

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA RURAL Y AGROALIMENTARIA

Unidad de Hidráulica y Riegos



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

ivia
instituto valenciano
de investigaciones agrarias

Tesis doctoral

**Modelos CFD para el flujo del aire y la distribución de las gotas
de un turboatomizador durante las aplicaciones en cítricos.**

Directores

Dr. Moltó García, Enrique
Dra. Chueca Adell, Patricia
Dr. Palau Salvador, Guillermo

Autor

Salcedo Cidoncha, Ramón

Valencia

Noviembre 2015



Resumen:

Durante la aplicación de fitosanitarios con turboatomizador en cultivos arbóreos sólo una fracción del caldo pulverizado alcanza la vegetación, mientras que el resto se pierde en la atmósfera o el suelo principalmente. Estas pérdidas suponen un riesgo para el medio ambiente y las personas. La creciente concienciación medioambiental de la sociedad ha estimulado acciones legislativas para la mejora de la eficiencia de la aplicación de fitosanitarios. El primer paso para lograr este objetivo es cuantificar la cantidad de volumen pulverizado en cada sustrato (vegetación, suelo y atmosfera). Para ello, se han utilizado diferentes métodos experimentales. Sin embargo, estos ensayos son caros, requieren mucho tiempo y son complejos por su dificultad para controlar todos los factores que influyen en la distribución de la pulverización. Estas limitaciones han impulsado el desarrollo de modelos físico-matemáticos para simular el comportamiento de las gotas durante las aplicaciones. La aproximación numérica mediante la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) puede ser una buena opción.

Por ello, el objetivo de la presente tesis fue diseñar un modelo CFD para simular el comportamiento global de la pulverización durante los tratamientos en cítricos con turboatomizador en condiciones mediterráneas.

En primer lugar, se realizó un experimento para describir el flujo real del aire desde que sale de un turboatomizador hasta que se enfrenta a la copa de un naranjo. Se observó que se formaban dos vórtices, uno sobre la copa y otro detrás del árbol. No se han descrito estas estructuras en otros cultivos. La alta densidad foliar induce una separación del flujo que da lugar a estas estructuras turbulentas.

A continuación, se procedió a modelizar el problema asumiendo que el árbol enfrentado a la corriente del ventilador se comportaba como un sólido. Para ello se generaron 12 modelos CFD en 2D para reproducir el comportamiento del aire frente al árbol, resultantes de la combinación de tres modelos de turbulencia del aire (k - ϵ estándar, SST k - ω , RSM) y cuatro geometrías diferentes para la copa del árbol frente al ventilador. Durante el ajuste, se comprobó que con una copa sólida el modelo podía reproducir los mismos vórtices que en campo. El modelo SST k - ω simuló mejor el comportamiento físico del aire que el tradicional standard k - ϵ y el RSM. El modelo fue posteriormente validado con datos experimentales.

Por último, se desarrolló un modelo Euleriano-Lagrangiano para simular el movimiento y deposición de las partículas durante los tratamientos que incluía tanto un modelo de las corrientes de aire generadas por el equipo, como el viento atmosférico, además del comportamiento individual de las gotas. En diferentes instantes de la simulación se estudió la posición y las variables ligadas a las gotas (altura, velocidad etc.), se hizo una estimación del comportamiento dinámico de la nube de gotas y de otros parámetros que se han asociado al comportamiento de las gotas frente al viento durante las aplicaciones fitosanitarias (tiempo de relajación, ratio de evaporación etc.) y se cuantificó el volumen final en cada sustrato. Los resultados predijeron que los porcentajes de caldo respecto al total pulverizado fueron: el 44% en el árbol objetivo, el 28% en los árboles adyacentes, el 20% en el suelo y un 8% se perdió como deriva. Finalmente, el modelo se comparó con un balance experimental de masas, con resultados similares en la deposición sobre la vegetación y el suelo.

Resúm:

Durant l'aplicació de fitosanitaris amb turboatomizador en cultius arboris només una fracció del caldo polvoritzat aconseguix la vegetació, mentre que la resta es perd en l'atmosfera o el sòl principalment. Estes pèrdues suposen un risc per al medi ambient i les persones. La creixent conscienciació mediambiental de la societat ha estimulat accions legislatives per a la millora de l'eficiència de l'aplicació de fitosanitaris. El primer pas per a aconseguir este objectiu és quantificar la quantitat de volum polvoritzat en cada substrat (vegetació, sòl i atmosfera). Per a això s'han utilitzat diferents mètodes experimentals. No obstant això, estos assajos són cars, requerixen molt de temps i són complexos per la seua dificultat per a controlar tots els factors que influïxen en la distribució de la polvorització. Estes limitacions han impulsat el desenrotllament de models físicomatemàtics per a simular el comportament de les gotes durant les aplicacions. L'aproximació numèrica per mitjà de la Dinàmica de Fluids Computacional (CFD) pot ser una bona opció.

L'objectiu de la present tesi va ser dissenyar un primer model CFD per a simular el comportament global de la polvorització durant els tractaments en cítrics amb turboatomizador en condicions mediterrànies.

En primer lloc, es va realitzar un experiment per a descriure el comportament real del flux de l'aire des que ix d'un turboatomizador fins que s'enfronta a la copa d'un taronger. Es va observar que es formaven dos vòrtexs, un sobre la copa i un altre darrere de l'arbre. No s'han descrit aquestes estructures en

altres cultius. L'alta densitat foliar causa una separació del flux que dona lloc a estes estructures turbulentes.

A continuació, es va procedir a modelitzar el problema assumint que l'arbre enfrontat al corrent del ventilador es comportava com un sòlid. Per a això es van generar 12 models CFD en 2D per reproduir el comportament de l'aire davant de l'arbre, resultants de la combinació de tres models de turbulència de l'aire ($k-\varepsilon$ estàndard, SST $k-\omega$, RSM) i quatre geometries diferents per a la copa de l'arbre davant del ventilador. Durant l'ajust, es va comprovar que amb una copa sòlida podia reproduir els mateixos vòrtexs que en camp. El model SST $k-\omega$ va simular millor el comportament físic de l'aire que el tradicional estàndard $k-\varepsilon$ i el RSM. El model va ser posteriorment validat amb el primer assaig de la tesi.

Per últim, es va fer un model Eulerià-Lagrangià per a simular el moviment i deposició de les partícules durant els tractaments que incloïa tant un model dels corrents d'aire (vent i equip). En diferents instants de la simulació es va estudiar la posició i les variables lligades a les gotes (altura, velocitat etc.), es va fer una estimació del comportament dinàmic del núvol de gotes i d'altres paràmetres que s'han associat al comportament de les gotes enfront del vent durant les aplicacions fitosanitàries (temps de relaxació, ràtio d'evaporació etc.) i es va quantificar el volum final en cada substrat. Els resultats van predir que els percentatges de caldo respecte al total polvoritzat van ser: el 44% va acabar en l'arbre objectiu, el 28% en els arbres adjacents, el 20% en el sòl i un 8% es va perdre com a deriva. Finalment, el model es va comparar amb un balanç experimental de masses, amb resultats semblants en la deposició sobre la vegetació i el sòl.

Summary:

During the application of pesticides in tree crops with airblast sprayer only a fraction reaches vegetation, while the rest is lost in the atmosphere, soil or surface waters or evaporates quickly. These losses pose a risk to the environment and people. Growing environmental awareness in society and his concern for preserving the health of people and animals have stimulated important legislative actions that promote the improvement of the efficiency of the application of pesticides and reducing the risks associated with their use. The first step to achieve this goal is to quantify the amount of spray volume reaching each substrate (vegetation, soil and atmosphere). To quantify the losses, deposition or the mass balance applications have used different experimental methods carried out under field conditions. However, these tests are very expensive and time consuming. Also, when performed abroad, it is very difficult to control all the factors that influence the distribution of the spray and they are virtually impossible to reproduce. These limitations have prompted the development of physical-mathematical models to simulate the behavior of droplets during applications. The numerical approximation by Computational Fluid Dynamics (CFD) can be a good choice

The aim of this thesis was to design a first CFD model to simulate the overall behavior during treatments in citrus tree with airblast sprayer in Mediterranean conditions.

First, an experiment was conducted to describe the actual air flow from airblast sprayer fan facing up to the top of an orange tree. It was noted there were

two vortices, one on top and another behind the tree. No such structures have been described in other tree crops. High foliage density produces flow separation and this is the reason for the turbulent structures.

Then we proceeded to model the problem by assuming that the tree facing the current fan behaved like a solid. 12 CFD 2D-models were generated to reproduce the behavior of air against the tree, resulting from the combination of three air turbulence models ($k-\varepsilon$ standard, SST $k-\omega$, RSM) and four different geometries for the canopy tree in front of the fan. During the adjustment, it was found that a solid canopy could reproduce the same field vortices. The SST $k-\omega$ model simulated the physical behavior better air than the traditional standard $k-\varepsilon$ and RSM. The model was then validated with the first trial of the thesis.

Finally they were introduced in the model 1,500 droplets to simulate the movement and deposition of particles during treatments (Eulerian-Lagrangian model). The simulation was divided into two parts: only air from the fan (from the droplets were in the air to 0,35 s) and air only from wind (after 0,35 s). It were studied the position and variables linked to the droplets (height, velocity etc.) at different times of the simulation, the dynamic behavior of cloud droplets and other parameters associated with the droplets droplets became with the wind during treatments (relaxation time, evaporation ratio etc.) and the final volume in each substrate (vegetation, soil, air) was quantified. The results were compared with an experimental mass balance: 44% volume was deposited in the target tree, 28% on adjacent trees, 20% in ground and 8% was lost by drift. Comparing with test data, model was similar to the target tree deposition and ground losses.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer al Centro de Agroingeniería del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias la oportunidad que me han brindado de poder dedicar cuatro años de mi vida al mundo de la investigación profesional, una aspiración que siempre he tenido desde pequeño.

De forma más particular, quisiera dirigirme al Dr. Enrique Moltó y la Dra. Patricia Chueca, mis directores de tesis en el IVIA, porque fueron ellos los que me ofrecieron la oportunidad de poder realizar mi doctorado en un centro científico. Ellos me han enseñado mis primeros pasos en el mundo de la investigación y con su guía y su experiencia les debo la mayor parte de lo que he aprendido estos últimos años, en lo profesional y también en lo personal.

Por supuesto, nunca podré olvidar al resto de compañeros del IVIA: Rosana, Iván, Delia, Sento, Ana, Sergio, Mamén, Óscar, Santi, Juanjo, Jose Ramón, Belinda, Jose...mención aparte merecen el Dr. Rafa Granell y la Dra. Cruz Garcerá. Sin su ayuda no entendería la elaboración de esta tesis, y los considero como los “directores extraoficiales” de esta tesis.

Por supuesto quiero dar las gracias a mi director de tesis de la Universitat Politècnica de València, el Dr. Guillermo Palau. Además de sus buenos consejos e indicaciones, fue él quien me introdujo al nuevo campo en la ingeniería de la dinámica de fluidos computacional, que es la base de esta tesis.

No puedo olvidarme de la Dra. Arianne Vallet, del Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture de

Montpellier (Francia). Con todo lo que me aportó la considero otra directora no oficial de esta tesis, y además siempre se preocupó de que mi estancia en Francia fuera lo más agradable posible.

También quiero agradecer todo lo que aprendí durante los meses que estuve de estancias en el Intitute Von Karman for Fluid Dynamics (St. Genesius-Rode, Bélgica) con el Dr. Carlo Benocci y D. Philippe Planquart, así como tampoco quiero dejarme a Sergio Hoyas, del Centro de Motores Térmicos de la UPV, que también me ayudó en el primer año de la tesis.

Mi agradecimiento a las empresas de *Fontestad SA* y *Reva SA* que nos permitieran realizar los ensayos de campo en sus plantaciones de cítricos.

También dar las gracias al Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria por financiar esta beca doctoral.

Obviamente estoy agradecido al apoyo incondicional que he recibido de mis amigos de Valencia: Borja, Jorge, Miguel, David, Manurl, Mañico, Víctor, Ximo, Inma, Gloria, Carolina, Ali, María, Kus, Amparo, Pili, Naranjo, Estrella, Patri... y los nuevos que he hecho estos años gracias a la tesis, en Bélgica, Francia y Madrid, especialmente a Fernando Pérez y Alejandro Escario por su ayuda en el tratamiento de imágenes de esta tesis.

Y por último a mi familia. A mis padres, mi hermano, mis tíos, mis primos, mis abuelos. Por su amor, por su energía, por estar ahí siempre, simplemente por todo. Ellos son también autores de esta tesis.

A mis padres.

Tu estado de ánimo será tu destino (Heródoto)

Índice general

1. Introducción al problema de los tratamientos fitosanitarios en cítricos y justificación de la tesis	1
2. Factores que afectan a la eficiencia de los tratamientos.....	7
2.1. Variables meteorológicas.....	7
2.1.1. Viento	7
2.1.2. Temperatura	8
2.1.3. Estabilidad atmosférica.....	8
2.1.4. Humedad relativa	9
2.1.5. Precipitaciones	9
2.2. Propiedades físico-químicas del caldo pulverizado	10
2.2.1. Ratio de evaporación	10
2.2.2. Tensión superficial.....	10
2.2.3. Viscosidad.....	11
2.3. Parámetros asociados a los ajustes de la maquinaria.....	11
2.3.1. Boquillas	11
2.3.2. Presión del fluido durante la aplicación.....	12
2.3.3. Ventilador	12
2.3.4. Velocidad de avance del equipo	13
2.4. Características de la vegetación del cultivo.....	14
2.4.1. Tipo y desarrollo del cultivo.....	14
2.4.2. Resistencia de la vegetación al paso del aire	15
2.4.3. Propiedades de la superficie foliar y de las ramas	15
3. Métodos experimentales para estimar la eficiencia de los tratamientos	16
3.1. Ensayos de campo experimentales basados en colectores.....	16
3.1.1. Estimación de la deriva atmosférica	16
3.1.2. Balance de masas	18
3.1.3. Inconvenientes asociados a los ensayos de campo basados en colectores	20
3.2. Túneles de viento	21
3.3. Empleo de sistemas láser	23
4. Modelización mediante la dinámica computacional de fluidos (CFD).....	24

4.1. Conceptos básicos en mecánica turbulenta.....	25
4.1.1. Definición de flujo turbulento	25
4.1.2. Ecuaciones de Navier-Stokes	27
4.1.3. Cascada de energía y escala de Kolmogorov	29
4.2. Discretización del dominio y elección de la malla	29
4.3. Método numérico de los volúmenes finitos.....	32
4.4. Métodos empleados en la resolución de la turbulencia	32
4.5. Modelos turbulentos en la técnica RANS.....	36
4.5.1. Modelos basados en la hipótesis de Boussinesq.....	37
4.5.2. Modelo de esfuerzos de Reynolds	40
4.6. Consideraciones previas a la simulación	41
4.6.1. Definición de las variables objetivo	41
4.6.2. Elección de las condiciones de contorno	42
4.6.3. Influencia sobre las condiciones reales.....	47
4.6.4. Criterios de convergencia	47
5. Antecedentes de modelización en los tratamientos fitosanitarios.....	48
5.1. Modelos tradicionales de partículas.....	48
5.1.2. Modelos de pluma.....	48
5.1.3. Modelos de caminos aleatorios.....	49
5.2. Empleo de modelos CFD en las aplicaciones con turboatomizador.....	50
6. Objetivos	55
7. Descripción del flujo del aire producido por un turboatomizador durante una aplicación de productos fitosanitarios en naranjos.....	57
7.1. Introducción.....	57
7.2. Materiales y métodos	59
7.2.1. Medida de velocidades	60
7.2.2. Procesamiento de los datos y representación de resultados.....	65
7.2.3. Estimación de la intensidad turbulenta	66
7.3. Resultados y discusión.....	67
7.3.1. Análisis de los datos de velocidad	67
7.3.2. Estimación de la intensidad turbulenta.	75
7.4. Conclusiones.....	79
8. Diseño y validación de un modelo CFD del flujo del aire en 2D producido por un turboatomizador durante los tratamientos fitosanitarios en cítricos	82

8.1. Introducción	82
8.2. Materiales y métodos	84
8.2.1. Realización del ensayo para ajustar el modelo	84
8.2.2. Dominio y diseño de la malla.	88
8.2.3. Propuesta del tamaño de celda para las diferentes geometrías	91
8.2.4. Consideraciones generales para las simulaciones.....	92
8.3. Resultados y discusión.....	99
8.3.1. Ensayo para el ajuste del modelo.....	99
8.3.2. Selección del tamaño de celda.....	102
8.3.3. Selección de la geometría de la copa y del modelo turbulento.....	102
8.3.4. Validación del modelo con el segundo ensayo.....	107
8.4. Conclusiones.....	109
9. Estudio del comportamiento de las gotas en un modelo Euleriano-Lagrangiano aplicado a los tratamientos en cítricos con turboatomizador	111
9.1. Introducción	111
9.2. Materiales y métodos	112
9.2.1. Características generales del modelo.....	112
9.2.2. Simulación de la salida de gotas al aire.	114
9.2.3. Consideraciones sobre el aire del medio y el viento atmosférico... ..	115
9.2.4. Simulación de las gotas	117
9.2.5. Descripción del modelo global y simulación del fenómeno.....	119
9.2.6. Análisis descriptivo del comportamiento de las gotas en la simulación.....	120
9.3. Resultados y discusión.....	130
9.3.1. Análisis general del comportamiento de las gotas con el turboatomizador.....	130
9.3.2. Análisis general del comportamiento de las gotas con el viento	140
9.3.3. Evolución global de los parámetros principales de las gotas	152
9.3.4. Cinética y evaporación de las gotas.....	155
9.3.5. Balance final de masas y comparación con datos experimentales..	162
9.4. Conclusiones.....	164
10. Conclusiones generales	168
11. Trabajos futuros	171
12. Bibliografía	174

13. Anejo 1: Simulaciones preliminares considerando el primer árbol como un medio poroso.....	203
14. Anejo 2: Resultados experimentales y del modelo	209
14.1. Valores empleado en el ajuste del modelo	209
14.1.1. Resultados con la geometría 1	209
14.1.2. Resultados con la geometría 2	211
14.1.3. Resultados con la geometría 3	214
14.1.4. Resultados con la geometría 4	216
14.2. Valores empleados en la validación del modelo.....	219
14.3. Diagramas de las velocidades del aire del modelo Euleriano-Lagrangiano	221
14.3.1. Corriente procedente del turboatomizador	221
14.3.2. Corriente procedente del viento	222
14.4. Diagramas de gotas coloreadas por sus propiedades	223
14.4.1. Gotas según distancia al origen	223
14.4.2. Gotas según su altura	226
14.4.3. Gotas según su velocidad.....	229
14.4.4. Gotas según el número de Reynolds.....	234
14.4.5. Gotas según su temperatura	237
14.4.6. Gotas según su diámetro geométrico	240
15. Anejo 3: Fotografías de los ensayos	243

Índice de figuras

<i>Figura 1. Ejemplo de una malla estructurada (izquierda) y no estructurada (derecha).</i>	30
<i>Figura 2. Esquema adaptado de Arya (1988) que a su vez se basa en los valores presentados por la Royal Aeronautical Society (1972).</i>	44
<i>Figura 3. Diagrama del perfiles de velocidad del modelo de pared y del perfil logarítmico en la celda pegada al sólido (Blocken et al., 2007).</i>	45
<i>Figura 4. a) Alzado de la posición del ventilador con respecto al árbol y b) vista en planta de la disposición de los puntos de medición.</i>	61
<i>Figura 5. Alzado de un plano de medida en el experimento principal.</i>	63
<i>Figura 6. Velocidades U_x y U_z in a) Plano $x = -30$, b) Plano $x = 0$ y c) Plano $x = +30$. Distancia en metros.</i>	68
<i>Figura 7. Velocidades horizontales U_x y verticales U_z para a) postes A-30, A0 y A+30; b) postes C-30, C0 y C+30 y c) postes D-30, D0 y D+30. Distancias en metros.</i>	69
<i>Figura 8. Velocidades horizontales U_x y verticales U_z para a) postes E-30, E0 y E+30; b) postes F-30, F0 y F+30 y c) postes G-30, G0 y G+30. Distancias en metros.</i>	70
<i>Figura 9. Intensidad turbulenta de los postes verticales en a) Plano $x = -30$, b) Plano $x = 0$, c) Plano $x = +30$ antes y después de la copa y d) para el poste horizontal B en diferentes plano.</i>	76
<i>Figura 10. Alzado del primer ensayo</i>	86
<i>Figura 11. Dominio y esquema del modelo.</i>	88
<i>Figura 12. Esquema detallado de la entrada de aire en el modelo.</i>	89
<i>Figura 13. Geometrías propuestas para la copa.</i>	90
<i>Figura 14. Características de la segunda y tercera copa. Las partes coloreadas indican las regiones porosas.</i>	91
<i>Figura 15. Velocidades experimentales en los postes A y B.</i>	99
<i>Figura 16. Intensidades turbulentas a la salida del ventilador para el poste A (i) y el poste B (ii).</i>	100
<i>Figura 17. Velocidades experimentales (negro) en comparación con las velocidades simuladas (gris) para la geometría 2 y el modelo SST $k-\omega$ en los puntos donde el flujo se consideró estable. Distancias en metros.</i>	101
<i>Figura 18. Líneas de corriente del aire generado por todas las geometrías de modelo estándar $k-\varepsilon$ y la Geometría 2 para los modelos SST $k-\omega$ y RSM.</i>	105
<i>Figura 19. Velocidades experimentales (negro) en comparación con las velocidades simuladas (gris) en el segundo ensayo. Distancias en metros.</i>	108
<i>Figura 20. Dominio del modelo.</i>	113

<i>Figura 21. Ángulo de inclinación de cada boquilla referida a la horizontal (i) y posición de las boquillas y tramos por donde pasarán las gotas (ii).</i>	114
<i>Figura 22. Posición de las gotas en los instantes $t = 0,10$ s (i), $t = 0,20$ s (ii) y $t = 0,35$ s (iii).</i>	131
<i>Figura 23. Perfiles de velocidades del aire en la segunda fase (viento).</i>	141
<i>Figura 24. Posición de las gotas en los instantes $t = 2,35$ s (i), $t = 5,35$ s (ii) y $t = 8,35$ s (iii), $t = 11,35$ s (iv) y $t = 17,35$ s (v).</i>	143
<i>Figura 25. Localización de las gotas a lo largo de la simulación.</i>	153
<i>Figura 26. Distancia máxima, mínima y media de las gotas respecto a la entrada de aire A en cada nube. Distancia en m.</i>	153
<i>Figura 27. Altura máxima, mínima y media de las gotas respecto al suelo en cada nube. Altura en m.</i>	154
<i>Figura 28. Módulo de velocidad máximo, mínimo y medio de las gotas en cada nube. Velocidades en m/s.</i>	154
<i>Figura 29. Número de Reynolds máximo, mínimo y medio de las gotas en cada nube. Parámetro adimensional.</i>	154
<i>Figura 30. Diámetro geométrico máximo, mínimo y medio de las gotas en cada nube. Diámetros en μm.</i>	155
<i>Figura 31. Diámetro volumétrico $Dv10$, $Dv50$ y $Dv90$ de las gotas en cada nube. Diámetros en μm.</i>	155
<i>Figura 32. Descripción de la geometría del modelo. Cotas en m.</i>	203
<i>Figura 33. Representación de los valores de cada componente de la velocidad (U_y, U_z) frente a las velocidades experimentales.</i>	207
<i>Figura 34. Diagrama de los vectores considerando la primera copa como un medio poroso. Colores según el valor del módulo (m/s).</i>	208
<i>Figura 35. Contorno del módulo de las velocidades cuando la corriente procede del ventilador. Valores en m/s.</i>	221
<i>Figura 36. Diagrama vectorial de las velocidades cuando la corriente procede del ventilador. Colores según el valor del módulo (m/s).</i>	222
<i>Figura 37. Contorno del módulo de las velocidades cuando la corriente procede del viento. Valores en m/s.</i>	222
<i>Figura 38. Diagrama vectorial de las velocidades cuando la corriente procede del viento. Colores según el valor del módulo (m/s).</i>	223
<i>Figura 39. Gotas coloreadas según su distancia al origen de coordenadas en $t=0,10$ s (i), $t=0,20$ s (ii), $t=0,35$ s (iii) y $t=2,35$ s (iv). Valores en m.</i>	224
<i>Figura 40. Gotas coloreadas según su distancia al origen de coordenadas en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valores en m.</i>	225
<i>Figura 41. Gotas coloreadas según su altura en $t=0,10$ s (i), $t=0,20$ s (ii), $t=0,35$ s (iii) y $t=2,35$ s (iv). Valores en m.</i>	227

<i>Figura 42. Gotas coloreadas según su altura en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valores en m.</i>	<i>228</i>
<i>Figura 43. Gotas coloreadas según U_{dy} en $t=0,10$ s (i) y $t=0,20$ s (ii), y U_{dz} en $t=0,10$ s (ii) y $t=0,20$ s (iv). Valores en m/s.</i>	<i>230</i>
<i>Figura 44. Gotas coloreadas según U_{dy} en $t=0,35$ s (v) y $t=2,35$ s (vii), y U_{dz} en $t=0,35$ s (vi) y $t=2,35$ s (vii). Valores en m/s.</i>	<i>231</i>
<i>Figura 45. Gotas coloreadas según U_{dy} en $t=5,35$ s (ix) y $t=8,35$ s (x), y U_{dz} en $t=5,35$ s (xi) y $t=8,35$ s (xii). Valores en m/s.</i>	<i>232</i>
<i>Figura 46. Gotas coloreadas según U_{dy} en $t=11,35$ s (xiii) y $t=17,35$ s (xiv), y U_{dz} en $t=11,35$ s (xv) y $t=17,35$ s (xvi).</i>	<i>233</i>
<i>Figura 47. Gotas coloreadas según su número de Reynolds en $t=0,10$ s (i), $t=0,20$ s (ii), $t=0,35$ s (iii) y $t=2,35$ s (iv). Valor adimensional.</i>	<i>235</i>
<i>Figura 48. Gotas coloreadas según su número de Reynolds en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valor adimensional.</i>	<i>236</i>
<i>Figura 49. Gotas coloreadas según su temperatura en $t=0,10$ s (i), $t=0,20$ s (ii), $t=0,35$ s (iii) y $t=2,35$ s (iv). Valores en K.</i>	<i>238</i>
<i>Figura 50. Gotas coloreadas según su temperatura en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valores en K.</i>	<i>239</i>
<i>Figura 51. Gotas coloreadas según su diámetro en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valores en m.</i>	<i>241</i>
<i>Figura 52. Gotas coloreadas según su diámetro en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valores en m.</i>	<i>242</i>
<i>Figura 53. En la imagen (i) se muestra el equipo empleado para los ensayos de esta tesis. En la imagen (ii) se muestra el equipo en posición frente al árbol junto a los postes de medida antes del árbol. En la imagen (iii) se muestra el anemómetro, que se deslizaba a lo largo de los postes. También se ven los postes al otro lado del árbol. En la imagen (iv), aparece el único poste horizontal del ensayo sobre el ventilador.</i>	<i>243</i>
<i>Figura 54. La imagen (i) enseña al equipo en posición midiendo las velocidades antes del árbol en el poste C. La imagen (ii) muestra los dos anemómetros en posición en los postes C y D.</i>	<i>244</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Hipótesis y modelos empleados en RANS.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 2. Puntos en los que no se alcanzó la estabilidad (marcados con "X").....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 3. Número de celdas por cada malla en cada modelo.</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 4. Diferencias medias (m/s) entre resultados de las distintas mallas.</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 5. Diferencias entre velocidades reales y simuladas usando la Geometría 2 y diferentes modelos.</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 6. Valores de los parámetros asociados al comportamiento dinámico de cada nube.</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 7. Valores de los parámetros asociados al comportamiento dinámico de cada nube.</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 8. Valores medios y errores estándar de los parámetros asociados a la cinética de gota. Errores entre paréntesis</i>	<i>156</i>
<i>Tabla 9. Valores medios de U_s por tramos de alturas. Velocidades medias del viento incluidas.</i>	<i>157</i>
<i>Tabla 10. Valores medios de τ_s por tramos de alturas.</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 11. Valores máximos, mínimos y medios para los coeficientes C_a y $C_{a,s}$ en cada instante.</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 12. Valores medios de $C_{d,s}$ por tramos de alturas.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 13. Valores medios de k_0 por tramos de alturas.</i>	<i>161</i>
<i>Tabla 14. Comparación de los porcentajes del volumen aplicado entre el ensayo Garcerá et al. (2015) y los obtenidos en la simulación.</i>	<i>163</i>
<i>Tabla 15. Velocidades en la simulación frente al ensayo.</i>	<i>204</i>
<i>Tabla 16. Velocidades en la simulación frente al ensayo.</i>	<i>205</i>
<i>Tabla 17. Velocidades en la simulación frente al ensayo.</i>	<i>205</i>
<i>Tabla 18. R^2 y el error medio de predicción RMSEP de las simulaciones.</i>	<i>206</i>
<i>Tabla 19. Velocidades en la simulación con la geometría 1 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste C.....</i>	<i>209</i>
<i>Tabla 20. Diferencias de ángulos y variaciones de los módulos entre las velocidades experimentales y simuladas en el poste C.</i>	<i>210</i>
<i>Tabla 21. Velocidades en la simulación con la geometría 1 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste D.</i>	<i>210</i>
<i>Tabla 22. Velocidades en la simulación con la geometría 1 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales en los postes E, F y G.....</i>	<i>211</i>
<i>Tabla 23. Velocidades en la simulación con la geometría 2 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste C.....</i>	<i>212</i>

<i>Tabla 24. Diferencias de ángulos y variaciones de los módulos entre las velocidades experimentales y simuladas en el poste C.</i>	<i>212</i>
<i>Tabla 25. Velocidades en la simulación con la geometría 2 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste D.</i>	<i>213</i>
<i>Tabla 26. Simulaciones con la geometría 2 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales en los postes E, F y G.</i>	<i>213</i>
<i>Tabla 27. Velocidades en la simulación con la geometría 3 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste C.</i>	<i>214</i>
<i>Tabla 28. Diferencias de ángulos y variaciones de los módulos entre las velocidades experimentales y simuladas en el poste C.</i>	<i>215</i>
<i>Tabla 29. Velocidades en la simulación con la geometría 3 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste D.</i>	<i>215</i>
<i>Tabla 30. Velocidades en la simulación con la geometría 3 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales en los postes E, F y G.</i>	<i>216</i>
<i>Tabla 31. Velocidades en la simulación con la geometría 4 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste C.</i>	<i>217</i>
<i>Tabla 32. Diferencias de ángulos y variaciones de los módulos entre las velocidades experimentales y simuladas en el poste C.</i>	<i>217</i>
<i>Tabla 33. Velocidades en la simulación con la geometría 3 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste D.</i>	<i>218</i>
<i>Tabla 34. Velocidades en la simulación con la geometría 3 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales en los postes E, F y G.</i>	<i>218</i>
<i>Tabla 35. Velocidades experimentales y simuladas en los postes A, C y D.</i>	<i>219</i>
<i>Tabla 36. Velocidades experimentales y simuladas en el poste E.</i>	<i>220</i>
<i>Tabla 37. Velocidades experimentales y simuladas en los postes F y G.</i>	<i>220</i>

1. Introducción al problema de los tratamientos fitosanitarios en cítricos y justificación de la tesis

España es uno de los principales productores mundiales de cítricos (segundo en producción de mandarinas, sexto en naranjas y octavo en limones) y el primero en Europa (FAO, 2013). Para ello, destina una superficie superior a las 300000 ha cultivadas (MAGRAMA, 2013). También es el principal exportador mundial para su consumo en fresco con cerca de 3 millones de toneladas anuales (FAO, 2012). De ahí la necesidad de comercializar frutos de calidad sin la presencia de daños originados por agentes biológicos. Actualmente, a pesar de los grandes avances en la protección de cultivos, existen numerosas plagas y enfermedades que afectan al cultivo (GIPcítricos, 2015) y que requieren la aplicación de fitosanitarios. Las plantaciones cítricas se caracterizan por tener árboles globulares de gran tamaño con una densidad foliar muy elevada. La distancia entre árboles de una fila suele ser entre 3-5 m, por lo que normalmente las copas de los árboles cuando alcanzan la madurez se unen a las copas adyacentes formando un seto. Todo ello dificulta la distribución de la aplicación de fitosanitarios. Tradicionalmente, las aplicaciones con fitosanitarios se hacían con máquinas hidráulicas de mangueras y pistolas (Moltó *et al.*, 2007), pero en los últimos años se está optando por equipos mecánicos basados en sistemas hidráulicos asistidos por aire, conocidos como pulverizadores hidroneumáticos, turboatomizadores o simplemente turbos. Los turboatomizadores son equipos que fraccionan el caldo fitosanitario en gotas al hacer pasar el caldo, impulsado por

una bomba a presión, por los orificios reducidos del sistema de boquillas (pulverización hidráulica). Las gotas son distribuidas por el cultivo a través de una corriente de aire artificial producida por un ventilador, normalmente de flujo axial (Waxman, 1998). Además, el aire remueve las hojas, lo que ayuda a que las gotas alcancen zonas más internas del árbol (Márquez, 2007). El uso del turboatomizador presenta ventajas que ayudan a optimizar los tratamientos (Moltó *et al.*, 2006). Estas pulverizaciones requieren únicamente al conductor del tractor como mano de obra. Asimismo, disminuyen el consumo de agua y las pérdidas de producto por escurrimiento. Por otra parte, el tiempo de trabajo es lo suficientemente corto como para actuar en el momento de mayor sensibilidad de la plaga. Esto implica un empleo más racional de los productos químicos, evitando los trabajos de prevención y reduciendo la cantidad de materia activa a utilizar.

En general, durante las aplicaciones de fitosanitarios, y en particular, con las realizadas con turboatomizador, no todo el producto pulverizado alcanza la vegetación objetivo (Chen *et al.*, 2013; Chueca *et al.*, 2013). Una fracción se evapora, otra cae directamente al suelo y otra se dispersa hacia la atmósfera, dejando el área objeto del tratamiento. Esta última fracción es definida como deriva por la norma ISO 22866:2005 (ISO, 2005). Además, se producen otras pérdidas adicionales, como la escorrentía (parte del caldo que alcanza la vegetación se escurre de los árboles y cae al suelo) y el lavado de productos. De todas las pérdidas, la deriva es considerada la principal fuente de contaminación durante los tratamientos (Planas, 2013), ya que las gotas no sólo alcanzan la vegetación de los cultivos colindantes (De Snoo y Van der Poll, 1999), sino que

también pueden recorrer largas distancias desde el punto de aplicación (Felsot, 2005) hasta llegar a acuíferos (Carter, 2000) y poblaciones humanas (Ellis y Miller, 2010).

Todas las pérdidas descritas contaminan el medio ambiente y suponen un riesgo para la fauna, flora y las personas. De hecho se ha demostrado que perjudican la biodiversidad del ecosistema (Beketov *et al.*, 2013), disminuyen la fijación del nitrógeno atmosférico (Rockets, 2007), reducen las poblaciones de insectos polinizadores (Johansen y Mayer, 1990) e incluso ponen en peligro de extinción a especies enteras (Miller, 2004). Contaminan los recursos hídricos (Nesheim y Fishel, 2009) y el suelo (Shayler *et al.*, 2009). También afectan negativamente a la salud humana (Fantke, 2012), encontrándose una relación directa entre la exposición a los pesticidas y el riesgo de cáncer (Bassil *et al.*, 2007) o de que se produzcan daños neurológicos en la población infantil (Jurewicz y Hanke, 2008).

En el caso de las aplicaciones a plantaciones cítricas, las pérdidas que se producen adquieren más importancia puesto que los tratamientos se realizan con altos volúmenes de caldo, que pueden incluso llegar hasta los 5000 l/ha.

La creciente concienciación medioambiental de la sociedad y su preocupación por preservar la salud de las personas y animales han estimulado importantes acciones legislativas que impulsan la mejora de la eficiencia de la aplicación de fitosanitarios y la reducción de los riesgos asociados a su utilización. Siguiendo esta línea, la Directiva 2009/128/CE (DOUE, 2009a) exige

tomar acciones de prevención y disminución del impacto ambiental, y establece una serie de medidas para obtener un manejo sostenible de los plaguicidas.

Una de estas medidas es la concreción de las bandas de seguridad, es decir, zonas de la parcela en las que se prohíbe hacer tratamientos fitosanitarios para evitar la contaminación de las áreas colindantes. Es importante justificar en España las dimensiones de estas bandas mediante métodos científicos que tengan en cuenta las condiciones agroclimáticas propias de una región mediterránea. Además, es fundamental conocer la cantidad de producto que alcanza los distintos niveles tras un tratamiento (vegetación, atmósfera y suelo) mediante un ensayo de balance de masas. Éste y otros tipos de trabajos de campo se aprovechan para estimar el potencial de generación de deriva atmosférica de los equipos o de los tratamientos. De hecho, en varios países estos datos son empleados para recomendar que dimensiones deben tener las bandas de seguridad (Moltó *et al.*, 2012). Esto demuestra el papel determinante de la comunidad científica en esta materia.

Junto a estas medidas, existen otras normativas que endurecen aún más los tratamientos fitosanitarios, como el Reglamento (CE) 1107/2009 (DOUE, 2009b), relativo a la comercialización de productos fitosanitarios que exige más garantías de seguridad y eficacia, o el Reglamento (CE) 396/2005 (DOUE, 2005) que regula la presencia de residuos químicos. Todo ello impone que las aplicaciones de deban de realizarse de una manera mucho más racional, eficiente y segura.

Por lo tanto, para avanzar en la optimización de los tratamientos fitosanitarios, se necesitan elaborar ensayos cuyos resultados sirvan para

reflexionar sobre formas que mejoren la eficiencia de los tratamientos fitosanitarios y que cumplan con las normativas, así como destacar el interés de introducir mejoras técnicas en los recursos empleados. No obstante, existen una serie de parámetros físicos que son muy difíciles de estudiar en estos ensayos de campo y son muy importantes para lograr estos objetivos, como el comportamiento turbulento del aire del ventilador y su interacción con la vegetación, el movimiento caótico de las gotas o la cantidad total de producto que se pierde en el aire. Por esta razón, aprovechando el gran desarrollo de los ordenadores de estos últimos años, se está optando por el desarrollo de modelos físico-matemáticos que complementan los ensayos de campo al poder estudiar también estas variables.

