsors had no role in the design of the study, in the collection, analyses, or interpretation of data, in the writing of the manuscript, and in the decision to publish the results.

References

1. Ali, B.; Ali, B. Performance of a hydraulic jet agitation system with different jet nozzle sizes in the sprayer tank. *Agronomy* **2017**, *55*, 449–454.
2. ISO. *Equipment for Crop Protection—Spraying Equipment—Part 2: Test Methods for Hydraulic Sprayers*; ISO 5682-2; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1997.
3. ISO. *Agricultural and Forestry Machinery—Inspection of Sprayer and Liquid Fertilizer in Use; Part 1. General; Part 2. Boom Sprayers; Part 3. Sprayers for Bush and Trees*; ISO 16122; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015.
4. Balsari, P.; Tamagnone, M.; Allochis, D.; Marucco, P.; Bozzer, C. Sprayer tank agitation check: A proposal for a simple instrumental evaluation. In Proceedings of the Fourth European Workshop on Standardised Procedure for the Inspection of Sprayers—SPISE 4, Lana, Italy, 27–29 March 2012.
5. Tamagnone, M.; Balsari, P.; Bozzer, C.; Marucco, P. Assessment of parameters needed to design agitation systems for sprayer tanks. *Asp. Appl. Biol.* **2012**, *114*, 167–174.
6. Ozkan, H.E.; Ackerman, K.K. Instrumentation for measuring mixture variability in sprayer tanks. *Appl. Eng. Agric.* **1999**, *15*, 19–24. [[CrossRef](#)]
7. Ucar, T.; Ozkan, H.E.; Fox, R.D.; Brazee, R.D.; Derksen, R.C. Experimental study of jet agitation effects on agrochemical mixing in sprayer tanks. *J. Agric. Eng. Res.* **2000**, *78*, 195–207. [[CrossRef](#)]
8. Vondricka, J.; Schulze, P. Measurement of mixture homogeneity in direct injection systems. *Trans. ASABE* **2009**, *52*, 61–66. [[CrossRef](#)]
9. Armenante, P.M.; Luo, C.; Chou, C.; Fort, I.; Medek, J. Velocity profiles in a closed unbaffled vessel: Comparison between experimental LDV data and numerical CFD predictions. *Chem. Eng. Sci.* **1997**, *52*, 3483–3492. [[CrossRef](#)]
10. Ucar, T.; Fox, R.D.; Ozkan, H.E.; Brazee, R.D. Simulation of jet agitation in sprayer tanks: Comparison of predicted and measured water velocities. *Trans. ASABE* **2001**, *44*, 223–230. [[CrossRef](#)]
11. Chen, N.; Liao, B.; Pan, J.; Li, Q.; Gao, C. Improvement of the flow rate distribution in quench tank by measurement and computer simulation. *Mater. Lett.* **2006**, *60*, 1659–1664. [[CrossRef](#)]
12. Micheli, G.B.; Padilha, A.; Scalón, V.L. Numerical and experimental analysis of pesticide spray mixing in spray tanks. *Eng. Agric. J. J. Bot. Cabal.* **2015**, *35*, 1065–1078.
13. García, C.M.; Cantero, M.I.; Niño, Y.; García, M.H. Turbulence measurements with acoustic Doppler velocimeters. *J. Hydraul. Eng.* **2005**, *131*, 1062–1073. [[CrossRef](#)]
14. Poindexter, C.M.; Rusello, P.J.; Variano, E.J. Acoustic Doppler velocimeter-induced acoustic streaming and its implication for measurement. *Exp. Fluids* **2011**, *50*, 1429–1442. [[CrossRef](#)]
15. MacVicar, B.J.; Beaulieu, E.; Champagne, V.; Roy, A.G. Measuring water velocity in highly turbulent flows: Field tests of an electromagnetic current meter (ECM) and an acoustic Doppler velocimeter (ADV). *Earth Surf. Process. Landforms* **2007**, *32*, 1412–1432. [[CrossRef](#)]
16. Hosseini, S.A.; Shamsai, A.; Ataie-Ashtiani, B. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an acoustic Doppler velocimeter. *Flow Meas. Instrum.* **2006**, *17*, 59–68. [[CrossRef](#)]
17. Sharma, A.; Maddirala, A.K.; Kumar, B. Modified singular spectrum analysis for despiking acoustic Doppler velocimeter (ADV) data. *Measurement* **2018**, *117*, 339–346. [[CrossRef](#)]
18. Liao, Q.; Wang, B.; Wang, P.F. In situ measurement of sediment resuspension caused by propeller wash with an underwater particle image velocimetry and an acoustic Doppler velocimeter. *Flow Meas. Instrum.* **2015**, *41*, 1–9. [[CrossRef](#)]
19. Sontek/YSI. *FlowTracker Handheld ADV*; Technical Documentation; Sontek/YSI: San Diego, CA, USA, 2001.
20. Durgesh, V.; Thomson, J.; Richmond, M.C.; Polagye, B.L. Noise correction of turbulent spectra obtained from acoustic Doppler velocimeters. *Flow Meas. Instrum.* **2014**, *37*, 29–41. [[CrossRef](#)]

21. Voulgaris, G.; Trowbridge, J. Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements. *J. Atmos. Ocean. Tech.* **1998**, *15*, 272–289. [[CrossRef](#)]
22. Wahl, T.L. Analyzing ADV data using WinADV. In Proceedings of the Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, Minneapolis, MN, USA, 30 July–2 August 2000.
23. Oca, J.; Masalo, I. Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. *Aquacult. Eng.* **2013**, *52*, 65–72.
24. Xiongkuy, H.; Kleisinger, S.; Luoluo, W.; Bingli, L. Influences of dynamic factors and filling level of spray in the tank on the efficacy of hydraulic agitation of the sprayer. *T. Chin Soc. Agric. Eng.* **1999**, *15*, 131–134.



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Article

CFD Models as a Tool to Analyze the Performance of the Hydraulic Agitation System of an Air-Assisted Sprayer

Jorge Badules ¹, Mariano Vidal ¹, Antonio Boné ¹, Emilio Gil ²  and F. Javier García-Ramos ^{1,*} 

¹ Escuela Politécnica Superior, University of Zaragoza, 22071 Huesca, Spain; jbadules@hotmail.com (J.B.); vidalcor@unizar.es (M.V.); anbone@unizar.es (A.B.)

² Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología, Universitat Politècnica de Catalunya, Castelldefels, 08860 Barcelona, Spain; emilio.gil@upc.edu

* Correspondence: fjavier@unizar.es; Tel.: +34-974-239-301

Received: 17 October 2019; Accepted: 14 November 2019; Published: 18 November 2019



Abstract: A computational fluid dynamics (CFD) model of the fluid velocities generated by the agitation system of an air-assisted sprayer was developed and validated by practical experiments in a laboratory. The model was developed considering different settings of the agitation system: Three water levels in the tank (1000, 2000, and 3000 L); two different numbers of active nozzles (2 or 4); and three working pressures of the agitation circuit (8, 10, or 12 bar). Actual measurements of the fluid velocity into the tank were taken using an acoustic Doppler velocimeter (ADV). CFD simulations made it possible to estimate fluid velocities at 38% of the measuring points with relative errors of less than 30%. Additionally, the CFD models have allowed the correct prediction of the general behavior of the fluid in the tank considering mean velocities depending on the setting parameters of the agitation system (water level in the tank, hydraulic circuit pressure, and number of active nozzles).

Keywords: tank; fluid velocity; nozzle; pesticide; velocimeter

1. Introduction

The application of plant protection products (PPPs) in agricultural crops requires its appropriate dissolution in water to achieve a successful treatment according to the established prescriptions. For this goal, the tanks of the agricultural sprayers are equipped with agitation systems that should ensure a homogeneous PPP concentration in the tank, avoiding sedimentation.

Most sprayers have hydraulic agitation systems based on the use of injection nozzles. These systems consist of one or several nozzles (jet agitation systems) that, working at a specific pressure, introduce a liquid flow rate into the tank, generating turbulent flow. The mixing quality depends on different factors, including the geometry of the tank, quantity of water in the tank, nozzle location, nozzle flow rate, system pressure, and the time available for mixing.

To analyze the quality of the agitation, the standardized procedure ISO 5682-2 [1], which specifies the methods of testing and assessing the performance of agitation systems in hydraulic sprayers, can be used. This standard requires the collection of samples at various points in the tank and at the spraying nozzles, for laboratory measurement of the concentration of active matter. Performing these tests is time consuming and requires important material resources. In addition, information obtained for each test is specific according to the control parameters: Pressure of the agitation system, number of nozzles, water level, etc. In addition, results are not easily extrapolated to other regulation conditions of the agitation system.

As an alternative to the standardized procedure ISO 5682-2, different methodologies have been proposed such as the use of devices to measure liquid turbulence in the tank [2–5], image analysis

using tanks with transparent walls [6], and the use of instrumentation to measure fluid velocity inside the tank [2,7]. In addition to experimental measurements, numerical models based on the use of computational fluid dynamics (CFD) have also been applied [8].

In this sense, the study of agitation systems should allow for the analysis of the effect of set variables (pressure, number of nozzles, nozzle flow, nozzle position, liquid level in the tank) on the concentration of active ingredients in the sample. Performing this type of study according to the ISO 5682-2 standard, for different pressure configurations, nozzle types, etc., would be prohibitively expensive and time consuming; instead, the sprayer's manufacturers require rapid measurement methods that can validate the modeling carried out in the design phase. An ideal experimental test method would be one that provides information to allow manufacturers to quantify the same parameters used by engineers in the design phase, which, in most cases, are the estimated flow velocity at different points of the sprayer tank by using computational fluid dynamics. For this purpose, different studies have investigated fluid velocities inside spray tanks using CFD, and these values have been validated by experimental measures [9,10]. As an additional step in this line of work, some researchers [11] CFD-modeled the movement of fluid in a 4000 L tank of an agricultural sprayer and attempted to correlate the velocity of the fluid with the concentration of active ingredient, obtaining inconclusive results. Xiongkuy et al. [12] concluded that the efficacy of agitation was improved by increases in both flow rate and working pressure; similar conclusions were obtained by Tamagnone et al. [6]. In turn, it can be concluded that an increase in fluid velocity will produce an improvement in the efficacy of the agitation system [7].

The empirical measurement of fluid velocities inside the tank can be carried out using different systems such as particle image velocimeters [13], laser Doppler velocimeters [10], hot-film anemometers [9], acoustic Doppler velocimeters (ADV) [7,14], electromagnetic current meters [15], and electronic flow meters [2]. In most cases, acoustic Doppler velocimetry has been the preferred method [13,16,17] because it is relatively low in cost, can record at a relatively high frequency (up to 100 Hz), can measure three-dimensional instantaneous velocities, and is nonintrusive because it has a relatively small sampling volume according to the instrument selected. Furthermore, calibration is invariant [15].

Therefore, the objective of this work was to study the applicability of CFD models to validate the fluid velocities obtained by using an ADV to investigate the operation and efficiency of a hydraulic agitation system in the tank of an air blast sprayer according to different working parameters. Specific information of the methodology and results of the measurements made using an ADV are detailed in García-Ramos et al. [7].

2. Materials and Methods

2.1. Agricultural Sprayer

This study was carried out using an air-assisted sprayer with a nominal capacity of 3000 L (GarMelet S.L.). The geometry of the tank was cylindrical and the inside was divided into two interconnected parts (Figure 1). The agitation system consisted of four Venturi nozzles placed on the bottom of the opposite sides of the cylinder, two on each side. The inside geometry of the tank is shown in Figure 1.

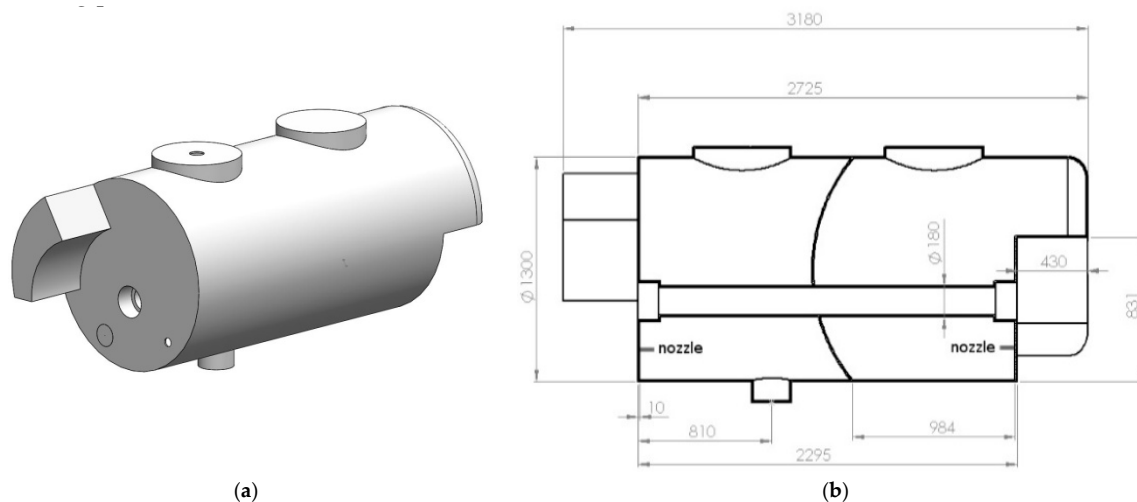


Figure 1. Geometry of the sprayer tank with a 3000 L capacity. (a) Exterior 3D view; (b) longitudinal interior 2D view. Dimensions in millimeters.

2.2. Fluid Velocity Measurements

An experimental factorial design was carried out with 3 independent variables for the configuration of the agitation system: Water level in the tank (1000, 2000, or 3000 L); number of active nozzles (2 or 4); and working pressure of the agitation circuit (8, 10, or 12 bar).

Velocity measurements were made in four circular sections of the tank, with eight measuring points in each section distributed at three heights (Figure 2). These measurements were carried out considering the different combinations of the variables (pressure, number of nozzles, and tank filling level). When the system worked with two nozzles, these were on opposite sides of the tank.

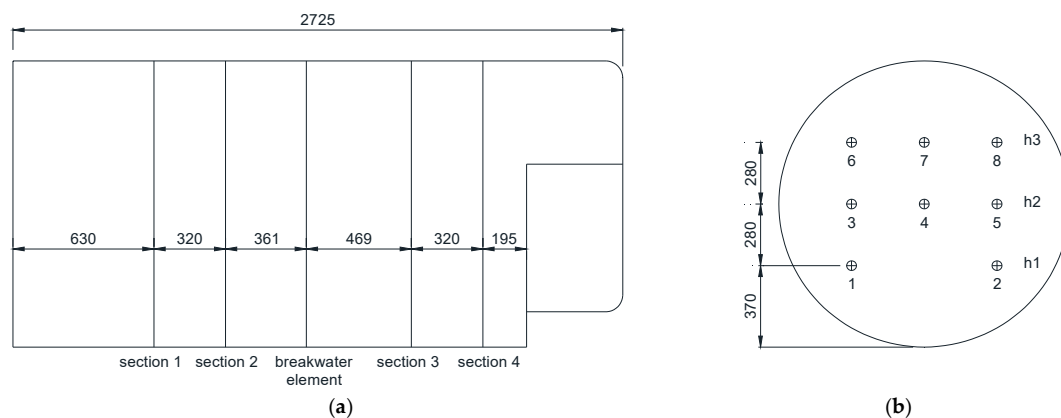


Figure 2. (a) Left. Cross-sections of velocity measurement points inside the tank (dimensions in millimeters); (b) Right. Velocity measurement points within each of the four sections.

In this sense, considering 1000 L in the tank, measurements could only be taken at points 1 and 2 (Figure 2), whereas with 2000 L, they could be taken only at points 1, 2, 3, 4, and 5. Measurements at all sampling points were, therefore, only available with 3000 L of water in the tank.

A 3D microacoustic Doppler velocimeter (3D MicroADV 16MHz by Sontek, San Diego, CA, USA) was used to carry out the velocity measurements, according to the methodology described in [7]. For the validation, 18 CFD models were developed (3 water levels $\times$ 2 number of nozzles $\times$ 3 working pressures).

2.3. CFD Model

A CFD simulation software, specifically, the commercial ANSYS-Fluent v. 15 (ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA), widely accepted by the scientific community for numerical fluid simulations, was used to analyze the liquid velocities generated in the tank sprayer.

The geometry of the tank was drawn with a CAD program. Later, the geometry was imported to a meshing module (Meshing-ANSYS ICEM CFD). In this module, aspects such as the size of the cells or the meshing close to the walls of the model are controlled. It is also possible to predetermine the boundary conditions of the model. Finally, the mesh was imported into the ANSYS-FLUENT program, where the final configuration and calculation were performed.

Of the calculation configuration parameters, the first is to specify whether the calculation is transient or stationary. In our case, the stationary option was chosen, as it represents the reality of the experimental test (constant volume of liquid in the tank and machine stopped in the laboratory).

Secondly, we are faced with the problem of modeling the air in the upper part of the tank not occupied by liquid. ANSYS-FLUENT has multiphase models that would allow a faithful modeling of the liquid–air interphase in the tank, but it would require a great deal of computing power. As, moreover, air does not intervene in the problem, a simple solution was chosen: Only model the water. In this way, it is possible to have a single-phase mode, improving the model convergence.

This methodology has, as a main inconvenience, the requirement of developing a different mesh model for each water volume setting in the tank (Figure 3).

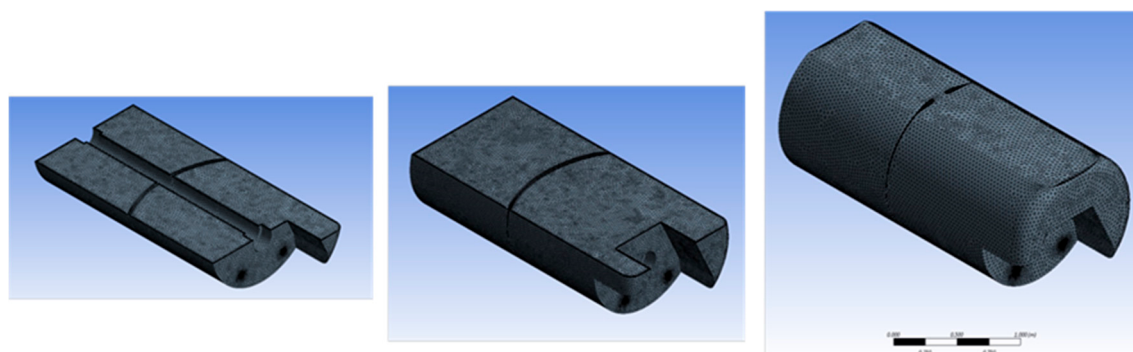


Figure 3. 3D view of 3 mesh configurations of the sprayer tank for 1000 (left), 2000 (center), and 3000 L (right) of water inside.

In other words, a model in which different phases could be implemented would allow the same mesh to be used for any volume of water in the tank, but it would require a great deal of computing power. On the contrary, it is advantageous to develop several simpler models, provided that the goal of the research is only obtaining the liquid velocities inside the tank. In this sense, one simplification must be assumed: The waves inside the tank are negligible.

In our case, having analyzed the tank with liquid volumes of 1000, 2000, and 3000 L, 3 different meshes were developed, which are described in Table 1. Previously, to decide the meshes used in the simulations, a mesh convergence study was carried out [18] for the case of 2 nozzles and 10 bar in which several meshes (cell sizes of 50, 35, and 25 mm) were tested for the three levels of water in the tank (Table 2). No relevant differences were found between results compared to different meshes. To establish the meshes in the walls, values of y^+ obtained in these previous calculations were analyzed. It was observed that almost all the walls had values of y^+ between 12 and 100 (Figure 4). As an exception, the vertical walls of the ends (not the internal breakwater) and the cylinder surrounding the axis of the power take-off, whose values of y^+ were below 10. In view of the results, it was decided to use the scalable wall model in the final calculations, because, in this way, the program guarantees that the calculated y^+ does not fall below 11,125 (limit between the viscous and turbulent layer);

nevertheless, the influence of the vertical walls in the data obtained in the measurement points is limited as no differences were found between the use of standard or scalable wall functions.

Table 1. Characteristics of the computational fluid dynamics (CFD) mesh models developed.

	1000 L Mesh	2000 L Mesh	3000 L Mesh
Number of cells	965,063	1,494,857	1,046,289
Minimum cell size	4.42×10^{-4} m	4.55×10^{-4} m	4.75×10^{-4} m
Maximum cell size	0.025 m	0.025 m	0.035 m
Mesh type		unstructured	
Meshed in walls		6 layers	

Table 2. Characteristics of the CFD meshes studied previously (2 nozzles, 10 bar). * Meshes finally developed in the numerical model selected.

	Maximum Cell Dimension (mm)		
Tank level (L)	25	35	50
1000	965,063 *	578,617	485,779
2000	1,494,857 *	772,332	574,015
3000	2,142,219	1,046,289 *	670,288

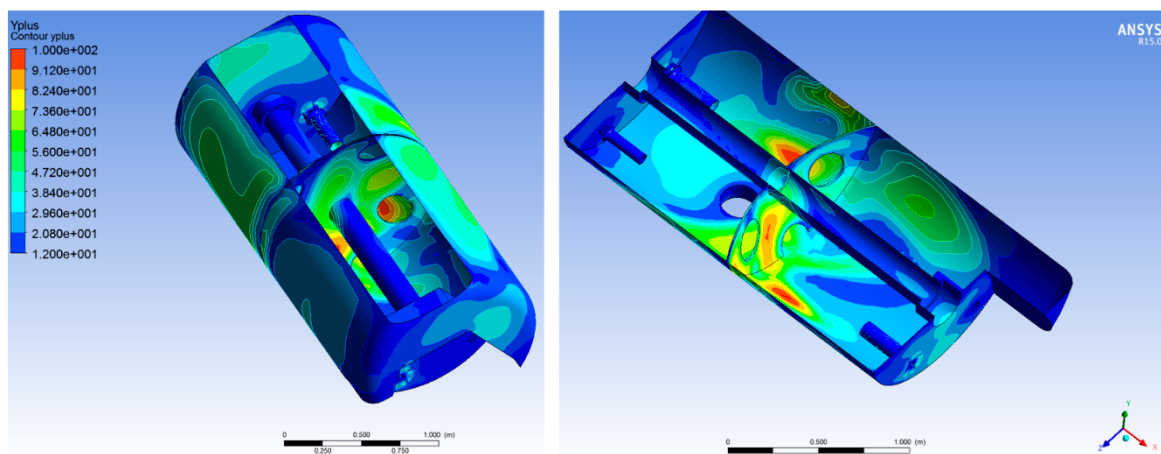


Figure 4. Contours of y^+ in the tank with (left) 3000 and (right) 1000 L, with two nozzles in use and 10 bar pressure.

One of the problems presented by this simplification is the modeling of the water-free sheet in the tank. The “wall” contour condition cannot be imposed, but neither is this surface a fluid outlet. As a proposal, it has been decided to impose a fluid inlet condition, specifying that the mass of fluid entering through that contour is zero.

The other boundary conditions are more evident: The nozzles are considered liquid inlets; the Venturi nozzles of the agitation system were modeled considering their actual geometry and nominal flow at different working pressures.

The outlet boundary condition, necessary for the calculation of the models, was arranged at the bottom of the tank, near the tank emptying area, and the rest are the walls of the tank, both external and internal.

For the calculation, Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) equations were solved with the standard $k-\epsilon$ turbulence model, and for Near-Wall treatment, Scalable Wall Functions were chosen. The calculation was developed in second order with the SIMPLE algorithm. The use of other turbulence models was considered, and several turbulence models were tested: Realizable $k-\epsilon$, Re-normalisation group $k-\epsilon$ (RNG $k-\epsilon$), standard $k-\omega$, Shear stress transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$), even including Reynolds

stress model (RSM). After such calculations, the use of some of these models (such as RSM) was considered inappropriate, as the residuals in the continuity equation obtained were not only high, but the calculation variables at the points studied (for example, the speed) never stabilized at a fixed value. Among the turbulence models that ended with stabilized values (residuals and variables), the Standard $k-\epsilon$ was chosen after verifying that their results were similar to the others.

In addition, it can be said that a bibliographic search of works that study the modeling of liquid flows in tanks using CFD concludes that the ideal turbulence model in this type of problem is not very clear. While some conclude that the standard $k-\epsilon$ model is not suitable for calculating certain variables [19,20], others [21,22] do not see any inconvenience in their use. Therefore, we have chosen to test several and maintain the one that offered acceptable results at the lowest computational cost.

With this setup, residues quickly reached values less than 10^{-4} , with the exception of those in the continuity equation, which were higher the greater the number of cells of the model. For this reason, the number of cells of the 3000 L mesh was limited by increasing the size of the cells. In this context, it is considered that the calculation had converged when the values of these residues were stable, which occurred when the velocity values were stabilized (Figure 5). For this goal, 4 h of calculation were needed in which 1500 iterations were made with a computer with 16 GB RAM and an Intel i7 4820k CPU.