Esta tesis está enmarcada en el desarrollo de esta herramienta en el caso de los tratamientos con turboatomizador en cítricos, ya que hasta la fecha no existe modelo alguno. Para ello, primero se define el problema de los tratamientos con turboatomizador (capítulo 1) y las variables que influyen en la eficiencia de las aplicaciones (capítulo 2). Luego se repasan los principales métodos experimentales empleados para estimar el comportamiento del volumen pulverizado (capítulo 3). A continuación se explican los fundamentos para modelizar con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) (capítulo 4) y los antecedentes en modelización de los tratamientos (capítulo 5). Después, se empieza a describir el trabajo realizado en la presente tesis, empezando con una descripción física del problema, estudiando el comportamiento de la corriente del ventilador cuando se enfrenta a la copa de un cítrico (capítulo 7). De esta manera, se ha podido diseñar un primer modelo CFD en 2D que es capaz de simular el

Introducción al problema y justificación de la tesis

comportamiento del aire saliente del ventilador alrededor del árbol (capítulo 8). Posteriormente se ha hecho una simulación global durante la pulverización (capítulo 9), incluyendo el carácter turbulento de la corriente frente a la vegetación y el movimiento de las partículas, y se ha estimado la cantidad de producto que se deposita en los árboles y el suelo o se pierde en la atmósfera, comparando estos resultados con un balance de masas experimental.

2. Factores que afectan a la eficiencia de los tratamientos

A continuación se describen los factores que influyen en la eficiencia de la aplicación de fitosanitarios y que se han clasificado en cuatro grupos: las condiciones meteorológicas (epígrafe 2.1), las propiedades físico-químicas del caldo fitosanitario (2.2), los aspectos de la maquinaria empleada (2.3) y las características del cultivo (2.4).

2.1. Variables meteorológicas

2.1.1. Viento

Entre las condiciones meteorológicas, el viento es el factor externo que más influye en las pérdidas por deriva atmosférica (Courshee, 1959; Maybank *et al.*, 1978; Reichard *et al.*, 1992; Moltó *et al.*, 2013), así como también influye en la distribución de gotas sobre los árboles (Yates *et al.*, 1983 y 1985). Según Goering y Butler (1975) es importante el peso de la componente horizontal del viento y las fluctuaciones en la velocidad. El grado de turbulencia del viento afecta a la difusión de las partículas pulverizadas en el aire.

La cantidad de deriva atmosférica aumenta de manera lineal con la velocidad del aire (Goering y Butler, 1975; Bode *et al.*, 1976; Wolf *et al.*, 1993). Hobson *et al.* (1993) indicaba que este incremento se produce a partir de un valor aproximado de 1 m/s. Para velocidades inferiores a este valor, la dirección de las partículas en el aire se vuelve más impredecible (Asman *et al.*, 2003). No

obstante, la influencia del viento sobre la deriva también está sujeta al tamaño medio de las partículas pulverizadas (Kuchniki *et al.* 2004). Las gotas gruesas son menos susceptibles de ser arrastradas por el empuje del viento.

2.1.2. Temperatura

La temperatura regula la estabilidad atmosférica, es decir, afecta directamente al grado de turbulencia del aire. Por esta razón, algunos autores le dan un papel protagonista junto al viento en la influencia sobre las pérdidas por deriva (Goering y Butler, 1975; Smith *et al.*, 1982).

La temperatura también tiene una influencia directa sobre la evaporación de las gotas. A mayor temperatura, mayor evaporación de las partículas. La reducción del diámetro medio de las partículas desde la salida del pulverizador debido a la evaporación hace que sean más influenciados frente a la acción del viento (Hofman y Solseng, 2001).

2.1.3. Estabilidad atmosférica

El grado de estabilidad atmosférica se determina a partir de la diferencia de temperatura entre una porción de aire y el aire circundante. En condiciones estables, el movimiento vertical se inhibe, mientras que en condiciones inestables la porción de aire tiende a moverse continuamente hacia arriba o hacia abajo. Un ejemplo de inestabilidad se da en un día despejado, después del amanecer cuando el aire cercano al suelo está más caliente que el que está por encima. La diferencia de temperaturas genera un movimiento vertical que facilita la mezcla entre las capas de aire. Cuando se produce la inestabilidad atmosférica, la dispersión de las

gotas pulverizadas se incrementa debido a las turbulencias generadas en el aire (Thistle, 2000).

Miller *et al.* (2000) comprobó que en condiciones estables, la nube de gotas se desplazaba horizontalmente cerca del suelo y se producía menos pérdidas que en condiciones inestables. Experimentos en viñedos artificiales destacaron la importancia de la estabilidad atmosférica en la caracterización de la nube de partículas (Gil *et al.*, 2007).

2.1.4. Humedad relativa

La humedad relativa tiene un papel determinante en la velocidad de volatilización de las partículas líquidas. Una humedad relativa baja favorece la evaporación de las gotas, disminuyendo su tamaño y, por tanto, incrementando también la posibilidad de ser arrastradas por el viento (Thistle, 2004). Igualmente, cuanto más distancia recorran las partículas más influencia tendrá la humedad sobre ellas (Wang y Reutmann, 2008). La influencia de la humedad sobre la deriva está fuertemente correlacionada con la temperatura ambiental (Nuyttens *et al.*, 2006).

2.1.5. Precipitaciones

Es importante saber de antemano la previsión meteorológica antes de practicar el tratamiento, ya que la lluvia favorece el lavado del producto en las hojas (Franz *et al.*, 1998; Stover *et al.*, 2002).

2.2. Propiedades físico-químicas del caldo pulverizado

2.2.1. Ratio de evaporación

El ratio de evaporación se define como la variación del diámetro medio de la gota pulverizada en un intervalo de tiempo (Williamson y Threadgill, 1974). A mayor ratio de evaporación, el diámetro de las gotas disminuirá más rápidamente y la fracción de gotas evaporadas y de deriva podría aumentar. Dependiendo de la temperatura ambiental y de la presión de vapor de la sustancia, cada gota presentará una mayor o menor sensibilidad a la evaporación (Holterman, 2003).

En el caldo fitosanitario hay que diferenciar entre el disolvente (normalmente agua y algunos coadyuvantes) y el soluto (la materia activa del producto en cuestión). Por lo general, el ratio de evaporación del agua es mayor que el del soluto por lo que en las partículas suspendidas en el aire, el contenido de agua de la gota se evaporará antes, quedando en suspensión la parte del producto fitosanitario (Elliot y Wilson, 1983).

2.2.2. Tensión superficial

La tensión superficial de una sustancia es la tendencia a disminuir su superficie hasta que su energía de superficie potencial sea mínima, condición necesaria para alcanzar un equilibrio estable. Actúa como una fuerza que se opone al aumento de área del líquido y es la responsable de la forma de gotas en los líquidos. A mayor tensión superficial menor es el tamaño de gota formado y, por tanto, más influenciado al efecto del viento (Hewitt, 1998).

Como la tensión superficial juega un papel destacado en el espectro de las gotas, también influye sobre la distribución de deposición sobre la vegetación (Haq *et al.*, 1983; Salyani, 1988; Jørgensen, 2000) y puede repercutir sobre la formación de escorrentía en las hojas.

2.2.3. Viscosidad

Una mayor viscosidad del caldo implica que las gotas sonde un tamaño mayor, debido a su mayor resistencia a la deformación, y por tanto, más resistentes al empuje del viento (Derksen *et al.*, 2005; Stainier *et al.*, 2006).

Por otra parte, se ha señalado que la viscosidad también influye sobre la distribución de producto en el objetivo, pero en menor medida que la tensión superficial (Garcerá, 2013).

2.3. Parámetros asociados a los ajustes de la maquinaria

2.3.1. Boquillas

Las boquillas son el elemento que da lugar a la población de gotas. Existen diferentes tipos según la utilidad que se vaya a hacer (de abanico, de espejo, etc.). En aplicaciones arbóreas las que más se utilizan son las cónicas (Cooke *et al.*, 1990). Estas boquillas producen conos de gotas con el fin de favorecer la uniformidad en la deposición del producto sobre las hojas. Las boquillas cónicas se caracterizan por el diámetro de salida y por los orificios del difusor. A mayor diámetro de orificio se aumenta el caudal y el diámetro de gota. Las gotas finas tienen mayor tendencia a perderse por deriva mientras que las gotas gruesas por escorrentía. De ahí que sea necesario encontrar un equilibrio en el tamaño de las

gotas. En las últimas décadas se han diseñado boquillas de baja deriva (Moltó *et al.*, 2013) que producen gotas más gruesas respecto a las convencionales.

Además de las boquillas en sí, hay que indicar que la orientación y altura que presentan también va a influir en la eficiencia de los tratamientos (Smith *et al.*, 1982; Yates *et al.*, 1983).

2.3.2. Presión del fluido durante la aplicación

La presión se emplea para forzar al líquido a atravesar la boquilla de tal forma que la energía del mismo lo disgregue en partículas al salir al exterior. Para un mismo tamaño de orificio de salida, a mayor presión menor tamaño de gota y por tanto, mayores pérdidas por deriva (Nordby y Skuterud, 1975). No obstante, Holterman (1997) señala que una alta velocidad de salida de la gota puede suavizar este efecto ya que la gota se hace más independiente de las turbulencias externas. Por otro lado, una presión insuficiente puede producir un tamaño demasiado grande de gota y aumentar el riesgo de escorrentía ya que las gotas tienen más tendencia a escurrir.

2.3.3. Ventilador

Cross *et al.* (2003) estudiaron la influencia del caudal de aire empleado en los ventiladores axiales, llegando a la conclusión que grandes reducciones en el flujo volumétrico de aire pueden reducir sustancialmente las pérdidas por deriva de los turboatomizadores sin afectar negativamente al recubrimiento de la vegetación.

Factores que afectan a la eficiencia de los tratamientos

La velocidad del ventilador también es importante. Walklate (1992) comprobó que una velocidad mal ajustada puede incrementar la deriva si se trabaja con gotas de tamaño fino.

Hay que señalar que los equipos asistidos por aire necesitan menos presión para formar las gotas respecto a otros equipos de pulverización, ya que aprovechan la corriente de aire generada para arrastrar las partículas pulverizadas. Esto es importante a la hora de estudiar la deposición de producto.

Algunos equipos incorporan deflectores para fijar la corriente saliente del ventilador y orientarla directamente a la vegetación objetivo, para disminuir las pérdidas por deriva. No obstante, Celen (2008) comprobó en un ensayo con manzanos que la inclinación que se le da a estos deflectores tiene una influencia directa sobre la distribución de producto en los árboles.

2.3.4. Velocidad de avance del equipo

La velocidad de avance del equipo produce variaciones sobre el volumen de aplicación empleado (Reichard *et al.*, 1977; Cunningham y Harden, 1998; Holownickiet *al.*, 2002; Al Heidary *et al.*, 2014).

En cultivos extensivos durante las aplicaciones con pulverizadores de barra conforme aumenta la velocidad de avance, aumenta la deriva (Womac *et al.*, 2001; Van de Zande *et al.*, 2004 y 2005; Nuyttens, 2007). Miller y Smith (1997) midieron un incremento de las pérdidas por deriva en más de un 50% cuando la velocidad del tractor pasaba de 5 a 8 km/h. Según Asman *et al.* (2003), una elevada velocidad de avance del equipo aumenta los esfuerzos cortantes del viento

sobre la nube de gotas salientes de la boquilla, incrementando la dispersión de las gotas Sin embargo, se ha observado que una presión adecuada en las boquillas (Tsay *et al.*, 2004) o el empleo ajustado del ventilador (Van de Zande *et al.*, 2004) puede compensar este efecto.

En las aplicaciones de fitosanitarios sobre cultivos arbóreos el efecto de la velocidad sobre la deriva no está tan claro debido a la influencia de la vegetación. Experimentos en cítricos bajo las condiciones de Florida, mostraron que parecía producirse mayor deriva al aumentar la velocidad de avance (Salyani *et al.*, 2013). Sin embargo, en manzanos el hecho de aumentar la velocidad del equipo produjo una disminución de la deriva (Lešnik *et al.*, 2014).

2.4. Características de la vegetación del cultivo

2.4.1. Tipo y desarrollo del cultivo

El tipo de cultivo y su desarrollo determinan la forma y la densidad del área foliar del árbol en el momento del tratamiento con fitosanitarios. Estos factores, a su vez, influyen de manera directa a la eficiencia de los tratamientos con turboatomizador (Duga *et al.*, 2015a).

Ensayos en frutales han demostrado que cuanto mayor sea la cantidad de masa foliar de los árboles el fenómeno de la deriva es menos intenso (Pratt *et al.*, 2000), ya que cuanto más follaje tenga el árbol, el número de gotas pulverizadas atrapadas es más grande. Esto es porque el follaje absorbe la energía extra producida por el ventilador, frenando las gotas y atrapándolas (Hofman y Solseng, 2001).

Por otro lado, la deposición dentro del árbol se vuelve más variable a medida que la densidad foliar se incrementa y repercute directamente sobre los depósitos y la eficacia de los tratamientos (Salyani y Whitney, 1990; Hall, 1991; Stover *et al.*, 2002).

2.4.2. Resistencia de la vegetación al paso del aire

Las copas rugosas de los árboles presentan una resistencia aerodinámica al paso del aire, produciendo una serie de turbulencias adicionales en el flujo tanto en el interior de la copa como en su contorno (Finnigan, 2000; Su *et al.*, 2008; Finnigan *et al.*, 2009). La masa vegetal absorbe la energía cinética del aire, produciendo pérdidas en la velocidad y en la presión (Belcher *et al.*, 2003; Yi, 2008; Yue *et al.*, 2008), lo que repercute en desviaciones de las trayectorias de las partículas líquidas a su paso.

2.4.3. Propiedades de la superficie foliar y de las ramas

Las características físicas de la superficie de las hojas determina la forma de retención de líquidos, lo que influye sobre el tamaño y la distribución de las gotas que se depositan (Mercader *et al.*, 1995). Una superficie cubierta de pelos, rugosa o con un sistema ceroso bajo la cutícula complica la retención del caldo fitosanitario (Garcerá, 2013). Por otra parte, las ramas muchas veces resultan ser porosas, lo que les permite retener mejor el producto, afectando a la dispersión del producto (Smith *et al.*, 2000).

3. Métodos experimentales para estimar la eficiencia de los tratamientos

La eficiencia de los tratamientos fitosanitarios se ha estudiado principalmente mediante ensayos de campo basados en colectores que estiman la deposición o las pérdidas de deriva o los balances de masas (epígrafe 3.1). No obstante, estos trabajos presentan una serie de inconvenientes. De ahí que surjan otras metodologías como los realizados con túneles de viento (3.2) o los basados en dispositivos láser LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) (3.3).

3.1. Ensayos de campo experimentales basados en colectores

3.1.1. Estimación de la deriva atmosférica

Como se ha comentado anteriormente, la deriva es la fuente más importante de contaminación durante los tratamientos fitosanitarios. Es por ello que su estimación ha sido objeto de investigación y se han desarrollado diversas metodologías y tecnologías.

Unas metodologías se basan en hacer una estimación directa de la deriva y para ello trabajan con valores experimentales obtenidos durante la aplicación de fitosanitarios en campo. En los primeros estudios realizados, las técnicas empleadas para estimar la deriva eran diferentes lo que dificultaba la comparación de los resultados entre los mismos (Wolters *et al.*, 2008). Por eso se hizo un esfuerzo de normalización y surgió la norma internacional ISO 22866:2005 (ISO, 2005), que establece un criterio estándar para estos ensayos. Esta norma se basa

en la metodología empleada por Ganzelmeier *et al.* (1995). Consiste en pulverizar un material trazador a una concentración conocida en un área de cultivo definida. En una parcela adyacente con suelo desnudo se colocan una serie de colectores sobre los que se depositan gotas que se han derivado. De los colectores se extrae la parte del trazador y se calcula la fracción de volumen de caldo derivado. Los resultados que se pueden obtener son la curva de deriva depositada en función de la distancia a la parcela pulverizada y el perfil de la nube de deriva a ciertas distancias de la parcela pulverizada.

A partir de datos experimentales de deposición de gotas, se han desarrollado modelos para estimar la deriva en función de la distancia que pueden alcanzar las partículas pulverizadas: el modelo alemán (Ganzelmeier *et al.*, 1995; Ganzelmeier y Rautmann, 2000) y el modelo holandés (Holterman y Van de Zande, 2003). Ambos modelos han sido calculados basándose en los datos experimentales obtenidos en las condiciones meteorológicas del centro de Europa y para diferentes tipos de cultivos de esas regiones. El modelo alemán considera cereales (excluyendo el maíz), viñas, frutales (principalmente manzanos) y lúpulos, estados de desarrollo foliar y tipos de aplicación. Por su parte, el modelo holandés considera los cultivos de patatas, remolacha azucarera, cereales, suelo desnudo y frutales en dos estados de desarrollo foliar (con hojas y sin hojas).

A pesar de que son modelos ampliamente reconocidos presentan limitaciones ya que no contemplan el caso de otros cultivos no centroeuropeos como los cítricos ni condiciones meteorológicas de otras regiones. De hecho, Meli *et al.* (2003) en unos ensayos llevados a cabo en Sicilia comprobaron que el

modelo alemán hacía sobreestimaciones en el caso de una plantación de cítricos. La limitación de este estudio es que únicamente estimó la deriva depositada hasta los 7.5 m de distancia del turboatomizador. De igual modo, Alves y Cunha (2014), tras unos ensayos en tratamientos de plantaciones de café, concluyeron que ambos modelos hacían más sobrestimaciones cuanto menor era la distancia al equipo.

La adecuación de los modelos de deriva a los casos de estudio es muy importante ya que estos modelos son los que se utilizan para evaluar los riesgos de la deriva para distintos pesticidas sobre el medio ambiente y la población (De Schampheliere *et al.*, 2005 y 2007; Cunha *et al.* 2012).

3.1.2. Balance de masas

Para estimar la eficiencia de un tratamiento, además de la deriva deben considerarse otras pérdidas que se producen durante las aplicaciones. Con este objetivo se han llevado a cabo experiencias para calcular el balance de masas de las aplicaciones que muestran las distintas fracciones de producto que terminan en los diferentes sustratos, la vegetación, la atmósfera y el suelo. Este tipo de estudios también se pueden usar para clasificar los equipos y los tratamientos según su potencial de generación de deriva, o para evaluar el efecto de cualquier medida anti-deriva que se quiera incluir en una máquina (Moltó *et al.*, 2011).

Las metodologías empleadas en estos estudios son similares a las de los ensayos de deriva. Consisten en ensayos de campo en las que se pulveriza un trazador y cuyas gotas se recogen sobre colectores colocados en los diferentes

sustratos de la plantación (Jensen y Olesen, 2014). Al igual que en caso de estimación de la deriva, existe una norma ISO 22522:2007 (ISO, 2007) que establece una metodología estándar para estudiar la distribución de la pulverización sobre la copa y las pérdidas al suelo y que se puede usar de referencia para estos ensayos.

Uno de los primeros trabajos publicados en cítricos fue el de Cunningham y Harden (1998) en Australia, en el que realizaron un ensayo de balance de masas para comprobar que diferencias existían entre los turboatomizadores convencionales y los pulverizadores de torre. Para estudiar la deposición en la vegetación recogieron hojas y frutos de manera individual de diferentes zonas de varios árboles. Para medir la deriva usaron hilos de cobre verticales como colectores, situados a cinco filas del tratamiento. En el caldo añadieron un trazador fluorescente. Posteriormente, lavaron los colectores y analizaron el caldo obtenido por fluorimetría. Los resultados mostraron que no había diferencias significativas en las pérdidas por deriva, aunque los pulverizadores de torres presentaron más pérdidas por escorrentía y los convencionales produjeron una distribución menos uniforme de producto sobre la cubierta vegetal.

En Florida, Salyani *et al.* (2007) también comparó las pérdidas producidas y la deposición sobre la vegetación entre cinco turboatomizadores de uso común en aplicaciones de naranjos. Los colectores consistieron en líneas continuas a base de cinta de algodón, que se extendían por encima de copas de los árboles, de sus lados y a nivel de suelo. Estas cintas llegaban hasta la tercera fila de cultivo para cada lado de la posición del turboatomizador. Los resultados mostraron que los

porcentajes medios de volumen para las pérdidas en el suelo y de deriva atmosférica fueron aproximadamente del 13% y 8% respectivamente, mientras que el 76% restante terminó en la vegetación objetivo.

En España, Garcerá *et al.* (2015) también estimaron el balance de masas en cítricos cultivados en condiciones mediterráneas. Para ello, se empleó un sistema de muestreo formado por colectores de papel secante, para recoger la deposición en el suelo y la vegetación objetivo, y colectores de hilo de nylon, para recoger las pérdidas atmosféricas y la deposición en la vegetación colindante, extendiendo la medida a las 5 filas adyacentes a ambos lados de la calle pulverizada. En este caso los resultados también fueron expresados como porcentajes, mostrando que las pérdidas al suelo y por deriva atmosférica fueron del 25% y 18% respectivamente, y la deposición en la vegetación del 48%. La cantidad restante del 9% no se pudo determinar.

3.1.3. Inconvenientes asociados a los ensayos de campo basados en colectores

Los ensayos de campo, tanto para estimar la deriva como para determinar el balance de masas, son ensayos muy costosos que requieren mucha mano de obra y están sujetos a factores no controlados, como los meteorológicos, a pesar de que se restrinjan las condiciones en las que deben llevarse a cabo. Además no tienen en cuenta la fracción de la deriva que se pierde en la atmósfera en forma de vapor y tampoco permiten la detección de irregularidades espaciales en la nube de gotas, ya que están limitadas por el número, la localización y la altura de los colectores. Por otra parte, no analizan como las características de la vegetación

(densidad foliar elevada, diámetro grande) afectan al comportamiento de las corrientes de aire y gotas de las aplicaciones con turboatomizador.

3.2. Túneles de viento

Con el fin de reducir los factores no controlados que se producen durante los ensayos de campo, se ha normalizado una metodología que, en lugar de estimar la deriva producida durante los tratamientos, calcula el potencial de deriva en túneles de viento ISO 22856:2008 (ISO, 2008).

Los túneles de viento brindan la oportunidad de realizar ensayos en condiciones controladas y repetibles, evitando las perturbaciones propias del trabajo de campo. Tienen que ser capaces de generar y mantener la velocidad nominal de aire con un bajo grado de turbulencia. Los resultados deben ser únicamente usados para clasificar el potencial relativo de deriva al compararlos con un sistema generador de referencia. Se recomiendan los mismos colectores que en los ensayos de campo, aunque la norma ISO hace especial hincapié en los colectores cilíndricos por sus buenas correlaciones con las mediciones realizadas en campo.

En cambio, los túneles de viento no permiten estudiar la influencia de ciertos parámetros, como la velocidad del tractor o el aire generado por el ventilador del pulverizador (Nuyttens *et al.*, 2010). Además, la instalación de estos túneles suele ser laboriosa y consumen mucha energía por lo que su coste es elevado.

Métodos experimentales para estimar la eficiencia

Los túneles de viento han servido para analizar la influencia en la deriva de las propiedades fisicoquímicas de los pesticidas (Guler *et al.*, 2006; De Schampheliere *et al.*, 2009) o de las boquillas (Nuyttens *et al.*, 2009). También se han utilizado para comparar la eficiencia de los colectores o el material trazador (Brusselman *et al.*, 2005; Arvidsson *et al.*, 2011).

3.3. Empleo de sistemas láser

Frente a las metodologías basadas en la deposición sobre colectores, la tecnología LIDAR se presenta como un método de teledetección que proporciona una gran resolución a todos los niveles lo que posibilita conseguir, en tiempo real, imágenes 3D de la pluma de partículas pulverizadas.

Mediante esta tecnología se han obtenido imágenes en tiempo real de la nube de partículas en las que se apreciaba la densidad relativa de plaguicidas (Mickle, 1996 y 1999). Ha tenido otros usos, como tratar de cuantificar la concentración de fitosanitarios en la atmósfera (Hiscox *et al.*, 2006), la monitorización de la deriva en naranjos (Miller *et al.*, 2003) y en viñedos (Gil *et al.*, 2013) o la deposición de producto en manzanos (Walklate *et al.*, 2002).

Esta tecnología es eficiente, selectiva y permite ahorrar tiempo. No obstante, se limita a monitorizar la nube de partículas, todavía hay que desarrollar equipos específicos para cada cultivo (Gregorio *et al.*, 2011 y 2013), tiene un precio muy elevado y no permite la toma de valores absolutos del volumen de la nube generada (Gil y Sinfort, 2005). Además también se ve influenciada por los factores meteorológicos.

4. Modelización mediante la dinámica computacional de fluidos (CFD)

Los métodos experimentales difícilmente pueden explicar la influencia de ciertos parámetros en los tratamientos y no permiten la visualización completa de la pluma de gotas. Un complemento importante a estos ensayos puede ser el empleo de modelos físico-matemáticos que reproduzcan los tratamientos. Esta herramienta se ha ido desarrollando cada vez más aprovechando el aumento de la potencia de cálculo de los ordenadores.

Tradicionalmente, en pulverización se han empleado modelos que reproducen el comportamiento de las partículas, como los modelos Lagrangianos (Gil y Sinfort, 2005). Dentro de estos modelos, los más conocidos son los de caminos aleatorios, que simulan el movimiento caótico de cada partícula.

También se han propuesto otros modelos que requieren una potencia de cálculo menor que los Lagrangianos. Los de regresión múltiple estudian la relación entre las distintas variables que intervienen en la deriva (Gil *et al.*, 2007 y 2008). Por su parte, Larbi y Salyani (2011) propusieron un modelo de deposición de gota en cítricos basado en los llamados modelos de distribución retardada, que se emplean en biología para estudiar la dispersión del polen o de los microorganismos en la atmósfera.

Desde hace dos décadas está teniendo una mayor repercusión la modelización mediante la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) (Teske *et al.*, 2011, Lee *et al.*, 2013). La CFD se basa en los trabajos de Richardson (1910)

y utiliza métodos numéricos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes que rigen el comportamiento turbulento de los fluidos. Estos modelos ofrecen la gran ventaja respecto a los anteriores de que no sólo simulan el comportamiento del flujo, sino que además pueden integrar modelos Lagrangianos. Por lo tanto, en este caso se puede ver simultáneamente el comportamiento de la corriente saliente del ventilador y de las partículas que viajan en su seno. Además, los modelos CFD permiten incluir numerosas variables que influyen en los tratamientos y que son muy difíciles de controlar en los experimentos de campo, como la interacción con la vegetación, el viento o la temperatura.

A continuación se describen las bases físicas de los flujos turbulentos (4.1), la discretización del dominio y los tipos de malla (4.2), el método numérico (4.3), los modelos generales usados en CFD (4.4), los modelos RANS (4.5) y, por último, se plantean una serie de consideraciones previas a la simulación que deben tenerse en cuenta (4.6).

4.1. Conceptos básicos en mecánica turbulenta

4.1.1. Definición de flujo turbulento

Un flujo en la naturaleza puede ser laminar o turbulento. En el caso de los flujos laminares, el movimiento de las partículas es estratificado y ordenado. Se considera que el flujo se desplaza en láminas paralelas, sin mezcla entre ellas.

Sin embargo, la mayoría de los flujos en la naturaleza son turbulentos y se caracterizan por describir flujos irregulares donde se producen fluctuaciones no

estacionarias, es decir, sus propiedades varían en el tiempo para un mismo punto. Debido a este comportamiento, se recurre a la estadística para analizarlos.

Estos flujos tienen la propiedad de ser rotacionales, es decir, las partículas fluidas giran alrededor de un eje. Esto da lugar a una serie de estructuras físicas llamadas vórtices o remolinos.

Otra característica es que los flujos turbulentos son siempre disipativos. Debido a las pérdidas energéticas por los efectos viscosos, para que la turbulencia se mantenga, se necesita un suministro continuo de energía. Este aporte procede del flujo principal y aumenta los procesos de deformación a los que se ven sometidas las partículas del fluido.

Por último, los flujos turbulentos son difusivos. Sus propiedades se mezclan rápidamente incrementando los efectos del transporte de masa, cantidad de movimiento y energía.

Para definir cuándo se considera que un flujo es turbulento se emplea el número de Reynolds (Re) (Reynolds, 1883):

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (1)$$

U (m/s) es la velocidad media del flujo, L (m) es la longitud característica, que corresponde con el tamaño del vórtice más grande que se produce en una sección determinada, y ν (m²/s) es la viscosidad cinemática. Esto implica que el número de Reynolds es un ratio entre los efectos inerciales y los viscosos del flujo.

Cuanto más grande es el valor de Re para un flujo determinado, más predominan las fuerzas inerciales y más turbulento es el flujo. En cambio, cuanto más bajo sea este valor, los esfuerzos viscosos son más predominantes y el flujo es más laminar.

4.1.2. Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes gobiernan el comportamiento de un fluido Newtoniano (cuando su viscosidad es constante en el tiempo). Generalmente se entienden como el conjunto de ecuaciones de la cantidad de movimiento y la ecuación de continuidad.

La ecuación de la cantidad de movimiento, en notación vectorial, se expresa como:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \left\{ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right\} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (2)$$

Donde D/Dt es la derivada material o total. Esta derivada se descompone en la aceleración local, que representa la variación de la velocidad en un punto fijo del espacio, y en la aceleración convectiva, asociada a la variación de la velocidad cuando se desplaza el punto. μ (Pa·s) es la viscosidad dinámica, ρ (kg/m³) la densidad, u (m/s) es el vector velocidad y p (Pa) la presión.

Los términos en la ecuación ((2)) son todos lineales con excepción de la aceleración convectiva. El primer término del lado derecho representa el balance de fuerzas másicas de gravedad y fuerzas superficiales normales asociadas a la

presión. El segundo término del lado derecho representa la difusión de cantidad de movimiento debido a los efectos viscosos.

La ecuación ((2)) contiene 4 incógnitas, una por cada componente de la velocidad y otra por la presión. Para cerrar el número de ecuaciones requeridas, se tiene en cuenta la ecuación de continuidad, que en realidad es la aplicación del principio de conservación de la masa. Para un fluido incompresible, la ecuación de continuidad se expresa como:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3)$$

Es frecuente usar notación tensorial para expresar las ecuaciones anteriores. De esta manera se puede visualizar mejor los distintos términos que las componen. En notación tensorial se consideran tres coordenadas: (x, y, z) , de modo que la velocidad tiene tres componentes (u_1, u_2, u_3) . Si se divide la ecuación ((2)) por la densidad, la componente en la dirección x_i puede describirse como:

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} \quad (4)$$

Por otra parte, la ecuación de la continuidad quedaría como:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

4.1.3. Cascada de energía y escala de Kolmogorov

La velocidad es inestable en los flujos turbulentos, con grandes variaciones a medida que transcurre el tiempo. Se sabe que las fluctuaciones de la velocidad se producen por la presencia de los vórtices. Las dimensiones de los vórtices más grandes coinciden con las escalas del flujo principal. Debido a la acción de los términos no lineales en la ecuación de Navier-Stokes, estos vórtices transfieren su energía a vórtices más pequeños, y a su vez, estos a otros vórtices aún más pequeños, y así consecutivamente. Durante esta transferencia, casi no se pierde o disipa energía en el proceso. A todo este proceso se le denomina cascada de energía.

A escalas muy pequeñas la viscosidad domina el proceso, convirtiendo la energía turbulenta en calor. La escala donde ocurre esto se llama escala de Kolmogorov. Representa el menor tamaño posible que tiene un vórtice dentro del flujo. Esta escala es menor cuanto más alto es el número de Reynolds del flujo.

4.2. Discretización del dominio y elección de la malla

El primer paso en la modelización con CFD es la elección de un dominio geométrico donde se quiere modelizar el comportamiento del flujo a su paso. Sin embargo, independientemente del tipo de flujo que se quiera estudiar es necesario una discretización espacial del dominio para obtener la solución numérica. Las posiciones discretas en las que las variables son calculadas están definidas por la malla numérica. La malla divide el dominio en un número finito de subdominios denominados comúnmente celdas.

Es fundamental que los resultados finales que ofrezca un modelo sean lo más independientes posibles de la malla (Baker, 2005). Sólo deben depender de las ecuaciones físicas y de las condiciones de contorno.

Existen dos tipos de mallado: las mallas no estructuradas y las estructuradas (Figura 1).

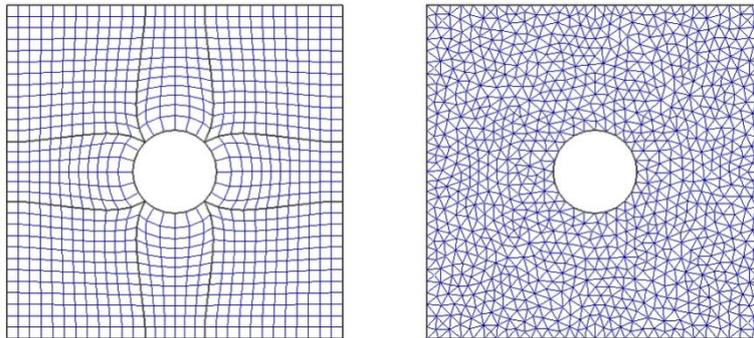


Figura 1. Ejemplo de una malla estructurada (izquierda) y no estructurada (derecha).

En las mallas no estructuradas las celdas se elaboran conectando arbitrariamente una serie de puntos, que se denominan vértices, mediante líneas que no llegan a cortarse. Estas líneas definen los vértices de las celdas que en 2D son una mezcla de cuadriláteros y triángulos y en 3D tetraedros y hexaedros.

En cambio, en las mallas estructuradas el dominio se divide en bloques, y a continuación se definen las celdas en cada uno. Las celdas resultantes de la malla son cuadriláteras en 2D y hexaedros en 3D.

Las mallas no estructuradas presentan la ventaja de adaptarse mejor a dominios de geometrías complejas y la generación de la malla suele ser más rápida. Pero las mallas estructuradas resuelven mejor las ecuaciones de Navier-Stokes porque los métodos numéricos que luego se emplean toman como hipótesis que los dominios son regulares. Todo lo que se separe de ello genera

errores numéricos que se van acumulando. Además, las mallas estructuradas permiten tener un mayor número de celdas en los lugares donde se generen los fenómenos turbulentos más complicados. Por tanto, se tiene un mayor control sobre las celdas.

En mallas estructuradas, la distribución de las celdas puede ser uniforme o variable. Si no es uniforme, el ratio de crecimiento entre celdas consecutivas debe de ser menor en las regiones donde existan mayores gradientes en las propiedades del flujo para mantener los errores de truncamiento en niveles aceptables. Cuando se trabaja con la técnica RANS (epígrafe 4.5) se recomienda que el ratio máximo de crecimiento entre celdas consecutivas no sea mayor del 20% (Baker, 2005).

En modelos ambientales, se ha indicado que para predecir el flujo alrededor de un obstáculo sólido con una precisión aceptable, es muy importante reproducir adecuadamente las características de separación del flujo en la zona superior y laterales, pues es donde se producen los fenómenos más complejos (Tominaga *et al.*, 2008). Por esta razón, el ratio de crecimiento entre celdas debe de ser más bajo en las zonas del modelo donde se produzcan estos fenómenos que en el resto. Es decir, la resolución de celdas ha de ser más fina en estas zonas. Esto se hace para mantener los errores de truncamientos pequeños.

Para escoger la malla final se usa la llamada extrapolación de Richardson en modelos cuyo objetivo sea la validación (Granell, 2014). Consiste en probar al menos tres mallas con resoluciones que aumentan 1,5 veces en las tres dimensiones. Esto se hace para escoger la malla que ofrezca los resultados lo más independientes posibles del tipo de resolución sin ralentizar demasiado la potencia

de cálculo, en otras palabras, se busca una malla que mantenga el equilibrio entre resultados y coste computacional.

4.3. Método numérico de los volúmenes finitos

Como las ecuaciones físicas de Navier-Stokes son de difícil solución tienen que ser discretizadas en sistemas algebraicos simples. El método de discretización de los volúmenes finitos es el más utilizado en los programas comerciales de CFD. Es una técnica flexible (se puede usar con mallas estructuradas y no estructuradas) y se emplea en casos de geometrías complejas. Para esta tesis se ha empleado este método aplicado a una malla estructurada.

Con el método de los volúmenes finitos, cada celda del dominio discretizado representa un pequeño volumen de control. Seguidamente, se integran las ecuaciones de conservación de la masa, de cantidad de movimiento y de la energía. Así se construyen ecuaciones algebraicas para las variables dependientes o incógnitas. Por último, las ecuaciones son resueltas de una forma ordenada para ir actualizando los valores de las variables independientes. Las ecuaciones se aplican en puntos discretos de las celdas llamados nodos.

4.4. Métodos empleados en la resolución de la turbulencia

Antes de hablar de las diferentes técnicas, hay que explicar en qué consiste el criterio de Nyquist. Este teorema indica que para identificar una onda de una determinada longitud y no confundirla con otra onda de longitud diferente, hay que conocer como mínimo tres puntos de ella. Esto quiere decir que si se pretende resolver una onda de longitud L_0 con una malla de discretización Δx , entonces se

ha de cumplir la condición $\Delta x < L_0/2$. Este requisito impone una restricción bastante fuerte sobre la malla del modelo CFD: el tamaño de ella debe ser inferior a la mitad de la escala de Kolmogorov, que como ya se comentó en el epígrafe 4.1.3 es muy pequeña. Por esta razón es muy difícil de resolver directamente las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos turbulentos, ya que normalmente se trabaja en situaciones mayores que la escala de Kolmogorov. En base a esta dificultad para trabajar con las ecuaciones, se han desarrollado varios tipos de modelos en CFD para desarrollar el comportamiento de los flujos. Los más conocidas son Direct Numerical System (DNS), Large Eddy Simulation (LES) y Reynolds Average Navier Stoke (RANS).

La técnica CFD que pretende resolver directamente las ecuaciones de flujo es el DNS, a costa de requerimientos computacionales muy elevados. Aunque actualmente ya está resolviendo casos de flujos transitorios y turbulentos, la carga de cálculo sigue siendo excesiva y queda fuera de la mayoría de las aplicaciones en ingeniería.

Por esa razón se han desarrollado otras técnicas para simular los flujos turbulentos. El método LES resuelve directamente los grandes vórtices y recurre a modelos de turbulencia para los vórtices pequeños. Parte de la base de que los vórtices más pequeños, al contrario de los más grandes, son independientes de la geometría de contorno, y por tanto, tienen un carácter isotrópico y son más fáciles de modelar. Esta técnica sigue requiriendo una potencia de cálculo grande y su uso en ingeniería sigue siendo limitado, aunque está creciendo en los últimos años.