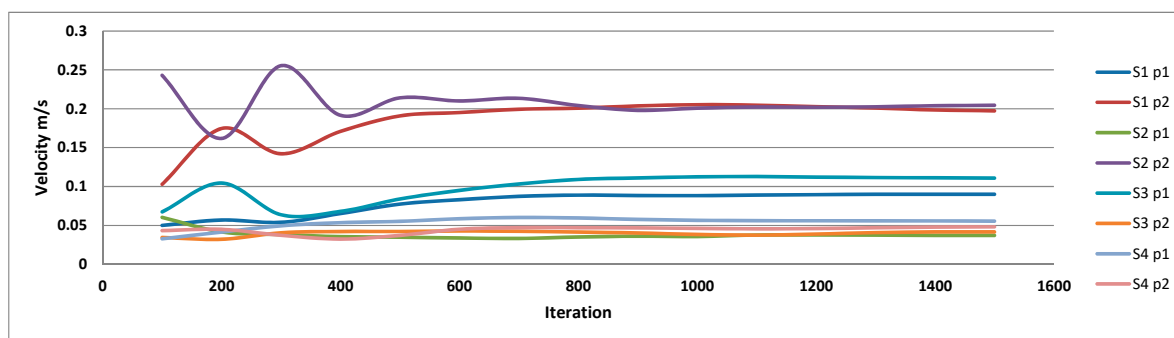


Figure 5. Liquid velocity for a 1000 L model obtained at 8 sampling points as the iterations were in progress. In this case, it can be concluded that 1500 iterations were sufficient to consider the model as stabilized.

The critical issue in the development of CFD models to assess the operation of the sprayer agitation system is the accuracy of the model, as the final design should guarantee the proper mixing of the plant protection products. Poor system performance in real use could cause very serious consequential losses to farmers and a risk to society (inadvertent pesticide residues from poor tank mixing).

3. Results and Discussion

3.1. Mean CFD Velocities

In a first analysis, the mean velocities obtained with the model for a specific setting of the agitation system (pressure, water level, and number of active nozzles) were analyzed. In this way, the variability of the data is absorbed and an overall evaluation of the effect of the regulation parameters is obtained to be compared to that obtained with the experimental data.

In this way, considering the effect of the level of water inside the tank (1000, 2000, and 3000 L) and the pressure of the agitation circuit, Figure 6 shows the mean fluid velocity (points according to the level of water and the pressure). CFD results were in accordance with the experimental ones (ADV measurements) and with those obtained by [23] who used an ADV velocimeter in an aquaculture circular tank and obtained higher velocities with the lower levels of water in the tank.

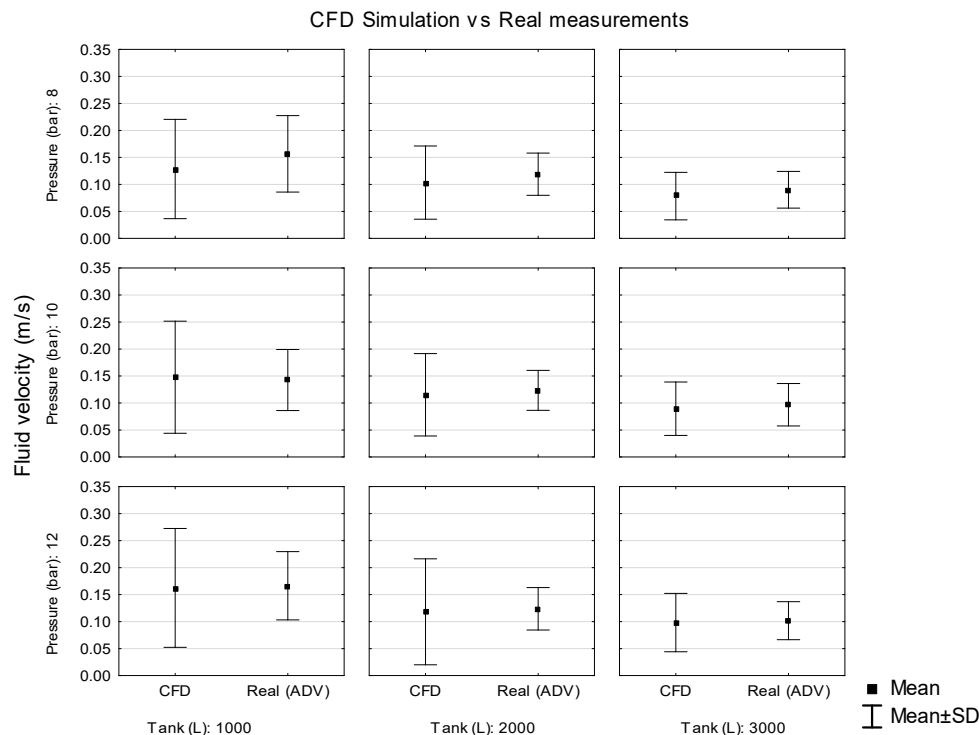


Figure 6. Mean fluid velocities, estimated by CFD and experimentally measured, according to the level of water in the tank and pressures of the nozzle circuits.

The CFD simulation reasonably predicted that the most determining factor in the agitation velocity was the water level in the tank. The pressure of the agitation circuit also had a significant influence on the fluid velocity, with higher velocities generally occurring as the pressure increased. These CFD data were consistent with the experimental ones (ADV measurements) and also with those obtained by [9], who measured fluid velocity using a hot-film anemometer at nine points inside a sprayer tank of 1136 L, working with four nozzles, and registered fluid velocity increments between 40% and 130% as the system pressure increased from 2.07 to 4.70 bar.

In general, results were consistent in both CFD modeling and actual ADV measurements, with CFD values lower than those obtained with experimental measurements.

The number of active nozzles in the agitation system also significantly affected the fluid velocity (Figure 7); velocities were lower with four active nozzles than those with two nozzles. This fact reflects that the location of the nozzles within the tank can affect the fluid velocity more significantly than does the number of nozzles activated. In this case, the nozzles were located on opposite sides of the tank so the effect of increasing the number of active nozzles did not result in an increase in velocity. These results were consistent in both CFD modeling and actual ADV measurements. However, other authors [9] who worked with eight nozzles in the agitation system registered a 14.8% velocity increase compared to that for four nozzles, although, in this case, all of the nozzles were aligned in the lower part of the tank, placed on the same work plane.

This fact reinforces the importance of using CFD models to properly locate nozzles inside the tank during the design phase of the sprayer. When only two nozzles worked, they did so in opposite corners of the tank, so that there was no interaction between the liquid flow rates generated by each nozzle. However, when the four nozzles worked, they faced each other 2 to 2 (Figure 8), so the currents generated tended to be counteracted. Therefore, thanks to CFD models, it can be deduced that the location of the nozzles and the holes of the central breakwater are determining factors in the behavior of the fluid inside the tank.

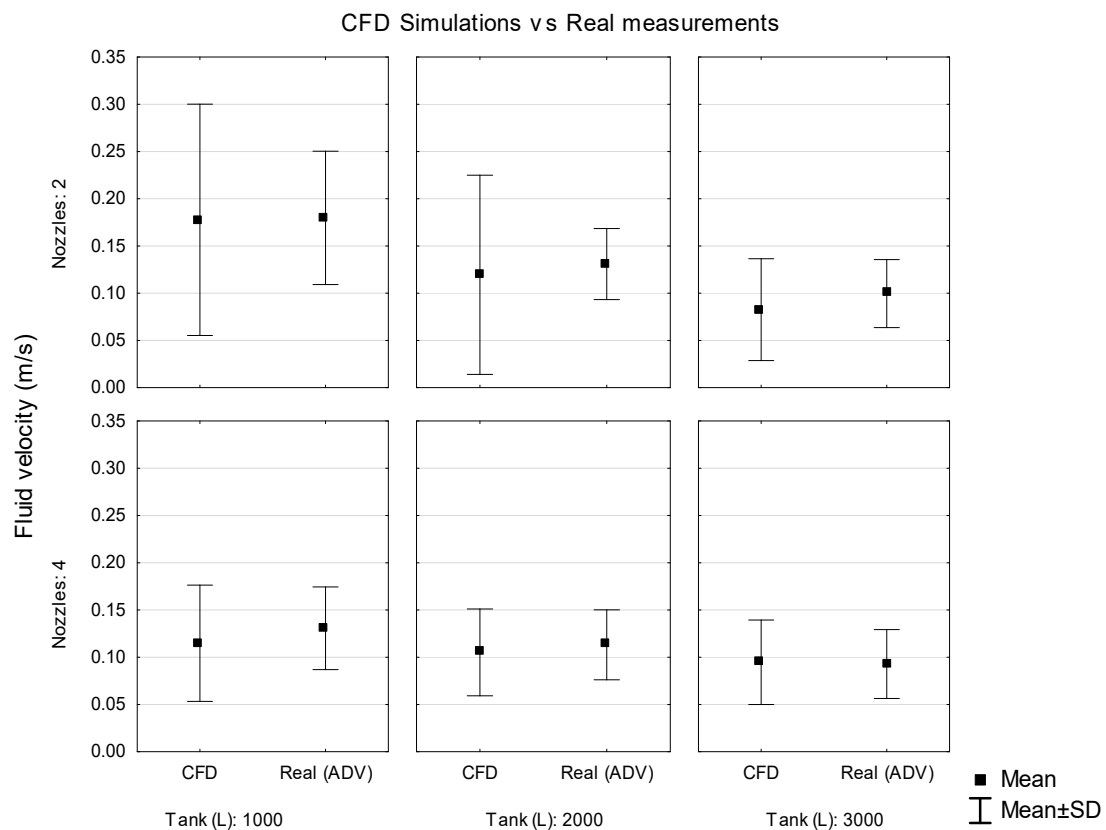


Figure 7. Mean fluid velocities, estimated by CFD and experimentally measured, according to the number of active nozzles.

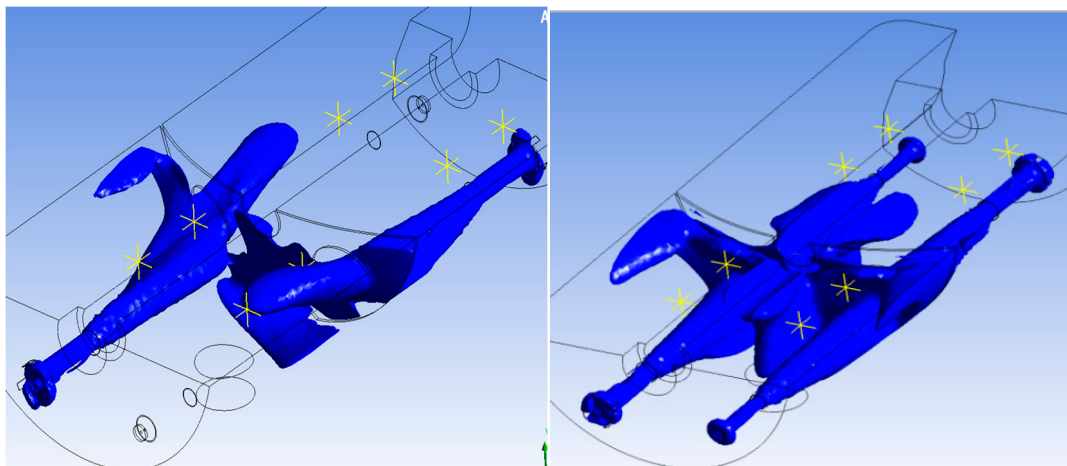


Figure 8. Iso-velocity diagram at 0.2 m/s with (left) two and (right) four active nozzles in a tank with 1000 L. Scale 1:60.

If data are compared by averaging the velocities of the points belonging to the same height (Figure 9), the theoretical velocities obtained in the computer model fit quite well with the experimental ones, although at height 2 (0.65 m from the bottom), the CFD values are significantly lower than those determined experimentally. If the study is carried out by sections (Figure 10), the CFD simulation correctly predicts the section that is the one with the highest speeds in any case.

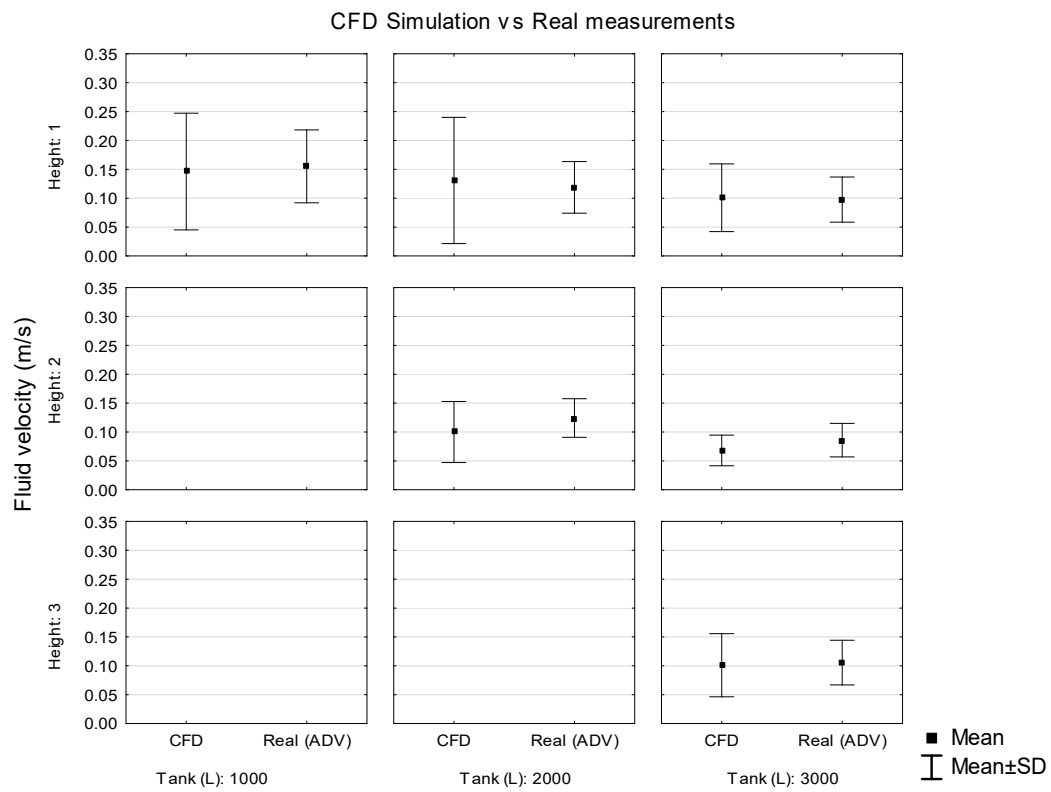


Figure 9. Mean fluid velocities, estimated by CFD and experimentally measured, according to the height of the measurement point (1: 0.37 m; 2: 0.65 m, 3: 0.93 m).

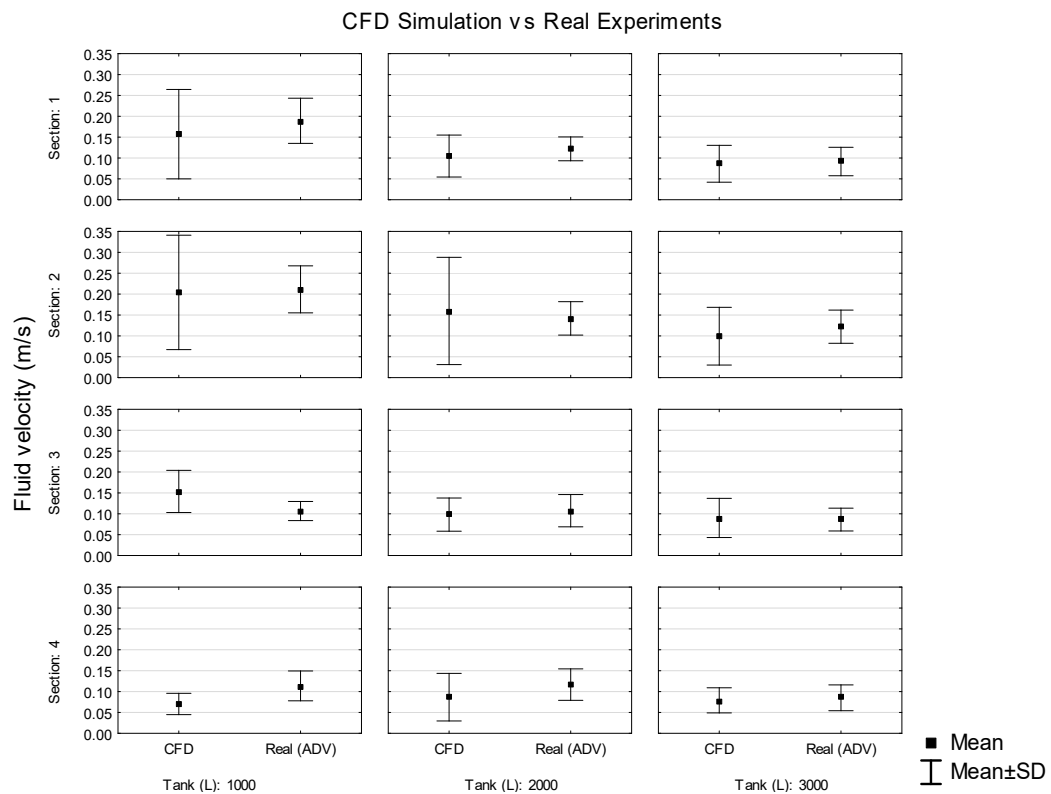


Figure 10. Mean fluid velocities, estimated by CFD and experimentally measured, according to the section of the measurement point.

By analyzing the effect of the regulation parameters of the agitation system on the fluid velocity, and considering the mean velocities obtained as a function of the water level in the tank, the CFD models provide results similar to those obtained with experimental measurements. In this sense, it is clearly useful to use CFD models to obtain data that help in the decision making related to the regulation and design of the agitation system, thereby reducing experimental tests in the first phases of equipment development. It should be remembered that theoretical velocities calculated in the CFD simulation always had a greater variability than those obtained in the experimental tests.

3.2. Validation Error

Analyzing point by point, without grouping data according to the setting parameters of the agitation system, the relative errors (%) obtained with the model and those obtained with the experimental test have been quantified using Equation (1).

$$E = \frac{1}{N} \sum \frac{(V_m - V_c)}{V_m} \times 100, \quad (1)$$

where “ E ” is the relative error (%), “ V_m ” is the value measured, “ V_c ” is the value calculated by the simulation with CFD, and “ N ” is the number of points measured.

According to the developed models, a total of 360 data have been compared. As shown previously, the mean velocities obtained in the real experiment were very similar to those by CFD simulation, although a higher standard deviation of the data is observed in the simulation (Table 3).

Table 3. Model errors considering all measuring points.

	Real Experiment	CFD Simulations
Mean (m/s)	0.1126	0.1041
Standard deviation	0.0460	0.0723

However, the detailed analysis of the 360 experimental data according to Equation (1) gives an error of 45.62%. According to the usual validation criterion for this type of model [24], an error below 30% would be admissible. Data with that tolerable margin of error were obtained at 38% of the points, which would be in line with other authors [9] who have also obtained a percentage of low point-to-point correlation in similar experiments.

As an illustrative example, the correlation of the CFD model “1000 L-10 bar-4 active nozzles” with respect to the real experiment was $r^2 = 0.002$, while the mean of the velocities were 0.116 and 0.125, respectively, which, unlike the point-to-point analysis, is a fairly acceptable approximation with an error of 7%. The above case is not an exception, as in all cases (Table 4), the averages obtained with CFD are very good approximations to those measured experimentally.

Table 4. Relative error (%) of the mean fluid velocities estimated experimentally and by CFD, separated by calculation models.

Model	2 Active Nozzles			4 Active Nozzles		
	8 Bar	10 Bar	12 Bar	8 Bar	10 Bar	12 Bar
1000	20%	12%	8%	14%	7%	14%
2000	10%	4%	12%	16%	10%	5%
3000	23%	16%	14%	3%	1%	7%

An explanation for this fact would be that the CFD magnifies the results of the velocities, both up and down, so that the errors by excess are compensated with the errors by default so that the set of values does not deviate from the average by more than 30%.

4. Conclusions

CFD simulation has made it possible to estimate fluid velocities at 38% of the measuring points with relative errors of less than 30%, showing low reliability.

However, the CFD models have allowed the correct prediction of the general behavior of the fluid in the tank considering mean velocities depending on the setting parameters of the agitation system (water level in the tank, hydraulic circuit pressure, and number of active nozzles).

Analyzing the regulation parameters of the agitation system, a lower level of water in the tank or a higher pressure in the hydraulic circuit produces an increase in the velocity in the fluid, thus improving the mixing process. On the other hand, in the case of the effect of the number of active nozzles on the fluid velocity, no general relationship can be established, because the position and orientation of active nozzles are more important than their number. In this sense, CFD analysis makes it possible to detect design errors in the arrangement of the nozzles prior to machine manufacturing. Therefore, with the methodology employed, the CFD can be converted into a useful design tool, allowing decisions to be made regarding the design of the agitation system prior to the manufacture of the first prototype and also to estimate the correct setting of the agitation system.

Author Contributions: Conceptualization, F.J.G.-R. and J.B.; methodology, J.B. and F.J.G.-R.; validation, J.B., F.J.G.-R. and E.G.; formal analysis, J.B.; investigation, J.B., F.J.G.-R., M.V., A.B.; resources, F.J.G.-R., M.V., A.B.; data curation, J.B.; writing-original draft preparation, J.B.; supervision, F.J.G.-R. and E.G.; Project administration, F.J.G.-R.; funding acquisition, F.J.G.-R.

Funding: This research was funded by LAMAGRI (University of Zaragoza).

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Gar Melet S. L. for their assistance with this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. ISO. *Equipment for Crop Protection—Spraying Equipment—Part 2: Test Methods for Hydraulic Sprayers*; ISO 5682-2; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1997.
2. Balsari, P.; Tamagnone, M.; Allochis, D.; Marucco, P.; Bozzer, C. Sprayer tank agitation check: A proposal for a simple instrumental evaluation. In *Proceedings of the Fourth European Workshop on Standardised procedure for the Inspection of Sprayers -SPISE 4-*, Lana, Italy, 27–29 March 2012.
3. Ozkan, H.E.; Ackerman, K.K. Instrumentation for measuring mixture variability in sprayer tanks. *Appl. Eng. Agric.* **1999**, *15*, 19–24. [[CrossRef](#)]
4. Ucar, T.; Ozkan, H.E.; Fox, R.D.; Brazee, R.D.; Derksen, R.C. Experimental study of jet agitation effects on agrochemical mixing in sprayer tanks. *J. Agric. Eng. Res.* **2000**, *78*, 195–207. [[CrossRef](#)]
5. Vondricka, J.; Schulze, P. Measurement of mixture homogeneity in direct injection systems. *Trans. ASABE* **2009**, *52*, 61–66. [[CrossRef](#)]
6. Tamagnone, M.; Balsari, P.; Bozzer, C.; Marucco, P. Assessment of parameters needed to design agitation systems for sprayer tanks. *Asp. Appl. Biol.* **2012**, *114*, 167–174.
7. García-Ramos, F.J.; Badules, J.; Bone, A.; Gil, E.; Aguirre, J.; Vidal, M. Application of an acoustic Doppler velocimeter to analyse the performance of the hydraulic agitation system of an agricultural sprayer. *Sensors* **2018**, *18*, 3715.
8. Armenante, P.M.; Luo, C.; Chou, C.; Fort, I.; Medek, J. Velocity profiles in a closed unbaffled vessel: Comparison between experimental LDV data and numerical CFD predictions. *Chem. Eng. Sci.* **1997**, *52*, 3483–3492. [[CrossRef](#)]
9. Ucar, T.; Fox, R.D.; Ozkan, H.E.; Brazee, R.D. Simulation of jet agitation in sprayer tanks: Comparison of predicted and measured water velocities. *Trans. ASAE* **2001**, *44*, 223–230. [[CrossRef](#)]
10. Chen, M.; Niao, B.; Pan, J.; Li, Q.; Gao, C. Improvement of the flow rate distribution in quench tank by measurement and computer simulation. *Mater. Lett.* **2006**, *60*, 1659–1664. [[CrossRef](#)]
11. Micheli, G.B.; Padilha, A.; Scalón, V.L. Numerical and experimental analysis of pesticide spray mixing in spray tanks. *Eng. Agric. Jaboticaabal.* **2015**, *35*, 1065–1078.

12. Xiongkuy, H.; Kleisinger, S.; Luoluo, W.; Bingli, L. Influences of dynamic factors and filling level of spray in the tank on the efficacy of hydraulic agitation of the sprayer. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* **1999**, *15*, 131–134.
13. García, C.M.; Cantero, M.I.; Niño, Y.; García, M.H. Turbulence measurements with acoustic Doppler velocimeters. *J. Hydraul. Eng.* **2005**, *131*, 1062–1073. [[CrossRef](#)]
14. Poindexter, C.M.; Rusello, P.J.; Variano, E.J. Acoustic Doppler velocimeter-induced acoustic streaming and its implication for measurement. *Exp. Fluids* **2011**, *50*, 1429–1442. [[CrossRef](#)]
15. MacVicar, B.J.; Beaulieu, E.; Champagne, V.; Roy, A.G. Measuring water velocity in highly turbulent flows: Field tests of an electromagnetic current meter (ECM) and an acoustic Doppler velocimeter (ADV). *Earth Surf. Process. Landf.* **2007**, *32*, 1412–1432. [[CrossRef](#)]
16. Hosseini, S.A.; Shamsai, A.; Ataie-Ashtiani, B. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an acoustic Doppler velocimeter. *Flow Meas. Instrum.* **2006**, *17*, 59–68. [[CrossRef](#)]
17. Sharma, A.; Maddirala, A.K.; Kumar, B. Modified singular spectrum analysis for despiking acoustic Doppler velocimeter (ADV) data. *Measurement* **2018**, *117*, 339–346. [[CrossRef](#)]
18. Baker, T. Mesh generation: Art of Science? *Prog. Aerosp. Sci.* **2005**, *41*, 29–63. [[CrossRef](#)]
19. Tamburini, A.; Cipollina, A.; Micale, G.; Brucato, A.; Ciofalo, M. CFD prediction of solid particle distribution in baffled stirred vessels under partial to complete suspension conditions. *AIDIC Conf. Ser.* **2013**, *11*, 391–400. [[CrossRef](#)]
20. Akiti, O.; Armenante, P.M. Experimentally-Validated Micromixing-Based CFD Model for Fed-Batch Stirred-Tank Reactors. *AIChE J.* **2004**, *50*, 566–577. [[CrossRef](#)]
21. Deglon, D.A.; Meyer, C.J. CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations. *Miner. Eng.* **2006**, *19*, 1059–1068. [[CrossRef](#)]
22. Wasewar, K.L.; Sarathi, J.V. CFD modelling and simulation of jet mixed tanks. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* **2008**, *2*, 155–171. [[CrossRef](#)]
23. Oca, J.; Masalo, I. Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. *Aquacult. Eng.* **2013**, *52*, 65–72.
24. Delele, M.A. Engineering Design of Spraying Systems for Horticultural Applications Using Computational Fluid Dynamics. Ph.D. Thesis, Leuven Catholic University, Leuven, Belgium, 2009.



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Article

Biphasic Computational Fluid Dynamics Modelling of the Mixture in an Agricultural Sprayer Tank

Jorge Badules ¹, Mariano Vidal ¹, Antonio Boné ¹, Emilio Gil ²  and F. Javier García-Ramos ^{1,*} 

¹ Escuela Politécnica Superior, University of Zaragoza, 22071 Huesca, Spain; jbadules@hotmail.com (J.B.); vidalcor@unizar.es (M.V.); anbone@unizar.es (A.B.)

² Department of Agri-Food Engineering and Biotechnology, Universitat Politècnica de Catalunya, Castelldefels, 08860 Barcelona, Spain; emilio.gil@upc.edu

* Correspondence: fjavier@unizar.es; Tel.: +34-914-239-301

Academic Editor: Mohammad Yaghouab Abdollahzadeh Jamalabadi

Received: 24 March 2020; Accepted: 15 April 2020; Published: 18 April 2020



Abstract: Agitation inside agricultural sprayer tanks can be studied while using an international standard procedure, based on obtaining internal samples of liquid. However, in practice, this test is not easy to perform. Herein, we propose the explicit study of the mixing procedure with biphasic computer simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD). An experimental test was performed on a 3000 L tank of a commercial air-assisted sprayer, with two different agitation system configurations, in order to compare the results of several theoretical physical models of biphasic flows for CFD, both Eulerian and Lagrangian. From the analysis of these theoretical models, we conclude that the Volume of Fluid model is not viable and the Discrete Phase Model produces erroneous results, while the Eulerian and Mixture models can both be useful. However, the results obtained suggest that complex streams generated by real-world agitation systems produce more errors in calculations. Both models can be conducted in the design phase, prior to the implementation of the machine. In addition, the computer simulations allow for researchers to analyse the mixing process in detail, making it possible to evaluate the efficiency of an agitation system according to the time that is required to reach mixture homogeneity.

Keywords: spray tank; agitation system; product concentration; Euler-Euler models; plant protection products

1. Introduction

Agricultural pesticides are widely used to fight against fungi, insects, and weeds. These products are applied with different types of sprayers, but their use generally requires dissolution in a water tank at the manufacturer recommended concentration.

These tanks have agitation systems that move the liquid to achieve homogeneity and prevent sedimentation. Standard requirements [1] for sprayer design (including Venturi agitators, if necessary) guarantee this homogeneity with a maximum deviation of 15%. There is also a standard procedure for studying agitation, the ISO 5682-2 standard [2]. After introducing a tracer to the solution, this procedure requires taking samples at three different levels after 10 min of agitation, and then repeating the process 16 h later. In practice, this procedure is time-consuming and labor intensive. As an alternative, several methods have been proposed to more efficiently study agitation in sprayer tanks, including the use of turbidity meters [3,4], photography of transparent tanks [5], glass microsphere sedimentation studies [6], and correlating the homogeneity of the solution with measurements of velocities in the liquid of the tank [7].

Ensuring that the agitation system adequately fulfils its function is very important for the machine manufacturer; however, although some of the mentioned methodologies are simpler than the ISO

standard [2], they all still require costly experimental measures to be added to previously manufactured equipment [8]. For this reason, numerical simulation prior to equipment development would allow for the efficiency of the agitation system to be evaluated in the design phase prior to manufacturing. To achieve this, Computational Fluid Dynamics (CFD) is a tool with great potential. This is a computer numerical calculation technique that solves problems involving fluids flows. Its most common application in the study of agricultural sprayer agitation systems has been the estimation of liquid velocities and the subsequent comparison with real values [9–11], the influence of different nozzle positions, orientations, and operating pressures [12], and the empirical study of concentration in the solution by correlating it with the velocities of a CFD model of a sprayer tank [13].

However, there are numerous studies that are based on CFD in the chemical industry that explicitly address the problem of mixture agitation in tanks by means of biphasic flow modelling. The most common case is the simulation of cylindrical tanks with solid-liquid mixtures, where agitation is performed with rotating impeller blades [14–16]. A study comparing the density of a mixture of different oils in a storage tank with corresponding CFD simulation highlights the usefulness of this approach for liquid-liquid mixing problems [17]. The simulation of liquid-gas mixtures is also possible [18]. However, studies of tank simulations in which the agitation system consists of nozzles [19], similar to the most common agitation system in agricultural sprayers, are much less common.

Therefore, this work aims to evaluate the potential of biphasic CFD modelling of a mixture inside a spray tank of a commercial orchard sprayer. The purpose is to obtain explicit information regarding the concentration of the dissolved product at any point of the tank. For this purpose, different CFD models have been analyzed, and empirical data validated the estimated product concentration results. The main objective of this research is to provide sprayer manufacturers with a useful and ready-to-use procedure to improve agitation system designs.

2. Results and Discussion

2.1. Experimental Results of Agitation

The experimental results of the tests (Table 1) showed that high homogeneity is achieved in the tank mixture, both with two and four agitators working, as the calculated averages deviated very little from the theoretical 4 g/L of dispersed phase concentration that was introduced into the tank.

Table 1. Concentrations of the dispersed phase after 10 min of agitation, at 10%, 50%, and 90% of the liquid height in the tank. Mean and standard deviation of the samples taken at the back and front of the tank.

Configuration		Back		Front	
		Mean (g/L)	SD	Mean (g/L)	SD
Two mixing nozzles	90%	3.975	0.011	4.001	0.024
	50%	3.991	0.015	3.955	0.051
	10%	3.993	0.043	3.96	0.041
Four mixing nozzles	90%	3.948	0.044	3.977	0.031
	50%	4.006	0.008	3.983	0.013
	10%	3.933	0.014	3.951	0.048

2.2. Results of Agitation with CFD Models

After presenting the experimental results, the results that were obtained from the CFD simulations with the different multiphase models are presented and discussed.

2.2.1. DPM

Figure 1 shows the results of the tank agitation simulation using the DPM model with 3000 L, running two agitators, after 10 min of simulated time. Remarkably, the distribution of the secondary

phase is not uniform at all, as would be expected from the experimental agitation results. The simulation shows that there were zones of the tank where the concentration was very low or non-existent, while in others the concentration was high, exceeding the range of the displayed scale. The calculation simulating four working nozzles provided similar results.

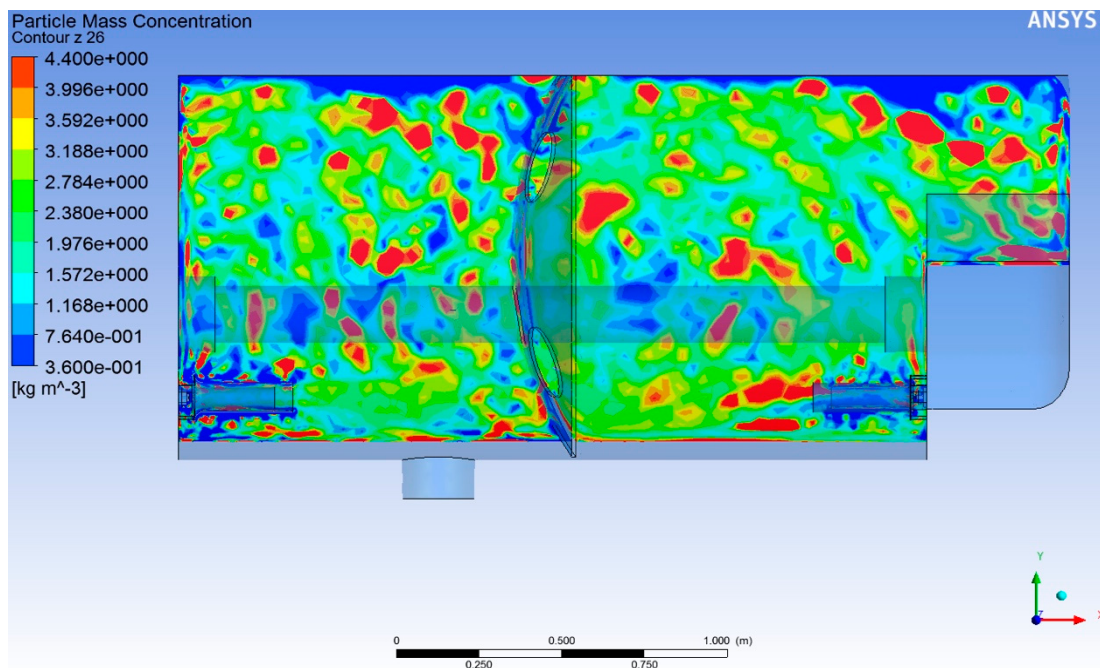


Figure 1. Concentration of the dispersed phase under the DPM model, with two working agitators, after 10 min of agitation simulation. The concentration results were not uniform. Lateral view of the tank. Concentration at a plane containing a pair of agitators.

The CFD simulations allow us to know the state of agitation in the computer model at any time. Figure 2 shows the evolution in the CFD simulation of the concentration at sampling points selected for the experimental measurements. When the simulation begins, the average concentration at the control points was zero, which is logical because the dispersed phase was introduced to the model in a confined zone of the tank far from the control points. Subsequently, the concentration presented volatile values in the first minutes of simulation, which are also explained by the movement of the dispersed phase through the tank when it was not yet mixed uniformly, so that, if a “cloud” of dispersed phase passed through a control point, the concentration increased violently, only to fall suddenly afterwards. However, although this behavior became smoother after the fifth minute of simulation (300 s), it never disappeared, even when the particles were already mixed throughout the model. The calculation at the end of the simulation was far from the expected one.

2.2.2. Mixture Model

The results that were obtained with the Mixture model were utterly opposite. Although in the first minutes of the agitation simulation, the calculation indicated that the concentration of the product was very heterogeneous in the different control points; as time passed, the concentration converged to a single value. In the case of operating with two agitators, the concentration results are shown in the six control points (Figure 3) located in three different levels, in which the CFD programme predicts a very homogeneous mixture throughout the tank after about 300 s of simulation. In general, the simulation seems to be consistent with the experimental data, as the result of the simulation yields an average concentration of 4.08 g/L. That supposes a relative error of 2.5% with respect to the measured mean value of 3.98 g/L (Table 1).

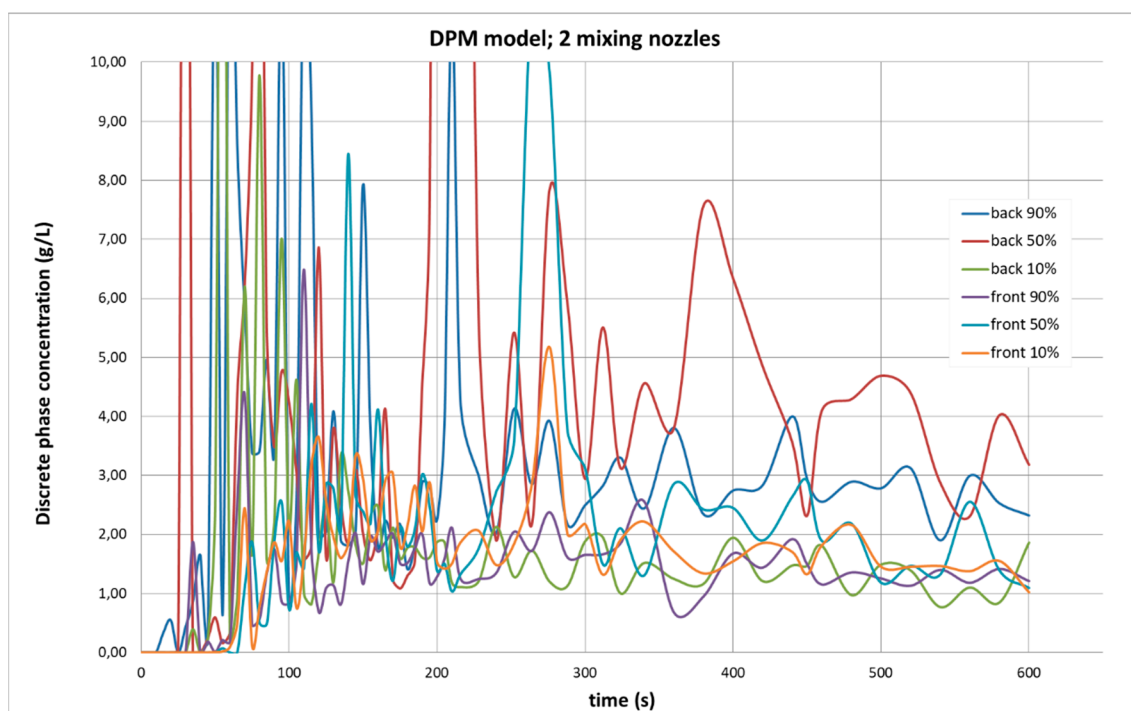


Figure 2. Evolution of the dispersed phase concentration during the simulation of agitation with the multiphase Discrete Phase Model (DPM) model, with two working nozzles. If the calculation were valid, an almost homogeneous concentration of 4 g/L should be obtained, which is the average amount of dispersed phase introduced in the calculation at the beginning.

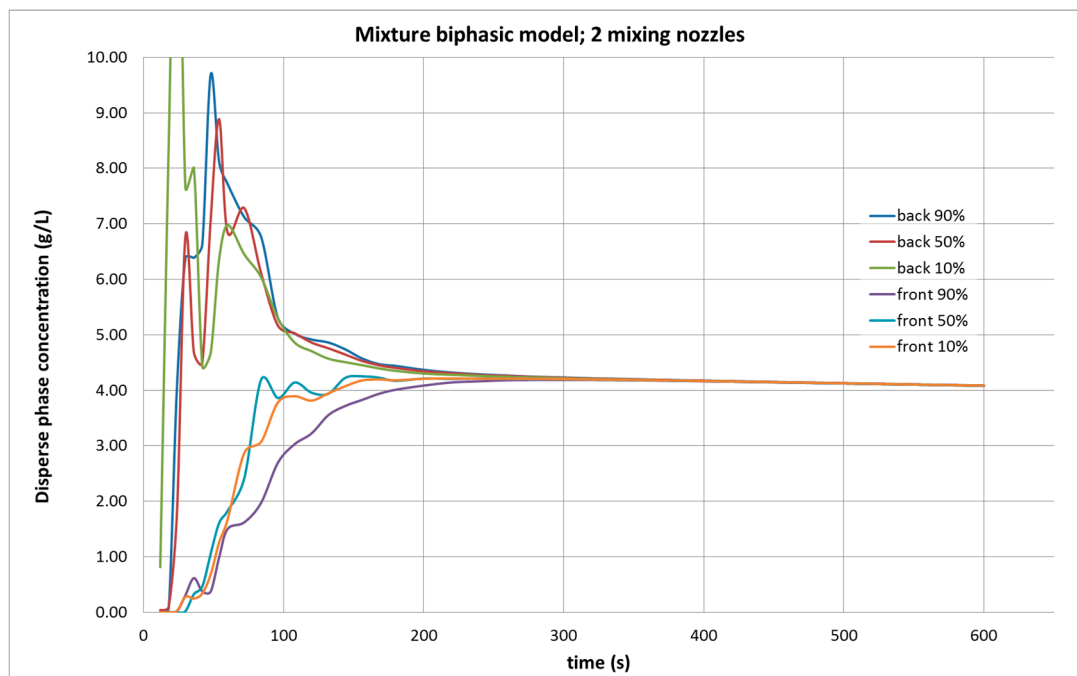


Figure 3. Evolution of the dispersed phase concentration in the Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation of the tank under study, in a biphasic mixture model, with two agitators operating, from six control points in the front and the rear part of the tank, at 90, 50, and 10% of the height of water in the tank.

The results of the simulation with four agitators, as shown in Figure 4, predicted that 600 s were required to achieve homogeneity in the control points, which is much higher than the necessary time with only two nozzles running. In addition, the calculated average concentration is 3.3 g/L, well below the 3.97 g/L experimentally measured. A portion of the dispersed phase has been “lost” during this calculation.

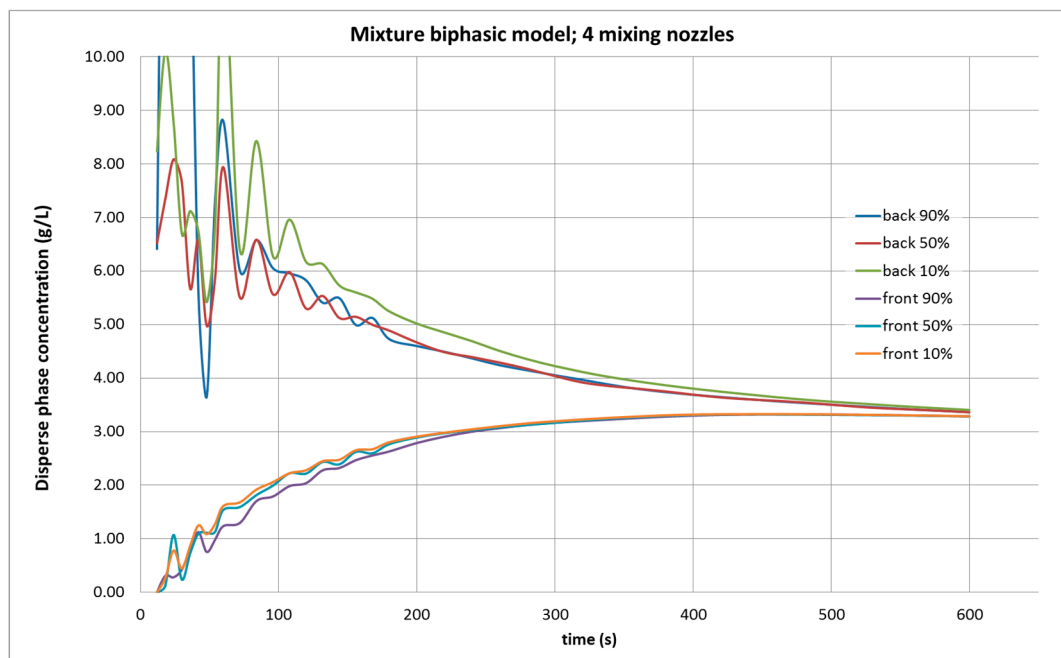


Figure 4. Evolution of the dispersed phase concentration in CFD simulation in the tank under study, with a biphasic mixture model, with four agitators operating, from six control points, in the front and the rear part of the tank, at 90, 50, and 10% of the height of water in the tank.

2.2.3. Eulerian Model

Figure 5 shows the results of the agitation simulation with two agitators studied using the Eulerian biphasic model. The results were similar to the Mixture model, but the homogenization of the content in the tank required a longer time (about 100 s more). Experimentally, it is not possible to know which model reflects reality more accurately, because continuous and real-time control of several points inside the tank cannot be realized with the methodology that was proposed by ISO [2].

Once homogeneity is reached in the tank during the last seconds of the simulation, the same trend was observed as in the previous Mixture model; the estimated CFD concentration decreases as the calculation progresses.

The evolution of the concentration at control points for the Eulerian simulations was like those of the biphasic Mixture model, as shown in Figure 6. Numerically quantifying the results obtained in the simulations under the two-phase Mixture and Eulerian models, the data shown in Table 2 are obtained.

Table 2. Concentrations of the dispersed phase after 10 min of agitation, at 10%, 50%, and 90% of the liquid height in the tank. Mean and error in the control points in the CFD simulations with respect to the experimentally measured values. The results from biphasic Mixture and Eulerian models, at the back and front of the tank.

Configuration		Mixture			
		Back		Front	
		Mean (g/L)	Error (%)	Mean (g/L)	Error (%)
Two mixing nozzles	90%	4.086	−2.79%	4.081	−2.00%
	50%	4.083	−2.31%	4.08	−3.16%
	10%	4.08	−2.18%	4.087	−3.21%
Four mixing nozzles	90%	3.364	14.79%	3.284	17.43%
	50%	3.362	16.08%	3.284	17.55%
	10%	3.405	13.42%	3.289	16.76%
		Eulerian			
		Back		Front	
		Mean (g/L)	Error (%)	Mean (g/L)	Error (%)
Two mixing nozzles	90%	4.007	−0.81%	3.999	−0.55%
	50%	3.992	−0.03%	4.005	−0.55%
	10%	3.983	0.25%	4.002	−1.29%
Four mixing nozzles	90%	3.422	13.32%	3.322	16.47%
	50%	3.408	14.93%	3.311	16.87%
	10%	3.455	12.15%	3.312	16.17%

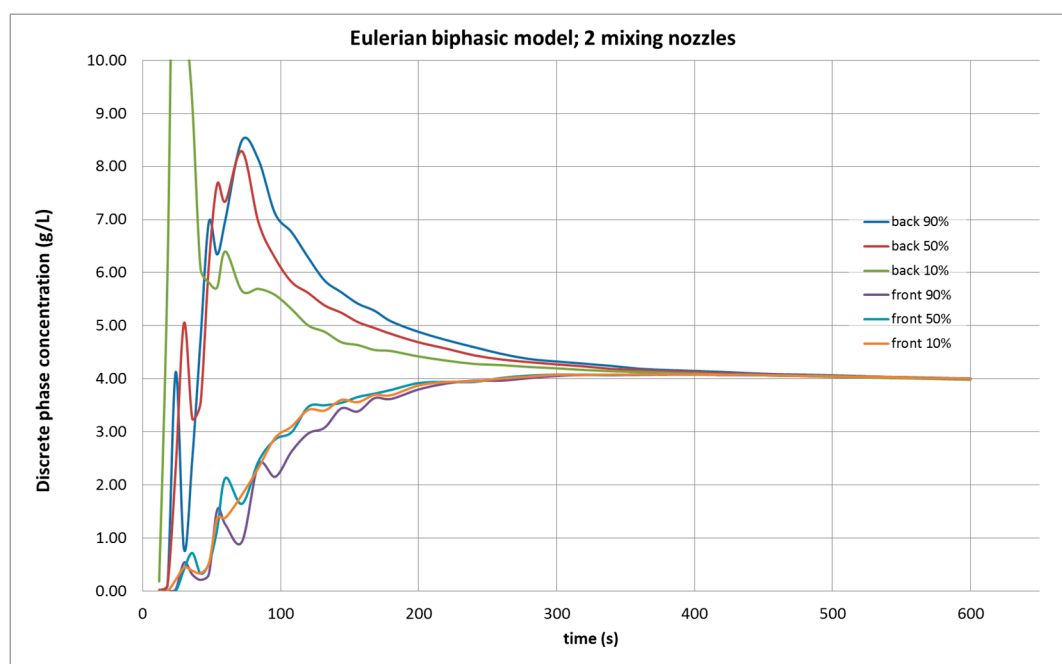


Figure 5. Evolution of the dispersed phase concentration in CFD simulation in the studied tank, under the biphasic Eulerian model, with two agitators working, from six control points.