El método RANS parte de la idea que las fluctuaciones del flujo pueden analizarse estadísticamente. Se puede distinguir entre una velocidad media del flujo y las fluctuaciones en torno a dicho valor. Aunque un flujo turbulento se caracteriza como la variación constante de sus parámetros, en muchas situaciones estas oscilaciones a lo largo del tiempo se encuentran dentro de un rango determinado. Por lo tanto, se puede suponer que el valor de un cierto parámetro en un instante determinado se puede descomponer en un valor medio y una fluctuación. Si se aplica este concepto a la velocidad se tiene:

$$u_j = U_j + u'_j \quad (6)$$

donde la velocidad instantánea u_j se puede descomponer como el sumatorio de un valor medio U_j y una fluctuación u'_j . De manera similar se puede aplicar este concepto a la presión. Si se multiplica por u_j la ecuación ((5) en el epígrafe 4.1.2 y se suma a ((4) se tiene:

$$\frac{\partial(U_j + u'_j)}{\partial t} + \frac{\partial((U_i + u'_i)(U_j + u'_j))}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(P + p')}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2(U_j + u'_j)}{\partial x_i \partial x_i} \quad (7)$$

Si se promedia sobre los términos de la velocidad y la presión, y considerando que el valor medio de un valor medio sigue siendo el mismo y que el promedio de una fluctuación es de un valor despreciable, se tiene:

$$\frac{\partial U_j}{\partial t} + \frac{\partial(U_i U_j + \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i \partial x_i} \quad (8)$$

Por otro lado, si se promedia sobre la ecuación de la continuidad:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

Si se multiplica (9) por U_i y se lo suma a (8), se obtiene:

$$\frac{\partial U_j}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_i} \quad (10)$$

Se observa que el término $\overline{u'_i u'_j}$ no es cero. En realidad, este término estadísticamente representa la covarianza de las fluctuaciones. Las fluctuaciones están correlacionadas entre sí y también consigo mismas (subyace un orden en las estructuras turbulentas), con lo que este valor no puede ser nulo.

A su vez, estas correlaciones forman parte de los denominados esfuerzos de Reynolds:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (11)$$

De esta manera, la ecuación (10) puede expresarse de la siguiente forma:

$$\frac{\partial U_j}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (12)$$

Se puede concluir que al promediar las ecuaciones de Navier-Stokes no se puede resolver completamente el problema de las fluctuaciones turbulentas, ya que permanecen dentro de los esfuerzos de Reynolds. Por tanto, se ha obtenido una serie de incógnitas adicionales a los valores medios. A esto se le denomina el

problema de cierre de la turbulencia. Si se sigue promediando las ecuaciones, siempre aparecerán más incógnitas de un orden mayor en las nuevas ecuaciones.

RANS es una técnica que intenta solventar el problema de cierre. Es el método más empleado actualmente en ingeniería, como en la modelización de tratamientos con turboatomizador, porque ofrece resultados aceptables a un bajo consumo computacional.

4.5. Modelos turbulentos en la técnica RANS

En el método RANS las componentes no permanentes de las variables de flujo se expresan por su valor promedio a través del tensor de esfuerzos de Reynolds, añadiendo seis incógnitas adicionales al sistema de ecuaciones. Para cerrar el número de ecuaciones de flujo existen dos hipótesis respecto a cómo modelar estos esfuerzos: Boussinesq (4.5.1) y los esfuerzos de Reynolds (4.5.2). En base a estas hipótesis, se han desarrollado varios modelos turbulentos. La Tabla 1 sintetiza estos modelos.

Tabla 1. Hipótesis y modelos empleados en RANS.

Hipótesis	Fundamentos	Modelos
Boussinesq	Considera los esfuerzos de Reynolds isotrópicos. Uso de un parámetro llamado viscosidad turbulenta.	k-ε estándar, k-ε realizable, RNG, k-ω estándar, SST
Esfuerzos de Reynolds	Proponen una ecuación para cada esfuerzo de Reynolds y otra para la disipación.	RSM

4.5.1. Modelos basados en la hipótesis de Boussinesq

La hipótesis de Boussinesq relaciona el gradiente de velocidad del flujo medio con los esfuerzos turbulentos mediante un parámetro llamado viscosidad turbulenta (μ_t). Este parámetro, a diferencia de la viscosidad dinámica, es una propiedad del flujo y no del fluido, es decir, μ_t depende de las velocidades del flujo. De esta manera, las ecuaciones quedarían como:

$$\frac{\partial U_j}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (13)$$

Esta hipótesis ha tenido gran difusión en ingeniería y se han desarrollado varios modelos siguiendo esta aproximación con buenos resultados. No obstante asume que la viscosidad turbulenta actúa como un escalar isotrópico, lo que no es estrictamente cierto, por lo que existen supuestos en los que estos modelos no simulan correctamente los fenómenos turbulentos.

Para trabajar con la viscosidad turbulenta, el modelo más conocido en ingeniería es el llamado k - ε estándar (Launder y Spalding, 1972). Contiene una ecuación de transporte (14) para la energía cinética turbulenta k (m^2/s^2), que es la energía cinética contenida en los vórtices, y otra ecuación (15) para el ratio de disipación ε (m^2/s^3), que es la tasa de disipación viscosa de la energía turbulenta.

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k u_i}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (14)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u_i}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (15)$$

Donde G_k representa a la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media; σ_k y σ_ε son los números turbulentos de Prandtl para k y ε respectivamente; S_k y S_ε son términos sumideros definidos por el usuario. Finalmente, el resto de parámetros son constantes obtenidas mediante ensayos y que se ha comprobado que están ajustados para un gran rango de flujos. La viscosidad turbulenta se calcula de la siguiente forma:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (16)$$

donde C_μ es una constante.

Aunque es un modelo muy popular, tiene una serie de limitaciones. Es un modelo definido y caracterizado para la turbulencia de un chorro circular. Cuando se produce una separación de flujo en una zona, la energía turbulenta es sobreestimada. Por ello, estos modelos no simulan adecuadamente el comportamiento de los flujos frente a obstáculos angulosos en los que se produce la separación del flujo. Tampoco reproducen correctamente los flujos de recirculación que se producen detrás de los obstáculos sólidos enfrentados a una corriente.

Existen propuestas de mejora del modelo k - ε estándar, como el modelo RNG (Re-Normalization Group) k - ε (Yakhot *et al.*, 1992), que añade términos para aumentar la precisión en la deformación de flujo e incluye el efecto de los

flujos rotacionales. Otro tipo es el Realizable $k-\varepsilon$ (Shih *et al.*, 1995), que considera ciertas restricciones matemáticas sobre los esfuerzos de Reynolds, prediciendo con mayor precisión los chorros de flujo. No obstante, ambos modelos siguen teniendo dificultades en la predicción del flujo cuando se separan debido a un obstáculo, como es en el caso de la simulación de los tratamientos fitosanitarios con turboatomizador en cítricos donde la corriente saliente se enfrenta a un obstáculo de grandes dimensiones como es la copa, por lo que estas observaciones deben ser tenidas en cuenta.

Otra alternativa es el modelo SST (Shear-Stress Transport) $k - \omega$ (Menter, 1994), donde $\omega(\text{s}^{-1})$ es el denominado ratio de disipación específico. Por un lado, usa la metodología del modelo $k-\omega$ estándar (Wilcox, 1988) en la descripción del flujo desde la parte interior de la capa límite, donde dominan los efectos viscosos. En cambio, en la zona alejada de la pared, donde dominan las fuerzas de inercia, utiliza una formulación basada en el modelo $k-\varepsilon$. Incluye un término de difusión cruzada en las ecuaciones para asegurar que el modelo simula correctamente tanto las zonas próximas a la capa límite como las alejadas. Las nuevas ecuaciones de transporte para k y ω son:

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k u_i}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (17)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \omega u_i}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (18)$$

donde \tilde{G}_k representa la producción de k debido a los gradientes de velocidad. El parámetro G_ω representa la formación de ω . Los términos Γ_k y Γ_ω representan la difusividad efectiva de k y ω , respectivamente. Las variables Y_k y Y_ω son la disipación de k y ω debido a la turbulencia. D_ω representa el término de cruzada. S_k y S_ω son los términos sumidero definidos por el usuario.

El modelo SST $k-\omega$ está adaptado para una mayor tipología de flujos que el modelo estándar $k-\varepsilon$, incluyendo los casos donde se producen gradientes adversos de presión (Pope, 2000) como por la separación de flujo cuando se enfrenta a un obstáculo sólido. Por el contrario, requiere más potencia de cálculo y el coste computacional es mayor.

4.5.2. Modelo de esfuerzos de Reynolds

RSM (Reynolds Stress Model) (Launder *et al.*, 1975) utiliza una ecuación para cada uno de los esfuerzos de Reynolds (6 ecuaciones en tres dimensiones), y otra ecuación para la disipación de la energía turbulenta. Por ello, en principio están más adaptados a los flujos anisotrópicos, como los tratamientos con turboatomizador, donde se producen fenómenos muy turbulentos en las inmediaciones del equipo y alrededor del árbol tratado.

No obstante, la fidelidad de la precisión de los modelos RSM está todavía limitada por las asunciones empleadas para modelar algunos términos en las ecuaciones de transporte de los esfuerzos de Reynolds. Es difícil modelar la presión y los términos del ratio de disipación y se puede comprometer la precisión de los modelos RSM. Por tanto, RSM no siempre ofrece mejores resultados que

los modelos basados en la aproximación de Boussinesq. Además, debido a su complejidad tiene un coste computacional mayor.

La representación esquemática de la ecuación de transporte de los esfuerzos de Reynolds es:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial t} + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + \Phi_{ij} + \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S \quad (19)$$

donde el primer término en el lado izquierdo de la ecuación es la derivada local de la velocidad y C_{ij} representa la aceleración convectiva. En el lado izquierdo, $D_{T,ij}$ equivale al efecto de la difusión turbulenta, $D_{L,ij}$ es la difusión molecular de la viscosidad, Φ_{ij} es la deformación de presión, ε_{ij} es la disipación, F_{ij} es la producción del flujo rotacional y S es un término definido por el usuario.

De todos estos términos, C_{ij} , $D_{L,ij}$ y F_{ij} se resuelven directamente. En cambio, los parámetros $D_{T,ij}$, Φ_{ij} y ε_{ij} deben ser modelados. La ecuación para la disipación de la energía cinética turbulenta es similar a la usada en el modelo k - ε estándar.

4.6. Consideraciones previas a la simulación

4.6.1. Definición de las variables objetivo

El primer paso de toda simulación CFD debe ser definir las variables objetivo (Menter *et al.*, 2002), es decir, aquellos parámetros que mejor caracterizan el problema a abordar. Estas variables suelen ser comparadas con sus equivalentes experimentales para validar el modelo. Entre las variables que más se

emplean en la modelización de tratamientos fitosanitarios destaca el módulo y la dirección de la velocidad del aire y la deposición de las gotas.

4.6.2. Elección de las condiciones de contorno

Se entienden como condiciones de contorno aquellas que definen el comportamiento del modelo en sus límites. Tienen una importancia fundamental en el comportamiento del flujo simulado.

Efecto del suelo y otras superficies sólidas

Para simular el flujo cercano a una superficie sólida, hay que tener en cuenta la capa límite sobre la superficie sólida. Esta capa está formada por una subcapa viscosa, otra de transición y una más alejada donde el flujo ya es turbulento. Esto requiere una elevada resolución de la malla en la zona más próxima a la pared.

Las funciones de pared son ecuaciones semi-empíricas que describen aproximadamente el comportamiento del flujo dominado por los efectos viscosos y su transición al régimen turbulento. Las funciones de pared se utilizan para no tener que aumentar el número de celdas en la dirección normal de las paredes, que es donde se producen varios fenómenos turbulentos. De esta manera se evita hacer una malla muy densa junto a la pared, lo que conllevaría grandes necesidades de cálculo. Es una herramienta robusta y ofrece resultados con precisión aceptable.

La función de pared más común (y que se usará en la presente tesis) es el modelo estándar de Launder y Spalding (1974). Para simular el comportamiento del flujo junto a la pared trabaja con los valores adimensionales u^+ , que es el ratio

entre la velocidad media del flujo y la velocidad de fricción, y^+ , que es la distancia normal a la pared, y k_s^+ , que describe la rugosidad en función de los experimentos de Nikuradse (1933). Este último término se describe en detalle como:

$$k_s^+ = \frac{u^* k_s}{\nu} \quad (20)$$

Donde u^* es la velocidad de fricción de la función de pared, k_s es la altura de rugosidad arenosa equivalente, y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

La altura de rugosidad, k_s , es el parámetro que la mayoría de los códigos comerciales de CFD exigen al usuario para simular el comportamiento del flujo junto a la pared (como nuestro caso). Este parámetro se obtiene muchas veces a partir de la longitud rugosa, z_0 , que representa la altura a la que la velocidad del viento se considera nula, y que depende a su vez del tipo de superficie y los obstáculos que puedan presentar. Existen diferentes propuestas de relación entre estos los parámetros, aunque la más extendida es:

$$k_s = z_0 \exp(\kappa B) \quad (21)$$

Donde κ es la constante de Von Karman y B otra constante.

Diferentes autores, como Arya (1988), han expuesto tablas con valores de z_0 en función del tipo de terreno (Figura 2).

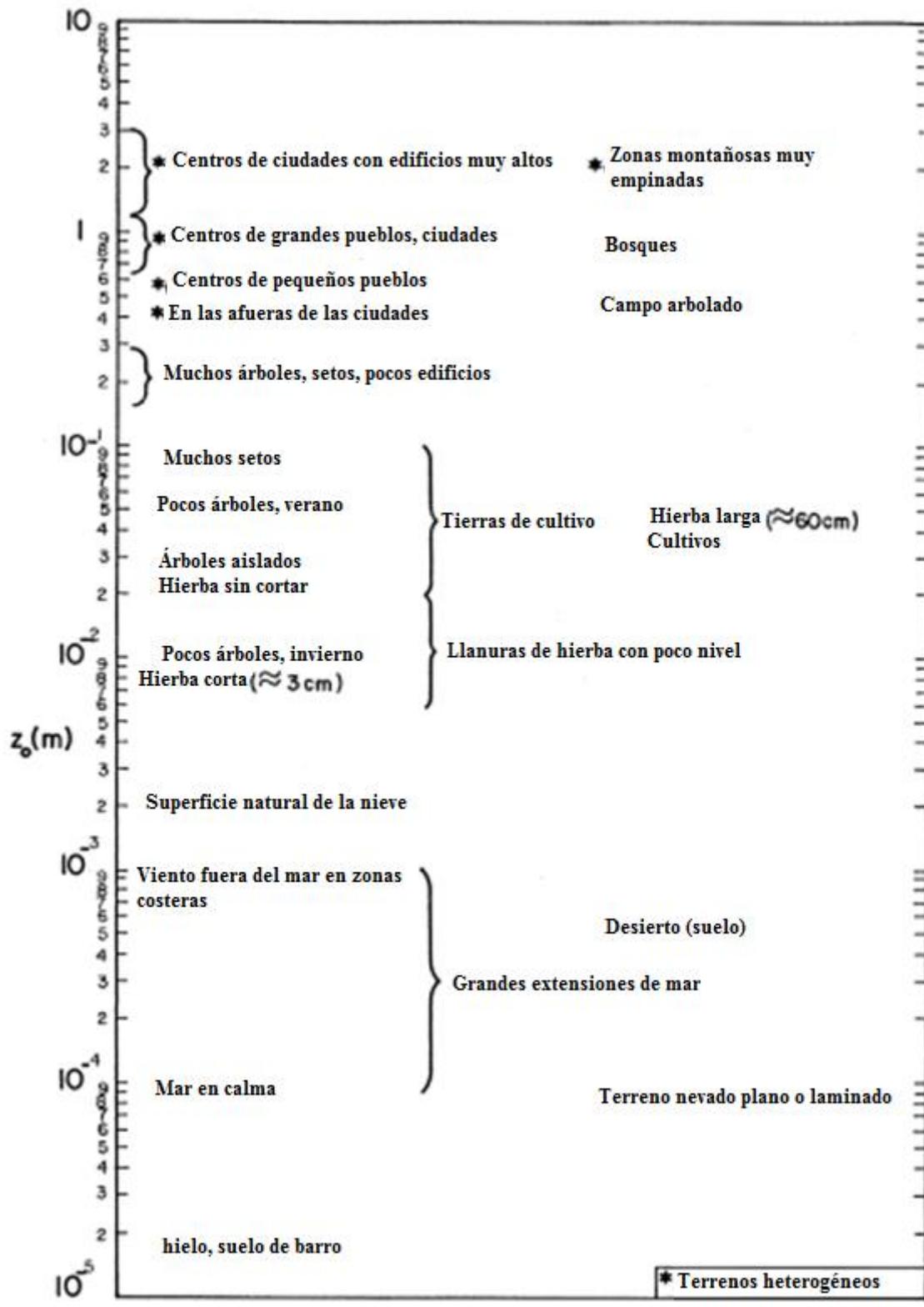


Figura 2. Esquema adaptado de Arya (1988) que a su vez se basa en los valores presentados por la Royal Aeronautical Society (1972).

Los manuales de buenas prácticas en CFD en ingeniería ambiental, como COST732, indican que para tratar el flujo cercano al suelo se pueden utilizar estas funciones de pared. Sin embargo, advierten que estos modelos no son apropiados en zonas donde se produce la separación del flujo. A pesar de ello se ha demostrado que los errores producidos pueden tener poca influencia en el resultado global de la simulación (Castro, 2003).

Blocken *et al.* (2007) establecieron cuatro condiciones para simular correctamente la rugosidad del suelo frente a una corriente de aire. Primero, una resolución de malla lo bastante fina en la dirección vertical de la pared. Segundo, un perfil de viento homogéneo en la dirección del flujo en todo el dominio. Tercero, que la distancia y_p , desde el punto central P de la celda adyacente a la pared, sea mayor que la altura de rugosidad k_s (Figura 3). El último punto es el cumplimiento de la relación entre z_0 y k_s .

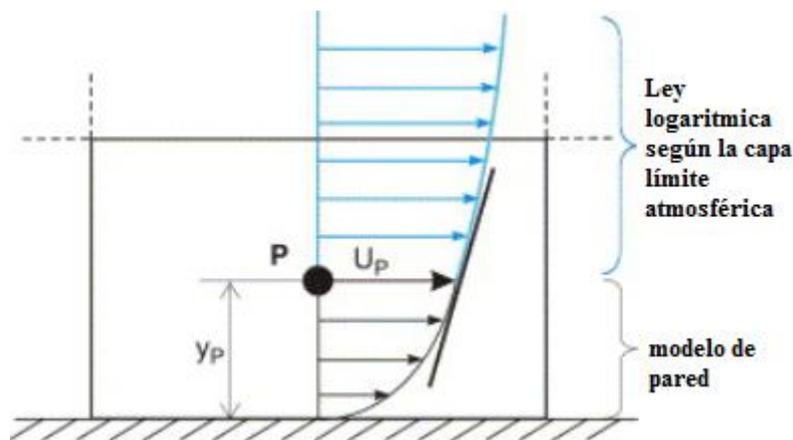


Figura 3. Diagrama del perfiles de velocidad del modelo de pared y del perfil logarítmico en la celda pegada al sólido (Blocken *et al.*, 2007).

Para otras superficies en obstáculos sólidos, se pueden considerar las conclusiones en ingeniería ambiental de Ramponi y Blocken (2012), que estudiaron la influencia de las edificaciones sobre las corrientes de aire en CFD.

En este sentido, usaron la función de pared y consideraron que la rugosidad era despreciable.

Contornos que corresponden a la atmósfera

Existen varias opciones cuando el extremo superior del dominio de un modelo ambiental corresponde a la atmósfera. Una puede ser una condición de simetría, consistente en generar un flujo paralelo al contorno del dominio. Otra es dar una condición de salida directa de flujo. También se puede incluir la presencia de aire a la salida, lo que ejerce una presión sobre el flujo saliente. Aunque se ha señalado lo especialmente delicado que es este punto sobre todo cuando existen obstáculos sólidos, Tominaga (2008) indicó que si el dominio computacional es lo suficientemente alto, esta condición de contorno no tiene influencia.

Se tienen las mismas posibilidades si en laterales también se presupone la presencia del aire ambiental. Con estas opciones, todas las derivadas de las variables del flujo son forzadas a cero y facilita los cálculos.

Perfil de viento

A menudo no se dispone de información experimental sobre el perfil de viento que se quiere simular. Para simular el viento existen numerosos modelos del perfil logarítmico del viento que pueden ser introducidos como condición entrada en el modelo CFD. Por ejemplo, Arya (1988) propuso un perfil de viento presentado en la ecuación (22). La velocidad de viento u_z a una cota z se describe mediante una función de tipo logarítmico, que establece una velocidad de referencia u_{ref} a una determinada altura de referencia z_{ref} .

$$u_z = u_{ref} \left[\frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \right] \quad (22)$$

4.6.3. Influencia sobre las condiciones reales

Cuando se trabaja con un modelo de turbulencia RANS, la influencia de las condiciones iniciales es limitada. El resultado final de la simulación depende casi exclusivamente de las condiciones de contorno. De todas maneras, escoger una condición inicial de entrada lo más próxima posible a la solución final ahorrará esfuerzo de cálculo. Por esta razón, muchas veces se usan como condiciones iniciales los resultados de simulaciones más simples, como simulaciones con esquemas de cálculo de primer orden.

4.6.4. Criterios de convergencia

Las simulaciones suelen monitorearse a través de los residuos, que se definen como el desequilibrio de una variable de flujo x sobre todas las variables del dominio. Si se tuviera una precisión infinita, se llegaría a una solución que convergería a cero. No obstante, el mínimo residuo que se puede alcanzar en los ordenadores es el que ofrece la precisión de cálculo.

Según COST732 el proceso iterativo de una simulación debe continuar al menos hasta que la reducción de residuos sea de cuatro órdenes de magnitud. Además, también recomienda hacer un seguimiento de cada uno de los parámetros que integran las ecuaciones de Navier-Stokes usadas en la simulación.

5. Antecedentes de modelización en los tratamientos fitosanitarios

5.1. Modelos tradicionales de partículas

Los modelos de partículas se han aplicado con éxito para reproducir el comportamiento de las gotas pulverizadas. No obstante, tienen muchas dificultades para incluir detalles específicos y además no representan las corrientes de aire, que son de gran importancia para comprender el fenómeno y poder hacer propuestas de mejora de eficiencia en los tratamientos.

5.1.2. Modelos de pluma

Estos modelos estudian la nube de gotas como si se tratara de un cuerpo continuo. Se basan en los trabajos de Bache y Sayer (1975), que usaron esta hipótesis para diseñar un modelo que estimaba la difusión de partículas de pesticidas en la atmósfera. Este modelo tenía en cuenta la velocidad del aire y la estabilidad atmosférica. Posteriormente, Steinke y Yates (1989) elaboraron un modelo donde la concentración de las gotas en la nube seguían una distribución de Gauss (por eso también se les llama modelos de difusión gaussiana).

Se han empleado sobre todo en aplicaciones aéreas (Tsai *et al.*, 2005) o pulverizadores hidráulicos de barra (Lebeau *et al.*, 2009). Estos modelos han resultado tener una buena precisión a largas distancias para grandes flujos de aire,

pero la resolución es pobre en las zonas próximas al equipo, el lugar más crítico en la formación de la deriva.

5.1.3. Modelos de caminos aleatorios

Estos son modelos del tipo Lagrangiano, y consideran el movimiento individual de cada gota a medida que se mueve desde su punto de liberación hasta que se deposita o se pierde en la atmósfera. Se tiene en cuenta el peso de las partículas y su resistencia aerodinámica. Se le confiere a la gota un carácter aleatorio debido a la interacción con las corrientes turbulentas del viento.

Hall (1975) y Thompson y Ley (1983) propusieron modelos de deriva con estas características para predecir el comportamiento de las gotas en la atmósfera. Posteriormente se aplicó a los tratamientos con los pulverizadores de barra, teniendo en cuenta detalles más específicos del equipo (Miller y Hadfield, 1989; Hobson *et al.*, 1993; Holterman *et al.*, 1997; Ellis y Miller, 2010).

Walklate (1987, 1992) utilizó este tipo de modelos para ver cómo se comportaban las gotas dentro de una corriente muy turbulenta y luego aplicarlo en los tratamientos con turboatomizador. Teske *et al.*, (2002) hicieron un modelo para aplicaciones aéreas que Hewitt *et al.* (2002) aplicó en turboatomizadores. Estos modelos son eficientes pero consumen un mayor coste computacional que los de pluma.

5.2. Empleo de modelos CFD en las aplicaciones con turboatomizador

Aunque ya existían trabajos previos con CFD orientados a estudiar los tratamientos (Reichard *et al.*, 1992; Walklate, 1993ab; Weiner y Parkin, 1993; Walklate y Weiner, 1994), fueron Xu y Walklate (1996) quienes aplicaron la CFD para reproducir el flujo generado por el ventilador de un turboatomizador. Desde entonces, ha habido un incremento en el número de trabajos presentados así como en la complejidad de los modelos (García Ramos *et al.*, 2015).

La estructura vegetal de los árboles tiene una gran influencia sobre el movimiento del aire y, por tanto, en la eficiencia de las aplicaciones. Por tanto, es lógico que haya un gran interés en saber simular el comportamiento del aire frente a la vegetación. Los estudios CFD normalmente han modelado la vegetación arbórea como un medio homogéneo y/o poroso que presenta una determinada resistencia al paso del aire por su interior. De este modo, Xu *et al.* (1998) estudiaron la dispersión de gotas pulverizadas en tratamientos de manzanos, considerando los árboles como un medio poroso. Para la simulación de las gotas integraron un modelo Lagrangiano. El resultado fue que la distribución de las partículas tenía un patrón similar al que se había obtenido experimentalmente.

Sidhamed y Brown (2001) utilizaron la CFD para modelizar en 2D y 3D el comportamiento de la corriente del aire de un turboatomizador forestal. Los resultados fueron comparados con datos experimentales y también por lo predicho por la teoría del chorro turbulento (Abramovich, 1963) que ya había sido aplicada para caracterizar la salida del flujo del ventilador (Reichard *et al.*, 1979; Brazee *et al.*, 1981). Se obtuvieron buenos resultados al comparar el modelo tridimensional,

aunque no con el modelo 2D. Posteriormente, incorporaron gotas usando un modelo Lagrangiano (Brown y Sidhamed, 2001) pero sin considerar la presencia de los árboles, observando discrepancias entre sus datos de ensayo y los del modelo en la distribución de las gotas y las distancias que alcanzaban.

A medida que aumentaba el uso de la CFD en ingeniería, Sanz (2003) señaló que la modelización del comportamiento de la vegetación no había sido abordada en profundidad. Considerando que el modelo más usado en CFD es el estándar $k-\varepsilon$ para simular el paso del aire a través de la vegetación, propuso unos términos sumideros/fuente para la velocidad, para la energía cinética turbulenta y para la disipación. Estas variables dependen a su vez de un coeficiente aerodinámico que caracteriza la resistencia de la vegetación al paso del aire.

Da Silva *et al.* (2006) hicieron un modelo Euleriano-Lagrangiano aplicado en viñedos, con el que querían analizar la influencia de la vegetación y el flujo de aire sobre la deposición de gotas. Modelaron el efecto de las copas de los viñedos como si fuera un medio homogéneo donde se incluían los términos propuestos por Sanz (2003). Para la determinación del coeficiente de resistencia enfrentaron la salida de aire del ventilador frente a un viñedo artificial, y midieron experimentalmente las velocidades horizontales antes y después de atravesar el viñedo, a partir de estos datos estimaron el grado de absorción de las velocidades por parte de la vegetación.

Esta metodología para determinar el coeficiente de resistencia experimentalmente ha sido repetida en varios trabajos aplicados en diferentes cultivos. Su mayor inconveniente es que supone que las velocidades detrás del

árbol siguen teniendo el mismo sentido que antes de atravesarlo. Esto es cierto para cultivos con una densidad foliar baja, donde la corriente saliente del ventilador atraviesa la copa sin grandes desviaciones. Pero podría cambiar en otros cultivos con un mayor espesor de follaje, y por tanto, mayor resistencia, donde la corriente podría fluctuar de manera diferente detrás de la copa.

Endalew *et al.* (2006, 2009, 2010a) desarrollaron un nuevo modelo de árbol para simular los tratamientos en perales considerando el tronco principal y las ramas principales como un sólido, y la vegetación como un medio poroso que también incluía los términos sumidero/fuente. Además estudiaron si el modelo estándar $k-\varepsilon$ era el más idóneo para simular el comportamiento del flujo. Probaron también los modelos SST $k-\omega$ y RSM. Al final concluyeron que el modelo estándar era el más apropiado. Este modelo se validó para distintos tipos de turboatomizador (Endalew *et al.*, 2010b, 2012) y se hizo especial hincapié en ver como el aire atravesaba la copa. Duga *et al.* (2013) y Dekeyser *et al.* (2013, 2014) añadieron partículas a este modelo de aire para estudiar la distribución y deposición de lasgotas. Los resultados fueron validados con datos de ensayo en árboles artificiales.

Por otra parte, Connell *et al.* (2011) realizaron un modelo aplicado en kiwis. En este caso, la vegetación fue diseñada de manera similar al modelo en perales desarrollado por Endalew y se empleó un modelo turbulento SST $k-\omega$ para el flujo de aire. No obstante, el modelo no fue validado.

Shelton y Neuman (2011) modelizaron la interacción de una nube de vapor de pesticida con los árboles durante una aplicación en cítricos. En este caso, la

vegetación se modelizó como un medio poroso, la nube de vapor se consideró como un medio continuo y el modelo turbulento del aire es el $k-\omega$ estándar. No obstante, no se especifica para que tipo de pulverizador está hecho el modelo, no se detalla el modelo del flujo del aire ni se validan los resultados.

En la revisión bibliográfica llevada a cabo se observa que el objetivo de la mayoría de trabajos sobre modelos CFD se ha centrado más en describir como las gotas atraviesan y se depositan en la masa vegetal y no en describir el balance de masas que se produce. De ahí que se haya simulado el comportamiento del aire en zonas próximas a la vegetación. Además todos los trabajos se han llevado a cabo en cultivos arbóreos de baja densidad foliar que permiten el paso de la corriente de un lado a otro del árbol. Sin embargo, no hay trabajos sobre cultivos con densidad foliar elevado como los cítricos que puedan afectar a la trayectoria de la corriente saliente del turboatomizador y, por ende, de las trayectorias de las partículas pulverizadas.

También se observa la asunción general de que la vegetación actúa como un medio poroso con una serie de términos añadidos en las ecuaciones para la velocidad, la energía cinética turbulenta y la disipación de esta, y que los cultivos de baja intensidad modelados hasta ahora parecen ajustarse a esta hipótesis. No obstante, árboles con diferentes características vegetativas diferentes es posible que no se ajusten a ese perfil por tener una mayor cantidad de follaje y fueren a las corrientes que sales del turboatomizador a tomar trayectorias diferentes. Además, esos términos adicionales fueron inicialmente propuestos para árboles sometidos a un flujo natural de aire modelado con un modelo concreto de

turbulencia. Sin embargo, cuando el turboatomizador trata el árbol la corriente principal de aire es forzada y la acción del viento es mínima, pues una de las condiciones para un buen tratamiento con turboatomizador es que la presencia de viento sea de muy baja intensidad para minimizar las pérdidas por deriva.

También se ha asumido en muchos trabajos el uso del modelo el $k-\varepsilon$ estándar para simular el comportamiento del flujo del aire. Sin embargo este modelo tiene problemas en reproducir la corriente de aire cuando se produce una separación de flujo, situación que podría producirse si se trata un árbol de gran densidad foliar que impida que el aire pueda atravesarlo. Además, este modelo se basa en la asunción de que la turbulencia es isotrópica, es decir, que la turbulencia es igual en las tres dimensiones del espacio, lo cual es difícil de suponer en los tratamientos con turboatomizador ya que estos equipos disponen de un ventilador axial que aspira el aire por una cara, lo expulsa perpendicularmente por unos canales, e inmediatamente se encuentra con la vegetación. Además, el equipo se está desplazando al mismo tiempo en condiciones al aire libre.

También comentar que no se ha encontrado ninguna guía de buenas prácticas específica para realizar simulaciones CFD en tratamientos fitosanitarios con turboatomizador en cultivos arbóreos.

6. Objetivos

El objetivo principal de la presente tesis doctoral es proponer un modelo CFD que simule el comportamiento del flujo del aire alrededor del árbol y la distribución de las gotas durante los tratamientos fitosanitarios con turboatomizador en cítricos. Para conseguirlo se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Describir físicamente y analizar el comportamiento del flujo del aire desde que sale de un turboatomizador en una plantación de cítricos, haciendo hincapié en las corrientes que circulan alrededor de los árboles.
- Desarrollar un modelo CFD del movimiento del aire saliente del ventilador que describa el comportamiento del flujo observado en el primer objetivo.

Para ello, se plantean los siguientes objetivos concretos:

- Realizar un estudio de sensibilidad de los diferentes modelos de turbulencia.
- Seleccionar las condiciones de contorno apropiadas para la simulación, es decir: la manera en la que el equipo expulsa el aire por el ventilador y el efecto de fricción del suelo, las propiedades de los fluidos que intervienen, el efecto de las dimensiones de los árboles y la distancia entre ellos y el efecto de la vegetación sobre el movimiento del aire.

- Validar el modelo CFD del movimiento del aire frente a los resultados experimentales.
- Desarrollar un modelo Lagrangiano que incorpore partículas al modelo Euleriano validado y estudiar el comportamiento de las mismas durante la simulación.
- Comparar el modelo de partículas con un ensayo de balance de masas con turboatomizador en cítricos en condiciones mediterráneas.

7. Descripción del flujo del aire producido por un turboatomizador durante una aplicación de productos fitosanitarios en naranjos

7.1. Introducción

Para mejorar la eficiencia de los tratamientos fitosanitarios es necesario conocer el comportamiento del flujo del aire durante las aplicaciones, pues ello afecta a la manera en que se moverán las gotas pulverizadas (Fox *et al.*, 2008). Por este motivo, muchos trabajos investigan el campo de velocidades de aire que genera el ventilador y su grado de la turbulencia debido a la variación de los gradientes de velocidad (Hetherington, 1997). En algunos de ellos han situado anemómetros a diferentes distancias y alturas respecto a la salida de aire y han medido las velocidades del aire en una posición estacionaria (García Ramos *et al.*, 2012), como primer paso para comprender el movimiento del aire durante el tratamiento. Aunque se sabe que estas medidas estacionarias deberían ser diferentes respecto al equipo del movimiento, algunos autores han destacado que hay una estrecha relación en ambos casos (De Moor *et al.*, 2002). Al mismo tiempo, existen modelos físico-matemáticos basados en la teoría del chorro turbulento (Abramovich, 1963) para caracterizar la salida del flujo (Reichard *et al.*, 1979; Brazee *et al.*, 1981; Giles *et al.*, 1991; Fox *et al.*, 1992).

También es necesario conocer cómo influye la fisiología de la vegetación en el movimiento del aire. Como se ha explicado en el epígrafe 2.4.2, las hojas de

los árboles y las ramas presentan una resistencia aerodinámica al paso del aire. En este sentido, al analizar la turbulencia del flujo del ventilador cuando se enfrenta a la masa foliar se ha constatado la pérdida de energía cinética turbulenta (Walklate *et al.*, 1996). La vegetación absorbe la energía extra producida por el ventilador, lo que puede ayudar a disminuir la deriva (Hofman y Solseng, 2001) y mejorar el rendimiento de la aplicación (Moltó *et al.*, 2006).

Varios autores han señalado la importancia del efecto de la vegetación sobre las pérdidas de deriva durante los tratamientos en viñedos (Balsari y Marucco, 2004; Pergher y Petris, 2007). En citricultura, aunque existen estudios para conocer la deposición de las gotas en el interior de los árboles (Juste *et al.*, 1990; Farooq y Salyani, 2002), la evaluación del riesgo de deriva se ha basado en las características de la maquinaria o del entorno (Salyani y Farooq, 2004; Cunha *et al.*, 2012), pero no en el estudio de la corriente de aire del ventilador que transporta las gotas o del efecto de la copa. Sin embargo, tratamientos en pomelos han mostrado que la estructura vegetal puede ser el factor más influyente en estas pérdidas y se ha manifestado la importancia de conocer la interacción entre la corriente generada y los árboles (Stover *et al.* 2002).

En los últimos años, se ha intensificado el uso de la CFD para simular el comportamiento del flujo procedente de turboatomizadores en tratamientos en cultivos cuya estructura y densidad foliar son muy diferentes a las de los cítricos (capítulo 5). No obstante, los cítricos es uno de los árboles frutícolas con densidad más alta y ofrecen una mayor resistencia a la corriente del aire, por lo que es necesario conocer en detalle cual es el carácter experimental del flujo frente a la

vegetación antes de construir un modelo CFD y asumir hipótesis genéricas para el diseño de la vegetación. Aunque se ha descrito la corriente producida por máquinas similares a las que se utilizan en España para los tratamientos de los cítricos (Pascuzzi y Guarella, 2008), estos trabajos no estudian el efecto de la vegetación sobre la corriente de aire.

Por todas estas razones, el objetivo de este trabajo es describir cómo se comporta el flujo del aire que sale de un turboatomizador situado en una plantación de naranjos, particularmente cómo influye la copa del árbol en dicho flujo y la turbulencia que se produce. Se asume que estos efectos podrían tener gran influencia sobre la eficiencia del tratamiento.

El trabajo se ha llevado a cabo bajo condiciones mediterráneas propias de los cultivos españoles de naranjos. Los resultados obtenidos podrán servir de base para generar modelos CFD del comportamiento de la deriva durante los tratamientos.

7.2. Materiales y métodos

Los ensayos se realizaron en una parcela comercial de naranjos (*Citrus sinensis* L.), variedad 'Lane Late'. El diámetro medio de los árboles era de 3,8 m y la altura de 2,6 m. La separación entre filas era de 6,0 m.

Se empleó un turboatomizador convencional (FUTUR 1500, Pulverizadores Fede, S.L., Cheste, España). El caudal medio de aire proporcionado por el ventilador en las condiciones del ensayo era aproximadamente de 24,4 m³/s. Esta cifra se calculó multiplicando la velocidad

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

media del aire (m/s), medido en diferentes puntos de la salida de aire, y la superficie de la salida de aire (m²).