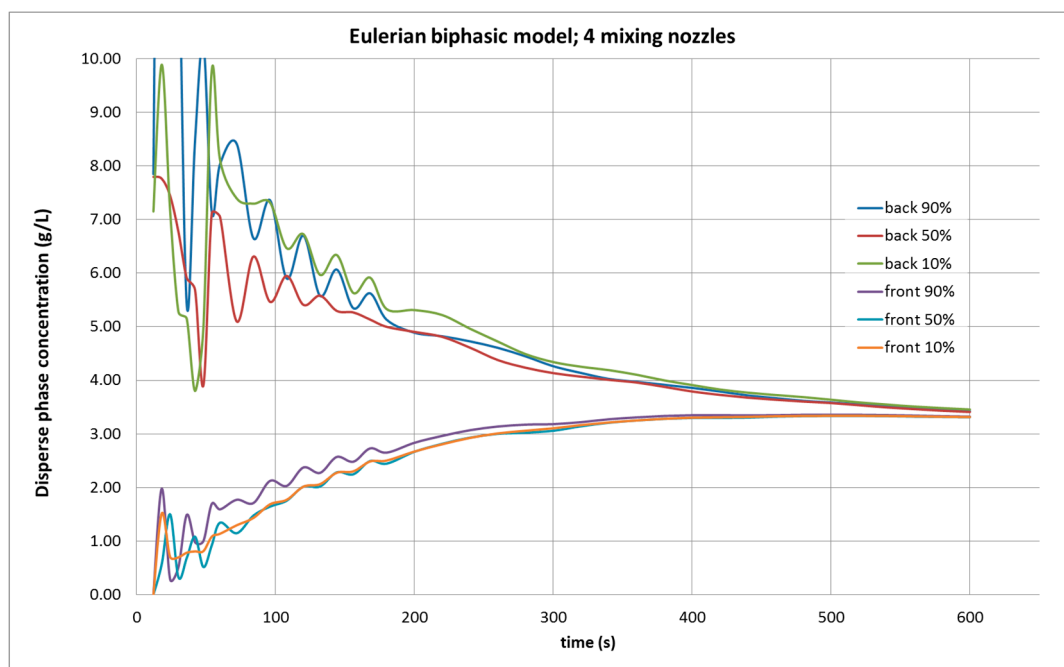


Figure 6. Evolution of the dispersed phase concentration in CFD simulation in the studied tank, under the biphasic Eulerian model, with four agitators working, from six control points.

3. Discussion

The average concentration calculated for the six control points using the DPM model, as shown in Figure 2, was less than half the expected value at the end of the simulation. The calculation software itself offered part of the explanation, as, after 10 min of agitation simulation, the software indicated that it could not calculate the position of 2548 of the 60,000 sample particles studied. This is equivalent to 4.2% of the dispersed phase having been lost during the calculation, but it does not fully explain the losses, which were more than 50% in the control points. However, according to the CFD software, the average concentration calculated in the whole tank was 3.83 g/L. Therefore, the local concentration in certain areas of the model (Figure 1) had to be very high, which counteracted the low concentration regions in the average value calculation. The dispersed phase was not dissipated with this model, but it was not well distributed. We conclude from these results that multiphase agitation simulation using the DPM model leads to erroneous results.

Biphasic CFD simulation using the Eulerian model with two agitators is considered to be as successful, while the same average concentration calculation using the biphasic Mixture model was slightly above what was experimentally measured. Table 2 shows the predicted concentration values by the CFD simulation values and errors as compared with the experimental ones. When the four-agitator operation was simulated, both biphasic models followed the same pattern, but the Mixture model provided slightly lower values than the Eulerian one; however, neither model adequately matched the experimental results. Although both of the simulations did reflect the homogeneity of the mixture, the calculated average concentration value was lower than the experimental value. While a higher number of agitators in operation implies lower average fluid velocities within the tank, causing reduced agitation and lower concentrations of dispersed phase [7], the difference with the simulation is too significant to be explained by this phenomenon.

Another cause must explain the errors compared to the experimental ones in the four agitator simulations. A new simulation with time-varying conditions was performed to understand these calculation discrepancies, as shown in Figure 7. From $t = 0$ to $t = 600$ s, the calculation was performed while considering the operation of four nozzles, simultaneously. From $t = 600$ s to $t = 800$ s, the four agitators continued to operate in the same way, but the calculation adopted the Reynolds Stress

Model to simulate the turbulence, instead of the standard $k-\varepsilon$ approach. Between $t = 800$ s and $t = 1400$ s, the agitation system was halted in the CFD simulation and the initial turbulence model calculation resumed. Finally, after $t = 1400$ s, the agitation system was activated again, but only with two active nozzles.

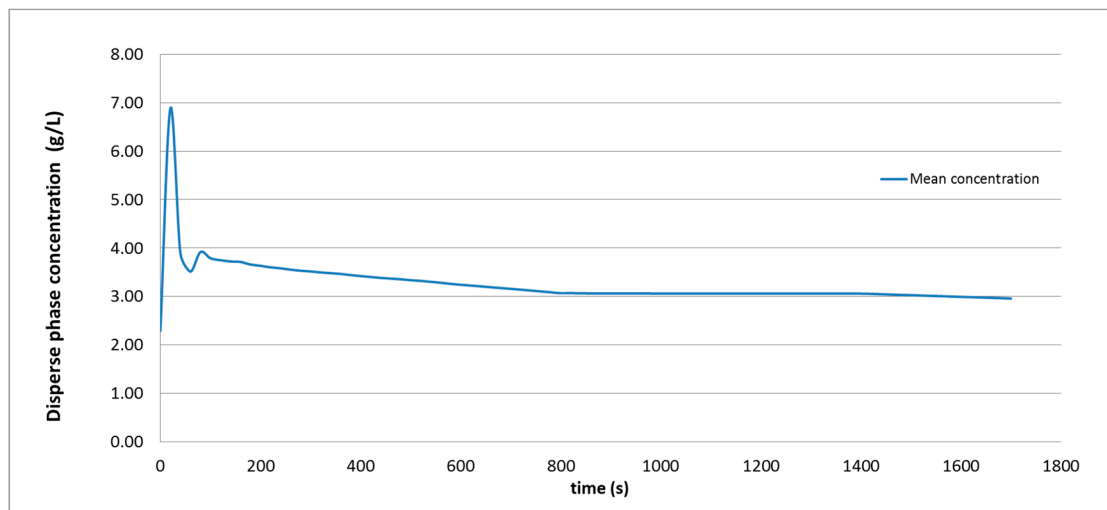


Figure 7. Evolution of the mean concentration during a simulation in which the calculation parameters are changed. Four agitators from $t = 0$ to $t = 800$ s, no agitation from $t = 800$ to $t = 1400$ s, two agitators after $t = 1400$ s.

After an initial unstable phase, the concentration decreased at a constant rate, with no noticeable change due to the adoption of another turbulence model. The change could only be seen now when the agitation system stopped; from that moment, the dispersed phase concentration seems to remain constant. However, when the agitation system was activated again, with two nozzles, the dispersed phase decreased again, but at a much lower rate than in the stage with four nozzles in operation.

Therefore, the source of error cannot be attributed to either the mesh or the chosen turbulence model, which has also previously been shown [11] to provide reasonable results. We can also exclude the case of an inadequate time step, because a test simulation using four working agitators with 0.5 s time steps, in which the calculation residues of the dispersed phase were less than 1×10^{-5} ; the obtained results were very similar to those that were obtained with time steps of 1 s.

The significant error that accumulated in the calculation with four agitators might be because the streams generated in the tank (shown in Figure 8) are more complex (they involve more recirculation), so, under these conditions, the calculation errors in the dispersed phase were greater. The complex stream conditions have been studied previously [11], and they occur because the main jets collide in the breakwater holes when all of the agitators are activated, impeding an adequate exchange of fluid between the two sub-chambers of the tank. With two agitators operating, the flow runs freely through the whole tank, crossing the breakwater through its openings without any problem, as shown Figure 8; but with four agitators working simultaneously, the flows become independent in four internal recirculation cells.

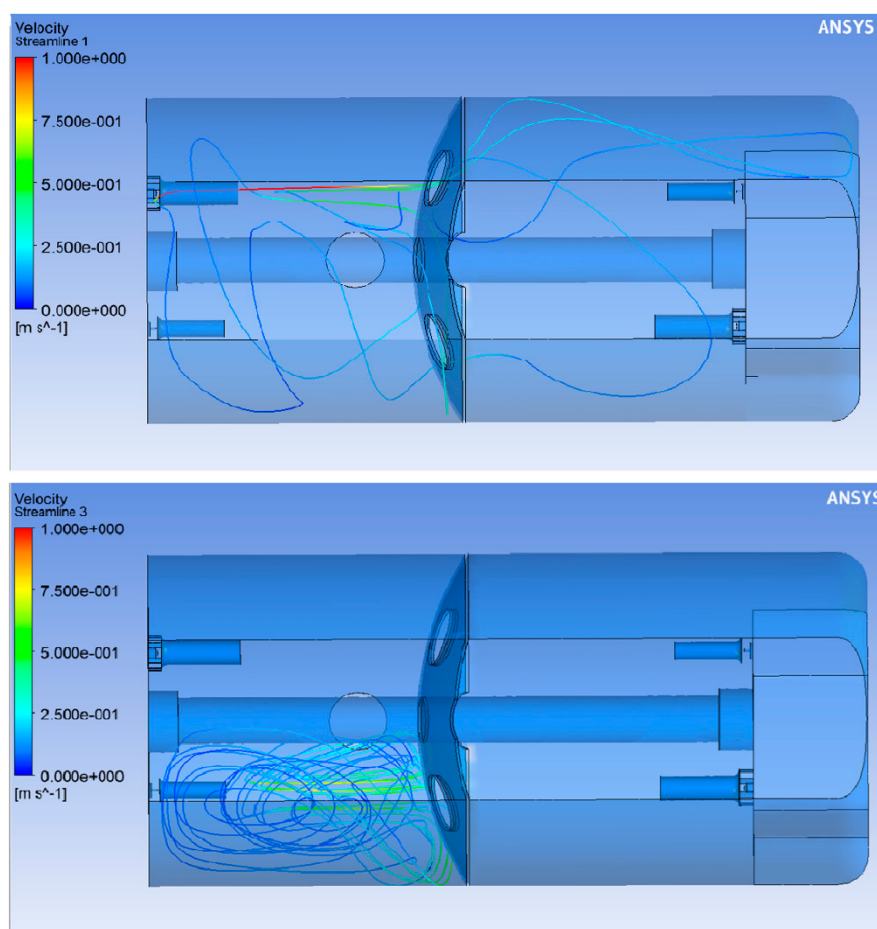


Figure 8. Top image of the tank with the main stream lines that pass through two points of the tank in front of two of the agitators. Top: only two agitators (those from opposite corners) are operating. Bottom: operation with all the agitators.

4. Material and Methods

4.1. Apparatus and Experiment

An air-assisted sprayer with a 3000 L cylindrical geometry tank (GarMelet S.L., Zaidín, Huesca, Spain), with two interconnected cameras separated by a breakwater was used as a model sprayer. The tank has a cylindrical hole, through which a drive shaft passes across to activate the rear fan, according to Figure 9. There are four Venturi effect agitators inside the tank, which consist of two different models with different flowrates. These agitate the liquid and can operate either simultaneously or only the two highest flow agitators, which are placed at opposite corners.

A series of experimental measurements [7] and CFD modelling [11] have already been performed with this tank in relation to liquid velocities with different machine configurations. Accordingly, this work therefore extends previous studies, as the velocities of the liquid inside this tank had been studied. The results of these previous studies have been directly used in this work, as, for example, methodology for the meshing and certain configurations of the calculation. Additionally, in this research, biphasic CFD modelling of the mixture is implemented in such a way that the developed methodology would be extensible to the study of any agitation system of agricultural sprayers.

For this experiment, two different tests have been performed with the tank filled with 3000 L of water and the hydraulic circuit of agitation operating at 10-bar pressure:

Simultaneous use of two high-flow agitators only.

Simultaneous use of all four agitators, including two high-flow and two low-flow.

Once the tank was filled with 3000 L of clean water, 12 kg of copper oxychloride was added to achieve a theoretical average concentration of 4 g/L. After 10 min of agitation, samples were taken at three different levels of the tank: 10%, 50%, and 90% of the liquid height, located in a vertical line under each upper opening of the tank (front and back). Subsequently, the samples were dried, and the solid residue was weighed. Five samples were collected per point, giving a total of 30 samples per test.

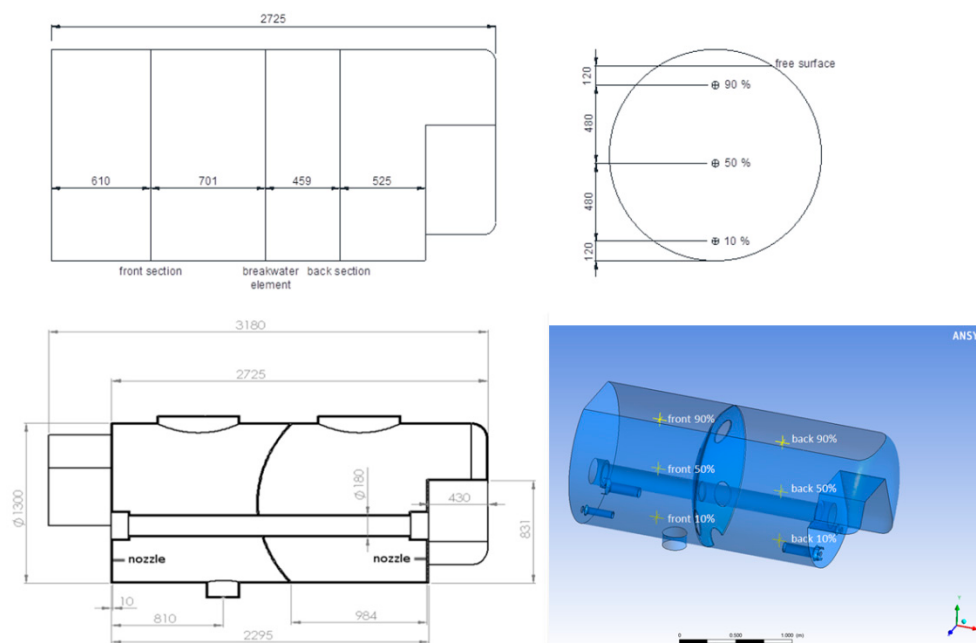


Figure 9. Location of sampling points (top); longitudinal cross-section of the tank (bottom left); three-dimensional (3D) scheme with sampling points (bottom right). Dimensions in mm.

4.2. CFD Models

For the resolution of all models, the software ANSYS-Fluent-17.0 (ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA) was used as the CFD code. The problem under investigation consists of the computer modelling of a multiphase fluid, where the primary phase is water. In the context of the ANSYS-Fluent software, such multiple problems can approach using the four following mathematical models: Volume of Fluid (VOF), Eulerian, Mixture, and Discrete Phase Model (DPM). In the following sections, the advantages and disadvantages of each of these models for the problem under study are briefly described.

4.2.1. VOF Model

The VOF model is an Euler-Euler model; that is, both primary and secondary phases are studied by means of an Eulerian approach. In the VOF model [20], the phases are immiscible. In our test case, the requirement for the Courant number to be less than 1, even in the most unfavorable cells [20] of the calculation mesh, is a major limitation of using this model. The Courant number is defined, as:

$$C = \frac{v \times \Delta t}{\Delta x} \quad (1)$$

where v is the local velocity of the fluid, Δt is the time step, and Δx is the length of the edge of the local finite volume mesh cell. For our study, compliance with this condition is not feasible because the speed of the fluid is higher than 30 m/s in the injection zone of the nozzles, and the cell length is much less than one millimeter. The time step in the transient calculation would have to be so small (on the order of millionths of a second) that a conventional computer would take several years to simulate 1 min of agitation.

The use of this model was ruled out for this reason. It might be a suitable model for the study of tank agitation with rotor blades or propeller systems, because the maximum speed would be lower, but there are not many references [21] regarding its use for this purpose.

4.2.2. Eulerian Model

The Eulerian model is also an Euler-Euler model, but with an important difference: the phases can be interpenetrating, i.e., the whole volume of a cell can be occupied simultaneously by several phases, as long as the sum of the phase percentages is one hundred.

The model represents a complex mathematical apparatus that makes it very computationally expensive, despite being the most widely used method [20] for studying highly heterogeneous multiphase flows, such as sedimentations or fluidized beds. Explicit compliance with the Courant condition, even in the most unfavorable cells, is not required.

4.2.3. Mixture Model

The Mixture model is mathematically simpler than the Eulerian approach [20]; it is more stable and can be computed faster. This approach is more suitable for the study of multiphase flows in which the phases are moderately homogeneously distributed throughout the fluid. The Mixture and Eulerian models are the two models most frequently used to study the agitation of multiphase mixtures in the chemical industry.

4.2.4. DPM Model

The DPM model is entirely different from the other three, as it is an Euler-Lagrange model; that is, although the primary phase is studied with a Eulerian approach, the secondary phases are numerically simulated while using a Lagrangian approach. In other words, the secondary phase is modelled as a collection of particles whose movement is calculated throughout the fluid. Rigorously speaking, it could be said that this is not a multiphase model but a monophasic one, to which the movement of discrete particles is coupled. It is not a very common model in the study of mixtures [22,23] when compared to the Euler-Euler model of interpenetrating phases.

Table 3 summarizes the characteristic differences between the models and their implementation in the present work.

Table 3. Summary of the multiphase models, the secondary phase characteristics, and the model implemented in this research.

Model	Secondary Phase	Model Implemented
VOF	Immiscible	No. Calculation time unfeasible
Eulerian	Interpenetrating	Yes
Mixture	Interpenetrating (more mathematical simplicity than Eulerian)	Yes
DPM	Discrete particles	Yes

4.2.5. Meshing

CAD geometry of the tank was developed, which allowed for the simulation of a solid inside the tank representing the nominal capacity of the tank (3000 L). This action was complemented with the removal of the internal volume of the tank not occupied by the liquid. This solid was imported into a meshing module (Meshing-ANSYS ICEM CFD), where some initial meshing parameters were specified:

Unstructured type mesh

Minimum cell size 4.75×10^{-4} m

Maximum cell size 0.035 m

Six layers of additional mesh on the walls

Additionally, the boundary conditions were also defined. The liquid outlet was defined at the bottom of the tank. The orifices of the mixing nozzles were defined as inlets, while the physical limits of the tank were defined as wall. In order to define the boundary condition of the water-free sheet, which is not a wall and has no friction, or any phenomenon of viscous dissipation, it was defined as a zero flow fluid entry at atmospheric pressure. This strategy was previously used [11] with good results in this type of calculations.

In this way, a mesh of more than one-million cells was obtained, which was imported into the CFD software, with which the final configuration was made. A simplified mesh of 122,609 cells (Figure 10) was obtained using the “polyhedral mesh” tool that incorporates the ANSYS-Fluent software, which was used to perform the calculation. This tool achieves by merging and changes in the geometry of the cells with the worst quality parameters, improving the quality of the mesh and reducing the number of cells. It was verified that this simplification offered similar results to the original mesh, thus saving calculation time.

As for the calculation, the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations were solved with the standard k - ϵ turbulence model. While in CFD simulations of mechanically stirred tanks, this approach can present problems [16,21], for situations similar to the present work, it has been shown to be sufficiently reliable [15,19]. It is outside the scope of this paper to analyze turbulence with models other than RANS [24,25].

Scalable wall functions were implemented with the standard k - ϵ turbulence model, which have provided reasonable results in monophasic models [11] that were performed previously with the same tank. The spatial discretization methods used are the second-order upwind for momentum and turbulence model equations, QUICK for dispersed phase, and PRESTO for pressure.

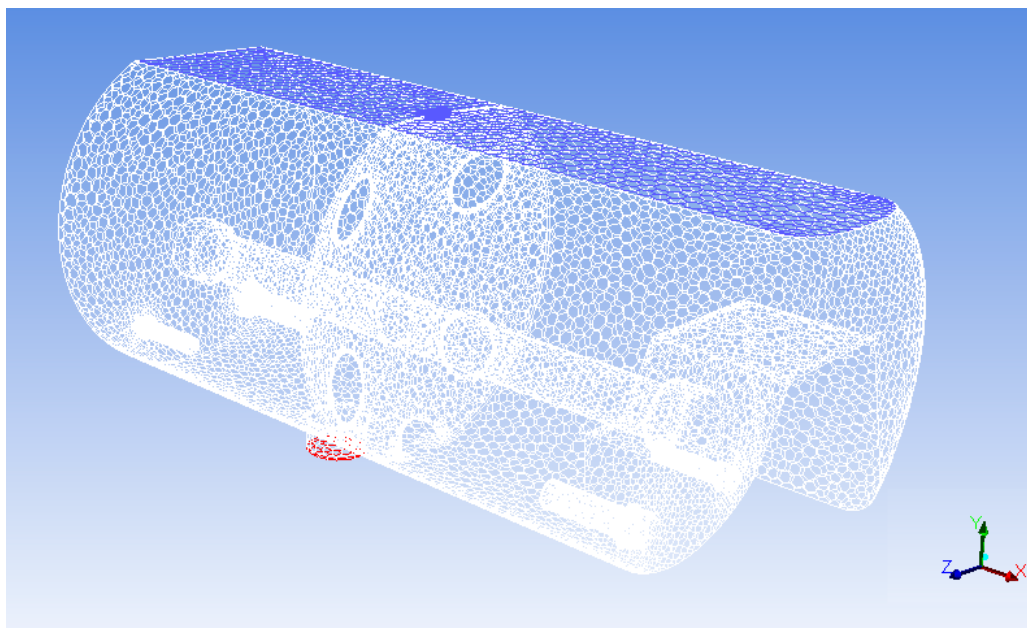


Figure 10. Mesh view in the ANSYS-Fluent software interface.

4.3. Dispersed Phase in the CFD Model

The introduction of the dispersed phase is very different in the Euler-Euler models when compared to the Euler-Lagrange models. The DPM method implies the calculation of two independent, but coupled, phases, one dispersed and the other dispersant [20]. As a dispersed phase, inert particles are introduced. Any material can be modelled in the simulation as a dispersed phase, but the particle diameter must be congruent. It cannot cause rapid sedimentation of the particles, as that would be far from the conditions of the real experiment.

The introduction of 12 kg of secondary phase into the 3000 L model with particles of a few microns in diameter involves a huge number of particles (can be more than 10^{10}). Although this would produce a very accurate model [26], it would be computationally intensive. The ANSYS-Fluent DPM method simplifies the calculation by limiting the number of particles and then extrapolating the behavior of the entire dispersed phase. Analogous to the study of meshing, it is convenient to perform a series of tests to determine what number of particles is reasonable to study [26]. This optimized number should be as large as possible without penalizing the calculation time and it should produce results that are similar to simulations with many more particles. In this way, it was determined that approximately 60,000 particles were sufficient. These particles were introduced at several points in a region of the mesh under the upper back cover and distributed over several seconds, so that large quantities do not accumulate in some cells. This prevents problems with the DPM method, which does not allow for a very high concentration of particles in any cell of the mesh. An appropriate boundary condition was imposed on the walls of the calculation domain, so that the particles could not escape the simulated tank.

The Euler-Euler models that were tested (both Eulerian and Mixture) handled the introduction of the dispersed phase differently. At the beginning of the experiment, a certain amount of secondary phase was set in a region of the mesh under the upper back cover (as in the previous case), where the products to be mixed in the tank are added.

All of the models required a fluid inlet (through the agitator nozzles) and an outlet (placed at the bottom outlet of the tank). As boundary conditions, the nozzles could not introduce a secondary phase from the outside and could not exit through the outlet (backflow = 0). The primary phase was the only product that entered and exited the finite volume model. This caused a certain distortion of the results in the proximity of the nozzles of the operating agitators and in the lower outlet of the tank, because the injected liquid comes from the recirculation of water from the tank and, therefore, does have dispersed phase. However, this strategy (not letting the secondary phase leave the tank) is justified because the dispersed phase concentration at the outlet in the CFD model is uncontrollable during the calculation.

4.4. Time Step and Convergence

The simulated models were intrinsically transient, so a time step between iterations had to be defined for the calculation, to understand the time evolution of the agitation. All of the models used accomplished with the Courant condition. The time step should ideally make the residuals of the calculation equations negligible (values less than 10^{-4}). However, the calculated residuals reach values less than 10^{-4} reasonably quickly if a simple stationary monophasic calculation is performed, except for the continuity equation, which never reaches these values. It seems reasonable not to demand lower residuals in a transient problem than would be obtained in a stationary problem.

In this way, the criterion followed was first to solve the models in stationary mode, and then once the residuals of the continuity equation (the most unfavorable ones) had stabilized, a time step was chosen that provided residuals of the same order of magnitude in the transient calculations. In our case, a time step of 1 s was shown to be sufficient for the transient calculation.

5. Conclusions

The VOF model is not computationally viable with conventional computers, because meeting Courant's condition requires the use of very small-time steps, so a simple simulation of several real minutes of agitation would take years of calculations. Furthermore, such a model is not suitable for this problem, because it is more appropriate for immiscible fluids.