7.2.1. Medida de velocidades

Algunos autores han analizado las corrientes de aire en el interior de la vegetación con el fin de comprender cómo penetran las gotas en el follaje (Svensson *et al.*, 2003; Panneton *et al.*, 2005). Sin embargo, esto fue considerado fuera del ámbito de este ensayo, que se concentraba en el movimiento general del aire alrededor de las copas, ya que se supone que las corrientes externas tienen más influencia sobre la deriva de las gotas.

La máquina se situó paralelamente a una fila de árboles, con la salida del ventilador alineada con el tronco de un árbol representativo. La distancia mínima desde el extremo de la copa más próximo al equipo hasta la salida de aire del ventilador fue de 1,05 m (Figura 4). Las mediciones de la velocidad del aire fueron tomadas con el conjunto tractor-equipo en estático.

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

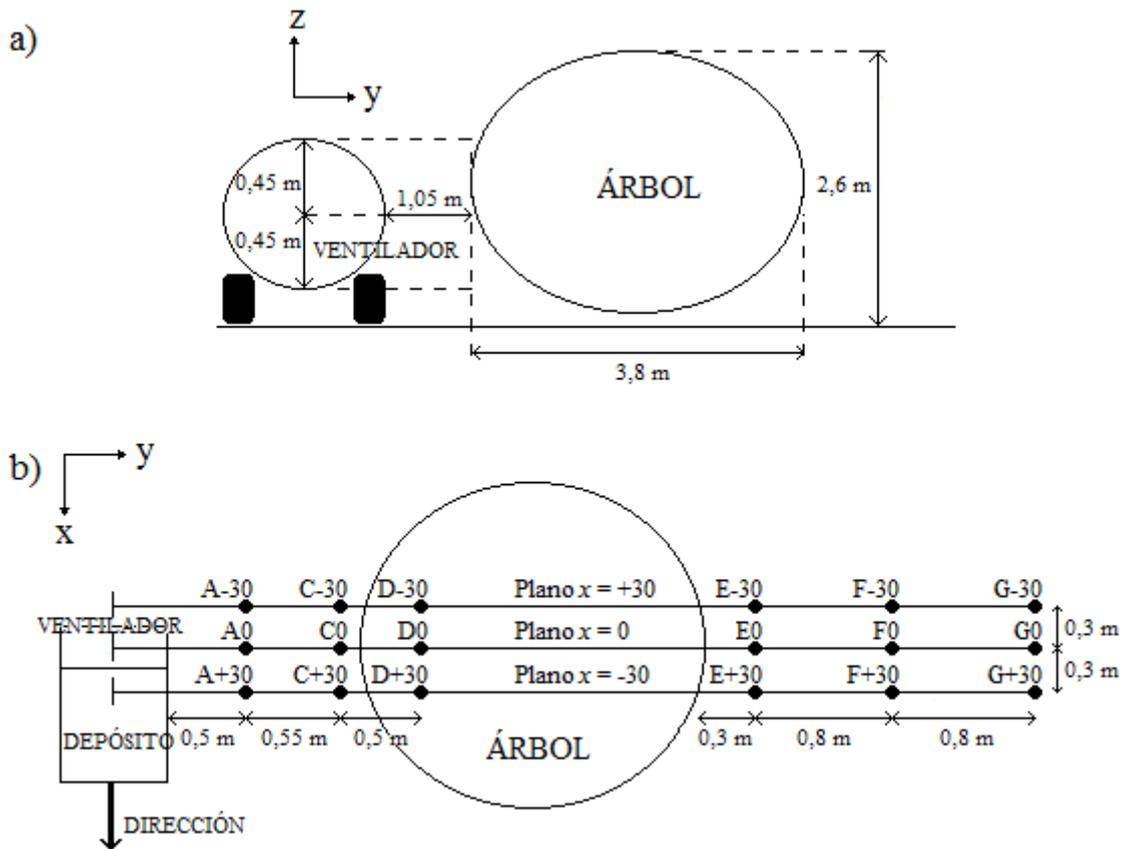


Figura 4. a) Alzado de la posición del ventilador con respecto al árbol y b) vista en planta de la disposición de los puntos de medición.

En el experimento la velocidad del aire se midió en tres planos paralelos entre sí y perpendiculares al equipo: un plano central, que se ha denominado Plano $x = 0$, alineado con la salida del ventilador y el tronco; y otros dos planos situados a 30 cm antes (Plano $x = +30$) y después de esta posición (Plano $x = -30$) en el camino del tractor (Figura 4). En este experimento, se tomaron medidas en cada plano utilizando postes verticales metálicos posicionados de manera específica (denominados A, C, D, E, F y G). La disposición de los puntos de medida fue la misma en cada plano (Figura 5). Los postes A se alzaban a 50 cm del equipo, con medidas cada 20 cm de altura, desde los 40 cm del suelo hasta los 2,0 m. A partir de ahí, se medía cada 50 cm de altura hasta los 4,5 m. Sobre los postes C, situados a 55 cm del poste A, se realizaron medidas cada 50 cm, desde

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

los 2,5 m hasta los 4,5 m de altura. Los postes D, a 50 cm del poste C, se encontraban dentro de la copa del árbol, y se realizaron medidas cada 50 cm de altura, desde los 3,0 m hasta los 4,5 m de altura. Los postes E, F y G estaban situados detrás de la copa. Los postes E se encontraban a 30 cm del extremo de la copa, los postes F estaban equidistantes entre los árboles de la fila y los poste G se colocaron a 30 cm de la siguiente copa. En estos tres postes se tomaron medidas cada 30 cm, desde 30 cm del suelo hasta los 3,0 m. A partir de ahí se registraron medidas cada 50 cm hasta los 4,5 m de altura. Además, había un poste B horizontal a 1,8 m de altura, donde se midieron velocidades cada 20 cm desde el centro del ventilador hasta coincidir con el plano A. En total se midieron en 201 puntos (67 puntos por plano, en tres planos). En el anejo 3 (capítulo 15) se pueden ver fotografías del ensayo.

En el ensayo solo se consideró una cara del ventilador como se ha realizado en estudios similares (Da Silva *et al.*, 2006; Endalew *et al.*, 2010 ab; 2011, 2012; Duga *et al.*, 2013) ya que aunque la distribución de aire en los ventiladores axiales es asimétrica los fabricantes reducen esta asimetría mediante la inclusión de deflectores de aire y mejoras en el diseño de sus ventiladores.

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

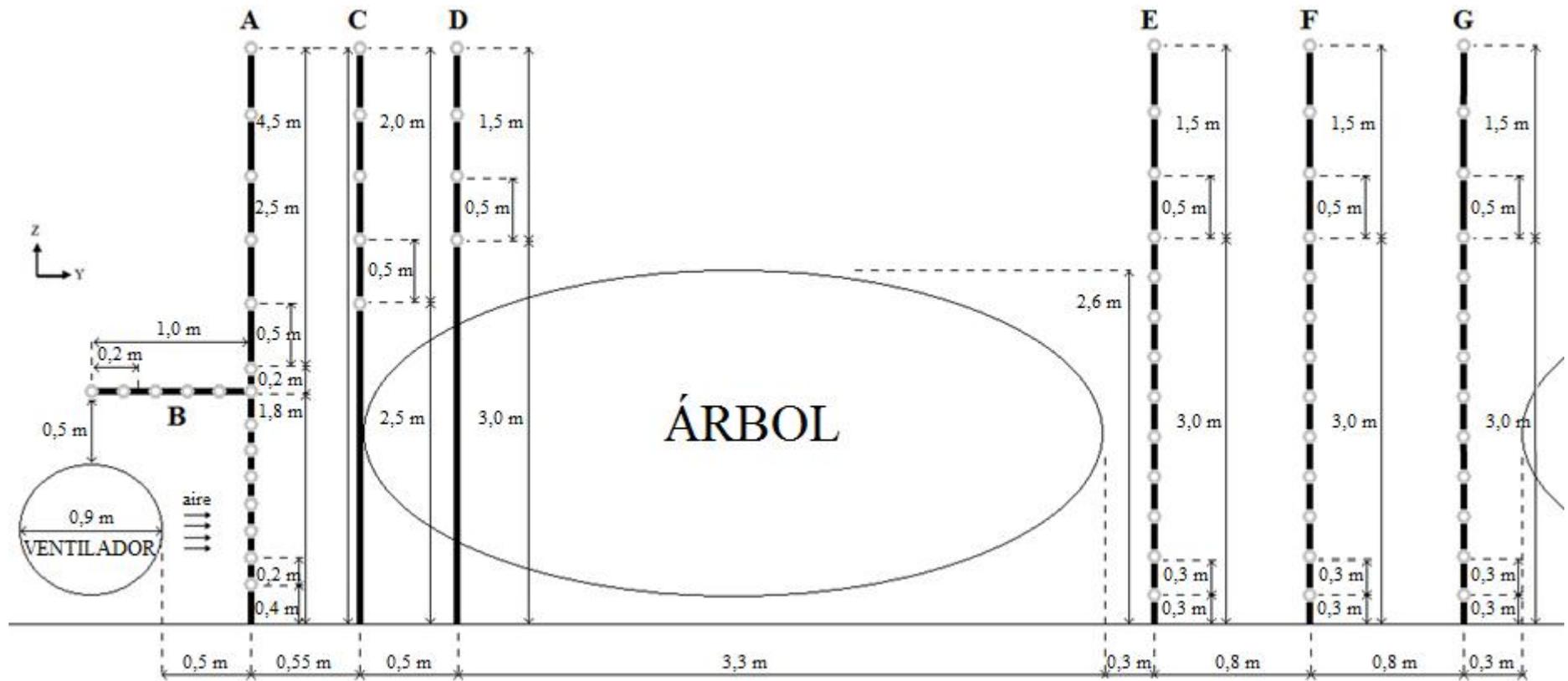


Figura 5. Alzado de un plano de medida en el experimento principal.

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

La velocidad y dirección del aire en cada punto se midió con un anemómetro de ultrasonidos 3D (WindMaster 1590-PK-020, Gill Instruments Ltd., Hampshire, UK) colocado en posición horizontal sujeto al poste, interfiriendo lo menos posible con la corriente de aire. La precisión fue de 1,5% con una resolución de 0,01 m/s. El tiempo de adquisición fue de 60 s en cada punto de medida, con una frecuencia de muestreo de 1 Hz (60 muestras). Se registraron las tres componentes instantáneas de la velocidad del aire, siendo U_x la dirección horizontal paralela a la fila de árboles, U_y la horizontal perpendicular a las filas de árboles y U_z la dirección vertical.

El ensayo duró cuatro días en condiciones atmosféricas lo más parecidas posibles. Durante el experimento se registraron las condiciones meteorológicas con un anemómetro de ultrasonidos 2D (WindSonic, Gill Instruments Ltd., Hampshire, UK) situado a 5,0 m de altura y un sensor para medir la humedad relativa y la temperatura (Log32, Data logger, Dostmann Electronic GMBH, Wertheim - Reicholzheim, Germany). Los dispositivos fueron colocados cerca de la plantación, sin obstáculos entre ellos y evitando cualquier tipo de interferencia mutua. La frecuencia de muestreo fue de 1 Hz. Las direcciones del viento midieron en sentido antihorario desde el Plano $x = 0$, de tal manera que 0° representaba la dirección principal de aire que sale del ventilador y 90° la trayectoria teórica del tractor.

El ensayo siguió las buenas prácticas agrícolas estandarizadas para los tratamientos fitosanitarios. Esto implica que la velocidad del viento tenía que ser inferior a 3 m/s durante la aplicación (BOE, 2012). Durante el experimento, los

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

vectores de velocidad del viento tuvieron magnitudes bajas y oscilaron entre 0,8 m/s y 1,2 m/s. Además, la temperatura media fue de 26,3 °C y la humedad relativa media fue de 67,9%.

La influencia del viento sobre la velocidad del aire producido por el pulverizador por debajo de 4,0 m se supuso despreciable ya que las experiencias se llevaron a cabo cuando las magnitudes de la velocidad del viento eran inferiores a 1,5 m/s. Además, aunque se admite que hay un cierto efecto del viento en las mediciones de la velocidad del aire que depende de la altura (Georgiadis *et al.*, 1996), Endalew *et al.* (2009) indica que normalmente se supone que el efecto sólo es significativo por encima de 1,5 veces la altura de los árboles (en nuestro caso, esto es igual a 3,9 m por lo que por debajo de 4,0 m el efecto puede considerarse insignificante).

7.2.2. Procesamiento de los datos y representación de resultados

En primer lugar, se realizó un estudio para determinar si el flujo de aire en cada punto de medición tenía una cierta estabilidad. Para ello, en cada punto, se calculó el valor medio de cada componente de la velocidad cada 10 segundos y el coeficiente de variación de estas medias, asumiendo condiciones estables si el coeficiente no era mayor de un valor aproximado del 30%. No obstante, hay que remarcar que es una hipótesis de partida, ya que no se ha encontrado en la bibliografía científica un valor de referencia en estos casos. Este valor del 30% es un valor de referencia.

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

Posteriormente, se representaron gráficamente las velocidades medias del ensayo. Para ello, se generaron tres diagramas vectoriales coincidentes con cada uno de los planos de medida ($x = -30$, $x = 0$ y $x = +30$), que contenían las coordenadas de las velocidades medias U_y y U_z , y seis diagramas perpendiculares a dichos planos, uno por cada poste vertical, que reflejaban las coordenadas U_x y U_z .

7.2.3. Estimación de la intensidad turbulenta

La intensidad turbulenta es un parámetro que cuantifica las fluctuaciones del flujo de aire. Es una medida a escala de la turbulencia, ya que se calcula con respecto a la velocidad media del aire, y se expresa como un porcentaje. Un flujo de aire sin ninguna fluctuación de la velocidad tiene una intensidad de turbulencia del 0%. Sin embargo, debido a la forma en que se calcula este parámetro, los valores superiores a 100% son posibles. Esto sucede, por ejemplo, cuando la velocidad media del aire es muy pequeña y hay grandes fluctuaciones de la velocidad del aire.

En la ecuación (6), mostrada en el epígrafe 4.4, se deduce que una velocidad instantánea u (en este caso era el dato proporcionado por el anemómetro) se puede expresar como el sumatorio de un valor medio U y una fluctuación u' .

A partir de esa ecuación, se calculó la intensidad turbulenta I , un parámetro que compara la importancia del módulo de las fluctuaciones respecto al módulo de la velocidad media, que se define como:

$$I(\%) = 100 \frac{\sqrt{u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2}}{\sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}} \quad (23)$$

Debe tenerse en cuenta que otros autores (Endalew *et al.*, 2009) no utilizan la ecuación (23), sino un promedio del módulo de la velocidad de fluctuación y, por tanto, sus valores se diferencian de los nuestros por un factor de $\sqrt{3}$.

7.3. Resultados y discusión

7.3.1. Análisis de los datos de velocidad

Las condiciones de velocidad de aire estable se cumplieron en todos los puntos de los postes verticales por debajo de 3,0 m de altura. Sin embargo, en algunos puntos no se alcanzó la estabilidad, mayoritariamente en los postes A y C, que son cercanos al ventilador y están muy influidos por el movimiento del mismo, y en puntos elevados o alejados (Tabla 2). En todos los puntos de los postes B se alcanzó la estabilidad.

Tabla 2. Puntos en los que no se alcanzó la estabilidad (marcados con "X")

Planos	Altura (m)	Postes					
		A	C	D	E	F	G
$x = -30$	4,0						
	4,5	x				x	x
$x = 0$	4,0	x	x				
	4,5	x	x		x	x	x
$x = +30$	4,0						
	4,5	x					

La Figura 6 representa la velocidad del aire medido en Planos $x = -30$, $x = 0$ y $x = +30$. La Figura 8 y Figura 9 representan los vectores de velocidad de aire (antes y después del árbol, respectivamente) en planos perpendiculares que incluyen los postes con la misma etiqueta.

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

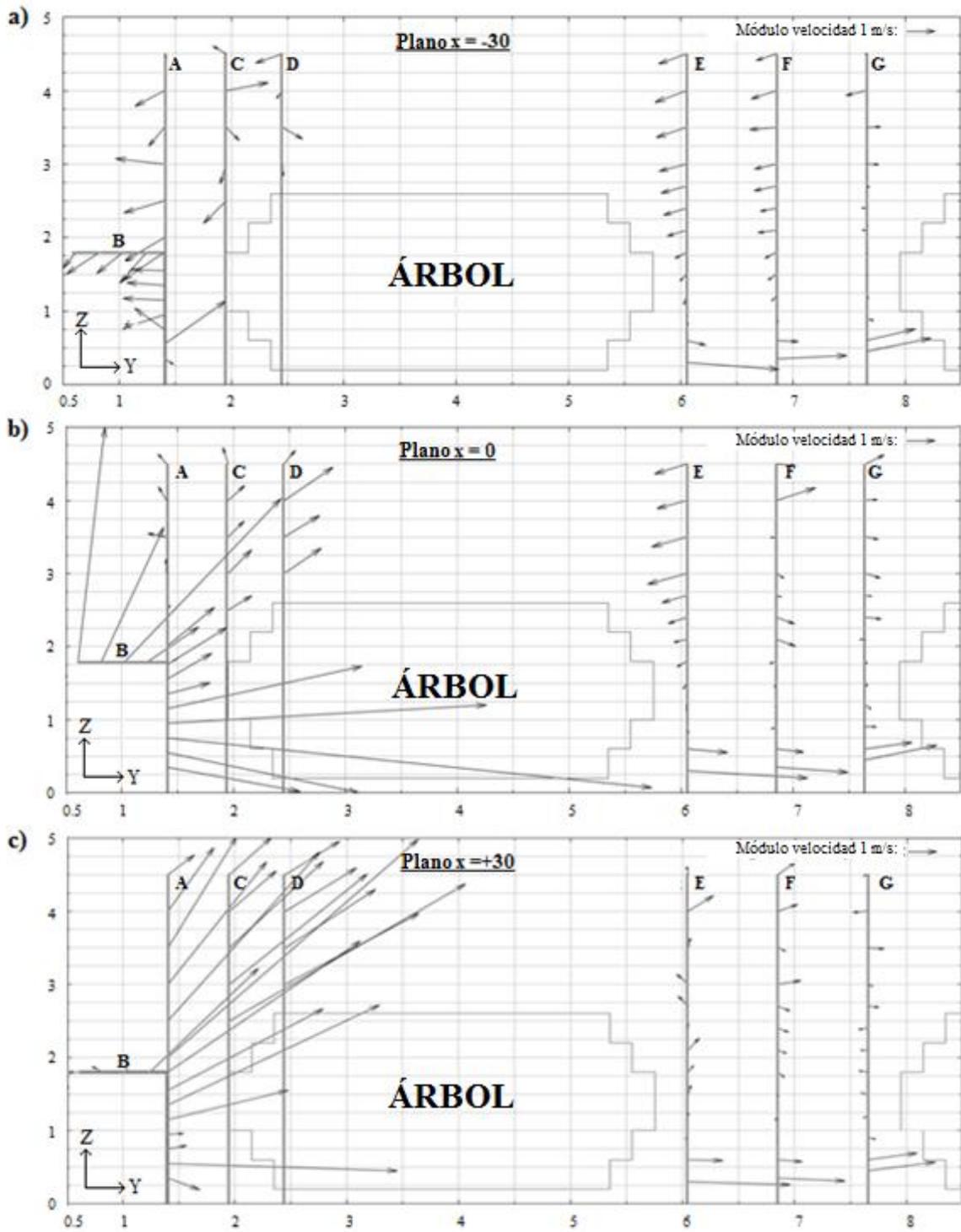


Figura 6. Velocidades U_x y U_z in a) Plano $x = -30$, b) Plano $x = 0$ y c) Plano $x = +30$. Distancia en metros.

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

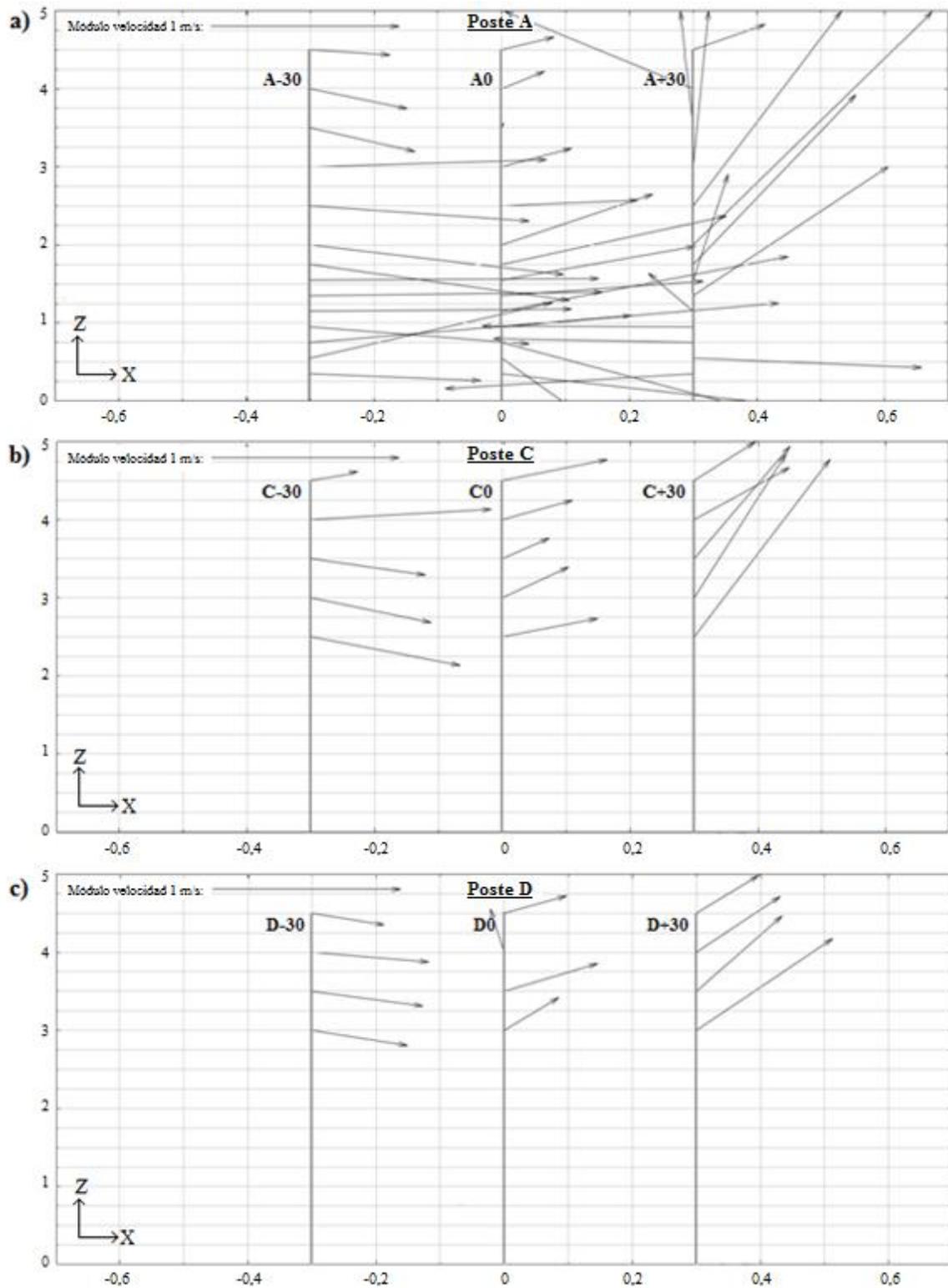


Figura 7. Velocidades horizontales U_x y verticales U_z para a) postes A-30, A0 y A+30; b) postes C-30, C0 y C+30 y c) postes D-30, D0 y D+30. Distancias en metros.

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

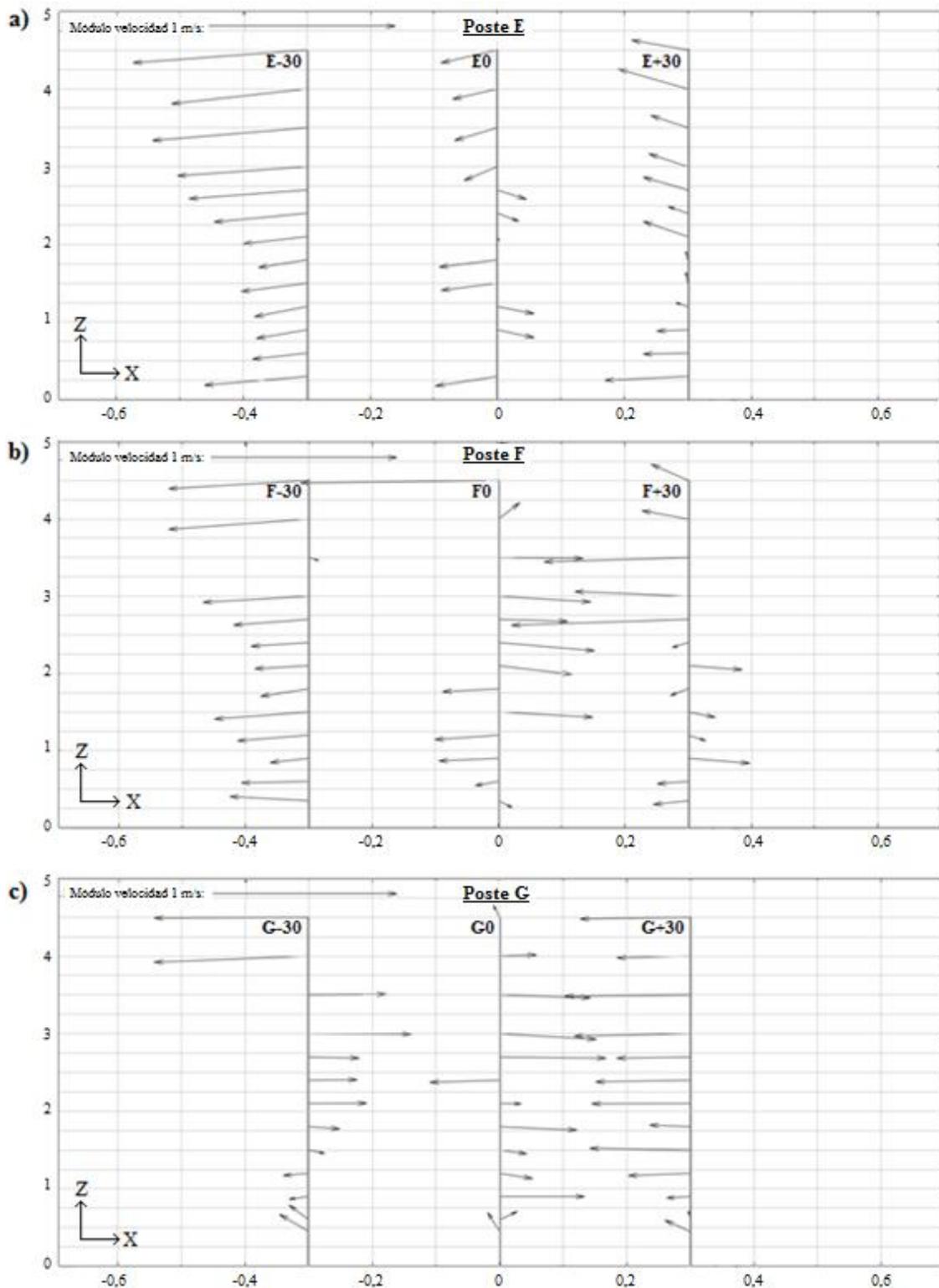


Figura 8. Velocidades horizontales U_x y verticales U_z para a) postes E-30, E0 y E+30; b) postes F-30, F0 y F+30 y c) postes G-30, G0 y G+30. Distancias en metros.

La Figura 6a muestra los vectores de velocidad en Plano $x = -30$ (componentes U_y y U_z). En la zona antes del primer árbol (puestos A-30, B-30 y C-

30), los vectores de velocidad del aire en el poste A-30 señalaron al equipo, probablemente debido a un efecto combinado de la aspiración del ventilador y la alta velocidad del flujo de aire en el Plano $x = 0$ (Figura 6b), que también puede causar la aspiración. En la Figura 7a (componentes U_x y U_z para el poste A), la mayor parte de los componentes U_x fueron de componente positiva, señalando en la dirección del movimiento teórico del tractor. La Figura 7a también confirma que los vectores en el poste A-30 se orientaron siguiendo la aspiración del ventilador. En la Figura 6a, los vectores en los primeros metros de altura en el poste A-30 sugieren que el aire podría haber estado girando en sentido antihorario, lo que indica la posible presencia de un pequeño vórtice al lado del ventilador. Las mitades inferiores de postes C-30 y D-30 también se vieron afectadas por la succión, presentando unas componentes verticales y horizontales negativas. Como en el caso de los postes A (Figura 7a), las Figura 7b y Figura 7c confirman el efecto de aspiración y la presencia de un gran vórtice en sentido antihorario perpendicular a la dirección del flujo de aire principal. La Figura 8a también muestra un reflujó antihorario después del primer árbol (postes E-30, F-30 y G-30) y 2,7 m por debajo de la parte superior de la copa; esta estructura recibió energía de la corriente de aire que llega por debajo de la copa. La anchura del vórtice era similar a la distancia entre las copas. En el poste de E-30, por encima de una altura de 1,2 m, los vectores apuntaron hacia el primer árbol. Esto sugiere que la vegetación apenas permitió que la corriente de aire del ventilador pudiera atravesarlo y, al mismo tiempo, que la succión tuvo lugar, probablemente debido al efecto producido por la corriente por debajo de la copa. Para alturas superiores a 3,0 m, las direcciones de las velocidades en los postes E-30 y F-30 se orientaron

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

principalmente hacia el turboatomizador. Esto pudo ser debido a la existencia de un vórtice sobre la copa del primer árbol. Las velocidades horizontales medias de aire en los postes E y F fueron alrededor de 1,1 m/s, tres veces más grandes que la componente media del viento en la misma dirección, y por esta razón el viento se consideró despreciable. Por otro lado, las Figura 8a y 8b mostraron un gran reflujo horario perpendicular a la dirección del flujo de aire principal (que circula en la dirección opuesta a la observada antes en las Figura 7a, 7b y 7c).

La Figura 6b muestra los vectores de velocidad en el plano central, $x = 0$. Se puede observar que el componente horizontal U_y fue positiva y dominante por debajo de 1,8 m en el poste A0, que era la zona más cercana a la salida de aire del ventilador. Para el poste B0, la componente vertical U_z fue creciendo cuanto más cerca ha estado del centro del ventilador. Para los postes C0 y D0, la corriente seguía el contorno de la copa. Para los postes E0, F0 y G0, sin embargo, de nuevo fue posible observar el vórtice entre árboles. También se observó un reflujo por encima de la copa, pero menos intenso que el observado en el Plano $x = -30$ (Figura 6a). En Plano $x = 0$, sólo los vectores del poste E0 estaban orientados hacia la copa. Las componentes horizontales de la velocidad, U_y , fueron otra vez casi siempre positivas en F0 y G0 a alturas por encima de 2,1 m. Una vez más, el viento se consideró despreciable en comparación con las velocidades del aire registradas en los puntos por encima de los árboles.

Para el Plano $x = 30$, las velocidades fueron más intensas en frente del árbol (Figura 6c). La componente U_z fue mayor en los puntos de los postes A+30, C+30 y D+30 que estaban situados más cerca de la mitad superior de la copa.

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

Todas las componentes de las velocidades fueron positivas en estos tres postes. En este plano, como en Plano $x = 0$, la copa de los árboles aumentó las fluctuaciones del aire, ya que modificó su trayectoria. La existencia de un vórtice entre las copas de los árboles todavía era perceptible, pero su intensidad disminuía en la medida en que el centro del reflujo estaba localizado entre los postes de F+30 y G+30. Mientras tanto, los vectores de velocidad por debajo de los 60 cm de altura en estos tres postes exhibieron el mismo comportamiento que en los otros dos planos, lo que refleja una fuerte corriente de aire bajo la copa. Después de esta zona, los vectores de velocidad apuntaron hacia la primera copa hasta una altura de 3,5 m para el poste E+30. Para los postes F+30 y G+30, los vectores de velocidad mostraron una tendencia similar a la observada en el Plano $x = 0$. Las velocidades verticales en la zona entre las copas fueron negativas en los postes G0 y G+30, como también se observó en los postes E-30, E0, F-30, F0 y F+30. En general, la velocidad del aire por encima de 4 m fue más alta que el viento medido.

Observando el plano formado por los postes E (Figura 8a), situados después del primer árbol, todos los vectores en E-30 y E+30 tuvieron componentes horizontales U_x negativas, mientras que en el Plano $x = 0$ los signos de U_x variaron hasta una altura de 3,0 m. La influencia del vórtice encima del primer árbol (Figura 6a y 6b) puede ser claramente apreciada. La componente U_z fue negativa por encima de los 3,0 m para los postes de E-30 y E0 como resultado de la dirección del reflujo, mientras que la velocidad vertical fue positiva en el poste de E+30 porque no ya no ha habido ningún vórtice en el Plano $x = +30$. Las velocidades U_x para el poste F-30 tuvieron direcciones similares como las del poste E-30 (Figura 8a). En cambio, U_x en los puntos de los postes F0 y F+30 fue

más variable que en los de E0 y E+30. En el plano formado por los postes G (Figura 8c), se observó un cambio en la dirección de las velocidades en los puntos del poste G-30 con respecto a los puntos del poste F-30. Las velocidades para los postes de G0 y G+30 fueron, hasta cierto punto, similares a los postes F0 y F+30, y estaban en la dirección opuesta en la componente horizontal, dando así una idea de cómo el vórtice situado encima del árboles tuvo girando siguiendo la dirección del flujo principal. La componente vertical U_z ha prevaleció durante los primeros 60 cm, probablemente debido a las pequeñas elevaciones del terreno de 45 cm sobre las que se asentaban los árboles. Por encima de una altura de 90 cm, el componente U_x fue mayor que en los postes anteriores.

Es importante señalar que en las pruebas realizadas en otros cultivos tales como viñedos (Da Silva *et al.*, 2006) y perales (Endalew *et al.*, 2010 ab, Dekeyser *et al.*, 2014), se ha observado que el flujo de aire ha cruzado la vegetación siguiendo la componente horizontal. Por lo tanto, U_y , ha sido positiva tanto al entrar como al salir de la vegetación. Sin embargo, en nuestros experimentos, se observó la presencia de un reflujo, que ha abarcado toda la altura de los árboles, tras la copa. Por debajo de los árboles, la corriente de aire fue sólo horizontal y positiva hasta una altura de 60 cm, que fue donde la vegetación ha presentado menor resistencia.

Hasta el momento, nunca se había informado anteriormente sobre la generación de un vórtice sobre la copa de la primera fila de árboles. Este reflujo podría afectar a la deriva incluso más que la existente entre árboles de distintas

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

filas, ya que según su intensidad y tamaño, podría condicionar el tiempo durante el cual las partículas pulverizadas se mantendrían en el aire así como sus trayectorias.

Una explicación para este comportamiento del aire en plantaciones de cítricos es que la densidad de la vegetación es generalmente mayor que en los viñedos o perales. La absorción de momento y la caída de presión han sido mucho más altos, por lo que el flujo de aire sólo habría encontrado una ruta de escape por debajo de la copa. También se observó en el ensayo que la velocidad de la corriente de aire sobre la superficie foliar aumenta. Las hojas de los árboles tienden a mostrar una mayor resistencia al aire, tomando posiciones verticales y moviéndose con las ramas. Esto habría producido un esfuerzo cortante en el flujo, lo que hace difícil la circulación de aire y fuerza al aire a alterar su trayectoria con el resultado de que sólo una pequeña parte de la corriente pueda cruzar la vegetación del árbol.

7.3.2. Estimación de la intensidad turbulenta.

En la Figura 9a se muestran los valores de intensidad turbulenta en función de la altura. En el poste A-30, el más próximo a la zona de aspiración, se observó que la intensidad de la turbulencia decaía notablemente desde los 40 cm hasta los 60 cm, para luego aumentar paulatinamente desde los 300 cm. Lo mismo ocurre en el poste C-30, ya que la corriente de aspiración se mantenía estable. A medida que aumentaba la altura, la corriente se hacía más vulnerable a las influencias de las fuerzas exteriores y aumentaba la intensidad turbulenta. La alta intensidad de turbulencia en los primeros 60 cm en el poste A-30 pudo ser debida a al pequeño vórtice descrito en la Figura 6a.

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

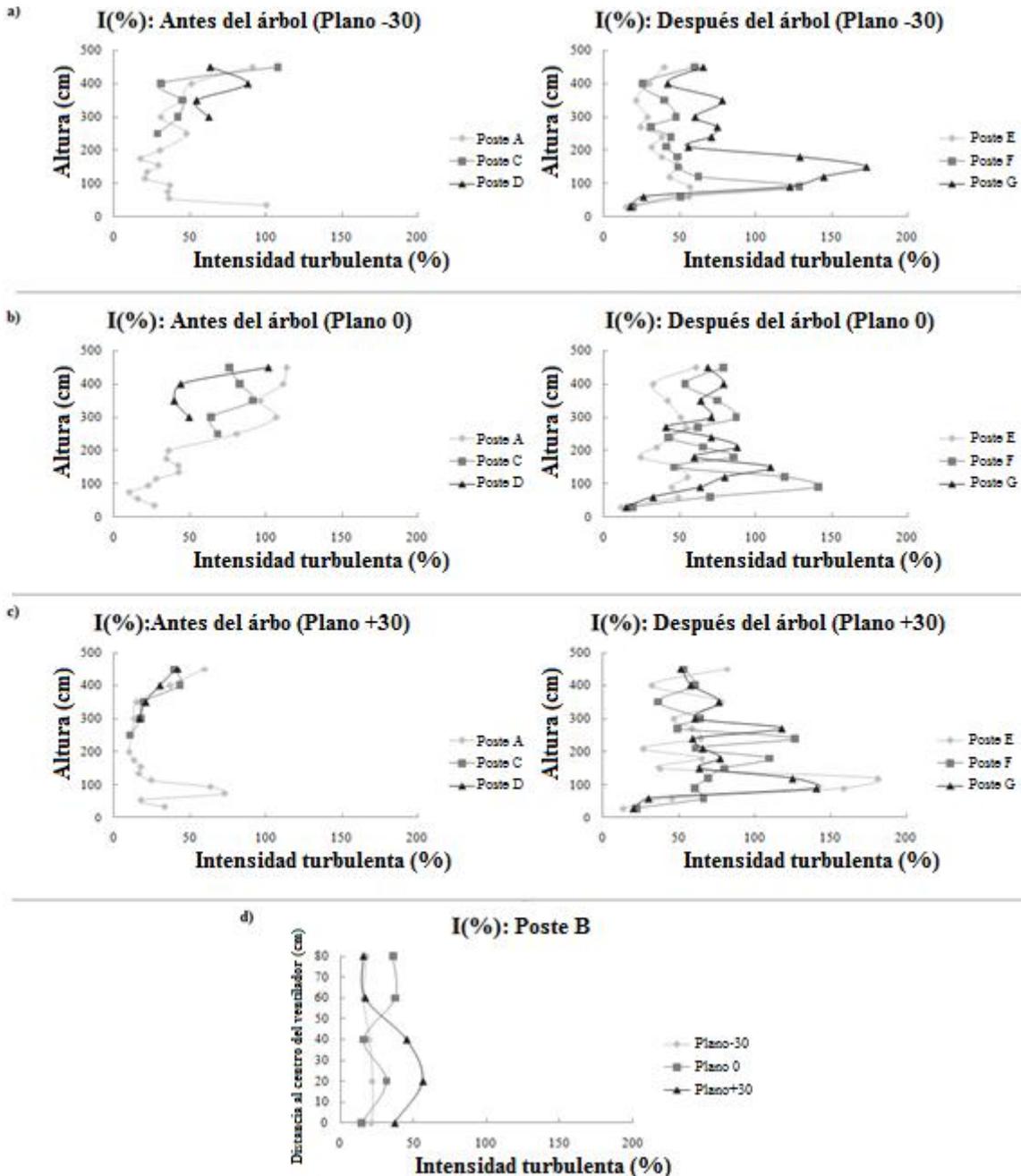


Figura 9. Intensidad turbulenta de los postes verticales en a) Plano $x = -30$, b) Plano $x = 0$, c) Plano $x = +30$ antes y después de la copa y d) para el poste horizontal B en diferentes plano.

Al otro lado de la copa el flujo del aire fue poco turbulento en los primeros 30 cm, seguramente porque era un corriente con muy pocas variaciones verticales, tenía pocos obstáculos a su paso y las corrientes de aire que pasaban por encima del árbol tenía poco efecto en el flujo. La intensidad turbulenta aumentaba y era

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

mayor que las demás en el poste G-30, que estaba más cerca del segundo árbol. Esto es porque los módulos de las velocidades eran próximos a cero y muy susceptibles a las acciones externas. A partir de los 400 cm, ya superada las copas, la intensidad turbulenta parecía incrementar en los tres postes. Seguramente esto último se deba a las fluctuaciones del segundo reflujo encima de la copa (Figura 7a).

En el Plano $x = 0$, el flujo era más estable en las salidas de aire del turboatomizador (Figura 9b). Hay que indicar que estas zonas las velocidades son muy altas (Figura 6a), y por ello apenas se modificaron por el entorno. Las intensidades turbulentas aumentaron en los puntos más lejanos respecto al ventilador.

Detrás de la primera copa, el flujo era más estable en los primeros 30 cm de altura. Del mismo modo que en el Plano $x = -30$, las fluctuaciones de la intensidad turbulenta en el poste E0 eran menores que en los otros dos postes. Las velocidades de aire en los puntos del poste G0 eran muy pequeñas y por tanto más susceptibles a la influencia del entorno. A 4,50 m, se igualaron los valores de los tres postes. A partir de 3.00 m los postes E0 y F0 presentaron una menor intensidad turbulenta que los correspondientes en el Plano $x = -30$ (E-30 y F-30, Figura 9a), lo cual se puede relacionar con una menor intensidad del reflujo sobre la copa del árbol.

El flujo de aire en el Plano $x = +30$ (Figura 9c) era menos turbulento que en los dos anteriores. Como ya se presentó en la Figura 9b, las velocidades en los tres postes A+30, C+30 y D+30 eran muy elevadas, por lo que las perturbaciones

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

fueron limitadas. La alta intensidad turbulenta a 60 y 80 cm de altura coincidió con los vectores de módulos más pequeños de la Figura 6c.

Detrás de la copa, el flujo es poco turbulento en los primeros 30 cm. En el poste E+30 las velocidades fluctuaron mucho entre 90 y 120 cm de altura (eran las velocidades registradas más pequeñas del poste) para luego aumentar y establecerse los valores de los módulos, con lo que las intensidades oscilan. Los postes F+30 y G+30 registraron un flujo más turbulento que parece volverse más estable a partir de los 300 cm. En la Figura 6c no se aprecia una estructura concreta de flujo. Además, los módulos de los vectores velocidad eran más pequeños que en los otros planos y con muchas variaciones en el signo de la componente vertical.

La intensidad turbulenta del aire para el poste horizontal B se muestra en la Figura 9d. La zona con menor turbulencia se encontró en el Plano $x = -30$. En el Plano $x = 0$, la corriente es menos turbulenta en la zona central del ventilador y a 40 cm de distancia, lo que coincidió con las velocidades registradas más altas en este plano. La velocidad a 20 cm era inferior que a 0 y 40 cm, con lo que esta diferencia de velocidades a ambos lados hace que la intensidad turbulenta a 20 cm fuera mayor. La turbulencia era elevada en el Plano $x = +30$ para luego disminuir a partir de los 60 cm del centro del ventilador porque las velocidades fueron próximas a cero en los primeros 40 cm.

Es importante señalar que las intensidades turbulentas halladas por Endalew *et al.* (2009) inmediatamente detrás del árbol en túneles de viento fueron de alrededor del 10% hasta la altura del árbol y después disminuyeron. Sin

embargo, como ya se comentó, en ese trabajo la intensidad turbulenta no se calcula con la ecuación (23). Si se utilizase esta ecuación, el valor de intensidad turbulenta de referencia sería 17%. En otro trabajo, Delele *et al.* (2005) utilizaron un valor uniforme de intensidad turbulenta de 30% a la salida del ventilador en sus simulaciones CFD, que equivaldría a 52% según la ecuación (23). En el presente trabajo se demuestra que las intensidades turbulentas en nuestro caso son muy variables en función de la altura y que en el poste A son inferiores a la propuesta por dichos autores. Asimismo, se observa que la intensidad turbulenta también es muy variable entre planos, lo que indica que el flujo estudiado en este trabajo es muy anisotrópico, probablemente más que el flujo estudiado en los trabajos antes citados, que se hicieron en perales, los cuales desarrollan mucha menos vegetación que los cítricos.

7.4. Conclusiones

En esta fase de la tesis se hace una descripción general del flujo de aire generado por el ventilador axial de un equipo de tratamientos fitosanitarios alrededor de un árbol durante la aplicación. La corriente saliente del ventilador se divide en una corriente que recorre la superficie vegetal más próxima hacia arriba y en otra corriente que pasa por debajo de la copa.

La corriente que pasa por debajo de las copas, su fricción con el suelo y la presencia de la siguiente línea de árboles generan un gran vórtice o reflujo en la fila paralela a la de movimiento del tractor. La anchura de este reflujo equivale al espacio libre entre las copas y la altura coincide con la del árbol. Este vórtice tiene un sentido antihorario en nuestro sistema de referencia.

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

La corriente ascendente que recorre la copa produce otro vórtice encima de la copa que no ha sido detectado en otros trabajos sobre aplicaciones en frutales. Este reflujo es al menos mayor que la mitad de la altura del árbol y puede tener una gran influencia en la trayectoria de las gotas pulverizadas que pasan por encima de los árboles y, por lo tanto, a la forma en que los productos fitosanitarios se difunden en la atmósfera.

El efecto de la gran velocidad que imprime el ventilador de la máquina al aire hace que las velocidades registradas en las condiciones del experimento fluctúen menos en las zonas con una mayor intensidad de la corriente de aire, ya que son lo suficientemente fuertes como para no sufrir variaciones debido a causas externas. Esto ocurre en la zona más próxima al turboatomizador y donde el aire pasa con más velocidad alrededor del árbol. Detrás del árbol se producen más variaciones de velocidad debido a que las velocidades son próximas a cero y por tanto pueden estar más influidas por el entorno.

Del trabajo se desprende que, durante los tratamientos de cítricos, las gotas pulverizadas contenidas en la corriente de aire cercana a la parte central de la copa son menos susceptibles de sufrir desviaciones en sus trayectorias que las gotas que se dirigen directamente a la parte alta, lo que resalta la importancia de dirigir adecuadamente hacia la vegetación los chorros de las boquillas que se encuentran en la parte alta de los arcos con el fin de reducir la deriva y mejorar la eficiencia de los tratamientos.

Estos comportamientos del flujo de aire en los tratamientos de naranjos no han sido descritos en otros tipos de cultivos frutales o en viñas, ni se ha encontrado

Descripción del flujo del aire de un turboatomizador en cítricos

que la intensidad turbulenta del flujo sea tan alta ni tan variable. Las causas pueden atribuirse a que la maquinaria que se emplea comúnmente en los tratamientos de cítricos genera un mayor volumen que la que se emplea en otros frutales y la densidad foliar de los naranjos es muy elevada. Además, visualmente se comprueba que las hojas tienden a exponerse perpendicularmente a las fuertes corrientes de aire. Todo ello hace que se genere un flujo más turbulento que en otros casos y con vórtices muy particulares.

8. Diseño y validación de un modelo CFD del flujo del aire en 2D producido por un turboatomizador durante los tratamientos fitosanitarios en cítricos

8.1. Introducción

Una de las variables principales que influyen sobre la eficiencia de los tratamientos son las características de la vegetación (epígrafe 2.4). Debido a la complejidad de evaluar en campo el efecto de los árboles sobre la corriente del ventilador, la modelización con CFD se presenta como una herramienta complementaria para el estudio.

En la literatura científica sobre CFD a menudo se modela la vegetación como un medio homogéneo y/o poroso (capítulo 5). Esta hipótesis se ha aplicado para simular los tratamientos en manzanos (Xu *et al.*, 1998) y en viñedos (Da Silva *et al.*, 2006). Shelton y Neuman (2011) también simularon el comportamiento de una nube de vapor de dimetil disulfuro al atravesar la copa de un cítrico, pero no validaron su modelo.

Otra aproximación es la propuesta por Endalew *et al.* (2009, 2010ab, 2011) que desarrollaron un modelo de tronco y ramas, simuladas como un medio sólido, y de vegetación, simulada como un medio poroso. Este modelo fue validado para distintos tipos de turboatomizador durante las aplicaciones en perales. Connell *et al.*, 2011 utilizó esta técnica para aplicarlo en kiwis, aunque sin validar.

En el capítulo anterior de la tesis (capítulo 7) se ha observado que durante los tratamientos fitosanitarios con turboatomizador en cítricos se producen dos reflujos de aire alrededor de la copa de los árboles que reciben directamente el aire del ventilador: uno detrás de la copa y otro sobre ella. Los resultados de los primeros modelos desarrollados, que consideraban la vegetación como un cuerpo poroso homogéneo y empleaban un modelo de flujo $k-\varepsilon$ estándar, no mostraron estos reflujos (Salcedo *et al.*, 2012) (anejo 1, capítulo 13).

La presencia de vórtices se ha observado, por ejemplo, en los estudios ambientales de flujos atmosféricos alrededor de estructuras sólidas. Cuando una corriente de aire incide sobre un cuerpo sólido se produce una pérdida de la energía cinética del aire y aumenta la energía potencial, aumentando la presión del aire y generando un gradiente de presión que la corriente no puede vencer. Este gradiente de presión altera la dirección de la corriente y produce una separación del flujo en la capa límite del sólido. Si se supone que los naranjos se comportan prácticamente como un sólido frente a la corriente de aire del turboatomizador, se podrían explicar los dos vórtices que se observaron experimentalmente en el trabajo antes mencionado. No obstante, las características del cuerpo sólido influyen en el tamaño, la intensidad y la ubicación de los vórtices, por lo que es necesario realizar un estudio que permita modelar convenientemente la copa de los árboles para que las simulaciones reproduzcan adecuadamente el flujo real.

El objetivo de esta parte de la tesis es desarrollar un modelo CFD bidimensional y estacionario con el método RANS, como un primer paso para reproducir el flujo de aire descrito de forma experimental, y validarlo.

8.2. Materiales y métodos

Para desarrollar el modelo se han seguido los siguientes pasos:

- Obtención de velocidades experimentales del aire para ajustar el modelo.
- Definición del dominio general y las características del modelo.
- Selección del tamaño de celda de la malla.
- Selección de la geometría de la copa y el modelo turbulento del aire.
- Validación del modelo con datos experimentales.

8.2.1. Realización del ensayo para ajustar el modelo

Medición de las velocidades del aire

El ensayo se realizó en una parcela comercial de naranjos variedad ‘Lane Late’ (*Citrus sinensis* L.) con las mismas características descritas en el epígrafe 7.2.1) del capítulo anterior. Para producir la corriente de aire, se utilizó el mismo pulverizador hidráulico bajo idénticas condiciones

El ensayo consistió en la medida de la velocidad del aire en diferentes puntos alrededor de la máquina y del árbol, representados esquemáticamente en la Figura 10. El tipo de anemómetro y el tiempo de adquisición también son los mismos que en el capítulo 7.

En los mástiles A y B se midieron las velocidades a la salida del ventilador. En las posiciones C y D se registró la velocidad del aire antes y después de atravesar el árbol, de manera similar al ensayo descrito por Da Silva *et*

al. (2006). Además, se midió la velocidad del aire con otro mástil, situado en tres posiciones equidistantes sobre la copa del árbol (E, F y G).

Los mástiles A y B se situaron a 0,5 m del ventilador. En el mástil A se midió a partir de 0,4 m del suelo, cada 0,2 m hasta 1,8 m de altura. En el B, se midieron las velocidades cada 0,2 m desde el punto más próximo al mástil A hasta el centro del ventilador. El mástil C estaba 0,3 m delante de la copa y el D 0,3 m detrás. En cada uno se tomaron medidas del aire cada 0,2 m hasta 3,0 m.

El mástil en las posiciones E, F y G no ha estado fijado al suelo. La posición F del mástil representaba lo que ocurría aproximadamente en la parte superior del centro del árbol, mientras que las posiciones E y G estaban a media distancia entre la F y el extremo de la copa. Debido a la dificultad de colocar los mástiles entre la vegetación, por el gran número de ramas y hojas, se estimó un error de $\pm 0,2$ m en la posición de los mástiles y en la altura de los puntos de medida. Se tomaron medidas a partir de 0,5 m de la cubierta vegetal, cada 0,5 m hasta 1,0 m de altura sobre la copa. En el anejo 3 (capítulo 15) se muestran fotografías del ensayo.

Como se explica a continuación, los datos de los postes A y B se emplearán como condiciones de contorno del modelo CFD (epígrafe 8.2.2) mientras que los postes restantes (C, D, E, F y G) se emplearán para la fase de ajuste de la geometría de copa y la selección del modelo turbulento (epígrafe 8.2.4).

Diseño de un modelo CFD del aire producido por un turboatomizador

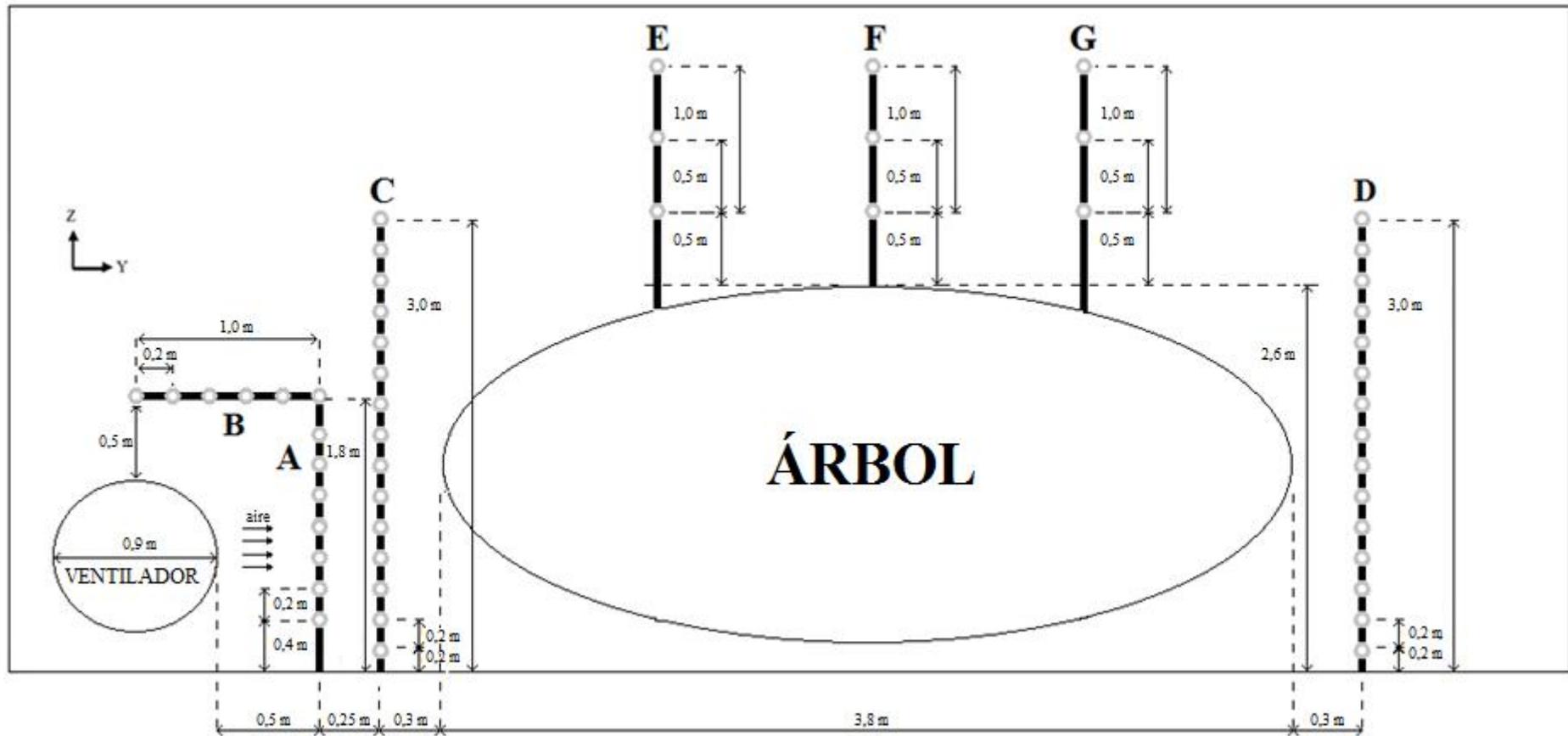


Figura 10. Alzado del primer ensayo

La medición de las características climatológicas se realizó con los mismos dispositivos empleados en el epígrafe 7.2.1 bajo idénticas condiciones. Los datos obtenidos fueron: temperatura media del aire de 23,5°C; humedad relativa media del 43,6%; velocidad media del viento de 0,9 m/s (todos los valores estuvieron por debajo de 1,4 m/s); y la dirección media del viento fue de 135° (Sur-Este) respecto a la fila de árboles (Norte-Sur). Además, se volvió a tener en cuenta las condiciones del BOE (2012). La velocidad del viento a 5 m de altura fue inferior a 1,5 m/s durante todas las mediciones en los experimentos y por esta razón se puede considerar que su efecto era insignificante

Análisis de los datos y estimación de la intensidad turbulenta

Los modelos CFD que utilizan la técnica RANS asumen que el flujo tiene un comportamiento estable dentro de la turbulencia, es decir, los parámetros oscilan dentro de un rango determinado a lo largo del tiempo. Por ello, se estudiaron la estabilidad de las variaciones de velocidad en cada punto siguiendo las hipótesis del capítulo 7.

Posteriormente, como condición de entrada del modelo se necesitaba calcular las intensidades turbulentas del aire. En este trabajo se calcularon las intensidades turbulentas en todos los puntos de los mástiles A y B. La intensidad turbulenta I en un punto se ha calculado utilizando la ecuación (23) descrito en el epígrafe 7.2.3 del capítulo anterior.

8.2.2. Dominio y diseño de la malla.

Dominio y características

Como un primer paso para describir este fenómeno se consideró un modelo en dos dimensiones. Se diseñó un dominio casi rectangular de 21 m x 8 m, en el que una esquina inferior se modificó para ser usada como la entrada de aire, con una forma y dimensiones similares a la de los postes A y B del ensayo. El aire podía salir por el resto de límites del dominio excepto por la base, que representaba el suelo (Figura 11).

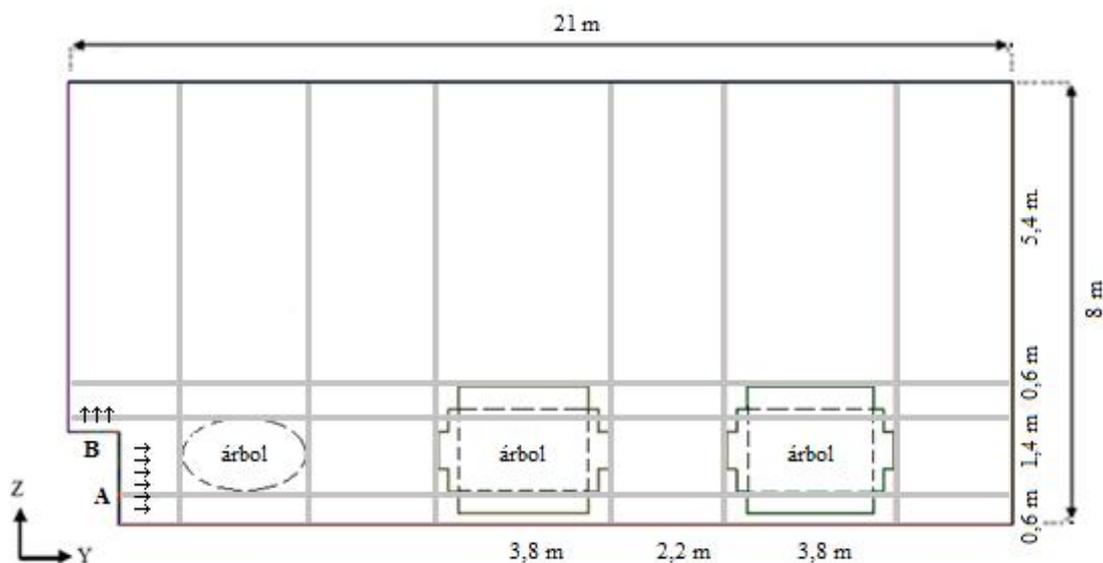


Figura 11. Dominio y esquema del modelo.

La entrada de aire se sectorizó en tramos uniformes de 0,2 m a partir de 0,4 m de altura, de manera similar a la disposición de los puntos de medición en los mástiles A y B (Figura 12). A cada tramo vertical se le asignó la velocidad y la intensidad turbulenta correspondiente al punto equivalente del experimento. Por ejemplo, la velocidad e intensidad en el tramo vertical A40 correspondía a la medida en el punto de medición del mástil A situado a 0,4 m de altura. Del mismo

modo se hizo con los tramos horizontales, utilizando datos de los puntos medidos sobre el mástil B.

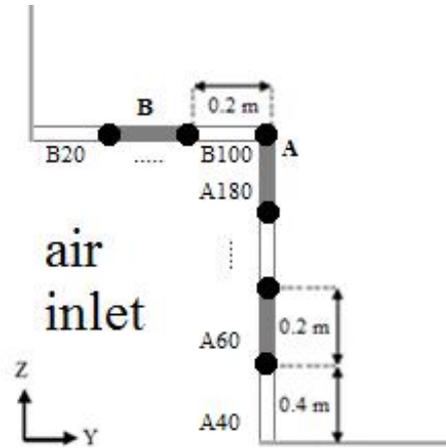


Figura 12. Esquema detallado de la entrada de aire en el modelo.

Geometría de la copa y propiedades

Dentro del dominio se definieron tres regiones correspondientes a las copas, cada una de ellas representando la sección transversal de una fila de árboles. Dada la experiencia previa sobre el comportamiento del flujo (capítulo 7 y anejo 1 del capítulo 13), se decidió considerar la región más cercana a la entrada de aire como un medio sólido de características homogéneas, mientras que las otras dos regiones se modelaron como un medio poroso. Considerar la primera región como un medio sólido implica que sus dimensiones deben ser menores que las de los árboles, puesto que si no se fuerza a la corriente de aire a tomar una trayectoria muy vertical y con velocidades muy rápidas debido al efecto Venturi. Además tiene que haber un espacio suficiente entre la región que representa la copa y el suelo del dominio, para simular adecuadamente el paso de aire que se observa en la realidad. Para decidir la geometría y dimensiones de esta región se propusieron cuatro opciones, todas ellas simétricas respecto a un eje vertical

(Figura 13). Las condiciones comunes a las cuatro representaciones de esta región fueron que la distancia entre el eje vertical de simetría del cuerpo sólido y la entrada vertical de aire (equivalente al mástil A) sea la misma que la del ensayo (2,45 m) y que la distancia entre los ejes de simetría verticales de las tres regiones que representan las copas fuera de 6,0 m, como en la parcela. La separación mínima entre el borde de la región que representaba la primera copa y el suelo fue de 0,6 m.

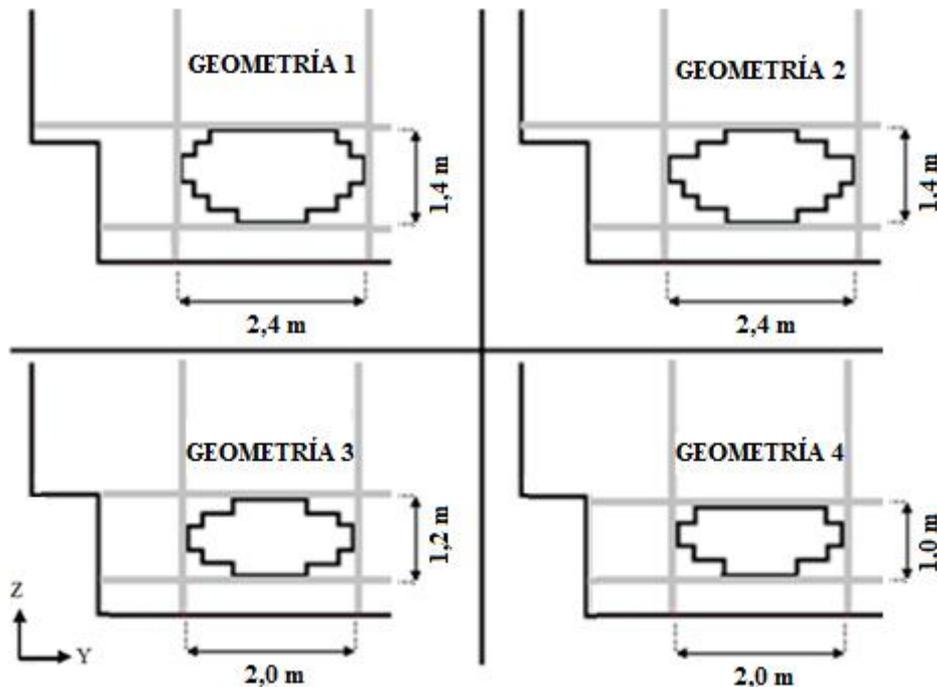


Figura 13. Geometrías propuestas para la copa.

Las geometrías 1 y 2 tuvieron formas diferentes, con una anchura máxima de 2,4 m y una altura de 1,4 m. La geometría 3 tuvo una anchura de 2 m y una altura de 1,2 m y la geometría 4 representó un cuerpo de 2 m de anchura y una altura de 1 m.

Las regiones correspondientes a las otras dos filas de árboles se simularon como cuerpos huecos con una cubierta porosa (Figura 14), simétricas respecto a

un eje horizontal y otro vertical, con una altura máxima de 2,6 m (como la de los árboles del experimento) y una separación de 0,2 m hasta el suelo. Se consideró que las copas de los cítricos tenían una anchura máxima de 3,8 m en el centro y una anchura mínima de 3 m en las partes superior e inferior, valores próximos al promedio de las mediciones reales en el campo. Por esta razón, las copas se modelaron usando superficies poligonales que disminuían gradualmente su anchura desde el centro a la parte superior e inferior de una manera escalonada.

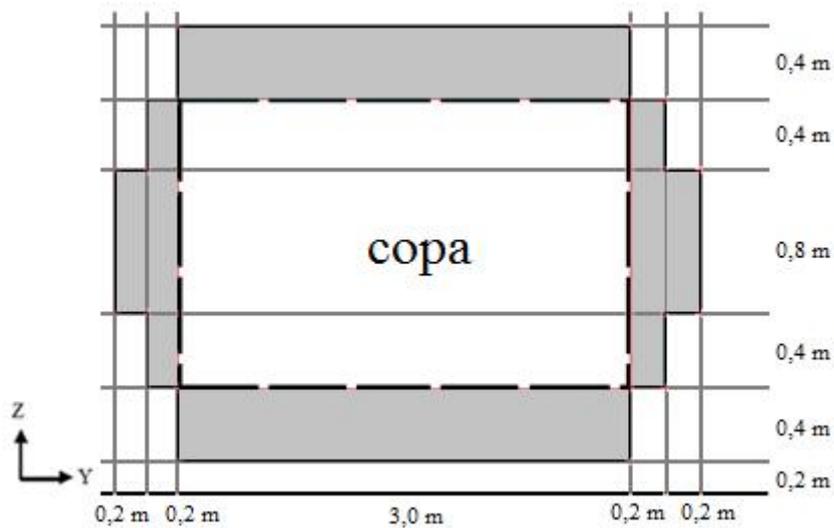


Figura 14. Características de la segunda y tercera copa. Las partes coloreadas indican las regiones porosas.

8.2.3. Propuesta del tamaño de celda para las diferentes geometrías

Se utilizó una malla estructurada de celdas cuadriláteras con distribución uniforme. Dado que los resultados de una simulación pueden depender de la malla (Franke *et al.*, 2007), para determinar el tamaño de celda se usó la extrapolación de Richardson (Granell, 2014), que se basa en hacer simulaciones con mallas cuya resolución aumenta un mínimo de 1,5 veces. Por tanto, para cada una de las geometrías de la región representativa de la primera fila de árboles se emplearon cuatro mallas con celdas de 20, 10, 4 y 2,5 cm de lado. La Tabla 3 indica el

número de celdas de la malla para cada geometría de la región que representa a la primera copa.

Tabla 3. Número de celdas por cada malla en cada modelo.

Modelo de copa	Celdas de 20 cm de lado	Celdas de 10 cm de lado	Celdas de 4 cm de lado	Celdas de 2.5 cm de lado
1	3924	15616	97300	249216
2	3930	15640	97650	249600
3	3945	15700	97825	250560
4	3950	15720	97950	250880

Para estimar la calidad de las mallas se utilizó el parámetro denominado determinante 3x3x3 (-), en el que un valor de 1 implica una malla perfectamente regular y un valor igual a 0 que existen elementos degenerados en cualquiera de las direcciones. Esto es importante porque los métodos numéricos usados asumen que las celdas son relativamente equiláteras, es decir, con un determinante 3x3x3 próximo a 1.

8.2.4. Consideraciones generales para las simulaciones

El programa que se utilizó para las todas las simulaciones ha sido ANSYS Fluent®(ANSYS, Inc. Canonsburg, PA, USA) con un ordenador de 8 procesadores Intel (R) Xeon (R) CPU, 2.80 GHz, Windows 7 y 16 Gb RAM. Se empleó la aproximación RANS (Reynolds Average Navier Stokes), modelando el aire como un flujo incompresible, isotérmico y newtoniano.

Para simular el comportamiento del flujo cercano a una superficie sólida, Fluent® implementa dos parámetros: la altura de rugosidad k_s (m), definida en el epígrafe 4.6, y la constante de rugosidad C_s (-). Para k_s se siguieron las recomendaciones de Blocken *et al.* (2007) detalladas en el apartado 4.6.2, que

advierde que si el valor de k_s es superior a la mitad de la altura de la celda más cercana al sólido (y_p) se puede incurrir en graves errores de predicción del flujo.

En las simulaciones para la elección de la malla, se quería tener las mismas condiciones de contorno en todas las mallas independientemente de su tamaño de celda. Como el tamaño mínimo de celda fue de 2,5 cm (y_p mínimo = 1,25 cm), se optó por un valor estándar de $k_s = 0,01$ m para las celdas pegadas al suelo. Por otro lado, la superficie de la región que representa la primera copa se consideró lisa ($k_s = 0$). Para C_s no existen referencias específicas sobre su uso. Por tanto, se tomó el valor por defecto del programa (0,5).

En las posteriores simulaciones para elegir la geometría de copa y modelo turbulento, así como en la validación final, se decidió ser más preciso con el valor de k_s , por lo que se definió la longitud rugosa z_0 (m) (epígrafe 4.6). Teniendo en cuenta que no hay obstáculos destacables en el suelo, se ha empleado un valor de $z_0 = 0.001$ m según la tabla de Arya (1988) (Figura 2), por lo que se ha obtenido una $k_s = 0.019$ m. Siguiendo las indicaciones de Blocken *et al.* (2007) y, teniendo en cuenta que el tamaño mínimo de la celda fue de 0.04 m como se verá luego, (epígrafe 8.3.2), se tuvo un $y_p = 0.02$ m. Por otro lado, la superficie de la región que representa la primera copa continuó considerándose lisa ($k_s = 0$) y C_s mantuvo su valor por defecto (0.5).

Para las zonas de salida del aire del modelo, se consideró una intensidad turbulenta $I = 5\%$ y un ratio de viscosidad turbulenta $\mu_t/\mu = 10$. Estos valores son frecuentemente empleados en ingeniería ambiental para modelar flujos atmosféricos.

Para determinar la resistencia de un cuerpo poroso al paso de un flujo, Fluent relaciona la caída de presión que se produce con la ecuación de Darcy. Esta ecuación es una suma de las pérdidas por la inercia y por la viscosidad. La viscosidad se consideró despreciable y se asignó un valor de inercia de 7 m^{-1} a la región correspondiente a los árboles de la segunda y tercera filas, basándose en resultados de trabajos previos (Salcedo *et al*, 2013)

Para el acoplamiento del cálculo de la presión y la velocidad se utilizó el algoritmo SIMPLE (Ferziger y Peric, 2001). El criterio de convergencia para las simulaciones fue alcanzar un valor mínimo del residuo normalizado de 10^{-4} .

Selección del tamaño de celda

Para seleccionar el tamaño de celda, se parte de la base de que se iba a utilizar una malla estructurada de celdas cuadriláteras con distribución uniforme. Dado que los resultados de una simulación pueden depender de la malla (Franke *et al.*, 2007), para definir el tamaño de celda se utilizó la extrapolación de Richardson (Baker, 2005), que se basa en hacer simulaciones con mallas cuya resolución aumenta un mínimo de 1,5 veces. Por tanto, para cada una de las geometrías se utilizaron cuatro mallas con celdas de 20, 10, 4 y 2,5 cm de lado respectivamente. Esto suponía 4 simulaciones por cada geometría de copa (16 simulaciones en total).

Para estas simulaciones preliminares, se escogió como velocidad inicial una corriente constante de 10 m/s, que salía de manera perpendicular a las regiones A y B de entrada de aire del dominio. Para resolver la turbulencia de la

corriente, se trabajó con la intensidad turbulenta (I) y la longitud característica (L). Este último parámetro se emplea para estimar el tamaño de los reflujos que se puedan producir respecto al tamaño total del flujo. La intensidad turbulenta fue del 10% en todos los tramos de entrada del aire. Para la longitud característica se ha basado en el trabajo de Delele *et al.* (2005), que determinó un valor del 5% en turboatomizadores.

Se empleó un modelo turbulento standard $k-\varepsilon$, con un esquema de discretización de primer orden.

Las variables objetivo de las simulaciones fueron los módulos de las velocidades en los puntos equivalentes a los del poste D en el ensayo. Se seleccionó la malla con celdas más grandes en las que la reducción de tamaño suponía una variación media del módulo de velocidad inferior o igual a 0,1 m/s.

Selección de la geometría para la primera copa y del modelo turbulento

La elección de un modelo turbulento influye notablemente en la precisión de las simulaciones (Franke *et al.*, 2007). Por ello, se ha estudiado el efecto de tres modelos sobre los resultados: standard $k-\varepsilon$, Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ y Reynolds Stress Model (RSM).

Para realizar este estudio, se realizaron simulaciones con los tres modelos turbulentos utilizando las cuatro geometrías de copa, siguiendo un esquema numérico de segundo orden. Con el fin de reducir el coste computacional, primero se realizó la simulación con el modelo standard $k-\varepsilon$. Cuando esta había convergido, se lanzaba una simulación con el modelo SST $k-\omega$, utilizando los

resultados de la anterior simulación como solución inicial. Por último, se empleó el modelo RSM actuando de la misma manera.

En estas simulaciones se utilizaron las velocidades e intensidades turbulentas registradas en los postes A y B del ensayo. L ha seguido siendo del 5% de la longitud de entrada de aire.

Las variables objetivo de las simulaciones fueron las velocidades en todos los puntos de medición del ensayo (excepto en A y B, que correspondían a la región de entrada de aire en el modelo).

Para determinar la bondad de los modelos, en primer lugar se observó si reproducían las estructuras principales de flujo observadas en la primera parte de la tesis: un vórtice detrás del árbol y otro sobre la copa, con una importante corriente entre el naranjo y el árbol. Para ello, se representó en una misma gráfica los vectores velocidad observados en cada punto del ensayo con los obtenidos en la simulación. Seguidamente, en cada punto de medida, se calculó el ángulo que formaban los vectores experimentales con los simulados y el módulo del vector diferencia.

Debido a que el objetivo principal para el modelo era reflejar el comportamiento general del flujo, se le dio más importancia a la dirección de los vectores de aire que al valor numérico. Por esta razón, los modelos preseleccionados son los que cumplieron los siguientes requisitos:

- El poste C debía representar el perfil de velocidades del ventilador lo más similar posible. Sin embargo, las diferencias entre los datos simulados y los

observados son previstas, debido a la naturaleza turbulenta del flujo y a la inexactitud de las mediciones. Por esta razón, se consideró sólo como válidos los modelos cuya máxima variación media entre módulos experimentales y simulados de velocidades eran inferiores al 20%. Al mismo tiempo, el ángulo medio máximo permitido entre los vectores experimentales y simulados de velocidad fue de 20°. Estos valores límite se establecieron arbitrariamente.