The DPM model requires a limited number of particles to be introduced into the model and additional precautions to be taken in order to avoid divergence during calculation iterations. Even so, the obtained results were clearly wrong as compared to the ones measured experimentally, as the results did not conclude that the mixture was homogeneous.

The Eulerian and Mixture models provided satisfactory results. The results from both models were similar, so, in future simulations, we recommend using the Mixture model, because it requires less calculation time.

The study of biphasic flows in CFD seems to have one major limitation: the calculation fails when strong recirculating flows dominate. The error concerns not so much the general behaviour of the fluid, but mainly in the calculation of the average dispersed phase concentration, which deviates from the true value as the calculation advances. This deviation is apparently due to problems with rounding or interpolation of values within each iteration.

If a certain volume of clean water has been previously introduced into the tank, and the product to be applied to the crop is added, some time is required in order to achieve a homogeneous mixture. The CFD study of the agitation might indicate that one system or a configuration of agitators is better than another if less time is required to homogenize the mixture. Such conclusions cannot be obtained from the application of the ISO 5682-2 standard, giving the time-varying CFD models an advantage. In the tank that served as the basis for this study, it is preferable to use two nozzles instead of four, as the homogeneity of the mixture is clearly reached earlier with only two working nozzles.

Even when considering the encountered difficulties, the proposed method offers a new alternative for the established agitation test in actual standard. This proposal could serve sprayer manufacturers as an easy, cheap, and immediate useful results during the sprayer's design.

Author Contributions: Conceptualization, F.J.G.-R., and J.B.; methodology, J.B. and F.J.G.-R.; validation, J.B., F.J.G.-R., and E.G.; formal analysis, J.B.; investigation, J.B., F.J.G.-R., M.V., A.B.; resources, F.J.G.-R., M.V., A.B.; data curation, J.B.; writing-original draft preparation, J.B.; supervision, F.J.G.-R., and E.G.; Project administration, F.J.G.-R.; funding acquisition, F.J.G.-R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by LAMAGRI (University of Zaragoza).

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Gar Melet S. L. for their assistance with this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. ISO 16119-3:2013. *Agricultural and Forestry Machinery—Environmental Requirements for Sprayers—Part 3: Sprayers for Bush and Tree Crops*; International Organization for Standardisation: Geneva, Switzerland, 2013.
2. ISO 5682-2:2017. *Equipment for Crop Protection—Spraying Equipment—Part 2: Test Methods for Hydraulic Sprayers*; International Organization for Standardisation: Geneva, Switzerland, 1997.
3. Ozkan, H.E.; Ackerman, K.K. Instrumentation for measuring mixture variability in sprayer tanks. *Appl. Eng. Agric.* **1999**, *15*, 19–24. [[CrossRef](#)]
4. Vondricka, J.; Schulze, P. Measurement of mixture homogeneity in direct injection systems. *Trans. ASABE* **2009**, *52*, 61–66. [[CrossRef](#)]
5. Tamagnone, M.; Balsari, P.; Bozzer, C.; Marucco, P. Assessment of parameters needed to design agitation systems for sprayer tanks. *Asp. Appl. Biol.* **2012**, *114*, 167–174.
6. Balsari, P.; Tamagnone, M.; Allochis, D.; Marucco, P.; Bozzer, C. Sprayer tank agitation check: A proposal for a simple instrumental evaluation. In Proceedings of the Fourth European Workshop on Standardised Procedure for the Inspection of Sprayers—SPISE 4, Lana, Italy, 27–29 March 2012.
7. García-Ramos, F.J.; Badules, J.; Bone, A.; Gil, E.; Aguirre, J.; Vidal, M. Application of an acoustic Doppler velocimeter to analyse the performance of the hydraulic agitation system of an agricultural sprayer. *Sensors* **2018**, *18*, 3715. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
8. Gil, E.; Salcedo, R.; Campos, J.; Llop, J.; Ortega, P.; Gallart, M. Orchard sprayer's evaluation according ISO 16119-3. Need to support manufacturer's procedure. In Proceedings of the International Advances in Pesticide Application: Mercure Brighton Seafront Hotel, Brighton, Suxxex, UK, 9–11 January 2018; pp. 325–332.
9. Ucar, T.; Fox, R.D.; Ozkan, H.E.; Brazee, R.D. Simulation of jet agitation in sprayer tanks: Comparison of predicted and measured water velocities. *Trans. ASAE* **2001**, *44*, 223–230.

10. Chen, M.; Niao, B.; Pan, J.; Li, Q.; Gao, C. Improvement of the flow rate distribution in quench tank by measurement and computer simulation. *Mater. Lett.* **2006**, *60*, 1659–1664. [[CrossRef](#)]
11. Badules, J.; Vidal, M.; Boné, A.; Gil, E.; García-Ramos, F.J. CFD Models as a tool to analyse the performance of the hydraulic agitation system of an air-assisted sprayer. *Agronomy* **2019**, *9*, 769. [[CrossRef](#)]
12. Engelbrecht, J.J. Optimisation of a Hydraulic Mixing Nozzle. Master's Thesis, Iowa State University, Ames, IA, USA, 2007.
13. Micheli, G.B.; Padilha, A.; Scalón, V.L. Numerical and experimental analysis of pesticide spray mixing in spray tanks. *Eng. Agric.* **2015**, *35*, 1065–1078.
14. Oshinowo, L.M.; Bakker, A. CFD modelling of solids suspensions in stirred tanks. In Proceedings of the Symposium on Computational Modelling of Metals, Minerals and Materials, Seattle, WA, USA, 17–21 February 2002; pp. 17–21.
15. Deglon, D.A.; Meyer, C.J. CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations. *Min. Eng.* **2006**, *19*, 1059–1068. [[CrossRef](#)]
16. Tamburini, A.; Cipollina, A.; Micale, G.; Brucato, A.; Ciofalo, M. CFD prediction of solid particle distribution in baffled stirred vessels under partial to complete suspension conditions. *J. Chem. Eng.* **2013**, *11*, 391–400.
17. Dakhel, A.A.; Rahimi, M. CFD simulation of homogenization in large-scale crude oil storage tanks. *J. Pet. Sci. Eng.* **2004**, *43*, 151–161. [[CrossRef](#)]
18. Karpinska, A.M.; Bridgeman, J. Towards a robust CFD model for aeration tanks for sewage treatment—A lab-scale study. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* **2017**, *11*, 371–395. [[CrossRef](#)]
19. Wasewar, K.L.; Sarathi, J.V. CFD modelling and simulation of jet mixed tanks. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* **2008**, *2*, 155–171. [[CrossRef](#)]
20. Fluent. *ANSYS Fluent Documentation 15.0*; ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2014.
21. Akiti, O.; Armenante, P.M. Experimentally-Validated Micromixing-Based CFD Model for Fed-Batch Stirred-Tank Reactors. *AIChE J.* **2004**, *50*, 566–577. [[CrossRef](#)]
22. Decker, S.; Sommerfeld, M. Calculation of particle suspension in agitated reactors with the Euler-Lagrange approach. In *Fluid Mixing*, 5th ed.; Institution of Chemical Engineers Symposium Series; Institution of Chemical Engineers: Rugby, UK, 1996; pp. 71–82.
23. Zhang, X.; Ahmadi, G. Eulerian-Lagrangian simulations of liquid-gas-solid flows in three-phase slurry reactors. *Chem. Eng. Sci.* **2005**, *60*, 5089–5104. [[CrossRef](#)]
24. Guha, D.; Ramachandran, P.A.; Dudukovic, M.P.; Derksen, J.J. Evaluation of Large Eddy Simulation and Euler-Euler CFD Models for Solids Flow Dynamics in a Stirred Tank Reactor. *AIChE J.* **2008**, *54*, 766–778. [[CrossRef](#)]
25. Kasat, G.R.; Khopkar, A.R.; Ranade, V.V.; Pandit, A.B. CFD simulation of liquid-phase mixing in solid-liquid stirred reactor. *Chem. Eng. Sci.* **2008**, *63*, 3877–3885. [[CrossRef](#)]
26. Delele, M.A.; Jaeken, P.; Debaer, C.; Baetens, K.; Endalew, A.M.; Ramon, H.; Nicolai, B.M.; Verboven, P. CFD prototyping of fan air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction. *Comput. Electron. Agric.* **2007**, *55*, 16–27. [[CrossRef](#)]

Sample Availability: Numerical models and data are available from the authors.

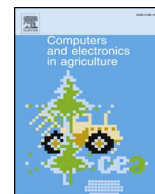


© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Contents lists available at ScienceDirect

Computers and Electronics in Agriculture

journal homepage: www.elsevier.com/locate/compag

Original papers

Comparative study of CFD models of the air flow produced by an air-assisted sprayer adapted to the crop geometry

Jorge Badules^a, Mariano Vidal^a, Antonio Boné^a, Jordi Llop^b, Ramón Salcedo^b, Emilio Gil^b, F. Javier García-Ramos^{a,*}^a Escuela Politécnica Superior - Huesca, Universidad de Zaragoza, Spain^b Escuela Superior de Agricultura de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Modelling

Vineyard

Mesh

Boundary conditions

Crop treatment

ABSTRACT

A computational fluid dynamics (CFD) model for simulating the air flow produced by an air-assisted sprayer can be developed according to any one of several sets of criteria and for various specific applications. Thus far, most CFD models have focused on the characterization of the air flow generated by the sprayer. However, such models may not be the best when assessing the effectiveness of air-assisted sprayers adapted to crop geometry, such as those used in vineyards. In this study, the air flow produced by an air-assisted sprayer adapted to the geometry of a vineyard was simulated using four CFD models: Model 1 was designed to simulate air velocity measurements at the outlets; Model 2 was designed to simulate air velocity measurements at a certain distance from the outlets; Model 3 was dedicated to the modelling of the internal geometry of the air ducts rather than the characterization of the air flows generated by the sprayer; and Model 4, which was developed as a variant of Model 3, was created to perform the same calculation in several stages. The models were validated with actual measurements of the air velocity near the sprayer outlets. The results showed that although Models 1 and 2 (both of which have been used in most existing studies) simplified the calculation, they are impractical for simulating different air flows. By contrast, Models 3 and 4 provided complex meshes that complicate the convergence of the calculation and require a suitable treatment of both the viscosity and the flow near the walls. Model 3 showed the smallest error (16%) in the air velocity estimated in the treatment plane. Model 4 showed potential for future implementation of the dispersed phase and crop-air interaction because it mitigated the problems arising from the complexity of the meshes. It should also be noted that there are errors inherent to the implementation of the CFD model, errors related to inaccuracies in the geometry of the air ducts, inaccuracies related to the measurement of the air velocities, inaccuracies in the quantification of the air flow, and simplifications linked to the turbulent model.

1. Introduction

Computational fluid dynamics (CFD) facilitates the study of numerous transport phenomena associated with fluids. One example is the modelling of the pesticide application process that is performed using agricultural sprayers (Bartzanas et al., 2013), which facilitates the estimation of drift loss (Da Silva et al., 2006; Baetens et al., 2007, 2009; Nuyttens et al., 2011), thereby improving the prediction accuracy of the efficacy of the treatment. Consequently, it is possible to reduce both the treatment cost and the resulting environmental pollution (Svensson, 2001; Ako, 2011; DEFRA, 2001). Field trials, which have been carried out for decades, are tedious and expensive; moreover, they are not repeatable because of the influence of atmospheric conditions, varying crop characteristics, etc. By contrast, CFD models are advantageous, as they can estimate the characteristics of the treatments carried out with

the sprayers under a wide range of real-world conditions (Teske et al., 2011).

In recent years, several researchers have developed CFD models to simulate the performance of the air-assisted sprayers used in fruit orchards (Delele et al., 2005; Endalew et al., 2010a, 2010b; Dekeyser et al., 2013; Salcedo et al., 2013). These studies have shown that the air flow generated by certain air-assisted sprayers can be simulated successfully with this technique. With regard to a specific sprayer, a validated CFD model may be a faster and more economical tool than an analysis conducted using collected experimental data (DEFRA, 2001), especially when further investigating the influence of that various parameters, such as air flow rate, forward velocity, and the phenological state of the treated crop (Da Silva et al., 2002).

The objective of this study is to analyse the advantages and disadvantages of different strategies for developing CFD models to

* Corresponding author at: Escuela Politécnica Superior de Huesca, 22071 Huesca, Spain.
E-mail address: fjavier@unizar.es (F.J. García-Ramos).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.026>

Received 25 November 2016; Received in revised form 14 September 2017; Accepted 20 September 2017
0168-1699/ © 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

Nomenclature

ρ	density
$\vec{u}$	vector of velocity
p	pressure at a point
μ	dynamic viscosity

k	turbulent kinetic energy
ε	energy dissipation ratio
E	error
V_m	value measured at a point
V_c	value calculated by CFD simulation
N	number of measured points

estimate the air flow generated by an air-assisted sprayer adapted to a specific crop geometry. Toward this end, a commercial sprayer that can simultaneously spray two rows of a vineyard from both sides was employed. The design of the equipment (Fig. 1) generates complex and highly vortex air currents, all of which can complicate not only the computational modelling but also experimental data collection.

For this study's purpose, four different CFD models were compared. Model 1 was designed to measure air velocity as close as possible to the machine outlets (Dekeyser et al., 2013). Model 2 was designed to measure air velocity along a line at a certain distance from the air outlets (Endalew et al., 2010b; Salcedo, 2015). Model 3 was dedicated to implementing the internal geometry of the air ducts and the total air flow supplied by the fan without the need to characterize air velocity at the machine outlets (as a prerequisite for developing the CFD model). Model 4 was designed to fulfill a purpose similar to that of Model 3, but it performs the essential calculation in two stages, the solution of the first stage being the input boundary condition of the second stage: stage 1 consists of the geometry of the duct, while stage 2 consists of the adjacent-air component the model.

2. Materials and methods

2.1. Sprayer characteristics

The spraying device analysed in this study was an IRIS multi-row air-assisted sprayer (Ilema-Hardi, S.A.U., Lleida, Spain) adapted to the line geometry of a vineyard (Fig. 1). The sprayer consisted of a centrifugal turbine that directed the air flow to four vertical ducts parallel to the sides of the vineyard line. Each vertical duct housed four groups of air-fluid outlets. Each group consisted of two hydraulic nozzles and one air outlet with internal deflectors that could be oriented in a one of several directions. Each air outlet was divided into four individual outlets each having dimensions of 3×5 cm.

A hedge of the vineyard was enclosed between a pair of vertical ducts that stood opposite to each other and were separated by approximately 1.65 m such that the crop could be treated on both sides at the same time. Thus, the machine, which was designed specifically for spraying vineyard lines, could treat two rows of vines simultaneously.

In order to take empirical measurements, one of the vertical ducts

was dismantled and moved to a laboratory. The duct was connected to a centrifugal fan, model S & P CRRT/2-401 RD 275 5.5 kW (Soler & Palau, Barcelona, Spain), which was able to provide an air flow similar to that provided by the sprayer. The laboratory temperature was about 25 °C, with no appreciable changes in temperature occurring between the air inlet of the fan and the air outlet of the duct.

The air flow produced by the fan was measured according to ISO 9898:2000 (García-Ramos et al., 2015) using a TESTO 0635 1041 hot-wire anemometer (Testo AG, Lenzkirch, Germany) having an accuracy of 0.03 m/s and a measurement range of 0–20 m/s. Based on all the measurements, an average flow rate of 1010 m³/h was obtained.

2.2. Fundamentals of CFD models

ANSYS Fluent 15.0 (ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA) was used as the CFD software for the resolution of all the models. The basis of CFD is the resolution of the Navier-Stokes equations, which describe the movement of Newtonian fluids. Basically, they include the momentum and continuity equations. Eq. (1) represents the momentum equation in vector notation, while Eq. (2) represents the continuity principle.

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \left\{ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right\} = -\nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \vec{u} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

Considering turbulent flows (those with a high Reynolds number, as in the case of sprayers), vortices of different sizes are generated (Salcedo, 2015), and these transfer energy (from the largest to the smallest) without loss by a process called energy cascading. However, upon reaching a certain scale, the fluid viscosity begins to control the phenomenon, converting the turbulent energy into heat. Ideally, the mesh of the model in the regions of viscous dissipation should be less than half of the scale at which this phenomenon begins to occur. However, this scale is so small that a resolving of Eqs. (1) and (2) would require an irresolvable mesh using conventional computers (Versteeg and Malalasekera, 1995). To solve this problem, several CFD techniques have been developed, each using mesh cell sizes that are much larger than the viscous dissipation scale. The most commonly use of these techniques at present relies on the RANS model (Reynolds Average



Fig. 1. IRIS multi-row air-assisted sprayer (Ilema-Hardi, S.A.U., Lleida, Spain) adapted to the vineyard geometry. The centrifugal turbine directs the air flow to four vertical ducts (left), each having four air-liquid outlet groups, parallel to the sides of the vineyard line. In each air-liquid outlet group, there are two hydraulic nozzles and four air outlets (right).

Navier Stoke), which is based on the fact that the velocity variations of the turbulent flows can be described statistically. However, for the resolution of this hypothesis, it is necessary to assume the ability of some models of turbulence and viscous dissipation to produce accurate predictions. Examples of such turbulent flow models include the standard k- ϵ (Launder and Spalding, 1972), standard k- ω (Wilcox, 1988), and SST k- ω (Menter, 1993) models. From these simplifications, acceptable results can be obtained at a relatively low computational cost.

As for the flow in the vicinity of the walls, ANSYS Fluent software facilitates the application of different mathematical treatments because (in turbulent flows) the velocity close to the walls varies non-linearly until it becomes negligible. This boundary layer zone also requires a mesh of non-assumable detail (Hii, 2004). Considering these mathematical treatments, which involve such models as the standard, scalable, or enhanced wall-function version, the problem can be solved with acceptable precision.

The previous consideration is relevant in this study due to the type of sprayer studied and the CFD simulations tested. Some simulations had in their domain only one wall condition (the floor) close to which air velocities are low. However, other models consider complex wall systems (such as those of the sprayer components) across which the paths that the jets of air must take are tortuous. Therefore, proper consideration of the viscosity model and the wall function may be critical to the accuracy of the results.

2.3. Developed CFD models

In the present study, four CFD models were tested:

- Model 1 measures air velocity as close as possible to the machine outlets. The measurement points are shown in pink in Fig. 2.
- Model 2 measures air velocity along a vertical line at 15 cm from the air outlets, with measurements made every 10 cm. The measurement line is shown in pink in Fig. 2.
- Model 3 implements the machine geometry and the total air flow supplied by the fan without requiring (as prerequisite for developing the CFD model) a characterization of the air velocity at the machine outlets.
- Model 4 performs the same calculation as Model 3 but does so in two stages. Stage 1 essentially implements the (duct) geometry of the machine; stage 2 implements the surrounding air. The output (solution) of the first stage constitutes the input contour condition of the second stage.

To validate the models, the air velocity was measured in three planes perpendicular to the air flow and located at distances of 0.3, 0.6, and 0.9 m from the air outlets. 25 measurement points were considered for each plane, as shown in Fig. 2. The measurement planes were located at a height of 0.75–1.35 m and separated by 0.3 m to simulate the position of the vineyard line. The distances from the first and last air outlets of the vertical duct to the ground were 0.4 m and 1.75 m, respectively.

The measurements (made with TESTO 0635 1041 hot-wire anemometer) were made in the “Y” direction (Fig. 2) when the air currents were stable at the inlet of the pneumatic duct. Data were taken at a frequency of 1 s, for 15 s, once the steady state was reached (a few seconds after the fan connection). As a velocity value at each point, the average of the collected data was considered.

In the case of Model 1, the measurements were taken by positioning the anemometer as closely as possible to the air outlet (Dekeyser et al., 2013). The direction of the air jet at the outlet was deduced from the geometry of the outlet (Da Silva et al., 2002).

The measurements were carried out using a single vertical duct, minus the counterpart corresponding to the other side of the vineyard line. This approach facilitates data collection. Otherwise, it would have been extremely difficult to measure the airflow in the middle plane,

where both air jets would collide, because the direction of dominant flow ceases to be the “Y”.

For all models, the flow was considered to be incompressible, isothermal and newtonian in coherence with the empirical data taken that ignored temperatures differences between the lab ambient air and the air at the outlets. A simple algorithm was used in all the cases, with equations of the second order. The other significant parameters are set at, turbulent viscosity ratio = 10, turbulent intensity = 5%, wall roughness height = 0, and roughness constant = 0.5, respectively.

2.4. Model 1

This model was designed to characterize air flows at the outlets. The air velocities measured at the center of each outlet (four measurements for each outlet group) were used to develop the CFD model. The model was three-dimensional, with a prism representing the volume near the sprayer (Fig. 3a). The boundary conditions of the model were as follows: floor; air inlets (for simulating the sprayer) and air outlets at atmospheric pressure. Owing to the geometric simplicity of the model, fast calculation could be achieved.

The choice of the flow treatment near the walls was deemed irrelevant because there was only one wall (floor) and the air currents

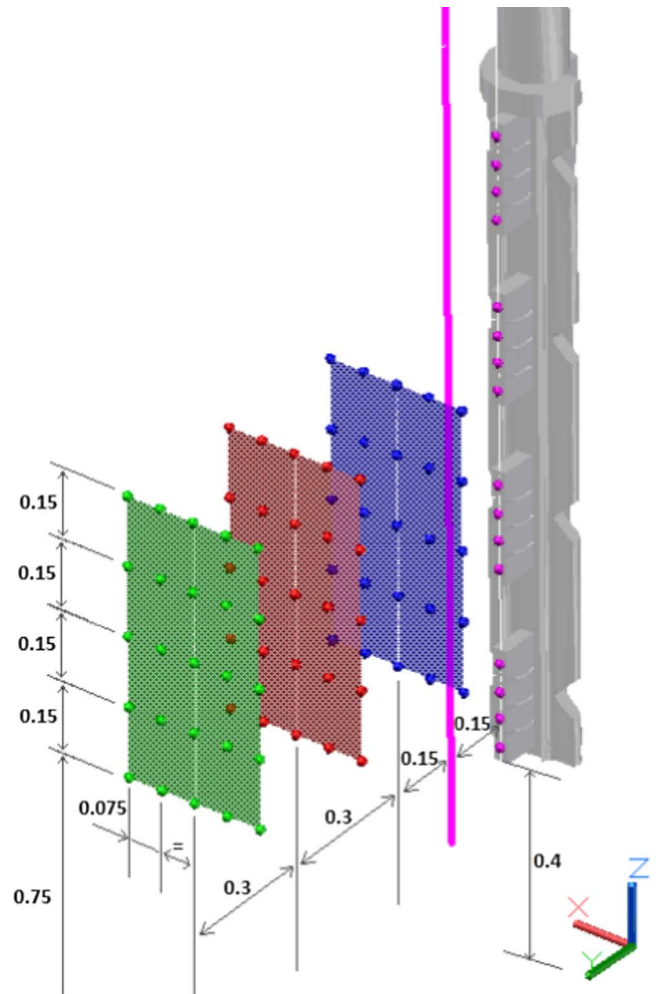


Fig. 2. Measurement points of air velocity for developing and validating the CFD models. Measurement points for developing the CFD models: pink points for Model 1; pink line for Model 2. Measurement points for validating the CFD models: blue points, plane XZ at 0.3 m from the outlets; red points, plane XZ at 0.6 m from the outlets; green points, plane XZ at 0.9 m from the outlets. A total of 25 points were considered for each plane. The vertical midline of the planes matches the plane YZ, which contains the outlets and the measurement points of Models 1 and 2.

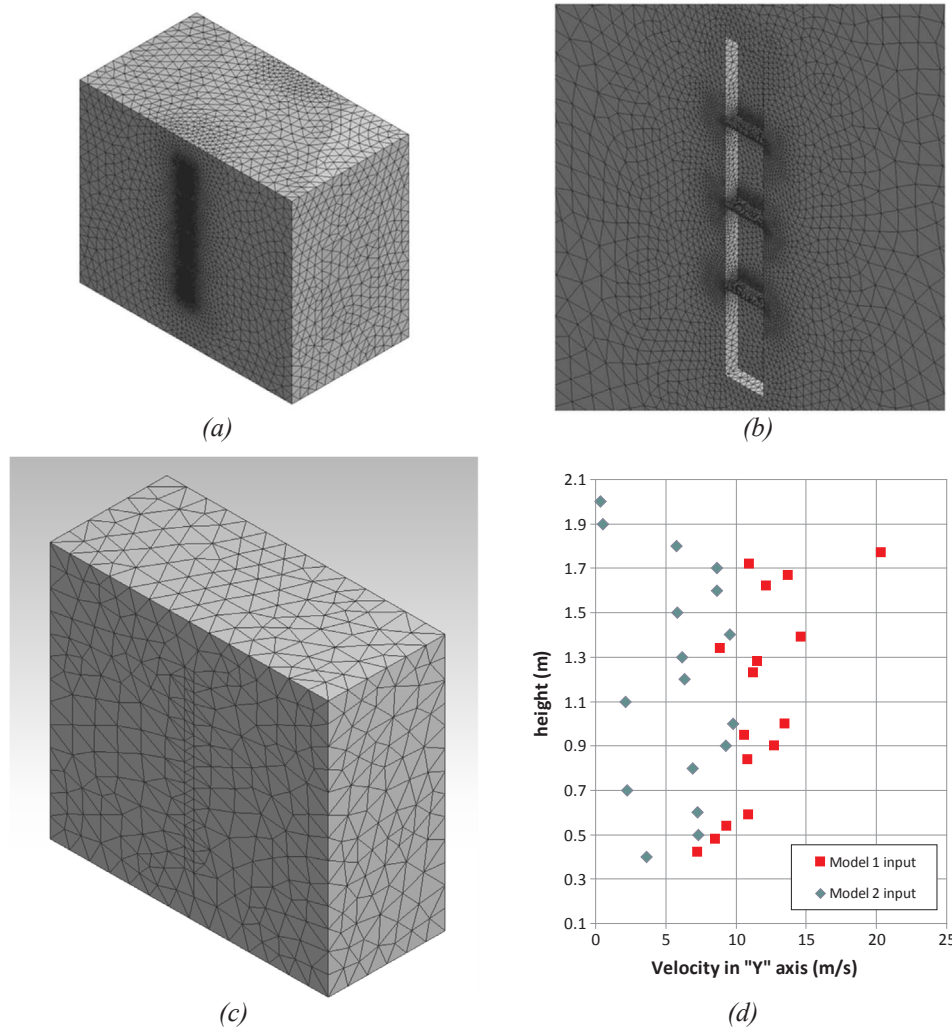


Fig. 3. Representation of CFD Models 1 and 2, based on the characterization of the air flow at the outlets. The air inlet in Model 1 (3a) corresponds with the air outlets of the sprayer (detail 3b, where a finer mesh is required). The air inlet in Model 2 (3c) is based on measurements made at a line 15 cm from the outlets. (3d) The air velocities taken at the air outlets of the duct (input boundary conditions for model 1) and the measurements taken at a 15 cm distance along a vertical line (input boundary conditions for model 2).

Table 1
Characteristics of the models.

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4 stage 1	Model 4 stage 2
Mesh	Simple	Very simple	Complex	Complex	Very simple
Typology	Unstructured	Unstructured	Unstructured	Unstructured	Structured
Refining mesh during calculation	Possible	Necessary	Not recommended	Not recommended	Possible
Cells (before refining mesh)	348,665	9518	554,087	522,053	50,000
Cells (after refining mesh)	353,691	76,459	554,087	522,053	54,466
Viscosity models that can be adopted	k-ε standard ^a k-ε RNG k-ε realizable k-ω standard SST-k-ω k-kl-ω SST RSM	k-ε standard ^a k-ε RNG k-ε realizable k-ω standard SST-k-ω k-kl-ω SST RSM	k-ε standard ^a k-kl-ω	k-ε standard ^a k-kl-ω	k-ε standard ^a k-ε RNG k-ε realizable k-ω standard SST-k-ω k-kl-ω SST RSM
Wall models that can be adopted (if applicable)	Standard ^a Non-equilibrium Enhanced Scalable	Standard ^a Non-equilibrium Enhanced Scalable	Standard Non-equilibrium Enhanced ^a Scalable	Standard Non-equilibrium Enhanced ^a Scalable	Standard ^a Non-equilibrium Enhanced Scalable
Inlet	16 rectangles (0.03 × 0.05 m each) in groups of 4	Rectangle (0.1 × 1.8 m) divided into 18 zones	Circle (d = 0.13 m; air intake duct)	Circle (0.13 m; air intake duct)	Outlet of Model 4 stage 1
Walls	Floor	Floor	Floor and duct walls	Duct walls	Floor
Outlet	Remaining limits	Remaining limits	Remaining limits	Vertical air section perpendicular to the air jet	Remaining limits

^a Model chosen for the calculation.

passing around it were negligible with respect to the description of the air flow generated by the sprayer. Four wall models (standard, unbalanced, scalable, and enhanced equations) were tested. The calculation was performed with the standard equation because no differences were found in the results. There were no computational limitations imposed on the selection of the turbulent air model. Different models of turbulence were tested (Table 1), and similar results were obtained from all of them. Finally, the standard k- ϵ calculation was selected because it is the most common engineering model.

For the CFD simulation, the air flow was considered to be produced exclusively through 16 rectangular holes (4 groups of 4 holes each) of the reduced section (3×5 cm per hole). These holes, generated in the geometry of the model, required moderate meshing (Fig. 3b), which increased the initial number of cells to around 350,000.

In order to transfer these holes in the geometry of the model to the mesh (Fig. 3b), cells whose edges were less than 1 mm were required. This created hundreds of thousands of cells in the air inlet area of the mesh. In the calculation, an attempt was made to optimize the number of cells using automatic meshing algorithms implemented by ANSYS Fluent and remeshing cells where high-speed gradients were given. But in this case, the lower limit of cells was imposed by this circumstance. As Table 1 shows, it was not necessary to increase significantly the number of cells (only a 1% increase was needed) to obtain a mesh that achieved results similar to those obtained when using a greater number of cells.

2.5. Model 2

This model was designed to measure air velocity at a certain distance from the outlets. This approach is the most widely used in CFD simulations of air-assisted sprayers (Endalew et al., 2010b; Salcedo, 2015). Measurements were taken at a distance of 15 cm from the nozzles and at a height range of 180 cm at intervals of 10 cm. The anemometer was similar to that used in Model 1.

Similar to Model 1, air velocities were introduced as a contour condition (Fig. 3c), but the initial mesh had a much smaller number of cells (Table 1) because the air inlet contour condition had been simplified. In this model, it was not necessary to adopt a fine mesh throughout the domain. It is advisable to reinforce the mesh only in areas of higher velocities in an iterative manner during the calculation, by using adaptive mesh tools. This makes it possible to simulate the convergence in a short period of time (around 5 min) with equation residues less than 10^{-4} (Delele et al., 2007) because the software optimizes the number of cells.

The approach for Model 2 involved the same considerations that were involved in Model 1 with respect to choosing the viscosity model

and near-wall flow.

One of the problems in this approach involved transferring discrete measurements taken along a line vertical to in the computer model. Some previous studies (Salcedo, 2015) that carried this out using a different type of sprayer achieved good results by employing two-dimensional models. However, in this study, the best results were obtained by employing three-dimensional models. The width of the cells on which the air inlet contour conditions were imposed was tested. The width of the outlets was around 3 cm. However, the width of the air jet increased with distance. Previously, several simulations of widths (3, 6, 10, 15 cm) had been analysed in order to correctly estimate the expansion of the air flow as a function of distance, and the one that fit best was selected. Finally, the contour conditions were introduced by considering a width of 10 cm.

2.6. Model 3

In Model 3, an approach different from one that is usually followed was used to compare the simulated air flow to the air flow produced by agricultural air-assisted sprayers. The air velocity at the entrance of the vertical duct through which the air arrives from the turbine was selected as the initial boundary condition, and the CFD model calculated the distribution of the air inside the vertical duct and the distribution in the outlets. To achieve this end, the internal geometry of the duct must be modelled, including the internal deflectors located at the outlets. The model also included a gas phase fluid prism (similar to Models 1 and 2), air outflow boundary conditions, and the floor that had a wall condition.

In taking this approach, it was critical to introduce the internal geometry of the air ducts with high precision. Moreover, it was imperative to take measurements of the interior contour of the duct because this geometry determines the circulation of the air through the interior of the element until it exits through the air outlets. Assuming simplifications is not advisable because it has been verified that the internal geometry of the duct is a determinant factor in the proper behaviour of the air flow. Therefore, if technical drawings from the manufacturer are not available, it is necessary to dismantle the machine and make internal measurements, as was done in the course of this study. The internal duct geometry was introduced with a CAD program and later loaded into the CFD software.

The mesh of Model 3 consisted of approximately 550,000 cells (Table 1). With respect to other models (Models 1, 2 and 4), the number of cells increases (Table 1) and also the complexity of the mesh, especially in the air outlet areas of the duct, as shown in Fig. 4. This fact produces an exponential increase in calculation time. In this case, the CFD adaptive meshing techniques resulted in problems that were

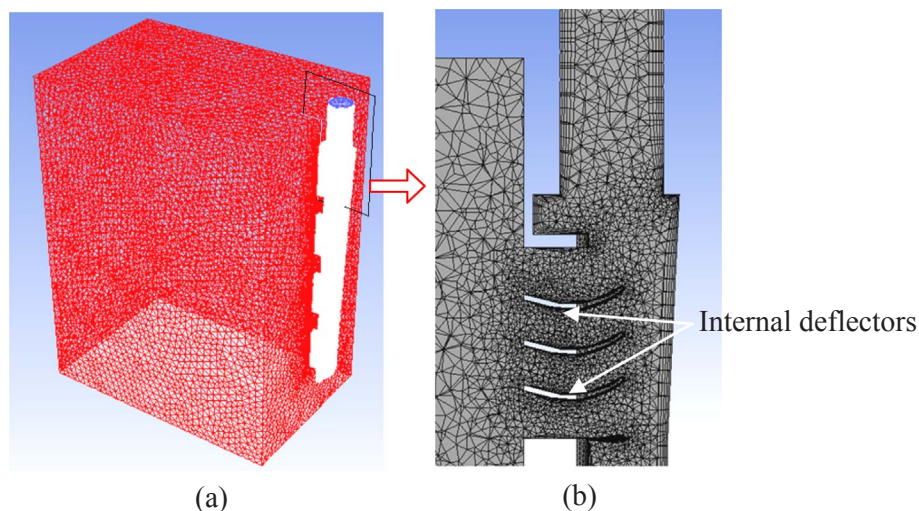


Fig. 4. Mesh of Model 3. (a) Mesh of the part of the machine (vertical duct and outlets) that distributes the air and the surrounding air. (b) Cross section of the mesh (YZ plane) at the top of the duct: mesh detail in a group of internal deflectors located at the outlets.

probably due to the irregularity of the mesh; hence, it was preferable to implement a fine mesh throughout. An unstructured mesh was used because the geometry of the internal deflectors did not allow for another type of mesh. The model was unstable during the calculation owing to the complexity of the air flows inside the duct. Given these conditions, implementing the dispersed phase in this model in future studies is not advised (Delele et al., 2007).

In contrast to the previous models, the choice of a suitable viscosity model is in this case critical. Different models were tested (k- ϵ standard, k- ϵ RNG, k- ϵ realizable, k- ω standard, SST- k- ω , k-kl- ω , SST, and Reynolds Stress Model). With regard to the air flows near the walls (which are critical in Model 3 because of their complexity), different treatments were tested, too: standard, scalable, unbalanced, and enhanced equations. Finally the standard k- ϵ model for the viscosity and enhanced equations for the flow in the walls was chosen (for reasons that are explained in the results section).

2.7. Model 4

Model 4 makes the same calculation as Model 3 but does so in two stages. The specifications governing the first stage were similar to those of Model 3, but in the second stage the air is represented and included in the implementation of a structured mesh to facilitate fast convergence. A cell size moderately larger than that of the previous stage (4 cm vs. 0.6 cm) was established, and an adaptive mesh was implemented during the calculation. The solution of the first stage (air velocities) provides the starting boundary condition of the second stage. Standard equations were considered as the wall model, and the k- ϵ standard calculation was chosen to simulate the turbulence.

3. Results

Fig. 5 shows the results corresponding to air velocity at heights ranging from 0.75 to 1.35 m from the ground (the typical height range of rows in vineyards). The air velocity profiles were compared at the intersection of the validation planes XZ at 0.3, 0.6, and 0.9 m (Fig. 2) with the plane YZ containing the air outlets because this plane was considered as the most representative of all three planes at which the highest air velocities were measured.

The air velocity differences shown in Fig. 5 are quantified in Table 2, which shows the Normalized Mean Absolute Error (NMAE) and the Mean Absolute Error (MAE) of the velocity estimated by the model in relation to the velocity measured in the tests (vertical midline of the validation planes). The NMAE is a practical measure for assessing the validity of a CFD model (Delele, 2009; Osorio et al., 2012), and is calculated according to Equation (3).

$$E = \frac{1}{N} \sum \frac{|V_m - V_c|}{V_m} \times 100 \quad (3)$$

In this sense, a model can be considered representative when the error is less than 30% (Delele, 2009). According to this criterion, Models 3 and 4 were found to be satisfactory (Table 2). Models 1 and 2, on the other hand, showed significant and inadmissible errors.

Furthermore, when observing all the experimental measurements taken on the control planes (0.3, 0.6 and 0.9 m air outlet distance), one can see that the velocities tend to 0 at a short distance from the centerline (less than 0.2 m). Fig. 6 shows the contour plots of the measured velocities (Fig. 6a) and those of the velocities estimated using CFD Model 3 (Fig. 6b). The values in the figure correspond to the plane at 0.6 m, which is representative of the distance to the air outlets in the vineyard. Contour plots were obtained in the case of Fig. 6a by interpolating the measured velocities using statistical methods pertaining to weighted distance while in Fig. 6b they were obtained directly from the CFD software.

The NMAE may not be suitable for cases such as the one studied, since absolute errors close to 0 may involve large relative errors. To avoid the influence of measurements with values close to 0, the MAE can be used, according to Eq. (4).

$$E = \frac{1}{N} \sum |V_m - V_c| \quad (4)$$

Table 3 shows the calculated errors that occurred when using all the measurement points of the three validation planes studied, with trends similar to those obtained when considering the vertical midline of the measurement planes with higher air velocities (Table 2).

For the resolution of the Model 3, some of the viscosity models were found to be unstable in their ability to solve the equations (that is, the equations diverged instead of converging), whereas others stabilized but with significantly high residual values. Acceptable results were obtained only when the k- ϵ standard and the kl- ω models were used (Table 1). Ultimately, the k- ϵ standard model was chosen because it achieved a higher accuracy at the cost of a relatively short computational time.

Regarding the wall functions, it was ultimately concluded that the standard model is acceptable; however, it should be noted that the model of the enhanced wall functions shows better convergence in the calculation (lower residues); on the other hand, it is more unstable owing to the resolutions pertaining to turbulent kinetic energy k (m^2/s^2) and the energy dissipation ratio ϵ (m^2/s^3).

The complexity of the generated air flows made it impossible to achieve a residual value less than 10^{-4} in the calculated equations. For this reason, in Model 3 the calculation was terminated when the

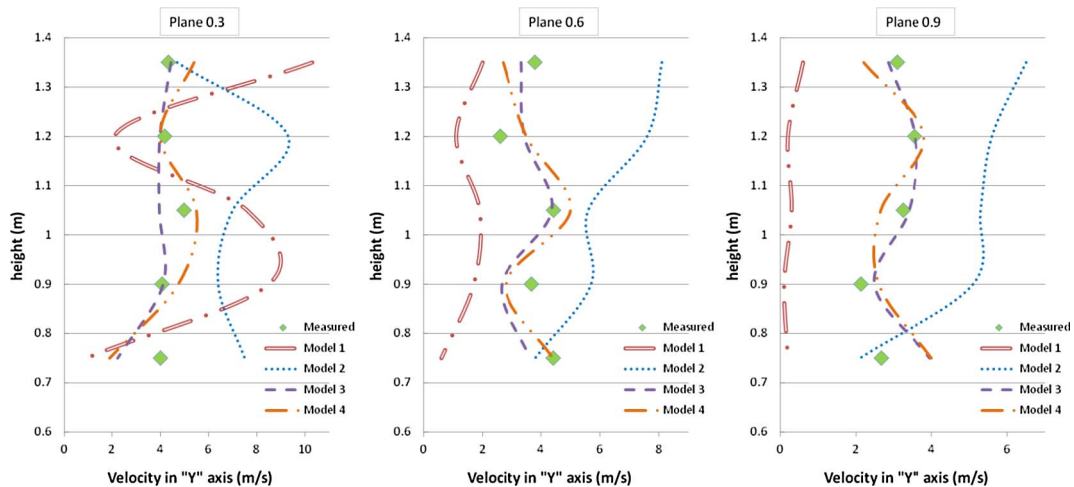
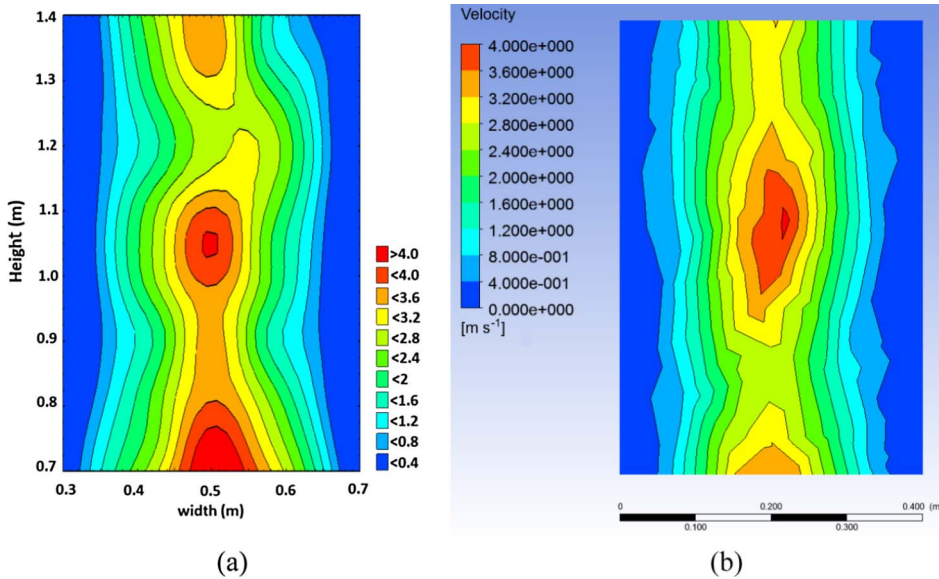


Fig. 5. Simulated and measured air velocities at 0.3, 0.6, and 0.9 m from the air outlets (considering the plane YZ containing the air outlets for Models 1, 2, 3, and 4).

Table 2

Validation errors associated with the air velocities obtained with the CFD models along the vertical midline of the validation planes. NMAE in percent and MAE in m/s.

Measurement plane (m)	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4	
	NMAE (%)	MAE (m/s)	NMAE (%)	MAE (m/s)	NMAE (%)	MAE (m/s)	NMAE (%)	MAE (m/s)
0.3	85	3.64	63	2.66	15	0.63	22	0.9
0.6	60	2.33	80	2.62	18	0.64	20	0.69
0.9	91	2.66	78	2.21	15	0.43	25	0.71
Mean error	79	2.88	74	2.50	16	0.57	22	0.77

**Fig. 6.** Contour plot of air velocities in a perpendicular plane at 0.6 m from the air outlets. (a) Contour plot based on direct measurements. (b) Contour plot obtained from CFD Model 3. The color scales are the same in both figures. The total data of the validation plane are consistent with those of Fig. 5, in which only one vertical line of the measurement plane is represented. The NMAE considering all control points of the plane is 29%. The maximum velocity peak at the center of the plane was predicted by the CFD model, as well as the velocity loss of an order of magnitude at 15 cm in the transverse direction. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

residues of the continuity equation (which showed the highest values in this case) were stabilized at a value of $3 \cdot 10^{-2}$ (Table 4).

The model could be solved in approximately 45 min by a computer (CPU: Intel i7 4820k; RAM: 16 GB; OS: 64-bit Windows 7) and by using a single core, the result being very different from previous models but the same as stage 1 of model 4.

4. Discussion

Model 1, which determined the air velocity at the outlets, produced the largest errors, whereas Model 3, which simulated the geometry of the air ducts, showed the best fit. Consequently, Model 3 will be used to explain the origin of the errors. Fig. 7 provides the details pertaining to the air velocities at an air outlet group of a vertical duct, this group consisting of four independent outlets. Considerable variability can be observed in the generated air flow. Fig. 7a shows the numerical velocity profile calculated along the vertical midline of the upper outlet group. The velocity variation between the points separated by 1 cm exceeded 20 m/s. Fig. 7b shows the velocity contour of the considered air outlet group, which corroborates the complexity of the air velocities shown in Fig. 7a.

The results generated by the simulated air jets of Model 1, show that

for this type of sprayer, it is not advisable to implement CFD models based on the air velocities at the outlets because the generated currents are highly complex. It is therefore necessary to determine not only the flow from each specific air outlet but also its precise distribution, which affects the characteristics of the air flows.

Model 2 had similar problems. The complexity of the air jets (Figs. 6 and 7) cannot be represented by a simple data measurement. The sprayers adapted to the crop geometry usually have specific air outlets that concentrate the air jets; in contrast, the traditional sprayers used in fruit orchards, which are not adapted to the crop geometry, have regular air outlets. The CFD models based on the characterization of air jets that have worked well with traditional sprayers (Salcedo, 2015) are not suitable for those adapted to the crop geometry because, in this case, models require a meticulous and exhaustive measurement of the experimental data to adequately characterize the air flows generated by the sprayer.

Another disadvantage is that once the model has been calibrated, it will only be valid for the configuration of the sprayer relative to the collected experimental data. For example, to estimate the air flow generated by the sprayer at different fan revolution speeds, it is necessary to recalculate the CFD model with new experimental data because it is not possible to determine whether a variation in the fan

Table 3

Validation errors considering all the measurement points of Fig. 2. NMAE in percent and MAE in m/s.

Measurement plane (m)	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4	
	NMAE (%)	MAE (m/s)	NMAE (%)	MAE (m/s)	NMAE (%)	MAE (m/s)	NMAE (%)	MAE (m/s)
0.3	50	1.13	79	1.06	54	0.49	57	0.6
0.6	55	0.97	65	1.12	29	0.4	27	0.38
0.9	78	1.36	71	1.17	30	0.45	31	0.49

Table 4
Comparative aspects of the analysed models.

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4 stage 1	Model 4 stage 2
Calculation time (s)	170	145	2750 ^a	2750 ^a	180
Residues of Eq. (2)	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	3×10^{-2}	6×10^{-2}	$< 10^{-4}$
Residues (remaining variables)	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$
Accuracy of results	Unacceptable	Unacceptable	Acceptable	Acceptable	

^a Calculation was finalized by stabilization of the residues in the iterations. Time only includes calculation. Time spent in meshing and preparation of the model is not included.

revolution speed generates a proportional variation in the air currents produced.

As for Models 3 and 4, both showed the smallest errors. Qualitatively, the velocity values obtained by both are correlated with those measured in the tests. The differences in the air velocities (model and empirical) are conditioned by the geometrical errors of the air ducts and imprecisions in the quantification of the air flow owing to its turbulent regime.

Model 3 was more accurate than Model 4 can be attributed to the division of the calculation into two stages in Model 4. In each stage, precision was lost in the calculation; this loss is significant if the equations do not converge with negligible residues in each stage. Therefore, direct models are preferable to divided models despite the complexity of their calculations. Fig. 8 shows the differences between Model 3 (direct model) and Model 4 (two stages).

However, the complete simulation of a spray application process would require the implementation of the air flow and the dispersed phase (liquid droplets); the resolution of the energy equation (to consider the possible evaporation of some drops); the implementation of the sprayer movement, which requires transitory calculation (Delele et al., 2005); and the modelling of the crop to be treated (Endalew et al., 2010c; Salcedo, 2015).

The implementation of a complete model using an unstructured mesh as complex as that of Model 3 would result in problems associated with convergence and stability in the calculation. To overcome these problems in future investigations (in which liquid droplets might be entrained by the air flow), Model 4 seems the most suitable despite its lower level of precision.

Regarding implementation problems, the approach based on the geometry of the sprayer (Models 3 and 4) shows inverse problems compared to the approach based on the characterization of the air flow. Determining the internal geometry of the air ducts and their CAD modelling is difficult, although this difficulty could be mitigated by using technical drawings provided by the manufacturer. In addition, the meshes are complex and irregular, and the calculation is difficult and

slow. However, the model, once realized, could be used to study the air flows generated by the sprayer (this advantage could be achieved without requiring the collection of additional experimental data by changing the introduced input flow).

It should also be emphasized that the models are differentiated by the sources that generate errors. Models 1 and 2 are based on the taking of experimental data, which can be influenced by the positioning of the anemometer (it is complicated to arrange exactly at the desired points repeatedly), ambient conditions, etc. Models 3 and 4, on the other hand, are based on sprayer geometry and as such are less subject to error because geometric measurements can be more easily replicated. Besides, the implementation of the sprayer geometry can be introduced according to the specifications of the manufacturer, if available.

Finally, it should be noted that the speed and convergence of a calculation seems to influence not only the number of cells in the model but also the complexity of the simulated air currents. That is, the generated currents supplied by the air outlets are much simpler than the air flows generated inside the ducts. Therefore, in spite of the disparity between the number of cells in Model 1 and the number of cells in 2, and 4 (stage 2), these models were solved in similar ways, as opposed to Models 3 and 4 (stage 1).

5. Conclusions

The most widely adopted approach for the CFD modelling of air-assisted sprayers, in which the characteristics of the air flow generated at the outlets (air velocities) are introduced to the model as boundary conditions, does not yield satisfactory results in the case of a sprayer adapted to suit the crop geometry commonly used in vineyards. This problem occurs with sprayers in which the air passes through complex geometries inside the ducts.