- El poste D debía reflejar el primer vórtice detrás del árbol, y a partir de los 2,6 m, la presencia del segunda vórtice. En cada punto de la simulación en la que se reprodujo el vórtice, la magnitud de la velocidad tenía que ser del mismo orden que en el mismo punto experimental correspondiente.
- Los postes E, F y G debían reflejar el vórtice encima de la copa. En cada punto de la simulación en la que se reproduce el vórtice, la magnitud de la velocidad tenía que ser del mismo orden de magnitud que en el punto experimental correspondiente.

A partir de los modelos preseleccionados, el modelo final fue aquel con las menores diferencias entre los datos experimentales y simulados.

Validación del modelo con los datos del segundo ensayo

La validación del modelo consistió en comparar los resultados de la simulación con datos obtenidos en otro experimento independiente (ensayo descrito en el capítulo 7 de la tesis).

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

La simulación se consideraba validada si representaba el carácter global del flujo (una correcta entrada de aire y los vórtices alrededor del árbol). El criterio propuesto fue:

- En los puntos de medida en frente del árbol:
 - Sobre los postes A, C y D, se tenía que comprobar que la simulación reflejaba la corriente de aire alrededor del árbol y que el orden de magnitud de las velocidades simuladas eran similares a las observadas en el experimento.

- En los puntos detrás del árbol (los cuales corresponden a los postes E, F y G) se consideró:
 - Para el poste E, el mismo criterio para seleccionar la geometría de la primera copa (poste D del ensayo para el ajuste).
 - En los postes F y G, se debía comprobar que las simulaciones reflejan las estructuras de flujo detrás del árbol y que el orden de magnitud de las velocidades del aire simuladas eran similares a las observadas en el experimento. Las bajas velocidades en los postes F y G (0,2-0,7 m/s) indicaron que esta región estaba menos influenciada por el fuerte flujo generado por el ventilador, haciendo que fuera más susceptible al efecto de otros factores no incluidos en el estudio (morfología del terreno, influencia de turbulencias 3D no incluidas en el modelo 2D, etc.).

8.3. Resultados y discusión

8.3.1. Ensayo para el ajuste del modelo

Medición de las velocidades del aire y estimación de la intensidad turbulenta para las condiciones de contorno

A continuación se muestran las velocidades correspondientes a los puntos de medición en los postes A y B (Figura 15). Se observa que la componente horizontal U_y fue dominante en los primeros 1,8 m de altura del poste A, aunque la otra componente U_z iba ganando presencia a medida que aumenta la altura. La corriente empezó yendo en dirección al suelo y luego ha ido ascendiendo. En el poste B, la componente vertical era más grande cuanto más cerca estaba al centro del ventilador. Este fue el mismo comportamiento observado en la primera parte de la tesis.

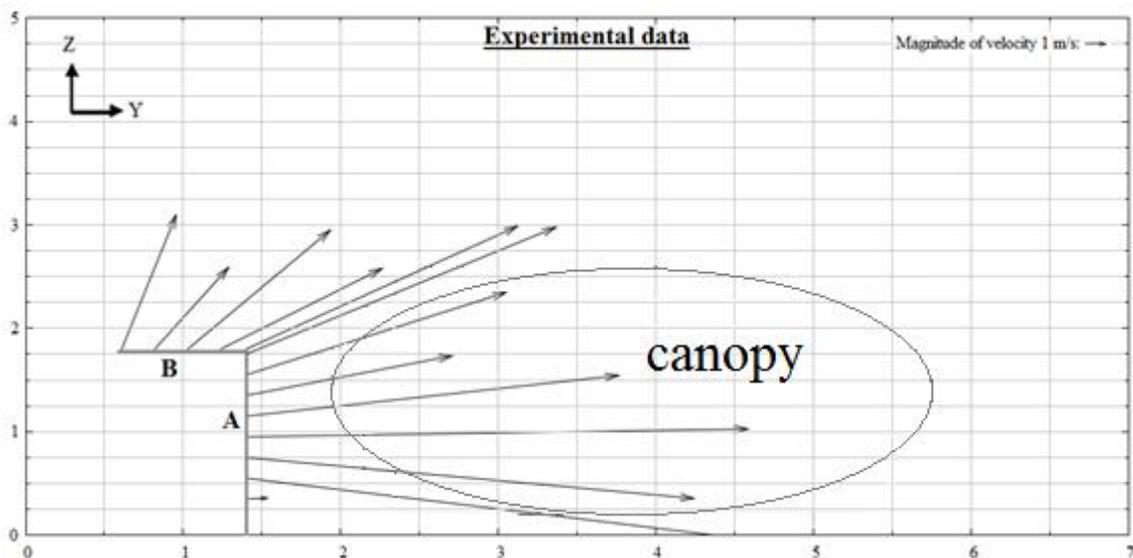


Figura 15. Velocidades experimentales en los postes A y B.

Respecto a las intensidades turbulentas, los valores en el poste A oscilaron entre 5 y 10%, con la excepción en los primeros 0,4 m (Figura 16i). Esto es

porque el módulo de la velocidad es mucho más bajo en ese punto que en el resto del poste, como se aprecia en la Figura 17. Esto lo hacía más vulnerable respecto a las fluctuaciones. En el poste B las intensidades fueron mayores, entre 10 y 30%. La intensidad disminuyó conforme se acercaba al poste A (Figura 16ii).

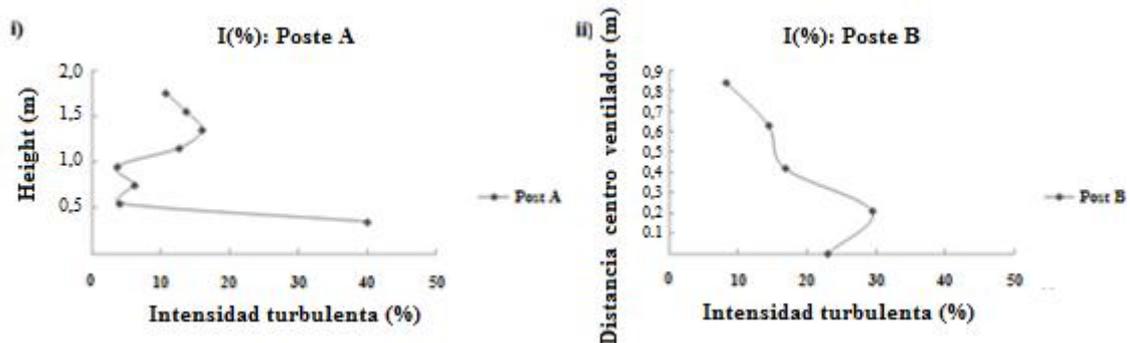


Figura 16. Intensidades turbulentas a la salida del ventilador para el poste A (i) y el poste B (ii).

Aunque la tasa de adquisición de datos de los anemómetros (1 Hz) no fue muy alta para calcular la intensidad con gran precisión, se consideró que se trataba de un enfoque mejor que el seguido por Endalew *et al.* (2010b), que utilizaba un valor constante que no se obtuvo en sus experimentos, o el seguido por Da Silva *et al.* (2006), que no explica como obtiene ese dato.

Medición de las velocidades del aire para seleccionar el modelo

La Figura 17 muestra un diagrama vectorial con las velocidades del ensayo que posteriormente serán las variables objetivo en las simulaciones. En los puntos correspondientes al poste en posición C se observó que la corriente fue prácticamente horizontal hasta los 2,0 m de altura, alcanzando sus máximos valores entre 0,4 y 1,0 m de altura (entre 21-23,0 m/s). La componente horizontal de la velocidad del aire, U_y , siempre fue hacia el árbol. La vertical, U_z , fue hacia el suelo en los primeros 0,6 m y luego cambió de sentido. A partir de los 2,0 m de

altura, el peso de ambas componentes sobre la corriente se igualaron. Hasta los 3,0 m, la velocidad del flujo decrecía y se hacía más vertical debido al efecto de la copa sobre el aire, que empujaba al aire a circular hacia arriba.

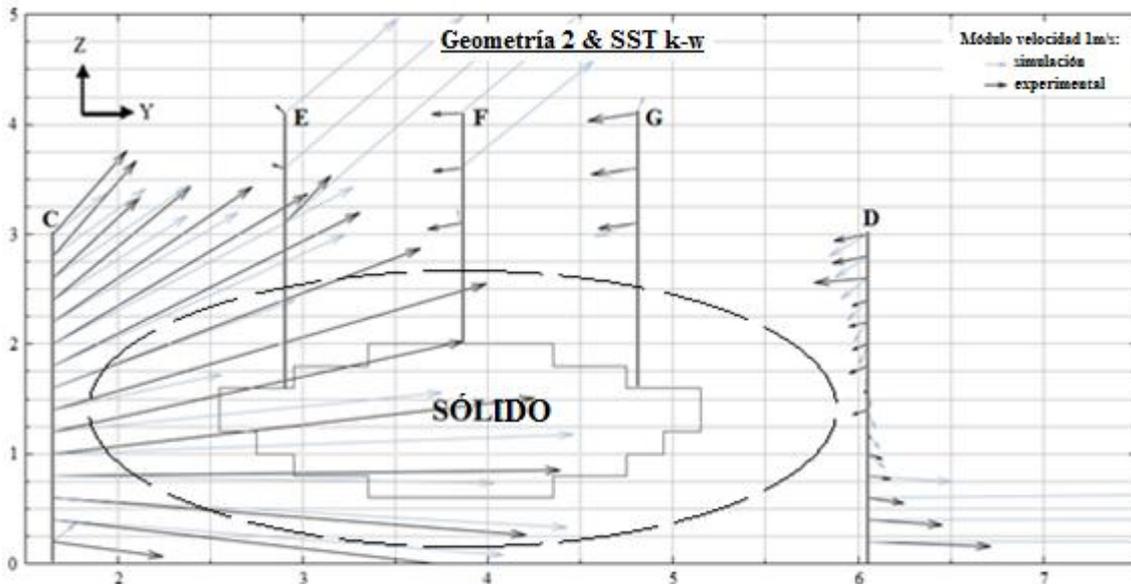


Figura 17. Velocidades experimentales (negro) en comparación con las velocidades simuladas (gris) para la geometría 2 y el modelo SST $k-\omega$ en los puntos donde el flujo se consideró estable. Distancias en metros.

Detrás del árbol (puntos del mástil en posición D), se produjo un cambio en la dirección del flujo saliente de debajo del árbol. Este cambio de tendencia implicó la existencia de un vórtice (en este caso de sentido antihorario) que alteraba la corriente. Todos los vectores apuntaron hacia la región del suelo. La componente U_y , en general, fue mayor que la vertical. Hasta los 1,2 m de altura mantuvo el sentido del aire antes de cruzar el árbol y fue donde la velocidad presentó los valores más grandes. Pero a partir de 1,4 m se invirtió el sentido. Las velocidades U_z oscilaron siempre entre -0,2 y -0,6 m/s. Las velocidades del aire siguieron apuntando al suelo y al árbol después de superar la altura del árbol. Ello sugiere que había otro vórtice en sentido horario sobre la copa, y que aspiraba el aire y lo llevaba hacia el centro de la cubierta superior del árbol.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Las velocidades del aire en los puntos sobre la copa reflejaron una recirculación del aire sobre ésta. Ambas componentes eran de signo negativo en los puntos correspondientes al mástil en la posición F (centro del árbol) y en la posición G. Esto confirma que la corriente sobre la copa probablemente forma un vórtice en sentido horario, aunque los datos experimentales solo alcanzaron a mostrar la parte inferior del mismo.

Los datos de velocidad en los puntos del ensayo cumplieron con el criterio de equilibrio propuesto. Por lo tanto, se consideraron adecuados para poder ser comparados con los resultados de las simulaciones.

8.3.2. Selección del tamaño de celda

La Tabla 4 muestra las diferencias medias de los resultados entre dos mallas de tamaño sucesivo. En todos los casos se observó que la diferencia media entre los resultados que se han obtenido con la malla de celdas de 4 cm de lado y con la de 2,5 cm no ha aumentado más de 0,10 m/s. Por tanto, se adoptó el tamaño de celda de 4 cm en todos los modelos restantes.

Tabla 4. Diferencias medias (m/s) entre resultados de las distintas mallas.

Modelo de copa	De celdas de 20 cm de lado a 10 cm	De celdas de 10 cm de lado a 4 cm	De celdas de 4 cm de lado a 2,5 cm
1	0,51	0,20	0,07
2	0,34	0,15	0,08
3	0,64	0,30	0,07
4	0,38	0,26	0,09

8.3.3. Selección de la geometría de la copa y del modelo turbulento

La Figura 18 muestra el flujo de aire generado por todas las geometrías para el modelo estándar $k-\varepsilon$, como ejemplo para explicar los resultados en cada

uno. También se muestra el flujo de aire generado por la geometría 2 para los otros modelos de turbulencia considerados. En el anejo 2 se presenta los valores numéricos de cada geometría y cada modelo turbulento del aire frente a los datos experimentales.

Las Geometrías 3 y 4 para las copas (Figura 18iii y Figura 18iv) no cumplieron con los requisitos de ajuste deseados al utilizar cualquiera de los modelos de turbulencia probados: a) las variaciones medias entre los módulos de las velocidades experimentales y simuladas han sido más del 20%, b) ningún vórtice se generó en los puntos correspondientes a los puestos E, F y G, y c) hubo dos vórtices detrás del árbol entre 1,0 a 2,0 m de altura. Para la geometría 3 el ángulo medio formado por los vectores reales y los simulados entre todos los postes fue de $78,4^\circ$ y el módulo del vector diferencia de 6,5 m/s, mientras que para la geometría 4 fue de $76,3^\circ$ y 6,4 m/s respectivamente. En ambas geometrías, los mayores valores para ángulos entre vectores y los módulos del vector diferencia se produjeron en los postes situados sobre el árbol.

En ambas geometrías, con este modelo de turbulencia y los otros, se observaron dos vórtices, aunque el vórtice sobre la copa del primer árbol fue desplazado a la derecha del dominio y era más pequeño de lo esperado. Esto, a su vez, afectó al vórtice detrás del primer árbol, que ha sido simulado con velocidades más bajas que las medidas en el poste D. Como consecuencia, estas dos geometrías representaron el flujo de aire que pasaba sobre el árbol de una forma más horizontal de lo que realmente es.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Las simulaciones con la Geometría 1 (Figura 18i) cumplieron con los criterios establecidos tanto delante como detrás de la copas del árbol. No obstante, independientemente del modelo de turbulencia usado, no reprodujeron el vórtice adecuadamente sobre la copa. El ángulo medio total entre los vectores observados y el modelo fue de $54,5^\circ$ y el módulo del vector diferencia de $6,9$ m/s. De nuevo, los mayores valores se recogieron en los puntos sobre el árbol.

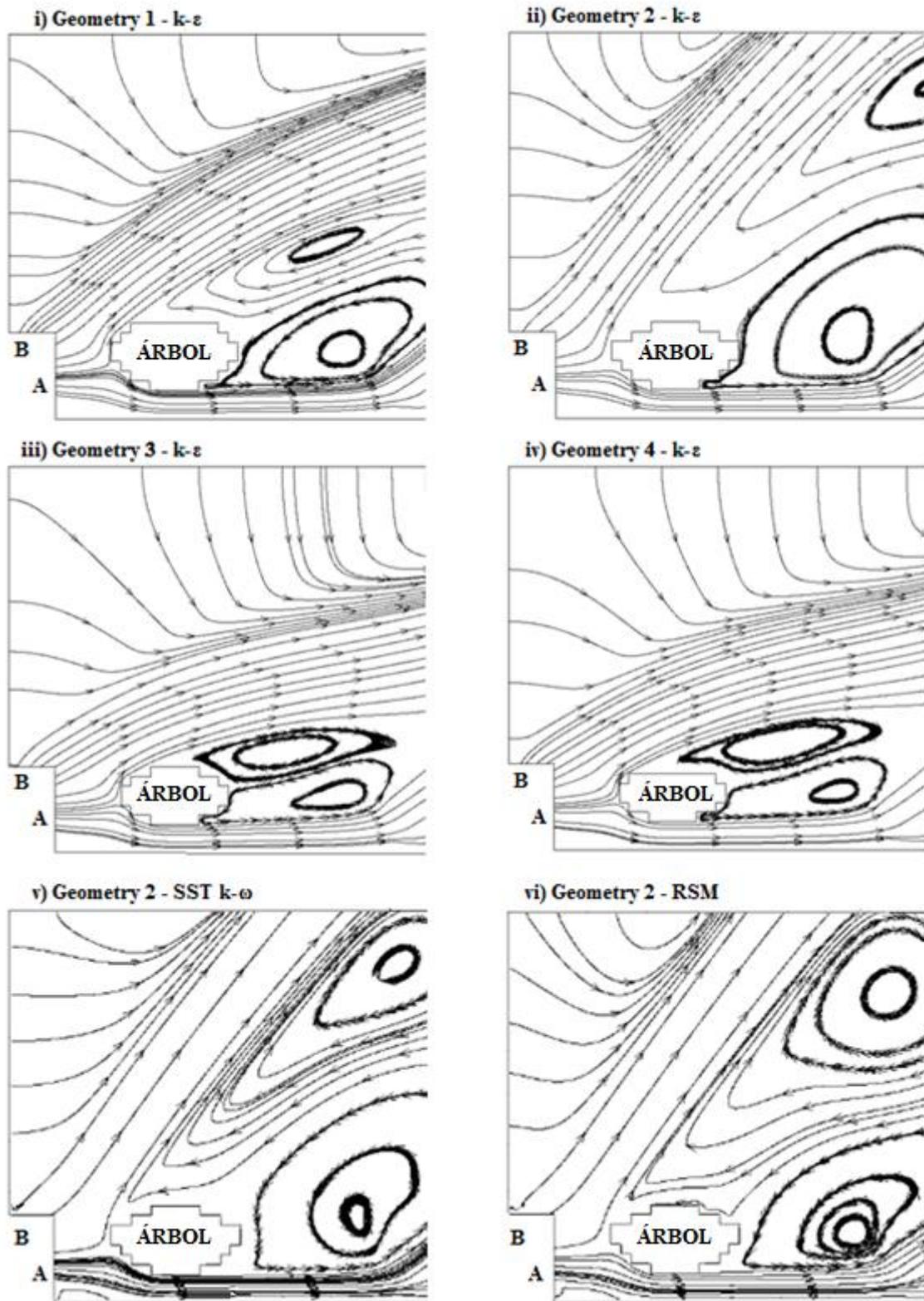


Figura 18. Líneas de corriente del aire generada por todas las geometrías de modelo estándar $k-\epsilon$ y la Geometría 2 para los modelos SST $k-\omega$ y RSM.

La Figura 18i muestra cómo el vórtice sobre la copa todavía no estaba presente en el área cubierta por los postes E, F y G. Este vórtice fue más intenso que en las Geometrías 3 y 4, pero estaba situado más lejos del árbol. Esto indica que el flujo de aire simulado durante el árbol era todavía más horizontal que la observada en campo.

La Geometría 2 fue la única que cumplió con los criterios de selección, excepto cuando se utilizó el modelo $k-\varepsilon$ (Figura 18ii), como se explica más adelante. La corriente de aire simulada sobre la copa se separó antes que las otras geometrías (Figura 18v y Figura 18vi), por lo que se volvió más vertical. Esto implica que el vórtice simulado sobre la copa era más fuerte y más cercano a la copa (las velocidades simuladas estaban más cerca de las velocidades reales medidas en el poste G).

La Tabla 5 resume los resultados obtenidos para la geometría 2 utilizando los diferentes modelos de turbulencia probados. El modelo $k-\varepsilon$ estándar se descartó porque no reproducía el vórtice sobre la copa en los postes E, F y G. Considerando los otros dos modelos, SST $k-\omega$ reprodujo mejor las estructuras de flujo que RSM (Figura 18v y Figura 18vi), ya que presentó el vórtice encima de la copa, situado por encima del centro. Además, las diferencias entre los ángulos de los vectores y en la variación de módulo eran más pequeñas, lo que significa que el modelo se aproxima más a los datos experimentales. El ángulo medio entre los vectores reales y simulados para el modelo SST $k-\omega$ de turbulencia de flujo fue de 10° y la variación media entre módulos fue del 16%, con las mayores diferencias en los puntos situados en el poste E.

Tabla 5. Diferencias entre velocidades reales y simuladas usando la Geometría 2 y diferentes modelos.

	Diferencia media de ángulos (°)	Variaciones medias de los módulos (%)	Presencia del vórtice sobre la copa		
			E	F	G
k- ϵ	11,0	17	No	No	No
k- ω	10,0	16	No	Si	Si
RSM	13,7	17	No	No	Si

La Figura 17 muestra tanto los vectores experimentales y simulados para la geometría 2 y el modelo SST $k-\omega$. Ambas velocidades presentaron valores y direcciones similares en los puntos de los postes C y D. Los ángulos entre ellos crecieron con el aumento de la altura frente al árbol, pero nunca superaron los 10°. Los módulos de las velocidades simuladas del aire en el poste de E superaron a los valores experimentales. Las velocidades simuladas en los dos puntos más bajos del poste G y el punto más bajo de F mostraron una dirección horizontal negativa, y aproximadamente el mismo módulo que los datos experimentales, lo que indica la presencia de un vórtice. Sin embargo, este vórtice simulado estaba en una posición más baja que la señalada por los datos experimentales. Además, este vórtice estaba desplazado ligeramente a la derecha de la figura. Las velocidades simuladas y reales tenían direcciones opuestas en los puntos superiores del poste F.

8.3.4. Validación del modelo con el segundo ensayo

En general, el modelo simuló correctamente el flujo de aire antes del árbol aunque con una presencia más marcada de la componente vertical que en los datos experimentales (puntos de los postes A, C y D) (Figura 19). Las mayores diferencias entre los datos simulados y experimentales se produjeron en el poste

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

A. El modelo se ajustó mejor en los postes C y D. En el poste A, los ángulos entre los vectores de velocidades experimentales y simuladas aumentaron con la altura, y a partir de 2.5 m los vectores experimentales regresaron al ventilador. Sin embargo, en C y D, la corriente simulada se comportó como en el ensayo, y se dirigía por encima del árbol a la atmósfera.

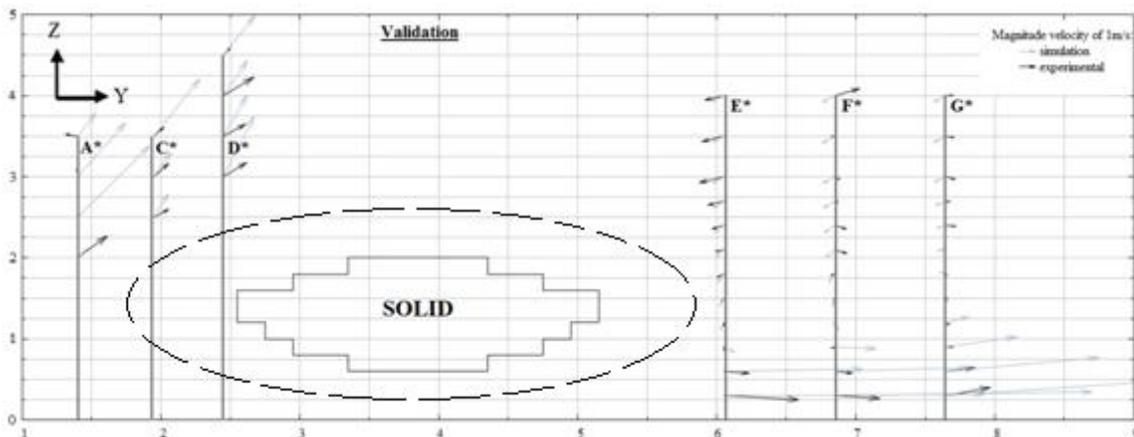


Figura 19. Velocidades experimentales (negro) en comparación con las velocidades simuladas (gris) en el segundo ensayo. Distancias en metros.

En el otro lado del árbol, en el poste de E, el módulo y las direcciones de las velocidades simuladas y reales fueron similares en todos los puntos. En los postes F y G, las direcciones de velocidad simuladas por debajo de 1,5 m fueron similares a las del experimento, aunque los módulos fueron más grandes. Por encima de 1,5 m tenían direcciones opuestas, pero presentaron un valor menor de 1 m/s en la mayoría de casos. Sin embargo, se puede considerar que el modelo reprodujo los dos vórtices que se aparecen en el ensayo de campo, uno sobre la copa y el otro detrás del árbol. Los puntos superiores del poste E (de 3,0 a 4,0 m) muestran el vórtice sobre el árbol porque las direcciones horizontales fueron negativas y la corriente era hacia abajo. El vórtice detrás del árbol se simuló por los cambios de dirección de las velocidades por debajo de 1,5 m en los puntos de

los postes de E, F y G (Figura 21). El apartado 14.2 del anejo 2 presenta los valores experimentales frente a los del ensayo.

El modelo ha sido capaz de reproducir las mismas estructuras turbulentas en el mismo orden de magnitud que en el experimento. Sin embargo, las velocidades experimentales frente al árbol fueron menos intensas que en el modelo. Esto indica que, aunque el modelo pudo reproducir el comportamiento general del fenómeno, sobreestimó la corriente de aire delante del árbol. Esto puede suceder porque se ha trabajado en dos dimensiones. Probablemente en un modelo 3D, la disipación sería mayor y las velocidades se ajustarían mejor. Habría más espacio para moverse alrededor del árbol y el aire no se centraría en la misma zona.

8.4. Conclusiones

Este capítulo propone un método para modelar el flujo de aire producido por un turboatomizador delante de una copa en cítricos. El primer paso consistió en trabajar en dos dimensiones para definir las características y el modelo de aire turbulencia. Las simulaciones reprodujeron los vórtices que se deducen de los datos experimentales: uno sobre la copa y otro detrás.

Este capítulo también destaca la importancia de recopilar datos experimentales no sólo por delante y por detrás del árbol, ya que a menudo es el caso, sino también en otras áreas, como por encima de la copa, que pueden tener una influencia importante en la eficiencia del tratamiento.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Se comprobó que, debido a que se produce una separación del flujo, es interesante utilizar modelos de turbulencia diferentes al standard $k-\varepsilon$ (el más empleado en estos casos). De hecho, este modelo no ha sido capaz de reproducir de manera deseada el reflujo que se produce detrás de la copa. El modelo SST $k-\omega$ se ha ajustado mejor a los datos experimentales que el RSM.

Otro aspecto a tener en cuenta es la forma que se le confiera a la región sólida, ya que ésta tiene una gran influencia sobre el flujo próximo a la copa y sobre la región del dominio situada frente a la entrada de aire en el modelo. Las simulaciones mostraron que la geometría debe de dar una gran componente vertical a la corriente de aire frente al árbol para que el vórtice sobre la copa se sitúe lo más posible en el centro de ella.

Pese a utilizar un modelo 2D para un fenómeno tan turbulento y heterogéneo como es el tratamiento con turboatomizador, se pudo reproducir de manera adecuada la corriente saliente del ventilador frente al árbol así como los vórtices que se reproducen en torno a la copa dentro de unos límites. Esto ha permitido ahorrar tiempo y simplificar cálculos respecto a las simulaciones tradicionales en 3D.

Sin embargo, se requieren avanzar en las simulaciones 3D para evitar sobreestimaciones en velocidades de aire y para una mejor comprensión del flujo. Las características definidas en este trabajo (copa sólida y modelo turbulento SST $k-\omega$) podrían utilizarse para diseñar un modelo tridimensional. Los enfoques futuros podrían centrarse en el análisis del tratamiento con el tractor en movimientos, una o varias filas, y el efecto del viento ambiental.

9. Estudio del comportamiento de las gotas en un modelo Euleriano-Lagrangiano aplicado a los tratamientos en cítricos con turboatomizador

9.1. Introducción

En las últimas décadas, se ha aprovechado la potencia de los ordenadores para el diseño de modelos físico-matemáticos que estiman el comportamiento de las gotas pulverizadas en los tratamientos (Teske *et al.*, 2011). Frente a los modelos tradicionales de partículas (epígrafe 5.1), la CFD integra el comportamiento de las gotas dentro de un modelo del flujo del aire (o modelo Euleriano). Por lo tanto, en este caso se puede simular tanto la corriente saliente del ventilador como el de las partículas. Además, permiten la inclusión de variables que influyen en la eficiencia de las aplicaciones como la vegetación (epígrafe 2.4). En este sentido, se han desarrollado modelos CFD Euleriano-Lagrangianos para cultivos específicos, como en viñedos (Da Silva *et al.*, 2006) y perales (Endalew *et al.*, 2010ab), con el fin de analizar la deposición de las gotas al atravesar las hojas. Sin embargo, estos modelos no estiman la fracción de producto que se pierde como deriva atmosférica o directamente al suelo.

Además, varios modelos CFD Euleriano-Lagrangianos se han desarrollado para analizar el comportamiento físico de las gotas durante la aplicación, ya que son fenómenos que en condiciones de campo son muy difíciles de observar. Se han realizado trabajos para estudiar la dispersión de las gotas en las proximidades del turboatomizador (Xu *et al.*, 1998), las distancias que podían

alcanzar las partículas (Zhu *et al.*, 1995; Brown y Sidhamed, 2001) o el efecto del viento durante la pulverización (Duga *et al.*, 2015b).

Los resultados obtenidos de estos modelos además permitirían profundizar en el estudio del comportamiento dinámico de la nube de gotas a través del desplazamiento del centro de masas a lo largo del tiempo, la cantidad de movimiento o la energía cinética de las gotas de cara al impacto. También permitirían estudiar la cinética y la evaporación de las partículas frente al viento durante los tratamientos. En este sentido, Holterman (2003) propuso una serie de parámetros y analizó la cinética y la evaporación de las gotas de agua que salen desde un pulverizador hidráulico de barra.

El objetivo de este nuevo trabajo fue elaborar un modelo CFD Euleriano-Lagrangiano a partir del modelo de aire del capítulo 8. Se pretende reproducir los tratamientos fitosanitarios en cítricos con turboatomizador en condiciones mediterráneas. Los resultados de la simulación se utilizaron también para estudiar el comportamiento cinético y dinámico de la nube de gotas. Finalmente, se compararon los resultados del modelo con el balance de masas experimental de la aplicación de fitosanitarios sobre cítricos en condiciones Mediterráneas realizado por Garcerá *et al.* (2015).

9.2. Materiales y métodos

9.2.1. Características generales del modelo

Para la parte Euleriana del modelo, el trabajo se basó en el modelo 2D diseñado y validado en el capítulo anterior. No obstante, la altura del dominio del

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

modelo se modificó de 8 m a 13 m, para poder seguir observando aquellas gotas que pudieran pasar de los 8 m (Figura 20). Las paredes A y B del contorno simulaban el aire de entrada procedente de un turboatomizador. En esta parte de la tesis, estas superficies incluían la entrada de gotas en el modelo. La pared C tuvo dos funciones: Durante la primera fase de la simulación (desde 0 hasta $t \leq 0,35$ s), era una salida de aire del modelo, y en una segunda fase de la simulación representaba la corriente del viento (a partir de $t > 0,35$ s).

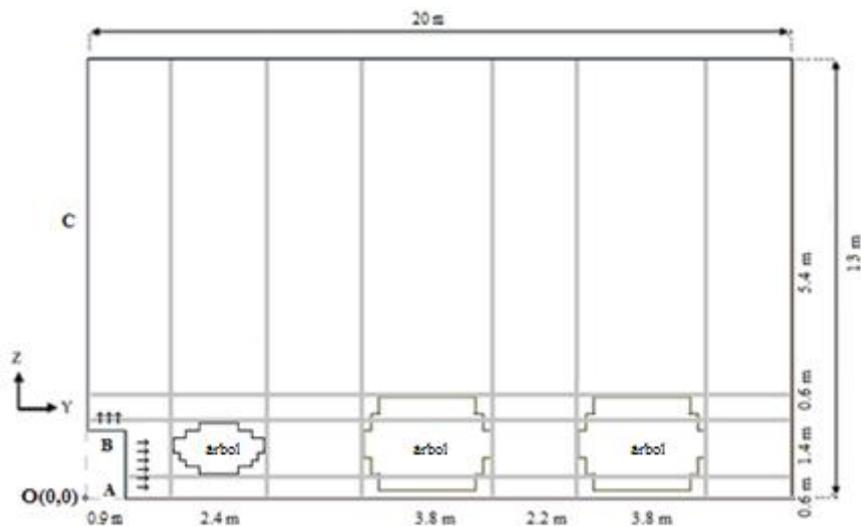


Figura 20. Dominio del modelo.

Respecto al resto de contornos del dominio, el extremo inferior representaba el suelo, y el superior y el la derecha eran salidas de aire del modelo. Las condiciones de contorno fueron las mismas que en el capítulo anterior.

Las velocidades de entrada del ventilador fueron las correspondientes a datos experimentales medidos según el epígrafe 8.2.1 del capítulo anterior.

9.2.2. Simulación de la salida de gotas al aire.

Para la salida de gotas, nos basamos en las disposiciones técnicas del ensayo de Garcerá *et al.* (2015) con boquillas convencionales Teejet D3 DC3. La posición inicial de las gotas se definió en base a la situación del equipo respecto a las superficies A y B y la inclinación de cada portaboquillas respecto a la horizontal en ese experimento (Figura 21i). Posteriormente se proyectó el eje central del cono de salida formado por las gotas en cada boquilla sobre las superficies A y B. Se decidió que los tramos en los que circulaba la mayoría de las gotas eran los tramos situados entre 0,6 y 1,8 m de altura de la superficie A (de A80 a A180) (Figura 21ii). De esta forma, durante la simulación, en estos tramos se consideraba la entrada de gotas y aire en el modelo, mientras que en el resto de tramos se consideraba únicamente la entrada de aire del ventilador.

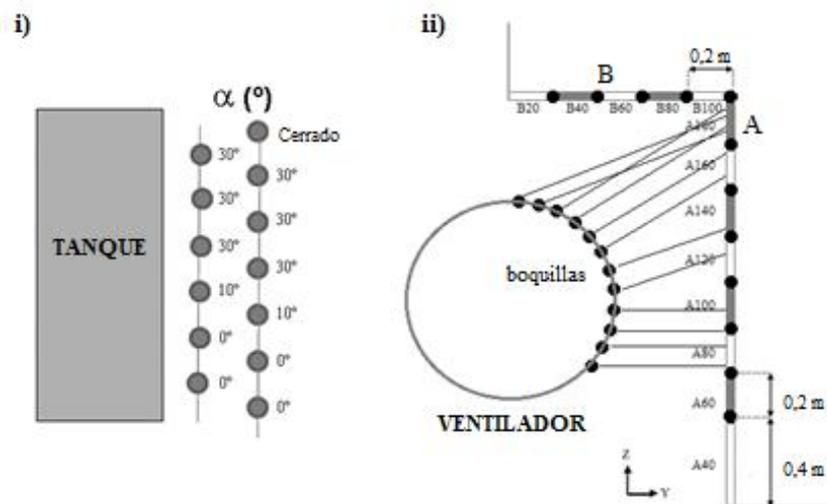


Figura 21. Ángulo de inclinación de cada boquilla referida a la horizontal (i) y posición de las boquillas y tramos por donde pasarán las gotas (ii).

Se decidió simular el comportamiento de 1500 gotas. Se escogió esta cantidad por considerarse lo suficientemente representativa del comportamiento general de la nube de gotas, y así poderla comparar con los datos experimentales.

Estas gotas se repartieron uniformemente en cada tramo de salida del aire (250 gotas/tramo).

Se consideró que la velocidad de entrada de las gotas en el modelo correspondía con la velocidad de salida de las gotas en la boquilla. Para ello, se estimó el módulo de la velocidad inicial de las gotas U_d (m/s) a partir de la ecuación (24), usando el caudal nominal de la boquilla, Q (2 l/min), y la sección de salida, S (m²). Para calcular las componentes horizontal U_{dy} y vertical U_{dz} de la velocidad en cada tramo, se usó la ecuación (25) que emplea el módulo, U_d , y el ángulo de inclinación de las portaboquillas, α (°), correspondientes a cada tramo:

$$U_d = \frac{Q}{S} \quad (24)$$

$$\begin{cases} U_{dy} = U_d \cos\alpha \\ U_{dz} = U_d \sin\alpha \end{cases} \quad (25)$$

9.2.3. Consideraciones sobre el aire del medio y el viento atmosférico

El aire del dominio fue considerado como un fluido incompresible, isotérmico y newtoniano compuesto por nitrógeno, oxígeno y vapor de agua. Para la simulación se adoptó una temperatura media del aire de 22,3 °C y una humedad relativa media de 58,71 %, medidas por Garcera *et al.* (2015).

La simulación del viento atmosférico ha sido un motivo de investigación en la modelización con CFD de los tratamientos (Endalew *et al.*, 2009 y 2010ab;

Herrera *et al.*, 2012; Duga *et al.* 2015b). No obstante, en este trabajo se decidió abordar la influencia del viento como una aproximación simplificada. El viento como tal sólo se consideró a una altura por encima de los árboles, a partir de los 3 m de altura. Por debajo de esta altura, se impuso como hipótesis la condición en cada celda del dominio del aire una velocidad paralela al suelo de 0,1 m/s. Este valor se adoptó porque se consideró que la influencia del viento entre los árboles era muy reducida pero no nula. Por experiencias vividas en campo, se han observado que siempre fluye un mínimo flujo atmosférico en la zona de vegetación, con valores próximos al adoptado en el presente trabajo. Obviamente, hay una progresión de las velocidades desde el suelo hasta una vez superado la altura de los árboles, pero se decidió trabajar por esta vía simplificada por el momento. Endalew *et al.* (2009) también indica que normalmente se supone que el efecto del viento atmosférico sólo es significativo por encima de 1,5 veces la altura de los árboles, lo que implica una zona de transición del flujo desde el límite de las copas hasta dicha altura. No obstante, no se ha tenido en cuenta tampoco esa transición en la presente tesis.

Para simular el viento se introdujo el perfil de viento propuesto por Arya (1988) en el epígrafe 4.6 mediante la ecuación (22). El valor u_{ref} que se consideró fue de 1,01 m/s, que era la velocidad media registrada en Garcerá *et al.* (2015) con un anemómetro de ultrasonidos 3D (WindMaster 1590-PK-020, Gill Instruments Ltd., Hampshire, UK) situado a 7 m de altura desde el suelo (z_{ref}), con el norte dirigido siempre hacia el equipo. No obstante, hay que señalar que en el ensayo el viento iba en dirección paralela a la trayectoria del equipo. Además, la longitud de

rugosidad, cuyo valor de 0.001 m fue definido en el epígrafe 8.2.4 del capítulo anterior.

Dado que este estudio se enmarca dentro de la capa límite atmosférica, se consideró que la corriente de entrada era paralela al suelo. De esta manera, u_z y u_{ref} se refieren a la componente horizontal de la velocidad del viento, mientras que el valor de la componente vertical se consideró igual a 0 m/s.

Como condición de salida en el modelo, se incluyó una intensidad turbulenta $I = 5\%$ y un ratio de viscosidad turbulenta $\mu_t/\mu = 10$, valores típicos empleados para modelizar el viento en ingeniería medioambiental.

Este perfil se introdujo a partir el instante $t=0,35$ s, como se explica más adelante. Antes de este instante, no había presencia de viento. Esto es sucedía también con la hipótesis del flujo a 0,1 m/s por debajo de los 3m.

9.2.4. Simulación de las gotas

Las gotas generadas por el pulverizador se consideraron como partículas esféricas de agua líquida. Como temperatura inicial se adoptó por hipótesis un valor de 15°C. Se consideró que el caldo, aislado inicialmente dentro del tanque de las condiciones externas, debía presentar una temperatura inferior a la del aire.

Para los tamaños de las gotas se adoptó una distribución de Rosin-Rammler tal y como se ha considerado en otros trabajos de modelización de tratamientos con turboatomizador (Duga *et al.*, 2013):

$$Y_d = \exp\left(-\left(\frac{D}{D_c}\right)^n\right) \quad (26)$$

Donde D (μm) es el diámetro geométrico de una partícula, D_c es un diámetro característico (μm), Y_d (-) es la fracción másica de las partículas con un diámetro mayor que D y n (-) es la de distribución de tamaños.

El programa CFD que se utilizó en este trabajo calcula esta distribución a partir de los valores mínimo, medio y máximo del diámetro de las gotas y de un coeficiente que denominaremos n' . En los modelos se asumió un diámetro mínimo de 1 μm , un diámetro medio de 350 μm (tamaño medio de las gotas según el fabricante, comunicación personal) y un diámetro máximo de 444 μm . Este valor se obtuvo de una estimación del diámetro volumétrico 90 o $Dv90$ de las gotas producidas por la boquilla (diámetro por debajo del cual se integra el 90% del volumen total). Para calcular $Dv90$ se utilizó la ecuación (26), sustituyendo D_c por el diámetro medio de 350 μm y asumiendo $n=3,5$ (valor por defecto de n que sugiere el manual del software).

Una vez definidos estos tres parámetros, se estimó el valor del coeficiente n' que debía introducirse en el programa para generar una distribución de gotas similar a una función de Rosin-Rammler que tuviese un diámetro volumétrico medio ($Dv50$) de 350 μm y un diámetro volumétrico 90 ($Dv90$) de 444 μm y se obtuvo un coeficiente $n'=5,3$.

9.2.5. Descripción del modelo global y simulación del fenómeno.

Para la modelización del aire y las gotas del pulverizador se utilizó el programa ANSYS Fluent® (ANSYS, Inc. Canonsburg, PA, USA). Todos los parámetros simulados presentaron un valor mínimo residual normalizado de 10^{-4} . El esquema numérico fue de segundo orden y se empleó el algoritmo SIMPLE (Ferziger y Peric, 2001).

En base a los resultados del capítulo anterior, para la simulación del flujo del aire generado por el ventilador se utilizó la aproximación RANS (Reynolds Average Navier Stokes), mediante un modelo turbulento SST $k-\omega$.

Para la simulación de las gotas se seleccionó un seguimiento estocástico para modelizar la dispersión turbulenta de las partículas. Para incluir el efecto de las fluctuaciones instantáneas sobre las trayectorias de las partículas, se seleccionó un modelo de caminos aleatorios discreto para las gotas. Las componentes de la velocidad fluctuante eran funciones discretas constantes por intervalos de tiempo. Su valor aleatorio se mantuvo constante dependiendo del tiempo de vida característico de los remolinos. Además, se incluyeron efectos como la rotura de gotas, la evaporación o la coalescencia entre dos gotas

La simulación se dividió en dos fases. Una primera fase que abarcó desde el instante inicial ($t=0$ s) hasta $t=0,35$ s. Esta fase pretende simular el paso de la máquina pulverizando y moviendo el ventilador por delante de los árboles. En $t=0$ s asumimos que el plano que pasa por el centro del canal de salida del ventilador coincidía con el plano de la simulación, y $t=0,35$ s era el tiempo que la máquina

tardaría en avanzar 0,15 m. Esta distancia era la mitad del ancho del canal de salida de aire del ventilador. Se asumió que la velocidad de avance fue de 1,65 km/h, valor recomendado para aplicaciones contra plagas internas de cítricos y adoptado en Garcerá *et al.* (2015).

En $t=0$ s se introdujeron en el dominio 1500 gotas. Durante toda la primera fase se mantuvo como condición de entrada el aire generado por el ventilador, y se consideró la acción del viento era despreciable frente a la corriente del ventilador, ya que se supuso que el orden de magnitud del aire del ventilador era muy superior.

La segunda fase de la simulación empieza inmediatamente después de $t=0,35$ s hasta que todas las gotas se habían depositado, evaporado o abandonado el dominio. En esta fase dejó de introducirse el aire generado por el ventilador y se asumió que solamente actuaban las corrientes atmosféricas.

9.2.6. Análisis descriptivo del comportamiento de las gotas en la simulación

Toma general de datos

Fluent® ofrecía una representación gráfica de la posición de las gotas dentro del dominio cuando se quería observar una variable física determinada en un momento dado. Junto a la posición de las gotas, aparecía una escala de 20 colores que iban gradualmente del color rojo al color azul. Cada color representaba un intervalo de valores de esa variable, de tal manera que el color rojo más intenso representaba el rango valores máximos asociados a ese parámetro, y el azul más intenso al mínimo. Cada gota estaba coloreada acorde al

rango de valores que tenía. De esta manera, se obtuvieron imágenes de las gotas en diferentes instantes ($t=0,10$ s, $t=0,20$ s, $t=0,35$ s, $t=2,35$ s, $t=5,35$ s, $t=8,35$ s, $t=11,35$ s, $t=17,35$ s) y se midieron los siguientes parámetros de cada gota coloreadas según: la distancia horizontal al punto origen de coordenadas en la Figura 20, altura respecto al suelo, la componente horizontal y vertical de la velocidad (U_{dy} , U_{dz}), diámetro relativo, temperatura y número de Reynolds. Los instantes fueron escogidos por considerarse que la posición y el número de gotas habían variado significativamente respecto al instante anterior.

Tratamiento de imágenes

Para analizar el comportamiento de las gotas con más detalle, era necesario conocer los parámetros individuales de cada gota. El código CFD nos ofrece esta información de manera particularizada. Visualmente podía ser muy difícil definir de manera individual el valor correspondiente de una variable física, especialmente cuando están muy juntas entre sí durante la primera fase. Por esa razón, se procedió a un tratamiento de las imágenes. Teniendo en cuenta que había una imagen diferente según el instante en que fue tomada y el tipo de variable, se procesaron 56 imágenes en total (7 parámetros por cada uno de los 8 instantes). Antes del tratamiento, todas las imágenes se alinearon mediante un registro de imágenes para obtener todas las coordenadas en el mismo espacio de referencia. Luego, sobre cada imagen se realizaron los siguientes pasos:

- Segmentación de las gotas (se ignora la posibilidad de superposición de gotas). Se hizo una umbralización de la imagen de luminancia seguido de una erosión morfológica de la imagen binaria con elementos estructurantes en

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

forma de cruz, que es como Fluent® representó cada partícula. Cada píxel positivo del resultado representaba una gota.

- Cálculo de cada parámetro que se quería analizar. Para cada color correspondiente a una gota, el programa asignaba un número que iba de manera creciente desde el 1 (que coincidía con el valor mínimo) hasta el 20 (valor máximo).
- Escritura de las imágenes de visualización y de un archivo CSV con todos los 7 parámetros físicos por cada gota dentro de un mismo instante.
- Se exportaba cada archivo a otro XLS. Como se ha señalado, cada color representaba en realidad un intervalo de valores. Por tanto, para un mismo parámetro, en cada gota se sustituía el valor del 1 al 20 por el promedio del rango del color correspondiente en Fluent®. Esto quiere decir que el análisis posterior del comportamiento de las gotas fue con datos medios.

En el tratamiento de imágenes se produjo un error en el reconocimiento del número de partículas, especialmente en $t = 0,10$ s, $t = 0,20$ s y $t = 0,35$ s, que es cuando aparecían más juntas las gotas. Durante la segmentación, el ordenador reconocía gotas de más y la diferencia media entre el número de gotas de la simulación y en el procesado de imágenes en estos tres instantes fue de 230 gotas. Por otro lado, la diferencia media entre $t = 2,35$ s y $t = 17,35$ s fue de 8 gotas.

Este error no se tuvo en cuenta en el estudio dinámico global explicado posteriormente, ya que el objetivo era presentar una primera aproximación del comportamiento de la nube de gotas y se consideró que el error en la estimación

de los parámetros era admisible. El mismo criterio se aplicó cuando se estudió la cinética y la evaporación de las gotas y en la estimación de los diámetros volumétricos.

Comportamiento dinámico del sistema de gotas

A partir de las distancias y y alturas z de cada partícula, así como los diámetros de cada gota, se podía conocer de manera aproximada las coordenadas y la masa de cada gota respectivamente. De esta manera se pudo estimar el centro de masas de la nube de gotas en cada instante:

$$\begin{cases} Y_m = \frac{\sum Y_i m_i}{\sum m_i} \\ Z_m = \frac{\sum Z_i m_i}{\sum m_i} \end{cases} \quad (27)$$

Donde (Y_m, Z_m) (m) son las coordenadas del centro de masas, (Y_i, Z_i) (m) la coordenadas de cada partícula en el espacio y m_i (kg) la masa asociada a cada partícula. Conocida la posición y la componente de cada velocidad, también se pudo obtener la velocidad del centro de masas:

$$\begin{cases} U_{my} = \frac{\sum m_i U_{iy}}{\sum m_i} \\ U_{mz} = \frac{\sum m_i U_{iz}}{\sum m_i} \end{cases} \quad (28)$$

Donde (U_{my}, U_{mz}) (m/s) son las componentes horizontal y vertical respectivamente de la velocidad del centro de masas y (U_{iy}, U_{iz}) (m/s) las

componentes de las velocidades asociadas a cada punto. De manera paralela se estimó la cantidad de movimiento o momento lineal total del sistema:

$$\begin{cases} P_y = \sum m_i U_{iy} \\ P_z = \sum m_i U_{iz} \end{cases} \quad (29)$$

Donde (P_y, P_z) (kg·m/s) son las componentes de la cantidad de movimiento. También se calculó el momento angular total.

Por último, se determinó la energía cinética total mediante:

$$E = \sum \left(\frac{1}{2} m_i U_i^2 \right) \quad (30)$$

Donde E (J) representa la energía cinética del sistema y U_i (m/s) el módulo de la velocidad asociada a cada gota.

Cinética y evaporación de las gotas durante el tratamiento

Se calcularon una serie de parámetros físicos propuestos en Holterman (2003) para analizar con más detalle el carácter de las gotas. Estas variables fueron calculadas para los instantes de la segunda fase de la simulación, a partir de $t=0,35$ s que es cuando interviene el viento atmosférico.

i) Cinética de las gotas

Primero se calculó el coeficiente de resistencia aerodinámica de cada gota C_d (-):

$$C_d = \left(\left(\frac{a}{Re} \right)^c + b^c \right)^{1/c} \quad (31)$$

Donde a , b y c eran constantes cuyos valores respectivos eran 24, 0,32 y 0,52. Para calcular el número de Reynolds (Re) de la gotas, Fluent® utiliza la velocidad relativa respecto al aire.

Con C_d , se pasó a calcular el tiempo de relajación τ (s) (ecuación 11), que es el tiempo que necesitan las gotas para adaptarse a los cambios a los cambios locales en la velocidad del aire:

$$\tau = \frac{4\rho_d D}{3\rho_a U d C_d} \quad (32)$$

Donde ρ_d (kg/m^3) es la densidad del agua y ρ_a (kg/m^3) la densidad del aire.

Este tiempo de relajación se puede expresar de otras maneras, como el ratio entre la cantidad de movimiento y la fuerza de resistencia aerodinámica F_d (N):

$$\tau = \frac{mUd}{F_d} \quad (33)$$

La fuerza aerodinámica F_d y la acción de la gravedad son las fuerzas principales que actúan sobre la gota. Con el paso del tiempo, estas fuerzas terminan por equilibrarse y la gota empieza a descender a una velocidad constante denominada velocidad de sedimentación U_s (m/s). Para estimar el valor de U_s para cada gota de la simulación se utilizó la relación propuesta por Holterman (2003)

entre U_s y D , donde se observa que dicha relación es potencial hasta alcanzar aproximadamente $150 \mu\text{m}$, y luego lineal. Usando esa tabla, se obtuvo una curva de interpolación (ecuación 34) para estimar el valor de U_s , teniendo en cuenta el cambio de carácter a partir de los $150 \mu\text{m}$ (el coeficiente R^2 de esta curva con los datos de la tabla es de 0,99):

$$\begin{cases} U_s = 4143,9D - 0,1194 & D > 150\mu\text{m} \\ U_s = 311017D^{1,5543} & D \leq 150\mu\text{m} \end{cases} \quad (34)$$

Esta velocidad es importante considerarla, ya que se presupone que cuando es inferior a un 10% de la velocidad del viento, la partícula es susceptible de ser parte de la deriva atmosférica. Para profundizar en este concepto, existen otros dos parámetros asociados a esta velocidad y que fueron también obtenidos en este trabajo: el coeficiente de resistencia aerodinámica a la sedimentación $C_{d,s}$ (-) y el tiempo de relajación para la sedimentación τ_s (s):

$$C_{d,s} = \frac{\tau g U d C_d}{U_s^2} \quad (35)$$

$$\tau_s = \frac{U_s}{g} \quad (36)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Holterman (2003) estudiaba la relación de estos parámetros cinéticos con el tamaño de gota. No obstante, las gotas sufren variaciones de tamaño a medida

que pasa el tiempo, con lo que de alguna manera deben de influir también en esos parámetros. Por esa razón, se calcularon los valores medios y los errores estándar de U_s , τ , τ_s y F_d para los diferentes instantes de tiempo desde $t=0,35$ s, instante en que se introducía el viento en la simulación, hasta $t=17,35$ s, fin de la simulación. Además, para una mejor comprensión de los coeficientes de resistencia C_d y $C_{d,s}$, se calculó el valor medio, mínimo y máximo. Para estudiar la deposición de las gota, se analizó la relación entre U_s , $C_{d,s}$ y τ_s con la altura de las gotas y el paso del tiempo, ya que a mayor altura es mayor también la exposición a las condiciones climatológicas, afectando al tamaño, velocidad etc. Para conocer la influencia de la altura y el paso del tiempo, se calculó el valor medio de U_s en cada instante sectorizado por alturas, cada 0,5 m desde los 3 m (altura a partir de la que empieza la acción del viento en el modelo) hasta los 7 m (por encima de esta altura no habían más gotas en la simulación). De igual manera se hizo para los parámetros $C_{d,s}$ y τ_s , aunque para $C_{d,s}$ se incluyeron también los valores mínimo y máximo. Para la velocidad U_s también se calcularon las velocidades medias del viento en cada tramo.

ii) Evaporación de las gotas

En cuanto a la evaporación, se usaron dos parámetros: el ratio de evaporación k_0 ($\mu\text{m}^2/\text{s}$), que se obtiene con la ecuación (37) y que estudia las variaciones del tamaño de gota respecto al tiempo, y t_{life} (s), definida por la ecuación (38) y que estima la duración de la gota antes de evaporarse completamente.

El ratio de evaporación se expresa matemáticamente como:

$$k_0 = q_0 \Delta T (1 + q_1 D) \quad (37)$$

Donde ΔT (°C) es la diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco, mientras que las variables q_0 ($\mu\text{m}^2/\text{sK}$) y q_1 (μm^{-1}) son dos parámetros que dependen entre otros factores de la temperatura, la humedad relativa y la propia ΔT . Estas variables se obtienen experimentalmente. Como no se disponía de estos tres parámetros, se usaron los valores estimados por Holterman (2003) para una temperatura ambiental de 20°C y una humedad relativa del aire del 50%, que se aproximaban a nuestros datos (22,3°C y 58,71%).

El ratio de evaporación se obtuvo calculando el promedio por alturas, de 3 a 7 m cada 0,5 m, en cada instante y también se calculó el tamaño medio de diámetros en cada altura y la velocidad media del viento.

Para determinar t_{life} la ecuación empleada fue:

$$t_{life} = \frac{2}{q_0 q_1^2 \Delta T} (q_1 D_0 - \ln(1 + q_1 D_0)) \quad (38)$$

Donde D_0 (μm) es el diámetro inicial de las gotas. Se estimó el valor de t_{life} para $t=0,35$ s, que era cuando las gotas se exponían al viento. Luego se comparó el número de gotas evaporadas al terminar la simulación con las predichas por la ecuación.

Balance final de masas y comparación con datos experimentales

En cada instante de la simulación también se podían obtener datos del número de gotas depositadas, evaporadas y que se habían fusionado, así como la

cantidad de caldo depositada en el suelo y el árbol y la cantidad evaporada. A partir de estos datos se calculó los porcentajes de las 1500 gotas o los porcentajes de caldo en los diferentes destinos. No obstante, hay que indicar que como las gotas van experimentando variaciones de volumen desde que salen al aire, no se puede estimar la cantidad depositada en la vegetación o que se pierde a partir del número de gotas que termina en cada sustrato, puesto que el volumen final de la gota será diferente. Es necesario conocer la masa total de agua que finaliza en cada nivel del dominio: vegetación, el suelo o el aire.

Del Fluent® también se puede obtener información sobre la cantidad total de agua que se deposita en el suelo y el árbol o abandonaba el dominio. A partir de estos datos se calculó el balance de masas total del tratamiento fitosanitario, es decir, la cantidad de caldo pulverizado que el modelo estimó que alcanzaba los diferentes niveles.

La deposición en la vegetación del primer árbol corresponde a las gotas que quedaron retenidas en el árbol sólido. Respecto a los otros árboles del modelo, como eran cuerpos porosos, las gotas no permanecían retenidas. Por ello, se consideró que las gotas se habían depositado en estos árboles cuando alcanzaban el tramo del suelo coincidente bajo estas copas.

Para la deriva atmosférica, se consideró la fracción de agua evaporada en el aire y las gotas que abandonaban el dominio por encima de los 5,0 m de altura, y. Se tomó esa altura porque es la que consideraron Garcerá *et al.* (2015) para estimar la deriva atmosférica.

Las gotas que se depositaron directamente en el suelo o que abandonaban el modelo por debajo de los 5,0 m fueron consideradas como pérdidas en el suelo.

El balance de masas se presentó en forma de porcentajes respecto al volumen total empleado, y se comparó con los resultados experimentales presentados por Garcerá *et al.* (2015).

9.3. Resultados y discusión

9.3.1. Análisis general del comportamiento de las gotas con el turboatomizador

A continuación se representa la posición de las gotas en la primera fase, que es cuando la única corriente de aire que interviene en el modelo proviene del ventilador (de $t=0,10$ s hasta $t=0,35$ s) (Figura 22). En el apartado 14.4 del anejo 2 se puede consultar con más detalle la información ligada a las gotas según su posición en cada instante.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

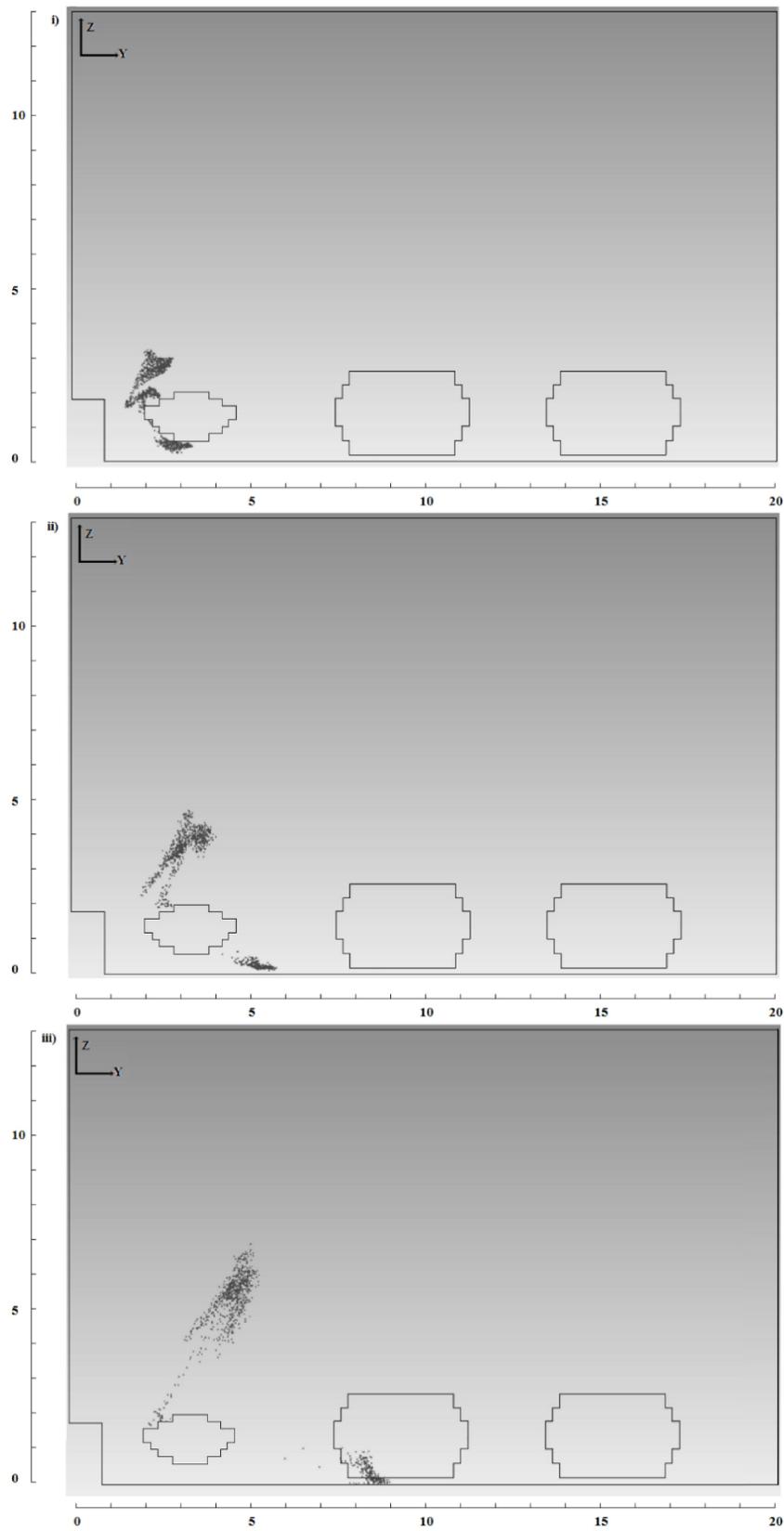


Figura 22. Posición de las gotas en los instantes $t=0,10$ s (i), $t=0,20$ s (ii) y $t=0,35$ s (iii).

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

La Tabla 6 muestra los valores de los distintos parámetros utilizados para analizar el comportamiento dinámico global de cada nube: centro de masas (Y_m , Z_m) y distancia al origen (Figura 20), velocidad del centro de masas (U_{my} , U_{mz}) y módulo U_m , momento lineal o cantidad de movimiento (P_y , P_z) y módulo P y energía cinética total (E).

Tabla 6. Valores de los parámetros asociados al comportamiento dinámico de cada nube.

	Nube 1			Nube 2		
	$t = 0,10$ s	$t = 0,20$ s	$t = 0,35$ s	$t = 0,10$ s	$t = 0,20$ s	$t = 0,35$ s
Y_m (m)	3,7	6,0	9,2	3,0	4,0	5,0
Z_m (m)	0,5	0,2	0,2	2,6	3,6	4,8
Distancia (m)	3,7	6,0	9,2	4,0	5,4	6,9
U_{my} (m/s)	21,3	24,5	18,2	11,0	8,1	6,1
U_{mx} (m/s)	-4,2	3,4	-0,4	11,0	9,6	6,4
U_m (m/s)	21,7	24,8	18,2	15,6	12,6	8,8
P_y (kg·m/s)	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$
P_z (kg·m/s)	$-6,6 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$-5,3 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$
P (kg·m/s)	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$
E (J)	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$

i) Gotas en $t=0,10$ s

En $t=0,10$ s, las gotas ya estaban siguiendo la trayectoria del aire saliente del equipo (Figura 22i). Como la corriente del ventilador se bifurcaba al enfrentarse al árbol sólido (Figura 18v del capítulo 8), las gotas se habían dividido en dos grupos o nubes: una bajo el árbol sólido y otro sobre la copa. En total había 1020 gotas en el aire (250 en la nube bajo el árbol), 450 gotas se habían depositado y 30 se habían evaporado (Figura 25 del epígrafe 9.3.3).

La nube 1 se formó a partir de las 250 gotas pulverizadas en la sección A80 de 0,6 y 0,8 m de altura (Figura 21ii) al ser atrapadas por el efecto de succión o Venturi producido por el estrechamiento de la corriente entre el suelo y el árbol sólido. Dicho efecto aumentó la velocidad del aire para compensar la pérdida de presión, alcanzando el centro de masas un módulo de la velocidad de 21,7 m/s (Tabla 6). La distancia horizontal que recorrieron las gotas respecto a la entrada A fue entre 1,9 y 3,0 m (Figura 26 del epígrafe 9.3.3) y la altura entre 0,2 y 0,8 m (Figura 27 del epígrafe 9.3.3), situándose el centro de masas de la nube 1 a 2,8 m de distancia horizontal de A y a 0.5 m de altura (Tabla 6).

A su vez, las gotas pulverizadas por encima de los 1,2 m sobre el suelo (secciones A140 a A180) se dirigieron hacia a la atmósfera (Figura 22i), siguiendo la corriente que pasaba por encima del árbol (Figura 18v), y formaron la nube 2. En centro de masas de la nube se situó a 2,1 m de distancia horizontal y a 2,6 m de altura (Tabla 6). Las gotas que alcanzaron mayor altura (3,2 m) fueron también las más alejadas de la entrada de aire A (hasta 2,5 m) mientras que las gotas situadas a menor altura (1,5 m) fueron las más próximas a la entrada A (1,1 m).

Las gotas entre 0,8 y 1,0 m de altura (A100 en la Figura 21ii) tenían una inclinación inicial horizontal (0°). Por lo tanto, salieron directamente hacia el árbol sólido, sin verse afectadas lo suficiente por los fenómenos de succión del aire de debajo del árbol, y en $t = 0,10$ s ya estaban atrapadas en el árbol (250 gotas) y no aparecían en pantalla (Figura 22i).

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Las gotas entre 1,0 y 1,2 m de altura (A120 en la Figura 21ii) estaban en una zona de transición. El árbol sólido se encontraba más próximo al ventilador, por lo que a esta altura era donde se producía la bifurcación de la corriente. En este tramo el carácter de las gotas se volvía más impredecible. Con lo cual, la sensibilidad a las condiciones iniciales era mayor que en otros tramos. El ángulo inicial de las gotas era positivo, pero el árbol estaba más cerca del equipo que en cualquier otra sección. Por lo tanto, en $t = 0,10$ s una parte de estas gotas se unieron a la nube 2 (50 gotas), y el resto (200) quedaron atrapadas en el árbol. Por tanto, las condiciones iniciales de la gota en el modelo perdían influencia cuanto más cerca estaba la vegetación al equipo.

En cuanto al nivel de turbulencia de las gotas se observó que ambas nubes presentaban valores similares, con valores medios de Reynolds de 67 en la nube 1 y de 64 en la nube 2. No obstante, en la nube 2 se localizaron gotas con valores máximos de alrededor de 294 (Figura 29 del epígrafe 9.3.3). Estas gotas con un carácter menos laminar coincidían con las gotas que presentaban un mayor diámetro.

Respecto al tamaño de las gotas en $t = 0,10$ s se obtuvo que las gotas de diámetro geométrico mínimo de $1 \mu\text{m}$ se habían evaporado (la simulación estimó 30 gotas evaporadas) o depositado en el árbol, siendo el nuevo diámetro mínimo de $5 \mu\text{m}$. El diámetro geométrico medio era menor respecto al inicial ($350 \mu\text{m}$) pero diferente en ambas nubes, en la nube 1 fue de $187 \mu\text{m}$ mientras que en la nube 2 de $214 \mu\text{m}$. El diámetro geométrico máximo no varió ($444 \mu\text{m}$) (Figura 30 del epígrafe 9.3.3).

En la nube 1, las gotas de mayor tamaño se correspondían con las más alejadas del equipo y las que tenían el módulo de velocidad más alto. En la nube 2, las gotas más grandes eran las más cercanas a la zona de influencia del vórtice sobre la copa (Figura 18v) y de los pequeños reflujos que se producían en las zonas angulosas del árbol sólido debido al gradiente de presiones en el aire. Estos fenómenos tenían un efecto de rozamiento con la corriente del aire del ventilador, de tal forma que las gotas más próximas a la copa presentaban una componente vertical U_{dz} menor (epígrafe 14.4.3 del anejo 2).

Los diámetros volumétricos estimados en ambas nubes fueron iguales con valores de $Dv10$, $Dv50$ y $Dv90$ de 191 μm , 367 μm y 411 μm respectivamente (Figura 31 del epígrafe 9.3.3). Los diámetros geométricos medios de las nubes estaban más cerca de $Dv10$ que de $Dv50$. Por lo tanto, las gotas habían reducido su tamaño de tal forma que, en cada nube, las gotas que tenían un tamaño igual o inferior al diámetro geométrico medio solamente representaban una fracción del volumen próxima al 10%.

ii) Gotas en $t=0,20$ s

En $t = 0,20$ s, el número de gotas en el aire era de 995 gotas, 35 gotas menos respecto a $t = 0,10$ s. De las 35 gotas, 30 se habían evaporado y 5 se habían quedado retenidas en el primer árbol (Figura 25).

La nube 1 se encontraba entre el primer y el segundo árbol (Figura 22ii) con el centro de masas a una distancia horizontal de A de 5,1 m y a una altura de 0,2 m (Tabla 6). La anchura de la nube estaba entre 4,0 y 5,4 m de distancia

respecto a la entrada de aire A, y la altura era de 0,5 m, situándose entre 0.1 m de altura mínima y 0,6 m de altura máxima (Figuras 26 y 27). La velocidad de las gotas había aumentado (módulo medio de la velocidad de las gotas de 26.2 m/s (Figura 28) y módulo de la velocidad del centro de masas de 24,8 m/s (Tabla 6)) debido a que la velocidad del flujo del aire era mayor después de pasar por el estrechamiento. Las gotas se desplazaban de manera paralela al suelo debido a la corriente horizontal del aire.

La nube 2 alcanzó los 4,7 m de altura, y se extendía entre los 1,5 y 3,5 m de distancia respecto a la entrada A (Figuras 26 y 27), estando el centro de masas a una distancia de A de 3,1 m y a una altura de 3,6 m (Tabla 6). La nube adoptó una forma “parabólica”, al igual que la corriente de aire que se dirigía a la atmósfera (como se puede apreciar por los valores de las velocidades del aire en el epígrafe 14.3.1 del anejo 2), donde las gotas estaban más concentradas por el centro (zona de mayor velocidad de la corriente) que por los extremos.

La velocidad del centro de masas de la nube 2 se redujo, siendo su valor fue de 12,6 m/s (Tabla 6). Las gotas con mayor velocidad se localizaban en el centro de la corriente del turboatomizador, donde la velocidad del aire era mayor (epígrafe 14.3.1).

Pese a las diferencias en los módulos de velocidad entre las dos nubes, el nivel de turbulencia entre ambas nubes seguía siendo similar, número medio de Reynolds de 34 en la nube 1 y de 38 en la nube 2 (Figura 29), lo que implica que el carácter de las gotas era muy laminar. Los valores eran menores que en $t = 0,10$ s. Como el número de Reynolds es directamente proporcional al diámetro

geométrico de la gota, en ambas nubes las gotas de mayor tamaño coincidían con las que presentaban un Reynolds mayor.

Entre $t=0,10$ s y $t=0,20$ s, no se produjeron diferencias importantes en cuanto a tamaños de las gotas. Los diámetros geométricos entre ambas nubes eran similares. Los diámetros oscilaban entre 4 y 444 μm , siendo el diámetro medio en la nube 1 de 196 μm (9 μm más que en $t = 0,10$ s) y de 220 μm en la nube 2 (6 μm más) (Figura 30).

Los diámetros volumétricos tampoco presentaban diferencias respecto a $t = 0,10$ s (Figura 31). Los diámetros geométricos medios seguían siendo próximos a los valores de $Dv10$.

iii) Gotas en $t=0,35$ s

El instante $t = 0,35$ s marcaba en la simulación el límite entre la influencia del turboatomizador y el viento. En la simulación quedaban 950 gotas en el aire (45 gotas menos que en $t = 0,20$ s). Hasta este instante en el primer árbol se habían depositado 460 y en el segundo árbol 20 gotas y sobre el suelo 10. El número de gotas evaporadas totales no había variado respecto a $t = 0,20$ s (Figura 25).

Las gotas depositadas en el segundo árbol o el suelo procedían de la nube 1 que se encontraba a la altura del segundo árbol (Figura 22iii) con el centro de masas a una distancia de A de 8,3 m y a una altura 0,2 m (Tabla 6). El segundo árbol, que era poroso, produjo un gradiente de velocidades que afectó de manera diferente a cada gota y modificó la forma de la nube respecto a $t = 0,20$ s. La nube

era más ancha (1,6 m), situándose entre los 7,0 m hasta los 8,6 m de distancia respecto a la entrada A. También era más alta (0,9 m) entre una altura mínima de 0,1 m y una altura máxima de 1.0 m (Figuras 26 y 27). Por otra parte, las gotas presentaban mayor tamaño a medida cuanto más lejos estaban de la entrada del aire y más cerca del suelo.

El modulo medio de la velocidad de centro de masas de la nube 1 se redujo a 18,2 m/s (Tabla 6), así como el módulo medio de la velocidad de las gotas a 14.1 m/s (Figura 28). La diferencia entre ambos valores había aumentado respecto a $t = 0.10$ s. Esto podría explicarse a que el centro de masas estaba situado en la zona donde las gotas presentaban un mayor módulo respecto al resto. Los módulos en la nube 1 variaban entre 6,9 y 22,9 m/s. Todas las gotas de esta nube presentaban una componente vertical de la velocidad en sentido negativo (epígrafe 14.4.3).

La nube 2 seguía teniendo una forma “parabólica” aunque asimétrica (Figura 22iii), siguiendo el perfil de velocidades de la corriente de aire del ventilador (epígrafe 14.3.1). Su centro de masas estaba situado a una distancia de A de 4.1 m y a una altura de 4,8 m (Tabla 6). La anchura de la nube era mayor que en $t = 0,20$ s (3,7 m) y estaba entre 1,8 m y 5,5 m de distancia a la entrada A. La altura de la nube también (4,1 m), situándose entre 2,8 m y 6,9 m (Figuras 26 y 27). Las gotas más grandes se situaban en la rama inferior de la parábola, la más próxima al suelo, mientras que las gotas de menor tamaño se situaban en la rama superior.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Las gotas de la nube 2 más cercanas al centro de la corriente del aire tenían mayor velocidad y ganaban altura respecto a las gotas de los extremos. El módulo medio de la velocidad de las gotas era de 13,7 m/s (Figura 28) y el del centro de masas de la nube de 8,8 m/s (Tabla 6).

El número de Reynolds en ambas nubes aumentó, 160 en la nube 1 y 167 en la nube 2 (Figure 29). En la nube 1 podría explicarse porque las gotas acababan de atravesar un vórtice que hay sobre la copa del primer árbol (Figura 18v). En la nube 2, la razón podría deberse a la variación de velocidades al entrar en el cuerpo poroso y/o por las gotas que seguían la corriente del ventilador en el espacio entre la copa y el suelo. Las gotas generalmente presentaban un mayor número de Reynolds cuanto más cerca estaban del centro de la corriente del aire, de modo que las gotas de la nube 2 entre 6,0 y 6,3 m de altura, que estaban muy alineadas con el centro de la corriente, donde mayor era la velocidad del aire, presentaron un número de Reynolds medio de 193. Las gotas con mayor número de Reynolds coincidían con las de mayor tamaño.

El diámetro geométrico máximo en ambas nubes seguía siendo de 444 μm y el mínimo era de 9 μm . No obstante, el diámetro geométrico medio era de 165 μm (29 μm menos que en $t = 0,20$ s) en la nube 1 y de 208 μm en la nube 2 (12 μm menos) (Figure 30). La reducción del valor del diámetro medio en la nube 1 fue mayor seguramente porque se habían depositado hasta 30 gotas con diámetros superiores a 250 μm .

La reducción de los diámetros volumétricos fue también más intensa en la nube 1 que en la 2. $Dv10$, $Dv50$ y $Dv90$ en la nube 1 fueron de 172, 281 y 389 μm

respectivamente (Figura 31), lo que suponían descensos de 19, 86 y 22 μm . En cambio, en la nube 2 los diámetros volumétricos estimados fueron de 194, 346 y 411 μm respectivamente. $Dv10$ y $Dv50$ se diferenciaban en 3 y 21 μm respecto a $t=0,10\text{s}$, mientras que el $Dv90$ seguía siendo el mismo. Los diámetros geométrico medios seguían estando más próximos a $Dv10$.

En cuanto a la temperatura de las gotas, el valor medio se mantuvo en 17°C en los tres instantes diferentes. Las gotas aumentaron 2 grados de media su temperatura cuando salieron al aire, seguramente debido a la energía cinética inicial y al rozamiento de las gotas con el entorno. Los valores más altos registrados fueron de 19°C en $t=0,35\text{ s}$ y coincidieron con las gotas que formaban parte de las estelas de las nubes 1 y 2, que tenían menor velocidad respecto al resto de la nube, por lo que el tiempo de exposición al aire y la influencia de la temperatura del entorno era mayor.