To solve this problem, an approach based on the implementation of the internal geometry of the air ducts in the model was tested. The drawbacks associated with using this approach include the difficulty in obtaining the precise internal machine geometry and the generation of

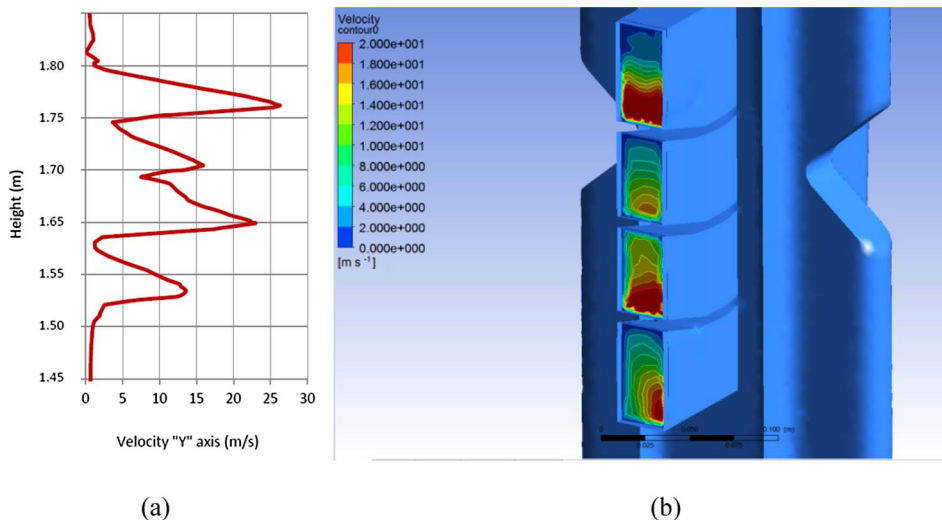


Fig. 7. Air velocities generated by Model 3 at the upper air outlet group of a vertical duct, considering a flow rate of $1010 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ in the CFD model. (a) Velocity profile calculated along the vertical midline of the air outlet. (b) Velocity contour.

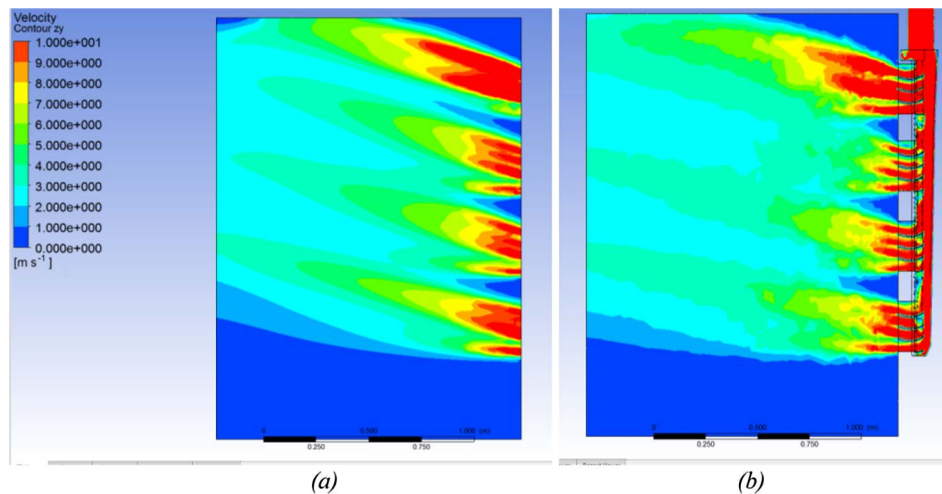


Fig. 8. Velocity contour in the middle plane of the air outlets. (a) Model 4 (two stages). (b) Model 3 (direct model).

a model with a complex calculation mesh. On the other hand, unlike the classic approach, this approach affords the possibility of studying the effect of different air flows by varying the model's input flow.

The instability of the geometry-based model can be mitigated by dividing the calculation into two stages, the first stage calculating the internal geometry of the air ducts, and the second stage calculating the surrounding air (with the results of the first stage being used as the contour boundaries). In the second stage, it is possible to create a structured mesh that improves the convergence of the equations. Moreover, additional aspects can be implemented in the calculation (such as the dispersal phase, the forward speed of the sprayer, and the crop-air interaction), allowing for a complete study of the treatment.

References

- Ako, P., 2011. Development of a Model to Predict Spray Deposition in Air-Carrier Sprayer Applications. Doctoral thesis. Universidad de Florida.
- Bartzanas, T., Kacira, M., Zhu, H., Karmakar, S., Tamimi, E., Katsoulas, N., Lee, In Bok, Kittas, C., 2013. Computational fluid dynamics applications to improve crop production systems. *Comput. Electron. Agric.* 93, 151–167.
- Baetens, K., Nuytens, D., Verboven, P., De Schampheleire, M., Nicolai, B., Ramon, H., 2007. Predicting drift from field spraying by means of a 3D computational fluid dynamics model. *Comput. Electron. Agric.* 56, 161–173.
- Baetens, K., Ho, Q.T., Nuytens, D., De Schampheleire, M., Endalew, A.M., Hertog, M.L.A.T.M., Nicolai, B., Ramon, H., Verboven, P., 2009. A validated 2-D diffusion-advection model for prediction of drift from ground boom sprayers. *Atmos. Environ.* 43, 1674–1682.
- Da Silva, A., Sinfort, C., Bonicellii, B., Voltz, M., Huberson, S., 2002. Spray penetration within vine canopies at different vegetative stages. *Aspects Appl. Biol.* 66, 33–339.
- Da Silva, A., Sinfort, C., Tinet, C., Pierrat, D., Huberson, S., 2006. A Lagrangian model for spray behaviour within vine canopies. *J. Aerosol Sci.* 37, 658–674.
- DEFRA, 2001. Department for Environment Food and Rural Affairs, United Kingdom Govern. Options for the Development of a Model for Evaluation of Bystander and Resident Exposures to Pesticides Used in Orchard, Hop and Bush Fruit Application. Research Project Final Report.
- Delele, M.A., De Moor, A., Sonck, B., Ramon, H., Nicolai, B.M., Verboven, P., 2005. Modelling and validation of the air flow generated by a cross flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed. *Biosyst. Eng.* 92 (2), 165–174.
- Delele, M.A., Jaeken, P., Debaer, C., Baetens, K., Endalew, A.M., Ramon, H., Nicolai, B.M., Verboven, P., 2007. CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction. *Comput. Electron. Agric.* 55, 16–27.
- Delele, M.A., 2009. Engineering Design of Spraying Systems for Horticultural Applications Using Computational Fluid Dynamics. Dissertations de agricultura. Universidad Católica de Leuven, Bélgica.
- Dekeyser, D., Duga, T.A., Verboven, P., Endalew, M.A., Hendrickx, N., Nuytens, D., 2013. Assessment of orchard sprayers using laboratory experiments and computational fluid dynamics modelling. *Biosyst. Eng.* 114, 157–169.
- Endalew, A.M., Debaer, C., Rutten, N., Vercammen, J., Delele, M.A., Ramon, H., Nicolai, B.M., Verboven, P., 2010a. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I: Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow. *Comput. Electron. Agric.* 71, 128–136.
- Endalew, A.M., Debaer, C., Rutten, N., Vercammen, J., Delele, M.A., Ramon, H., Nicolai, B.M., Verboven, P., 2010b. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying - Part II: Validation for different sprayer types. *Comput. Electron. Agric.* 71, 137–147.
- Endalew, A.M., Debaer, C., Rutten, N., Vercammen, J., Delele, M.A., Ramon, H., Nicolai, B.M., Verboven, P., 2010c. Modelling pesticide flow and deposition from air-assisted orchard spraying in orchards: a new integrated CFD approach. *Agric. For. Meteorol.* 150, 1383–1392.
- García-Ramos, F.J., Malón, H., Aguirre, A.J., Boné, A., Puyuelo, J., Vidal, M., 2015. Validation of a CFD Model by using 3D sonic anemometers to analyse the air velocity generated by an air-assisted sprayer equipped with two axial fans. *Sensors* 15, 2399–2418.
- Hij, M.J.W., 2004. Kiwifruit Flower Pollination - Wind Pollination Efficiencies and Sprayer Jet Applications. Doctoral thesis. Universidad de Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Launder, B., Spalding, D., 1972. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London.
- Menter, F.R., 1993. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. In: AIAA, 24th Fluid Dynamics Conference, 6–9 July, 1993. Orlando, FL; United States.
- Nuytens, D., De Schampheleire, M., Baetens, K., 2011. Drift from field crop sprayers using an integrated approach: results of a five-year study. *Trans. ASABE* 54 (2), 403–408.
- Osorio, J.A., Tinoco, I.D.F.F., Rocha, K.S.O., Martins, M.A., Damasceno, F.A., 2012. Validation of a CFD model for prediction of the efficiency of evaporative cooling in porous panels. *U.D.C.A. Actual. y Divul. Cient.* 15 (1), 209–217.
- Salcedo, R., Granell, R., Garcerá, C., Palau, G., Moltó, E., Chueca, P., 2013. Validation of a CFD model of the effect of an orange tree canopy on the air flow produced by an air-blast sprayer. In: 12th International Workshop on Sustainable Plant Protection Techniques in Fruit Growing. SuproFruit2013. IVIA, Valencia, Spain, June 26–28, pp. 95–97.
- Salcedo, R., 2015. Modelos CFD para el flujo del aire y la distribución de las gotas de un turboatomizador durante las aplicaciones en cítricos. Doctoral thesis. Universidad Politécnica de Valencia, Spain.
- Svensson, S.A., 2001. Converging Air Jets In Orchard Spraying - Influence on Deposition, Air Velocities and Forces on Trees. Ph.D. Dissertation. Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, Sweden.
- Teske, M.E., Thistle, H.W., Schou, W.C., 2011. A review of computer models for pesticide deposition prediction. *Trans. ASABE* 54 (3), 789–801.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. Longman Scientific & Technical, England.
- Wilcox, D.C., 1988. Re-assessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA J.* 26, 1299–1310.

Simulation of pesticide application in vineyards using CFD: Study of off-target losses and treatment optimization

By J BADULES¹, E GIL² and F J GARCÍA-RAMOS¹

¹*Universidad de Zaragoza – Spain*

²*Universitat Politècnica de Catalunya – Spain*

Corresponding Author Email: jbadules@hotmail.com

Summary

Computational Fluid Dynamics (CFD) has been used to simulate the application of pesticides on a vineyard by using an air-assisted sprayer. The selected sprayer, inverted U-shaped, consisted of vertical ducts, facing the crop hedge, through which the air generated by a fan came out, transporting the drops until their deposition on the crop. Considering this air-assisted sprayer, CFD modelling has been used to develop a dispersion model including both liquid and air phases, with the goal of determining the effects of the main parameters of the sprayer: liquid flow, droplet size, air flow and forward speed. The spray has been added to the model according to a Rossin-Rammler distribution. Once the CFD models have been obtained, the percentage of simulated drops that have reached the crop and those that have impacted the soil have been accounted. Finally, optimum theoretical treatment configuration and the influence of each variable studied have been discussed.

Key words: CFD – Computational Fluid Dynamics, vineyard, air assistance, viticulture

Introduction

The application of pesticides in agriculture is essential, but its use involves environmental risks (Defra, 2001). It is important to maximize the effectiveness of the treatment, reducing doses as much as possible and being environmentally friendly. In fruit orchards, pesticides are generally applied by air-assisted sprayers, which generate air currents that drag the drops towards the crop and, additionally, facilitate the penetration of the product into the crop. The efficiency of the treatment depends on many factors: sprayer design, spray nozzle, air flow rate, forward speed, phenological state of the crop, crop and orchard geometry, wind velocity, temperature, relative humidity, etc. In addition, the results of the application are also affected by the turbulence created by the sprayer itself (Landry & Wolf, 2019).

Only a part of the product sprayed by the nozzles successfully reaches the crop. The other part falls directly to the ground, or is lost by drift above the crop, or crosses the crop without being deposited.

Focusing on vineyard cultivation, the tests carried out to date show a large disparity in the fractions of liquid sprayed: Gil *et al.* (2005) indicated drift losses between 30% and 50% working with an axial fan sprayer; Pergher & Zucchiatti, (2018), using a tunnel-type sprayer with a recycler indicated a maximum efficiency (considered as the percentage of liquid that is deposited in the crop with respect to the total of liquid sprayed) of 50%. Similar results have been obtained in apple

orchards (Honga *et al.*, 2017) with ranges of efficiency according to the conditions under which the treatment is carried out, from 8.5% to 65.8%; losses due to air drift up to 25.8% and losses to the ground between 21.2% and 47.8%.

Porrás Soriano *et al.* (2005) developed a research with several types of sprayers, including a tunnel type (similar to the one to be studied here), obtaining a range of 10–80% leaf coverage with different pressures. Pergher & Petris (2017) and Siegfrieda *et al.* (2007) performed their experiments on several types of vineyard formations, finding a coverage between 50% and 80%. Although leaf coverage (percentage of leaf surface that gets wet with treatment) is not the same as efficiency, a correlation between the two is sometimes expected, so that treatments with low leaf coverage will have a low efficiency with some products. Considering that real experiments are costly both in time and money, and are replication is difficult because the results depend on atmospheric variables, the use of computers to perform simulations of treatments is a useful tool. On the one hand, mathematical models (Teske, 1996; Teske *et al.*, 2011; Dorr *et al.*, 2014) have been developed to predict drift, the results of the treatment (Ako, 2011) or the interaction of the drops (impact, bounce, shatter, retention) with the leaves of the crop (Dorr *et al.*, 2013, 2015) by solving complex mathematical models developed and calibrated for specific conditions. On the other hand, more recently, the increase in computing power of PC, has allowed developing approaches from Computational Fluid Dynamics (CFD), which allows a more general and flexible study, being able to adapt to any type of sprayer. Air currents generated by different types of sprayers can be simulated (Delele *et al.*, 2005, 2007; Salcedo *et al.*, 2015). However, the simultaneous study of the liquid phase (spray droplets) and the gas phase (air currents) is more complex, [Baetens *et al.*, 2000, 2009; Endalew *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2018). It is even more difficult to study their interaction with the crop (Honga *et al.*, 2017).

This work aims to apply a CFD modeling to simulate an air assisted sprayer of inverted U-shaped geometry by developing a dispersed model including both, liquid and air phases, with the goal of analysing the effects of the main setting parameters of sprayer: liquid flow, droplet size, air flow and forward speed.

Through these simulations, three fractions of the sprayed liquid are determined: direct losses to the soil, fraction projected to the crop area, and losses due to drift above the crop.

The fraction of liquid projected to the crop area, might not accurately represent the amount of liquid deposited in the crop, because part of it would be able to cross it without being trapped, (aspect not contemplated in the CFD model) and would add to other losses, but represents a theoretical maximum limit of spraying efficiency, considering that this is the amount of liquid deposited in the crop with respect to the total amount of liquid sprayed.

Materials and Methods

Sprayer description

The analysed sprayer is a tunnel multi-row air-assisted sprayer, inverted U-shaped, adapted to the line geometry of a vineyard (Fig. 1). A detailed description of the machine is found in Badules *et al.* (2018).

CFD Model

As explained in Badules *et al.* (2018), a two-stage experimentally validated model has been developed. In the first stage, the geometry of the sprayer ducts is modelled, and the average air velocity at the inlet of each duct is entered into the CFD program, obtaining its distribution in the air outlets. In this calculation stage, a computer file with x,y,z coordinates of each vertex of the cells with output contour condition, associated to an air velocity vector, is obtained for each duct. It is in the second stage of calculation, with a very simple geometry (Fig. 2) where the treatment settings can be configured. Basically, this model consists of an orthohedron that represents the space between the two ducts that enclose a vine row, with a hole in the middle, which represents



Fig. 1. Multi-row air-assisted sprayer adapted to the vineyard geometry. The centrifugal fan directs the air flow to four vertical ducts (left), each having four air-liquid outlet groups, parallel to the sides of the vineyard line. Each air-liquid outlet group consists of two hydraulic nozzles and four air outlets (right).

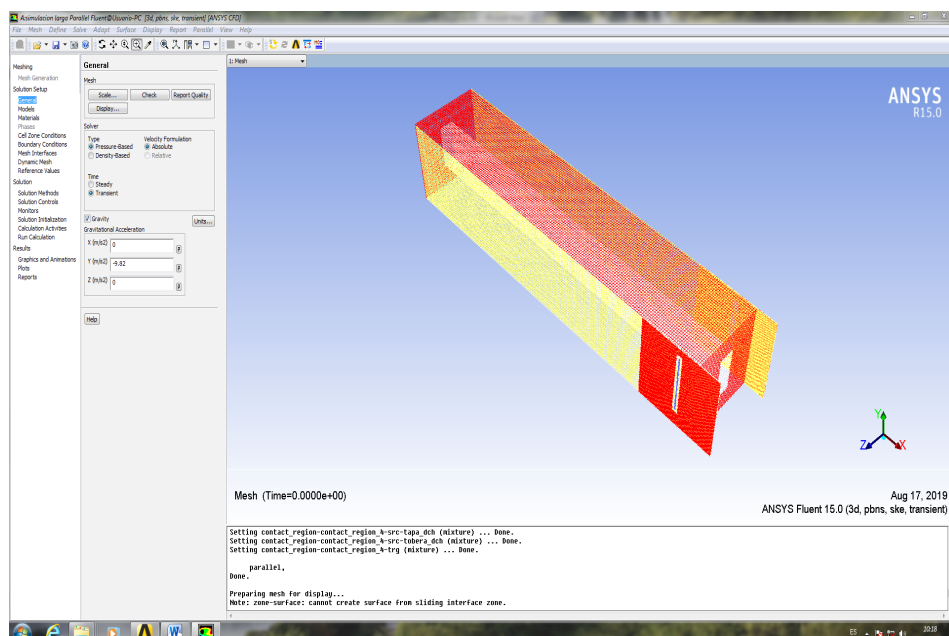


Fig. 2. Calculation mesh in the CFD program. The great orthohedron represents the air that surrounds the canopy. The inside part, without cells of finite volumes, represents the vine in its advanced phenological state. On the sides are the sprayer air outlets (blue line). The model is dynamic, as the air outlets and the neighbouring cells (painted red) slide on the yellow surfaces.

the canopy of the vineyard. The model has just over 300,000 cells and they are mostly cubic, which allows a quick calculation (Badules *et al.*, 2018). From a CFD vineyard model, Da Silva *et al.* (2001) concluded that the canopy, in advanced vegetative state, could be represented as a porous medium with a high coefficient of resistance. Models developed in the initial phase of the research concluded that the resistance coefficient causes in the CFD model, both in the air currents and in the droplets, a behaviour very similar to that of a wall, so for simplicity, a wall has been simulated directly (although inside, there are no finite volume cells because they are not necessary for the calculation). The model is completed with surfaces on the sides, which represent the air intake of the first calculation stage.

The model was developed with ANSYS Fluent, adopting a κ - ϵ turbulence model, in second order with the SIMPLE algorithm.

Disperse phase

A Lagrangian method has been used to model the droplet trajectories: the DPM (Discrete Phase Model). This model introduces in the calculation some “model droplets” from which the software extrapolates the behaviour of all the sprayed liquid. The number of simulated droplets must be sufficient to be representative, so it is recommended to make a sensitivity study of the results obtained according to the number of droplets introduced into the model (Delele *et al.*, 2007), FLUENT has several possibilities to model nozzles. In our case, we have opted for the hollow cone type commonly used in air-assisted sprayers. The software does not model a continuous cone, but a series of paths along the surface of a cone. In our case we have introduced 64 trajectories by nozzle, each one of them with 20 droplet diameters established according to a Rossin-Rammler distribution, which multiplied by 16 nozzles (eight by duct) gives a total of 20,480 droplets, which are introduced in the calculation. The modelling of hollow cone nozzles in FLUENT requires that they must be defined at a given point in the space, which cannot be moved. In our model, which is transitory, and with moving parts (the advance of the sprayer has been implemented in FLUENT using the “sliding mesh” technique), this causes a problem, since if the droplets are injected into the model at the initial instant, the result will not be correct because the convergence of the gas phase of the CFD problem has not yet been reached. This has been solved using the strategy described as follows. At the initial moment of calculation, the air currents are far away from the droplet injection points. After several initial calculation iterations (in our case 50 “time steps”), the software has already reached tolerable convergence values in the calculation of air currents. In addition, due to the movement implemented by means of the “sliding mesh” option, at this calculation moment, the air currents are applied at the exact same distance from the droplet injection points as that existing in the real machine between the spray nozzles and the air outlets. It is then, at this single moment of the calculation, when the dispersed phase studied in the simulation is injected.

Variables

Three setting parameters of the sprayer have been studied:

- Type of nozzle: Three droplet sizes have been simulated: 150, 250 and 350 μm (volume mean diameter, VMD), with a Rossin-Rammler distribution of 20 different droplet diameters, sprayed by hollow cone nozzles.
- Air flow supplied by the machine: Air velocities of 14, 18, 22, 26 and 30 m s^{-1} at the upper end of the duct have been considered. These values are only entered in stage 1 of the model (Badules *et al.*, 2018). These velocity values correspond to air flows of 670, 860, 1050, 1245 and 1435 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ for each vertical duct.
- Forward speed: 4.5, 6 and 7.5 km h^{-1} . This speed is implemented in the stage 2 of the model by indicating the “sliding meshes” in FLUENT. The sliding meshes are an option of FLUENT, by means of which, some cells of the calculation domain, can be moved with respect to others that remain fixed. In our case, the fixed cells are the air and the edge of the vineyard, and the mobile cells are the air outlet of the sprayer and its neighbouring cells.

The developed model (Fig. 3) aims to approach as simply as possible how the most important variables that can be controlled on a vine row in an advanced vegetative state influence the efficiency of the treatment. Neither the evaporation of the drops due to the effect of temperature, nor their break-up into smaller ones, nor possible coalescence, nor wind, have been taken into account, although all these variables could be introduced into the model for more precise studies if needed. Therefore, it must be said that as a simplified model, it is not intended to have an exact model of the spraying phenomenon under perfectly determined conditions, but to identify trends. As has been mentioned, in a real treatment, part of the liquid reaching the crop could pass through it. Even if the treatment is done badly, there could be runoff on the leaves. The real efficiency (liquid deposited in the crop with respect to total pulverized liquid) will always be less than the liquid which reaches the crop contour (calculated here), but we can expect greater deposition the greater the fraction that reaches the crop.

A total of 45 simulations were carried out in a few hours of calculation (between 1 and 1.5 h per simulation), providing data such as the place of impact of each simulated droplet, the nozzle from which it was sprayed, and the time required to deposit it. This information is supplied by FLUENT software in text files, in which each line contains the information of each droplet, so they can be easily imported and treated with a spreadsheet.

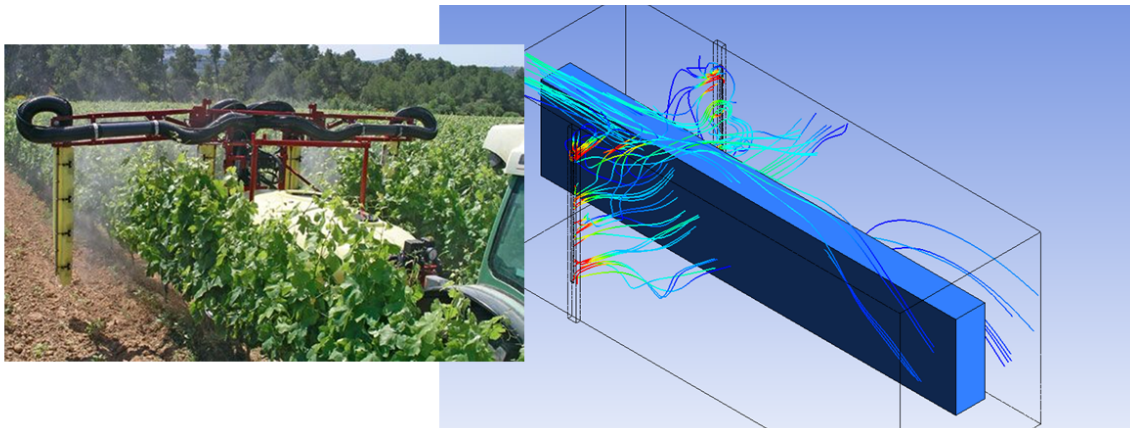


Fig. 3. Left: Sprayer treating two vine rows at the same time. Right: CFD simulation of the treatment on a vine row line, representing the main current lines coming out of the machine ducts.

Results and Discussion

Fig. 4 shows the percentage of spray liquid that reaches the crop in the most representative simulations carried out with respect to the air velocity at the nozzle's outlet. There is a positive correlation between quantity reaching the crop and air velocity.

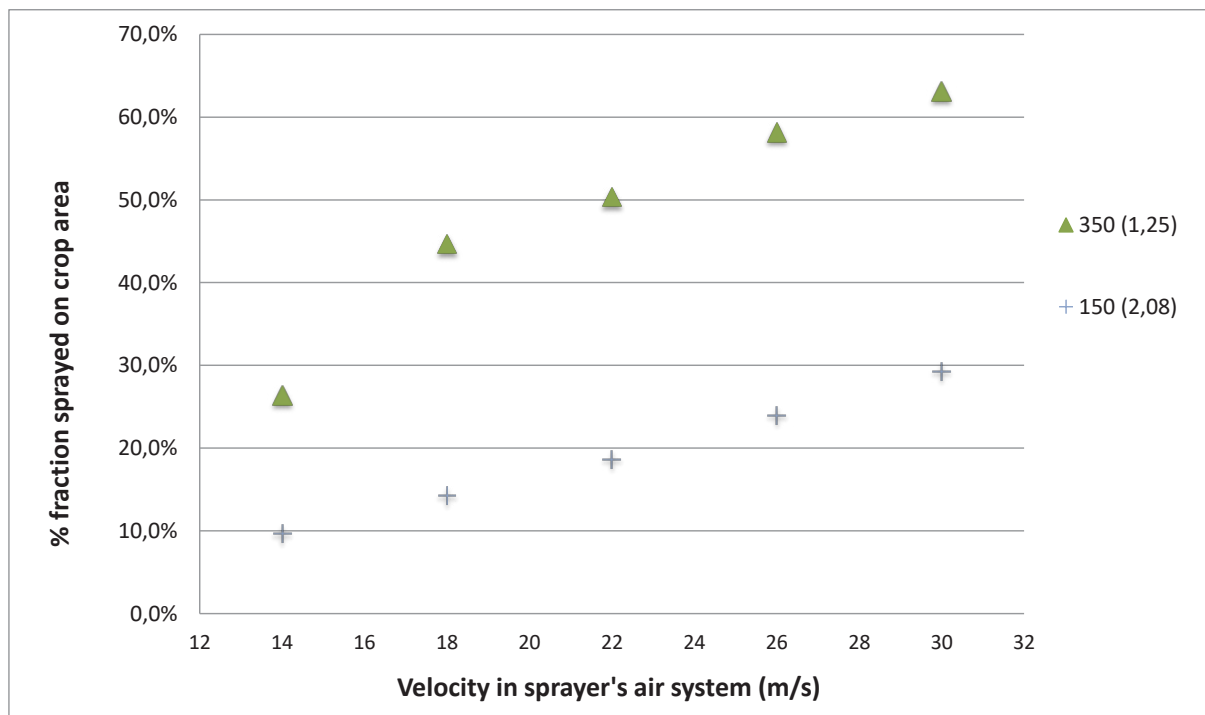


Fig. 4. Percentage of sprayed liquid that theoretically reaches the crop in the models, in two representative treatment conditions: sprayed VMD of 350 mm and forward speed of 1.25 m s^{-1} (the most favourable), and sprayed VMD of 150 mm and forward speed of 2.08 m s^{-1} (the most unfavourable).

Additional conclusions can be obtained from Fig. 4. Larger droplets size increases de quantity of sprayed liquid that reach the crop. Perhaps the kinetic energy they have at the exit of the nozzle makes these drops reach the crop easier than smaller drops. Lower forward speed seems to also favour the drops reaching the crop in greater quantity.

The theoretical efficiency (considered as a percentage of the sprayed liquid that reaches the crop, and mentioned above) obtained ranged from 10% to more than 60%, a very wide range but in line with other authors (Gil *et al.*, 2005; Porras Soriano *et al.*, 2005; Pergher & Petris, 2007; Honga *et al.*, 2017). It should be noted that in reality, it can be expected that the liquid deposited in the crop is even lower, since in the model is computed every droplet that impacts with the vineyard, when in reality, some droplets are able to go through it without being captured by any leaf, or also, could suffer runoff.

If the percentage of liquid lost to the ground is represented (Fig. 5), in this case the correlation is negative: the more air supplied by the machine, the less product is deposited on the ground, probably because an air stream with greater kinetic energy can carry heavier droplets preventing them from going directly to the ground. The results show that the smallest losses to the ground occur with the smallest droplets, which is expected. Less intuitive is the reason for the greater losses to the ground, which do not always correspond to the opposite of the previous case, since it occurs with intermediate nozzles (250 μm of average diameter, ground speed of 1.67 m s^{-1}). As a hypothesis, it is proposed that in this phenomenon the kinetic energy of the droplets would come into play, so that larger droplets could impact with the hedge while other very small ones would be at the mercy of the air currents of the sprayer. A medium size, however, would not have sufficient kinetic energy at the nozzle outlet to reach the hedge, but would be too heavy to be carried away by air currents, having none of the possibilities of larger or smaller droplets, and thus probably ending up on the ground.

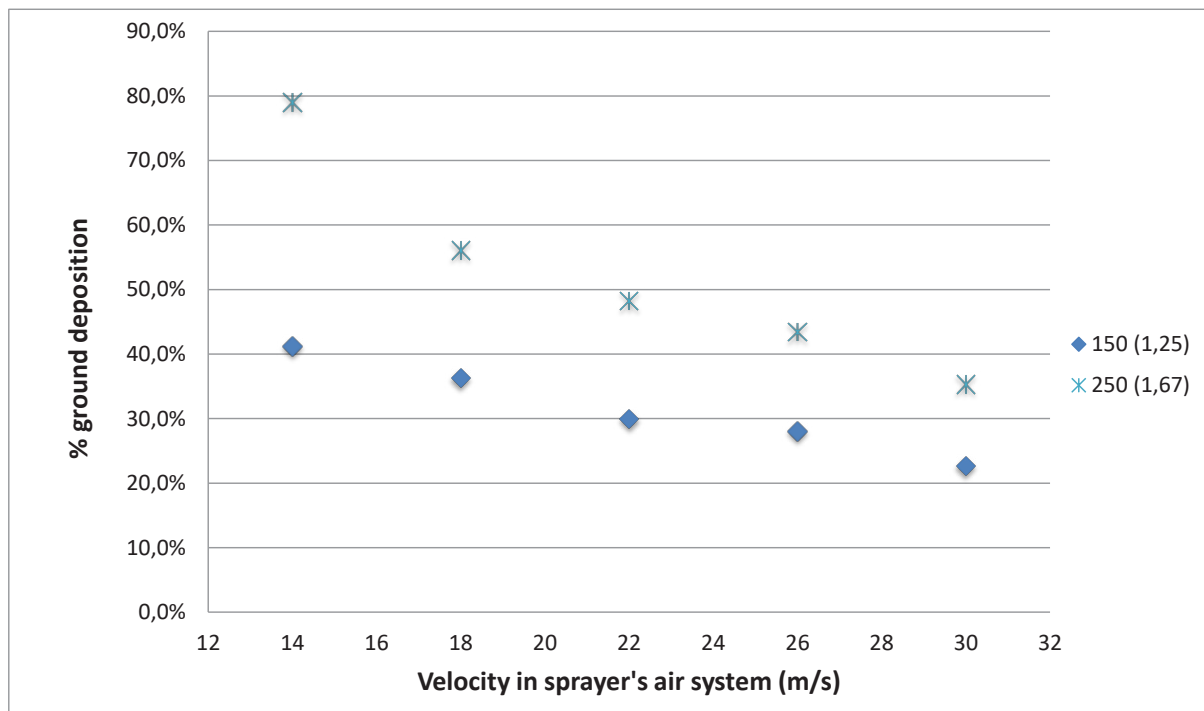


Fig. 5. Percentage of sprayed liquid that is lost to the ground, depending on the flow of air supplied by the sprayer in two representative treatment conditions: sprayed VMD of 150 mm and forward speed of 1.25 m s^{-1} (the most favourable), and sprayed VMD of 250 mm and forward speed of 1.67 m s^{-1} (the most unfavourable).

Once some of the results of the simulations have been presented, if they are grouped by treatments using averages, we can obtain clearer conclusions.

If we average all treatments according to the flow of air supplied by the sprayer, distinguishing drift above the crop losses, soil losses, and the percentage of liquid reaching the crop (averaging the

percentages obtained of each fraction of all CFD simulations calculated with the same airflow) (Fig. 6), CFD models predict a positive correlation between airflow and liquid sprayed on the crop ($r^2 = 0.9574$), and a negative correlation between airflow and ground losses ($r^2 = 0.9567$). Statistically, the correlation between air flow and drift above the crop is also good ($r^2 = 0.8857$), but in this case the slope of the straight line is very low. It can therefore be considered that in this machine, the air flow does not influence in these losses, but it improves the quantity of liquid that reaches the crop.

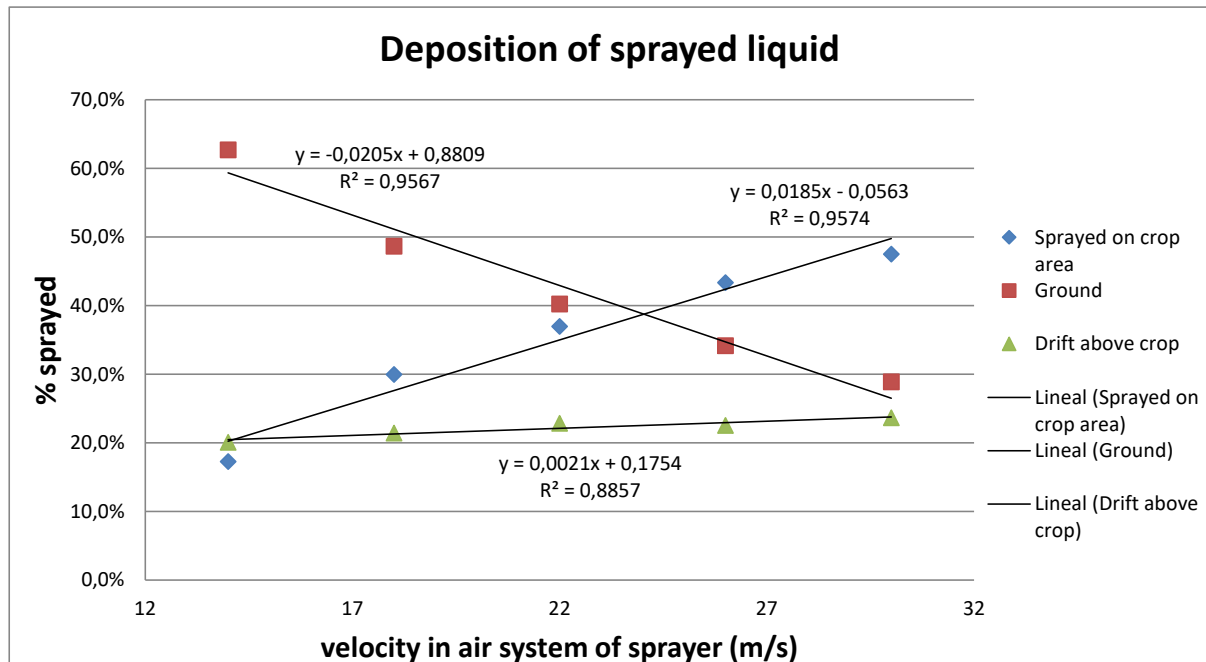


Fig. 6. Correlation between air flow and liquid distribution (sprayed on crop area, soil and drift above the crop).

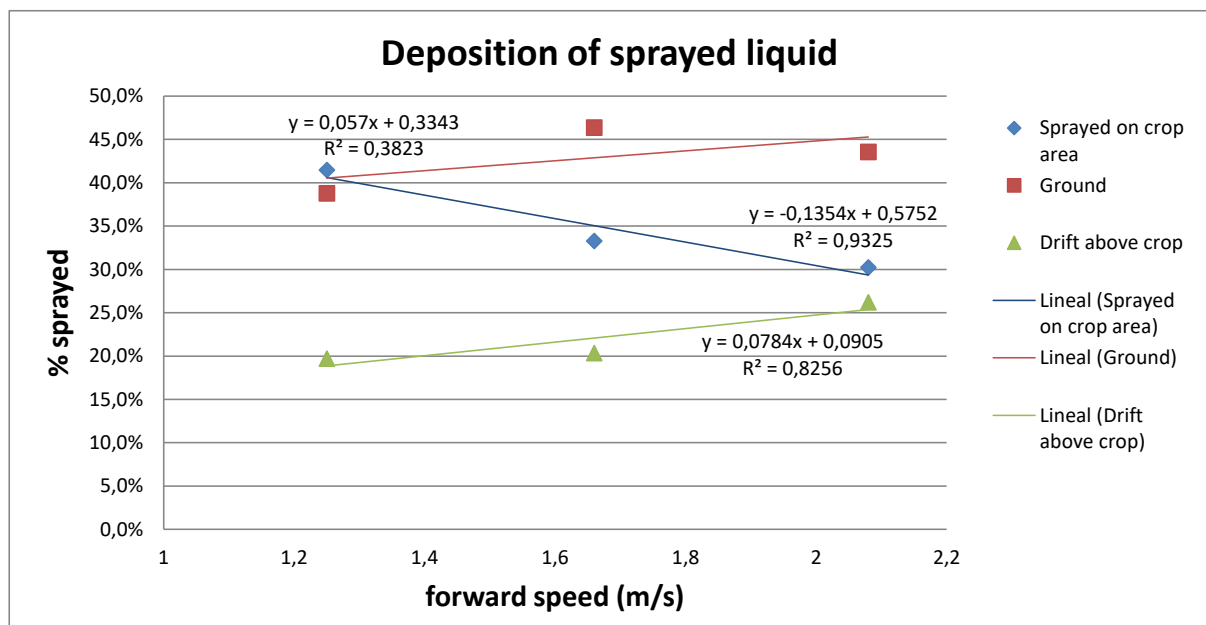


Fig. 7. Correlation between forward speed and distribution of liquid (sprayed on crop area, soil and drift above the crop).

On the other hand, if we analyse the influence of the forward speed (Fig. 7) on the liquid distribution (averaging all established CFD simulations at the same forward speed), a clear negative correlation ($r^2 = 0.9325$) between quantity of liquid that reaches the crop and forward speed is obtained. Drift above the crop as in the previous case would also have an acceptable statistical correlation but the

slope of the straight line is modest, whereas ground losses would not be correlated with forward speed.

It should be noted that if the nozzles operate at a constant flow rate, the lower the forward speed, the greater the volume sprayed per linear metre of vine; but what Fig. 7 reveals is an additional and complementary phenomenon: at a higher forward speed, not only would the volume of sprayed product per linear metre of row be reduced, but also the fraction of liquid pulverized over the crop area decreases, with which we have a negative synergy.

Therefore, CFD simulations conclude that with this sprayer it would be advantageous to perform treatments at the lowest possible forward speed and configure the machine to provide as much air as possible. These claims would need to be confirmed by experimental data.

Lastly, analysing the influence of the size of the pulverized droplets (Fig. 8), positive correlations are observed between drop size and (simultaneously) quantity of liquid that reaches the crop and soil losses. In this sense, the quantity of liquid that reaches the crop increases even though soil losses also increase, because drift above the crop is drastically reduced. According to the CFD models, this drift losses in the sprayer studied depend mainly on the nozzle characteristics.

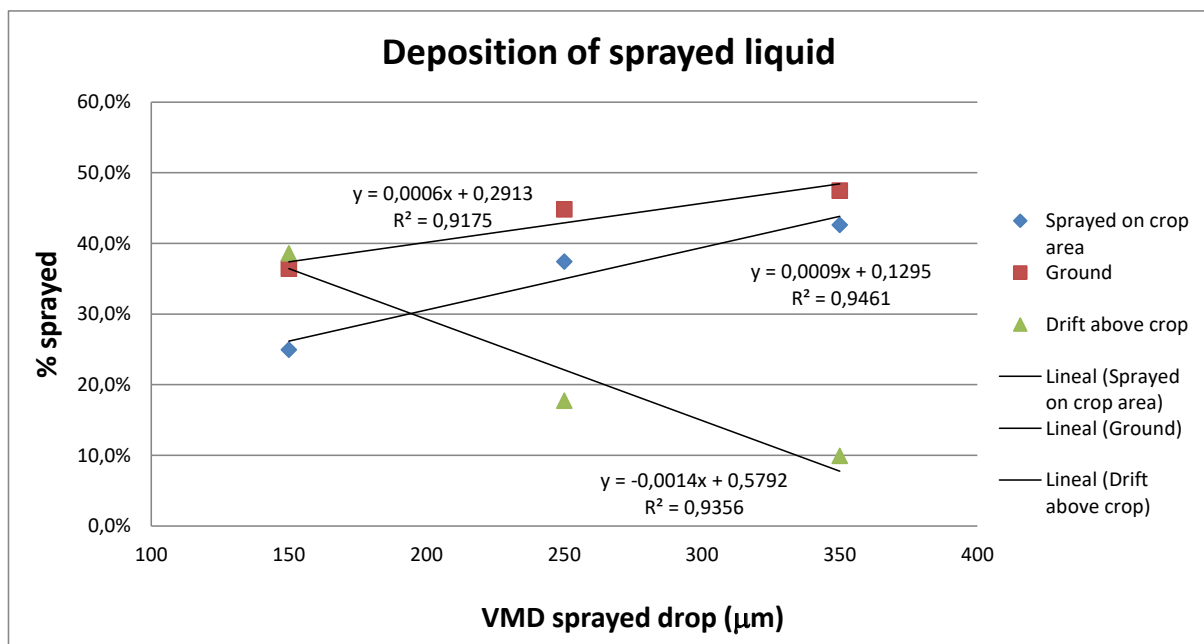


Fig. 8. Correlation between mean droplet diameter and distribution of liquid (sprayed on crop area, soil and drift above crop).

Other treatment improvement pathways

The CFD models performed obtain a large amount of data whose analysis can be used to improve the efficiency of treatment in other ways. For example, the amount of liquid sprayed into the crop from each nozzle can be known. If we analyse, for example, the highest efficiency simulation, which theoretically achieves a value of 63% of liquid sprayed on crop area, and calculate the individual efficiency of the 16 nozzles, data shown in Table 1 are obtained.

It is seen that under the proposed treatment conditions, with the dimensions of the expected vine hedge, the number eight nozzles (the lowest position of each duct) have a very low efficiency. If we simply propose to remove them, the efficiency of the treatment raises to 69%, losing only 5% of liquid with respect to that previously reached in the crop, which would be easily compensable by decreasing the speed of displacement to 5%, if necessary. Analysing data of Table 1, it could even be proposed to modify the angle of the nozzles 1, 2, 6 and 7, since their poor efficiency compared to nozzles 3, 4 and 5.

Table 1. *Calculated quantity of liquid that reaches the crop of the 16 nozzles. Settings: droplet VMD 350 μm , forward speed 1.25 m s^{-1} , air velocity 30 m s^{-1}*

Nozzle	Sprayed on crop area
Right_nozzle_1	48%
Right_nozzle_2	59%
Right_nozzle_3	91%
Right_nozzle_4	87%
Right_nozzle_5	87%
Right_nozzle_6	66%
Right_nozzle_7	47%
Right_nozzle_8	25%
Left_nozzle_1	48%
Left_nozzle_2	59%
Left_nozzle_3	89%
Left_nozzle_4	86%
Left_nozzle_5	85%
Left_nozzle_6	66%
Left_nozzle_7	42%
Left_nozzle_8	25%

Conclusions

Simple CFD models of air-assisted sprayers performance, although do not show all the complexity of a treatment, supply useful conclusions in a short time at a lower cost compared to real experiments.

For the sprayer model studied, a wrong configuration can produce very low efficiencies (quantity of spray liquid reaching the edge of the crop). In the case of treating vineyards in an advanced vegetative state, the basic recommendations for the user would be to work with droplets as large as possible, always within the tolerable limit with the objective of the treatment.

So the fight against drift above the crop, must be made mainly from the correct choice of nozzles, because in this type of machine, is the fundamental factor, not having hardly influence the flow of air, against what might be thought initially. The tunnel-type spray configuration may be responsible for this phenomenon.

The relative position between the nozzles and the hedge of the crop must be analysed to avoid, if necessary, inefficient nozzles. In the case of the geometry of the vineyard studied, the lower nozzle of each spray duct should be eliminated.

References

- Ako P. 2011.** *Development of a model to predict spray deposition in air-carrier sprayer applications*. Ph.D. USA: Florida University.
- 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, no. SI.
- Baetens K, Nuyttens D, Verboven P, De Schampheleire M, Nicolaï B, Ramon H. 2007.** Predicting drift from field spraying by means of a 3D computational fluid dynamics model. *Computers and Electronics in Agriculture* **56**:161–173.

- Baetens K, Ho Q T, Nuyttens D, De Schamphelleire M, Endalew A M, Hertog M L A T M, Nicolaï B, Ramon H, Verboven P. 2009.** A validated 2-D diffusion–advection model for prediction of drift from ground boom sprayers. *Atmospheric Environment* **43**:1674–1682.
- Da Silva A, Sinfort C, Tinet C, Pierrat D, Huberson S. 2006.** A Lagrangian model for spray behaviour within vine canopies. *Journal of Aerosol Science* **37**:658–674.
- DEFRA. 2001.** Options for the development of a model for evaluation of bystander and resident exposures to pesticides used in orchard, hop and bush fruit application. *Research Project Final Report*. London, UK: Department for Environment Food and Rural Affairs.
- Delele M A, De Moor A, Sonck B, Ramon H, Nicolaï B M, Verboven P. 2005.** Modelling and validation of the air flow generated by a cross flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed. *Biosystems Engineering* **92**(2):165–174.
- Delele M A, Jaeken P, Debaer C, Baetens K, Melese Endalew A, Ramon H, Nicolai B M, Verboven P. 2007.** CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction. *Computers and Electronics in Agriculture* **55**:16–27.
- Dorr G, Kempthorne D M, Mayo L C, Forster W A, Zabkiewicz J, McCue S, Belward J A, Turner I A, Hanan J. 2013.** Towards a model of spray–canopy interactions: Interception, shatter, bounce and retention of droplets on horizontal leaves. *Ecological Modelling*. 290. 10.1016/j.ecolmodel.2013.11.002
- Dorr G, Wang S, Mayo L C, McCue S, Forster W A, Hanan J, He X. 2015.** Impaction of spray droplets on leaves: influence of formulation and leaf character on shatter, bounce and adhesion. *Experiments in Fluids* 56. 10.1007/s00348-015-2012-9.
- Dorr G J, Kempthorne D M, Mayo L C, Forster W A, Zabkiewicz J A, McCue S W, Belward J A, Turner I W, Hanan J. 2014.** Towards a model of spray–canopy interactions: Interception, shatter, bounce and retention of droplets on horizontal leaves. *Ecological Modelling* **290**:94–101.
- Endalew A M, Debaer C, Rutten N, Vercammen J, Delele M A, Ramon H, Nicolaï 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**:1383–1392.
- Gil Y, Sinfort C, Bonicelli B, Bellon-Maurel V, Vallet A. 2005.** Methodology for Assessment of Drift from Radial Sprayers in Vineyard Applications. *Information and Technology for Sustainable Fruit and Vegetable Production FRUTIC 05* (congress acts), 12–16 September 2005, Montpellier, France.
- Honga Se-Woon, Zhaoa L, Zhub H. 2017.** CFD simulation of pesticide spray from air-assisted sprayers in an apple orchard: tree deposition and off-target losses. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.12.001.
- Landry H, Wolf T M. 2019.** An investigation of airflow patterns created by high-clearance sprayers during field operations. *Canadian Biosystems Engineering/Le génie des biosystèmes au Canada* **61**:2.01–2.12. <https://doi.org/10.7451/CBE.2019.61.2.01>.
- Pergher G, Petris R. 2007.** Canopy structure and deposition efficiency of vineyard sprayers. *Journal of Agricultural Engineering* June 2007. DOI: 10.4081/jae.2007.2.3.
- Pergher G, Zucchiatti N. 2018.** Influence of canopy development in the vineyard on spray deposition from a tunnel sprayer. *Journal of Agricultural Engineering* XLIX:801. DOI: 10.4081/jae.2018.801.
- Porras Soriano A, Porras Soriano M L, Porras 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 Journal of Agricultural Research* **3**(2):175–181.
- Salcedo R, Garcera C, Granell R, Molto E, Chueca P. 2015.** Description of the airflow produced by an air-assisted sprayer during pesticide applications to citrus. *Spanish Journal of Agricultural Research* **13**(2):e0208. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2015132-6567>.
- Siegfrieda W, Viretb O, Huberc B, R. Wohlhauser R. 2007.** Dosage of plant protection products adapted to leaf area index in viticulture. *Crop Protection* **26**:73–82.

- Teske M E. 1996.** An introduction to aerial spray modeling with FSCBG. *Journal of the American Mosquito Control Association* **12**(2):353–358.
- Teske M E, Thistle H W, Schou W C. 2011.** A review of computer models for pesticide deposition prediction. *Transactions of the ASABE* **54**(3):789–801.
- Yang F, Xue X, Cai C, Sun Z, Zhou Q. 2018.** Numerical simulation and analysis on spray drift movement of multirotor plant protection Unmanned Aerial Vehicle. *Energies* **11**:2399. doi:10.3390/en11092399.