La reducción de los diámetros geométricos de gota entre $t=0,10\text{ s}$ y $t=0,35\text{ s}$, con la consiguiente pérdida de masa y la presencia de fuerzas externas como el rozamiento del aire, podría ser la razón de que disminuyera la cantidad de movimiento (un descenso de $3,2 \cdot 10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m/s}$ en la nube 1 y $9,8 \cdot 10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m/s}$ en la nube 2) y la energía cinética total ($3,9 \cdot 10^{-4}\text{ J}$ en la nube 1 y $9,7 \cdot 10^{-4}\text{ J}$ en la nube 2) (Tabla 6).

9.3.2. Análisis general del comportamiento de las gotas con el viento

Antes de comentar las principales características físicas en la segunda fase, se representa un esquema del nuevo comportamiento del flujo en contraste cuando

el aire procedía del turboatomizador (Figura 23). Se puede observar como el tramo de transición entre la zona con velocidad constante 0,1 m/s y el viento va haciéndose más grande a medida que el viento superaba más obstáculos.

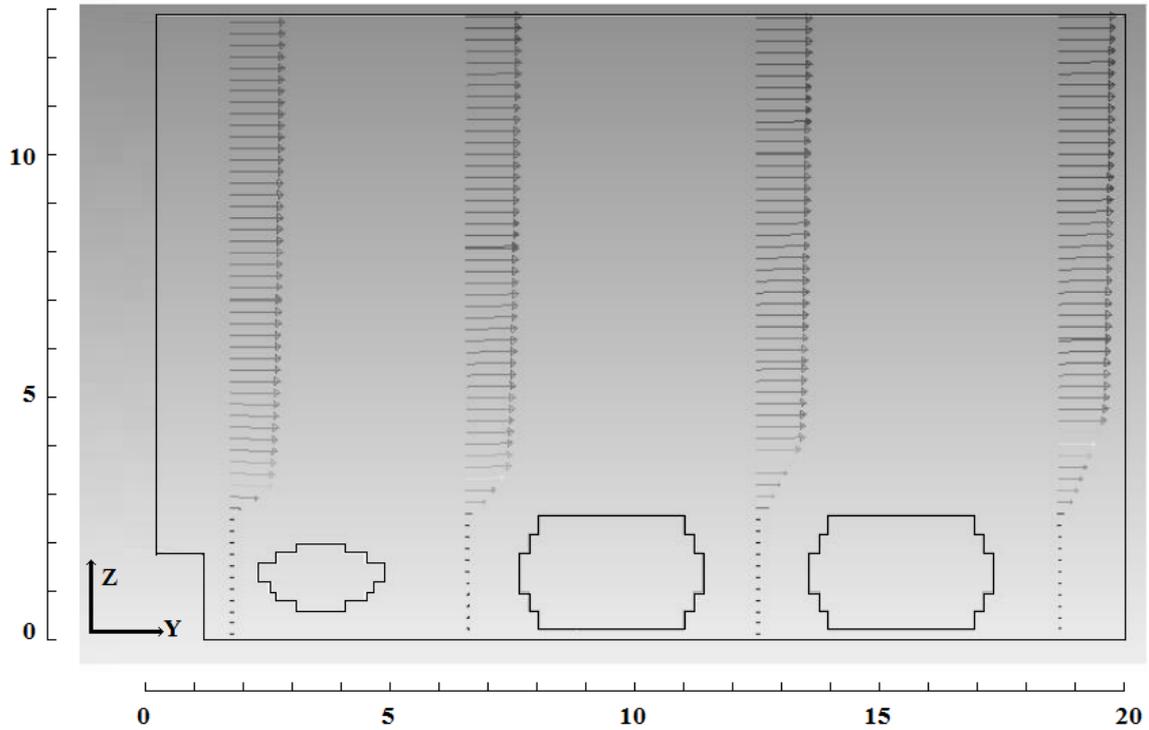
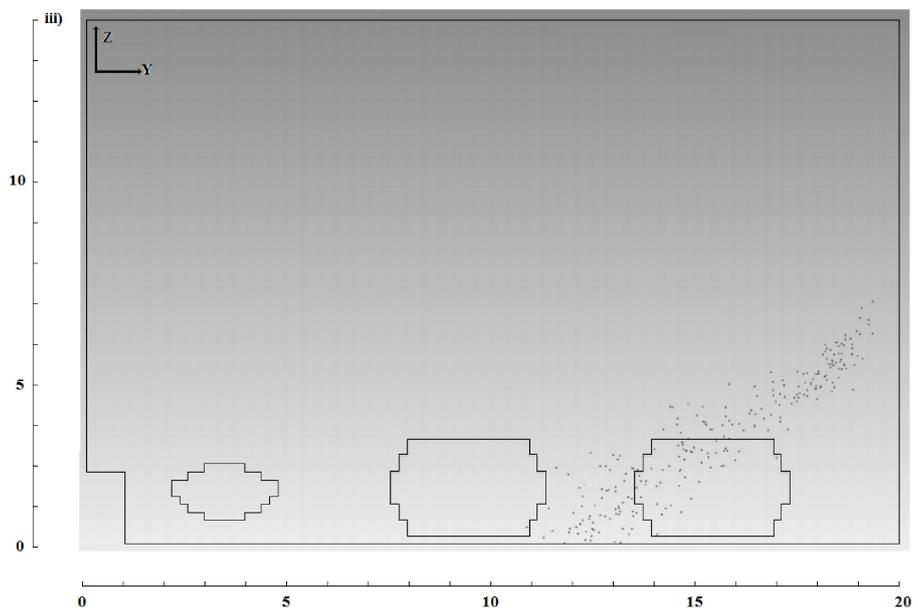
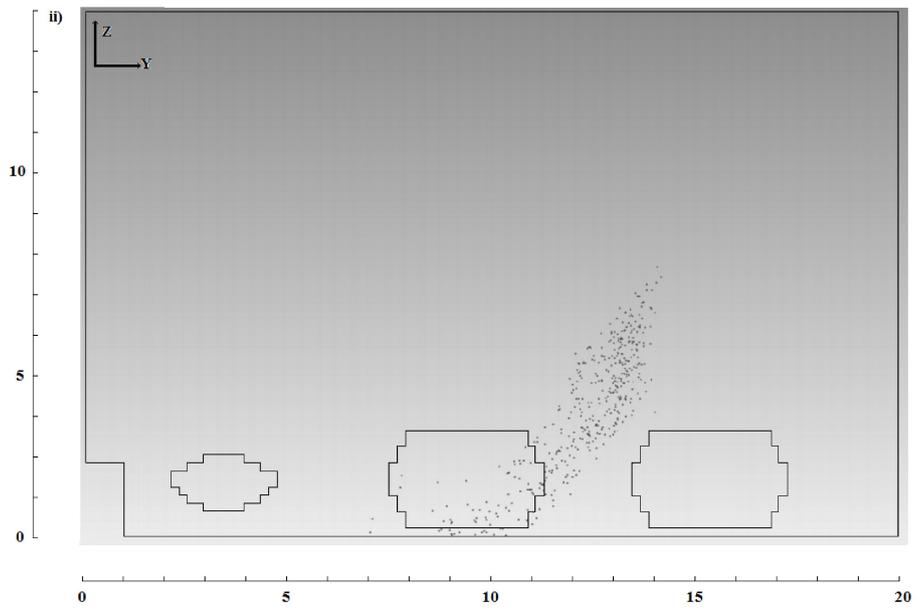
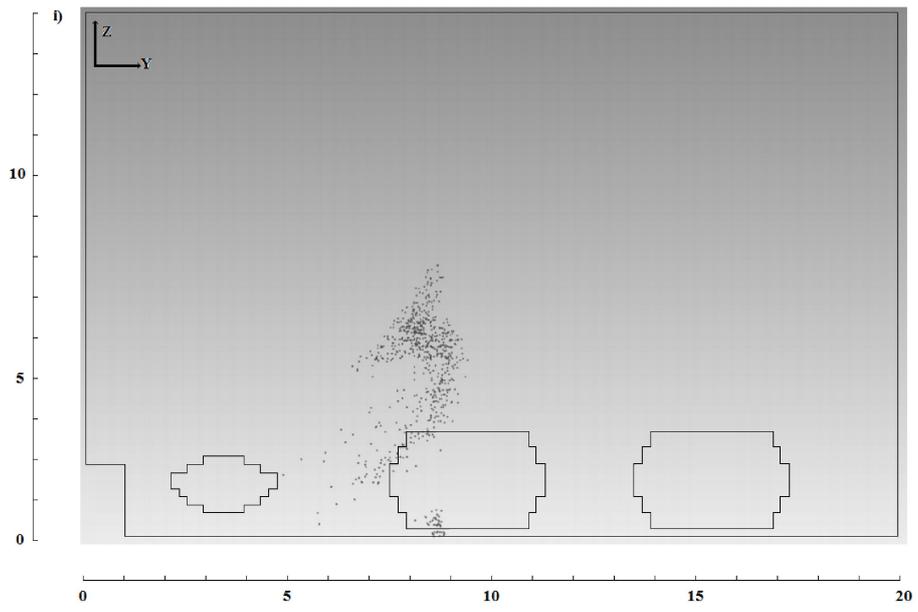


Figura 23. Perfiles de velocidades del aire en la segunda fase (viento).

A continuación, se representan la posición de las gotas durante la segunda fase en los diferentes instantes $t=2,35$ s, $t=5,35$ s, $t=8,35$ s, $t=11,35$ s y $t=17,35$ s (Figura 24). En el apartado 14.4 del anejo 2 se puede consultar con más detalle la información ligada a las gotas según su posición en cada instante.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo



Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

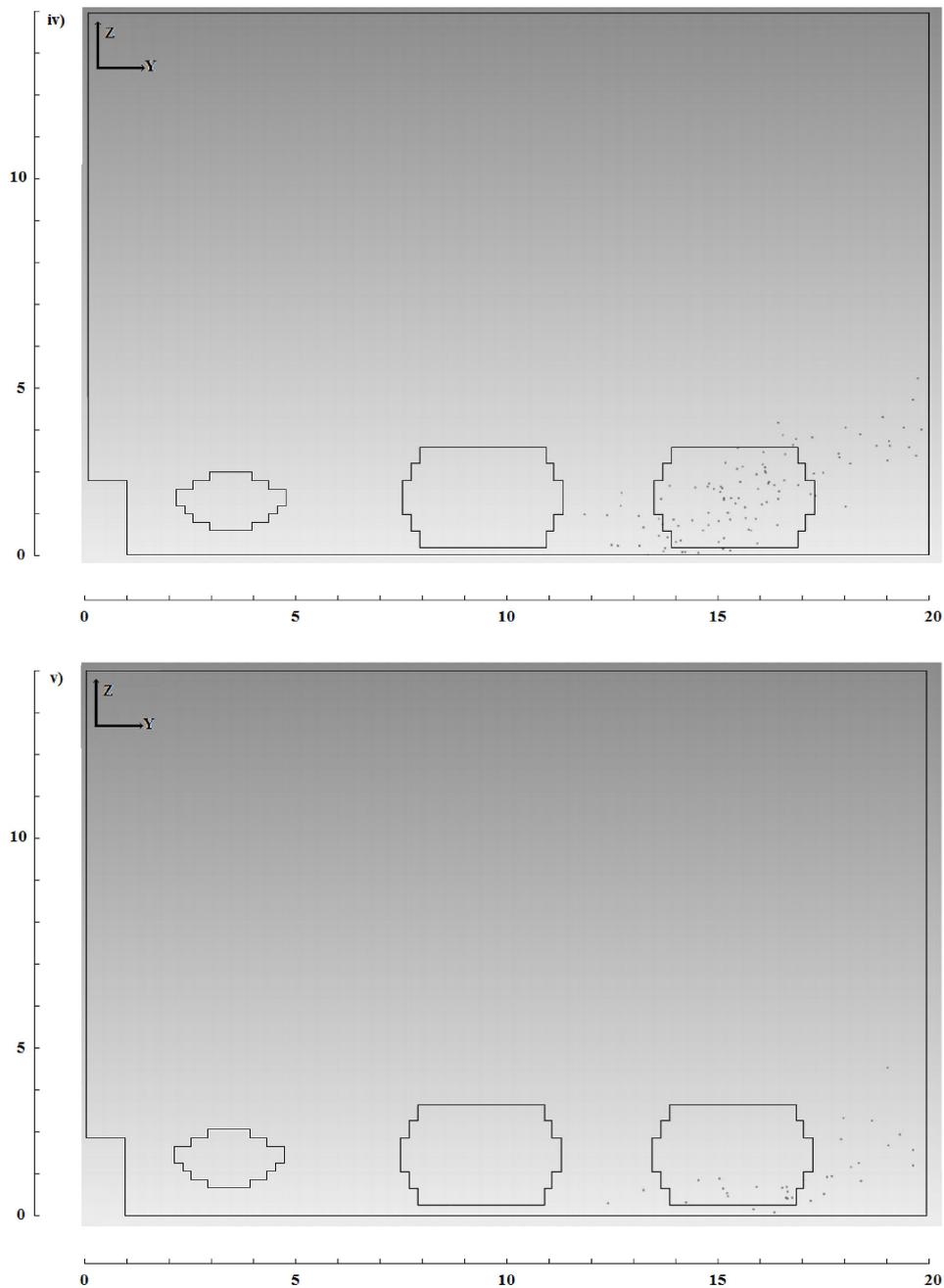


Figura 24. Posición de las gotas en los instantes $t=2,35$ s (i), $t=5,35$ s (ii) y $t=8,35$ s (iii), $t=11,35$ s (iv) y $t=17,35$ s (v).

La Tabla 7 muestra los valores de los distintos parámetros utilizados para ver el comportamiento dinámico global de cada nube con el viento.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Tabla 7. Valores de los parámetros asociados al comportamiento dinámico de cada nube.

	Nube 1		Nube 2				
	$t=2,35$ s	$t \geq 5,35$ s	$t=2,35$ s	$t=5,35$ s	$t=8,35$ s	$t=11,35$ s	$t=17,35$ s
Y_m (m)	9,2	-	8,5	10,5	14,2	15,6	16,9
Z_m (m)	0,2	-	4,3	1,7	1,4	1,1	0,6
Distancia (m)	9,2	-	9,5	10,6	14,3	15,6	16,9
U_{my} (m/s)	0,1	-	1,4	0,3	0,2	0,1	0,1
U_{mx} (m/s)	-0,3	-	-0,7	-0,9	-0,5	-0,4	-0,1
U_m (m/s)	0,3	-	1,6	0,9	0,6	0,4	0,2
P_y (kg·m/s)	$4,6 \cdot 10^{-8}$	-	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$6,8 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$
P_z (kg·m/s)	$-1,3 \cdot 10^{-6}$	-	$-9,7 \cdot 10^{-6}$	$-1,2 \cdot 10^{-6}$	$-1,7 \cdot 10^{-7}$	$-2,8 \cdot 10^{-8}$	$-3,5 \cdot 10^{-10}$
P (kg·m/s)	$1,3 \cdot 10^{-7}$	-	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-10}$
E (J)	$1,9 \cdot 10^{-8}$	-	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^{-8}$	$8,3 \cdot 10^{-9}$	$5,2 \cdot 10^{-11}$

i) Gotas en $t=2,35$ s

En $t = 2.35$ s (Figura 24i), quedaban en el modelo 670 gotas (220 gotas menos que en $t = 0,35$ s). 35 gotas se habían depositado en el primero árbol, siendo el total acumulado en dicho árbol de 495, y 145 en el segundo árbol, siendo el total acumulado 165 en el segundo árbol). Las gotas depositadas en el primer árbol procedían de la nube 2, mientras que las del segundo árbol de la nube 1. El número total de gotas retenidas en el suelo no había cambiado (10) y el número de gotas evaporadas era de 160 (100 más respecto a $t = 0,35$ s) (Figure 25).

En la nube 1 sólo quedaban 40 gotas y seguía en el segundo árbol, seguramente retenida por la resistencia porosa del árbol y la ausencia de la corriente de aire del ventilador, estando su centro de masas a 8,1 m de distancia horizontal respecto a A y a 0,2 m de altura (Tabla 7). Esta situación afectó al

módulo medio de las velocidades (0,2 m/s frente a 14,1 en $t = 0,35$ s) (Figura 28) y el módulo de la velocidad del centro de masas (0,3 m/s (Tabla 7) frente a 18,2 m/s. Las dimensiones de la nube 1 iban desde los 0,1 hasta los 0,6 m de altura, y desde los 8,0 hasta los 9,0 m de distancia de la entrada A (Figuras 26 y 27) lo que supuso una reducción de la altura en 0,3 m y de la anchura en 0,6 m respecto a $t = 0,35$ s.

El aspecto parabólico de la nube 2 se había deformado respecto a $t = 0,35$ s (Figura 24iii) debido seguramente a la ausencia de la corriente del turboatomizador y a la única influencia de la fuerza del viento. Las gotas del extremo superior en $t = 0,35$ s se había desplazado hacia el centro de la parábola, estando el centro de masas de la nube a 7,6 m de distancia horizontal de A y a 4,3 m de altura (Tabla 7) respecto a la entrada A. La extensión de la nube 2 era superior que en $t = 0,35$ s e iba desde 4,4 m hasta 9,0 m de distancia de la entrada A. La altura máxima alcanzada seguía siendo similar a la alcanzada en $t = 0,35$ s (6,8 m frente a los 6,9 m de $t = 0,35$ s), aunque la altura mínima era menor (1,3 m menos que en $t = 0,35$ s) (Figuras 26 y 27).

Las gotas de la nube 2 se movían con un módulo medio de 1,8 m/s (Figura 28) siendo similar a la del módulo de la velocidad del centro de masas de 1,6 m/s (Tabla 7), lo que suponía una diferencia de 11,9 m/s respecto a $t = 0,35$ s.

El número de Reynolds medio en la nube 1 fue de 3 y en la nube 2 de 16, disminuyendo considerablemente frente al valor de 160 y 167 en $t = 0,35$ s respectivamente (Figure 29). La ausencia de las corrientes de aire generadas por el ventilador seguramente fue la principal razón de dicha disminución. Dado que en

la simulación se trabajó siempre con el mismo perfil de entrada del viento, sería importante investigar cómo se comportarían las gotas con vientos con otros perfiles y características.

Ambas nubes tenían menores tamaños de gota con respecto al instante anterior, aunque con una distribución diferente. En la nube 1 presentaba un diámetro geométrico medio de $52 \mu\text{m}$ ($113 \mu\text{m}$ menor respecto a $t = 0.35 \text{ s}$) con un valor máximo de $67 \mu\text{m}$ ($377 \mu\text{m}$ menos) y un mínimo de $14 \mu\text{m}$ ($5 \mu\text{m}$ más) (Figura 30). En cambio, en la nube 2, el diámetro geométrico medio era de $200 \mu\text{m}$ ($8 \mu\text{m}$ menos que en $t = 0,35 \text{ s}$), siendo $14 \mu\text{m}$ ($5 \mu\text{m}$ más) y $439 \mu\text{m}$ ($5 \mu\text{m}$ menos) los valores mínimos y máximos respectivamente. Estas diferencias entre las nubes se debían a que hasta 165 gotas (de las 230 que habían en $t=0,35 \text{ s}$) de la nube 1 se habían depositado en la zona del segundo árbol entre $t = 0,35$ y $t = 2,35 \text{ s}$, correspondientes a diámetros geométricos por encima de los $67 \mu\text{m}$.

Los diámetros volumétricos $Dv10$, $Dv50$ y $Dv90$ de la nube 1 fueron 25, 56 y $67 \mu\text{m}$ respectivamente (Figura31), y próximos al diámetro geométrico mínimo, medio y máximo, seguramente debido a la disminución del número de gotas y del volumen. Mientras, en la nube 2, los diámetros volumétricos fueron de 216, 343 y $407 \mu\text{m}$ respectivamente. El diámetro geométrico medio estaba por debajo de $Dv10$, luego las gotas iguales o por debajo del diámetro geométrico medio no llegaban a formar el 10% del volumen.

ii) Gotas en $t=5,35$ s

En $t = 5.35$ s, quedaban 430 gotas en el aire (240 gotas menos que en $t = 2,35$ s) (Figura 24ii). El número de gotas retenidas en el primer árbol no aumentó (495). El total de gotas acumuladas en el segundo árbol fue de 290 gotas (125 más que en $t = 2,35$ s), y en el suelo de 50 (40 más). 235 gotas se habían evaporado desde que las gotas salieron al aire (75 más que en $t = 2,35$ s) (Figura 25). Ya no había dos nubes de gotas en el dominio. Las gotas de la nube 1 se habían evaporado o depositado sobre el segundo árbol. Por tanto, las gotas que continuaban en el modelo procedían de la nube 2.

La nube se encontraba entre el segundo y tercer árbol con el centro de masas a 9,6 m de distancia horizontal respecto a A y a 1,7 m de altura (Tabla 7). La extensión de la nube en anchura era de 7,1 m, frente a los 4.6 m en $t = 2,35$ s, e iba desde 6,6 m a 13,7 m de distancia respecto a la entrada A, y en altura desde 6,7 m de altura máxima, muy similar a $t = 2,35$ s, a 0,1 m de altura mínima (Figuras 26 y 27). También se observa que la nube estaba inclinada, las gotas más altas se veían más empujadas por el viento, con lo que su desplazamiento horizontal era mayor que las gotas próximas al suelo donde la velocidad era menor (epígrafe 14.4.3).

El módulo de velocidad de las gotas siguió disminuyendo, siendo de 1,3 m/s (Figura 28) al igual que el módulo de la velocidad del centro de masas cuyo valor fue de 0,9 (Tabla 7). Las gotas por debajo de 5,0 m tenían una componente vertical de la velocidad negativa. Cuanto mayor era el diámetro de la gota, más grande era la componente vertical sobre la horizontal y viceversa.

El número de Reynolds medio era de 8 (Figura 29). Este valor era mayor en las gotas de mayor diámetro, hasta un número máximo de 29. No obstante, con estos valores se podría señalar que las gotas seguían presentando un comportamiento laminar respecto al aire.

Los diámetros geométricos mínimo, medio y máximo fueron de 16, 153 y 321 μm respectivamente (Figura 30). El diámetro geométrico mínimo solo había variado 2 μm , pero el diámetro medio y máximo había disminuido 47 y 118 μm respectivamente.

Los diámetros volumétricos $Dv10$, $Dv50$ y $Dv90$ fueron 144, 224 y 289 μm respectivamente (Figura 31), y fueron inferiores respecto a $t = 2,35$ s (70, 119 y 118 μm de diferencia respectivamente) debido a la disminución del número de gotas y a la reducción de tamaños.

iii) Gotas en $t=8,35$ s

En este instante quedaban en el modelo 245 gotas (185 gotas menos que en $t = 5,35$ s) (Figura 24iii). Las gotas depositadas en el segundo árbol ascendían hasta 380 (90 más que en $t = 5,35$ s), en el suelo a 100 (50 más) y evaporadas a 280 (45 más) (Figura 25).

Las gotas estaban distribuidas entre la segunda calle y los límites del dominio con el centro de masas de la nube a 13,3 m de distancia respecto a A y 1,4 m de altura (Tabla 7). La extensión de la nube en anchura era de 8,4 m, 1,3 m mayor que en $t = 5,35$ s, situándose entre 10,4 m y 18,9 m de distancia horizontal respecto a la entrada A (Figura 26), por lo que a medida que transcurría el

tiempo la dispersión de las gotas aumentaba. La altura máxima alcanzada por las gotas era de 6,0 m (Figura 27).

La velocidad de la nube se redujo respecto al instante anterior, siendo el módulo medio de la velocidad de las gotas de 0,9 m/s (Figure 28) y el del centro de masas de 0.6 m/s (Tabla7). A medida que las gotas tenían más altura, el módulo de la velocidad era mayor, hasta un máximo de 1,8 m/s.

El número medio de Reynolds se redujo a 4 (Figura29), siendo mayor en las gotas más cercanas al suelo, que se correspondía con las gotas más grandes.

Los diámetros geométricos mínimo, medio y máximo fueron de 7, 113 y 241 μm respectivamente (Figura 30), lo que representaba una diferencia de 9, 50 y 80 μm menos que en $t = 5,35$ s.

Los diámetros volumétricos $Dv10$, $Dv50$ y $Dv90$ se redujeron hasta 110, 154 y 197 μm respectivamente (Figura31). El diámetro geométrico medio estaba como en los instantes anteriores más próximo a $Dv10$, pero se redujeron las diferencias respecto a $Dv50$ (40 μm de diferencia, frente a los 71 μm en $t=5,35$ s y los 143 μm en $t = 2,35$ s). La pérdida de volumen y la menor presencia de gotas en el aire fueron la causa de ello.

iv) Gotas en $t=11,35$ s

En $t = 11,35$ s, quedaban 100 gotas en el modelo (145 gotas menos que en $t = 8,35$ s) (Figura 24iv). El total de gotas depositadas en el segundo árbol era de 390 (10 más que en $t = 8,35$ s) y en el suelo 150 (50 más que en $t = 8,35$ s). 80 gotas abandonaron el dominio por el empuje del viento, 15 de ellas por encima de

los 5,0 m, lo que se consideró como deriva atmosférica. Las gotas totales evaporadas eran 285 (5 más que en $t = 8,35$ s) (Figura 25).

La nube seguía estando inclinada respecto al suelo (Figura 24iv) y tenía el centro de masas a una distancia horizontal de A de 14,7 m y a una altura de 1,1 (Tabla 7) entre la segunda calle y los límites del dominio. La altura de la nube de gotas decreció y no se observó ninguna gota por encima de los 4,2 m aproximadamente (Figura 27). La anchura de la nube se redujo en 0,4 m respecto a $t = 8,35$ s situándose entre 11,4 m y 19,4 m de distancia horizontal respecto a la entrada A (Figura 26).

El módulo medio de la velocidad de las gotas y del centro de masas se redujo a 0,4 m/s (Tabla 7). Los módulos eran mayores en las gotas situadas a mayor altura, hasta alcanzar un módulo máximo de 1,3 m/s (Figura 28).

Las gotas prosiguieron con un carácter muy laminar, con un valor medio de Reynolds de 3 (Figura 29). Esto indicaba que los efectos viscosos del aire sobre las gotas iban ganando mayor efecto sobre la inercia conforme pasaba el tiempo.

En cuanto a los diámetros geométricos, los valores mínimo, medio y máximo siguieron reduciéndose hasta 3, 108 y 153 μm respectivamente (Figura 30).

Los diámetros volumétricos $Dv10$, $Dv50$ y $Dv90$ disminuyeron hasta 8, 120 y 146 respectivamente (Figura 31). Las diferencias entre los diámetros geométricos y volumétricos se habían reducido enormemente, de modo que la

diferencia máxima era de 12 μm entre el diámetro geométrico medio y D_{v50} lo que sugiere que los tamaños de las gotas que formaban el volumen estaban más repartidos que en los instantes anteriores.

La temperatura media de las gotas fue de 16°C, un grado menos respecto a la temperatura media que se había mantenido igual desde $t = 0,10$ s.

v) Gotas en $t=17,35$ s

En $t = 17,35$ s, solo quedaban 20 gotas en el aire (80 gotas menos que en $t = 11,35$ s y 930 menos que en $t = 0,35$ s, el último instante donde aún soplaba el ventilador) (Figura 24v). El total de gotas depositadas en el segundo árbol era de 435 (10 más que en $t = 8,35$ s) y en el suelo 160 (10 más). Un total de 90 gotas abandonaron el dominio (10 más) y 300 se evaporaron (15 más) (Figura 25).

La nube se encontraba entre la segunda calle y los límites del dominio. El centro de masas estaba a una distancia de la entrada de aire A de 16,0 m y a una altura de 0,6 m (Tabla 7). La altura máxima a la que estaban las gotas era de 3.5 m (Figura27) mientras que las más próximas a la entrada A a 12,0 m mientras que las más alejadas a 19,2 m (Figura26).

La velocidad de las gotas continuó descendiendo siendo su módulo medio y el del centro de masas de 0.2 m/s (Figure 28 y Tabla7). Desde $t = 0,35$ s, el módulo se había reducido 13,5 m/s.

El número de Reynolds medio era inferior a 1 (Figure 29), lo que destacaba el dominio absoluto del efecto de la viscosidad del aire sobre el carácter de la gota. En $t = 0,35$ s era 167, por lo que ante la ausencia de la corriente del

equipo y la sólo presencia del viento, las gotas perdían inercia y su comportamiento se regía por la resistencia viscosa del aire.

El diámetro geométrico mínimo, medio y máximo era de 10, 46 y 99 μm respectivamente (Figura 30). Las diferencias con $t = 0,35$ s eran de 1, 162 y 345 μm .

Los diámetros volumétricos $Dv10$, $Dv50$ y $Dv90$ eran 33, 57 y 94 μm respectivamente (Figura31), y sus diferencias con $t=0,35$ s de 161, 289 y 305 μm . Las acciones externas sobre las gotas, como el rozamiento del viento o la pérdida de masa por evaporación eran constantes y las gotas experimentaban una progresiva pérdida de tamaño. El reducido tamaño de las gotas junto sus velocidades inferiores a las del viento fueron la causa más probable de que las gotas mostraran un comportamiento errático y sin una dirección concreta.

La reducción de la velocidad junto a la reducción del número de gotas y de sus tamaños desde $t = 2,35$ s y $t = 17,35$ s, afectó al momento lineal y la energía cinética total, disminuyendo que en la nube 1 hasta un $1,3 \cdot 10^{-7}$ $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ y $1,9 \cdot 10^{-8}$ J respectivamente y en la nube 2 hasta $4,3 \cdot 10^{-10}$ $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ y $5,2 \cdot 10^{-11}$ J (Tabla 7). Las 20 gotas que quedaron en el aire en $t = 17,35$ s (Figura 24v) no llegaron a depositarse y se evaporaron.

9.3.3. Evolución global de los parámetros principales de las gotas

A continuación, se resume la evolución global de los parámetros principales empleados en este trabajo para resumir las características generales de las gotas en cada instante: posición (Figura 25), altura (Figura 26), distancia a la

salida A de aire (Figura 27), módulo de la velocidad (Figura 28), número de Reynolds (Figura 29), diámetros geométricos (Figura 30) y volumétricos (Figura 31) desde $t = 0,10$ s a $t = 17,35$ s.

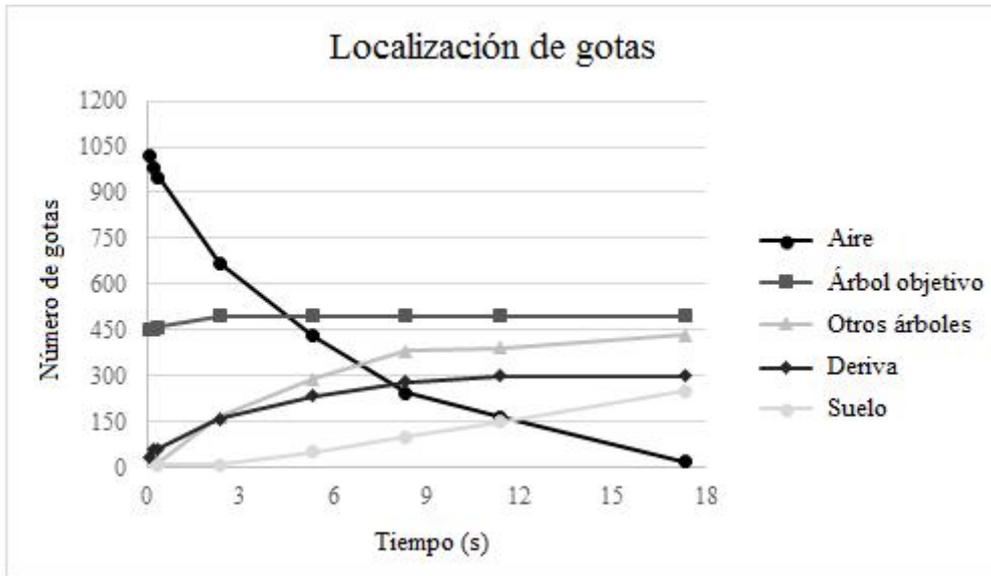


Figura 25. Localización de las gotas a lo largo de la simulación.

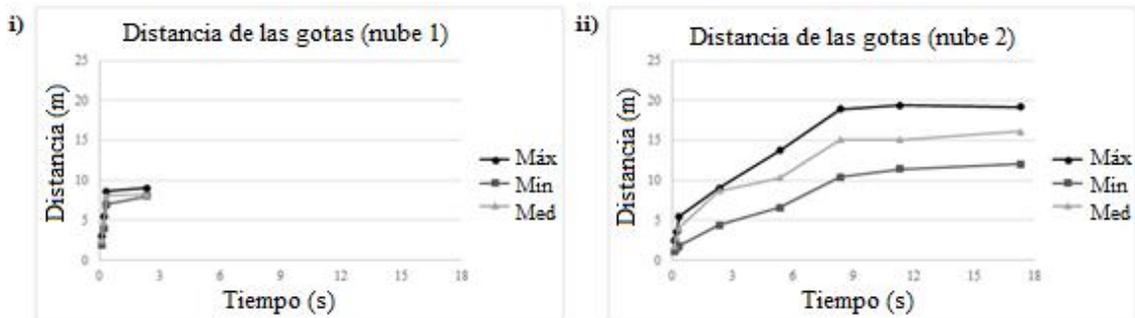


Figura 26. Distancia máxima, mínima y media de las gotas respecto a la entrada de aire A en cada nube. Distancia en m.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

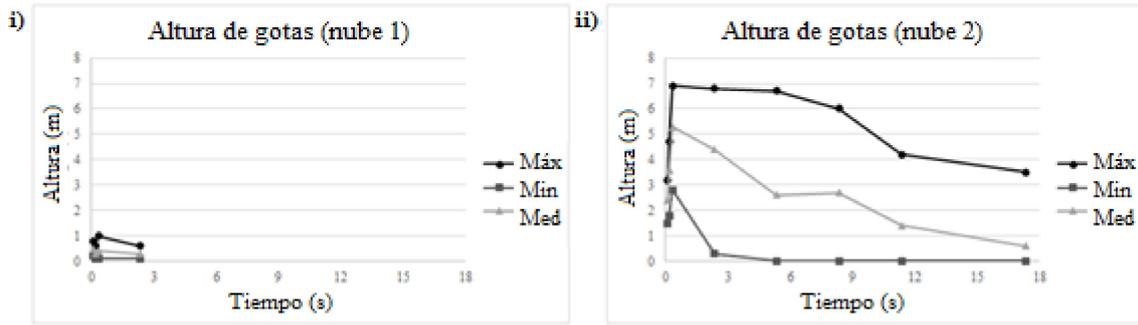


Figura 27. Altura máxima, mínima y media de las gotas respecto al suelo en cada nube. Altura en m.

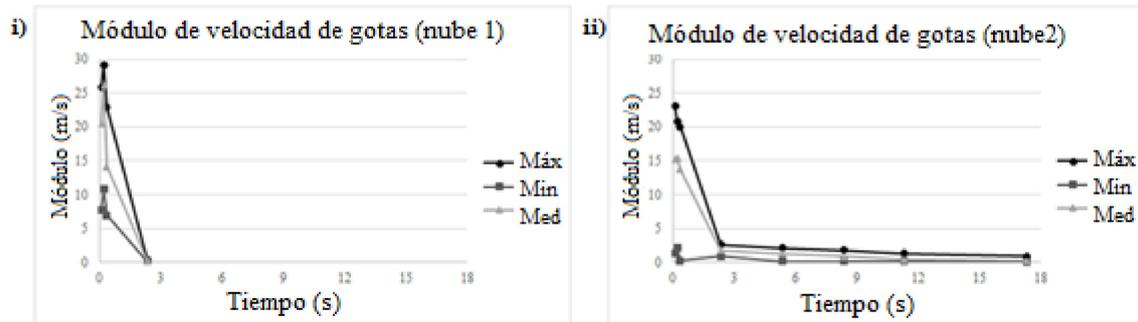


Figura 28. Módulo de velocidad máximo, mínimo y medio de las gotas en cada nube. Velocidades en m/s.

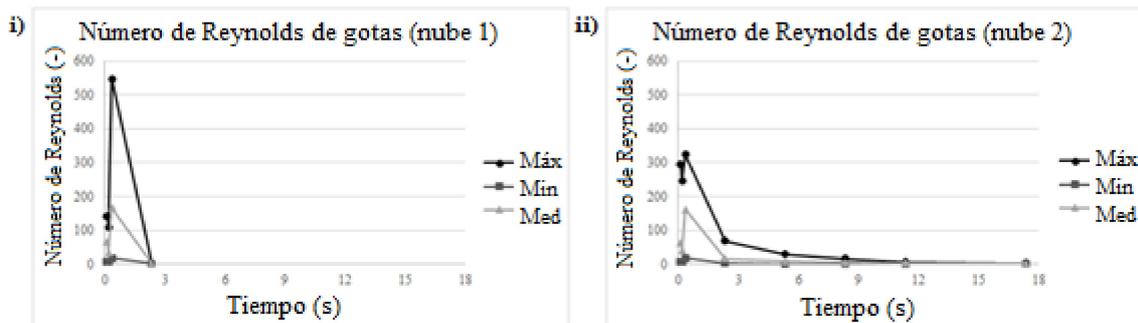


Figura 29. Número de Reynolds máximo, mínimo y medio de las gotas en cada nube. Parámetro adimensional.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

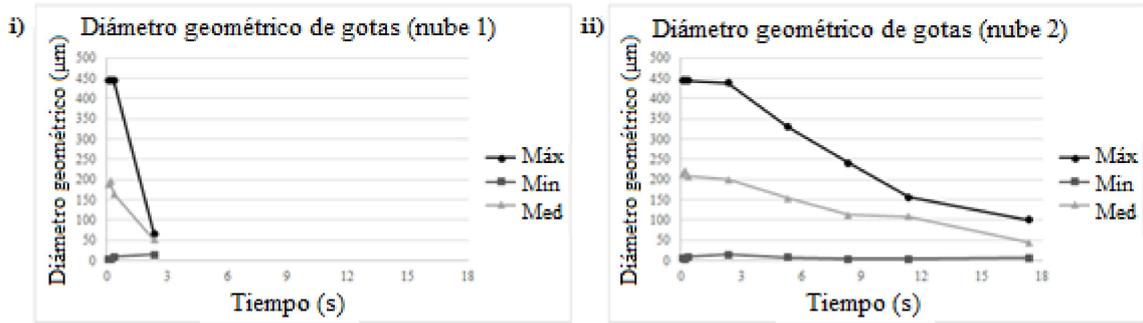


Figura 30. Diámetro geométrico máximo, mínimo y medio de las gotas en cada nube. Diámetros en μm .

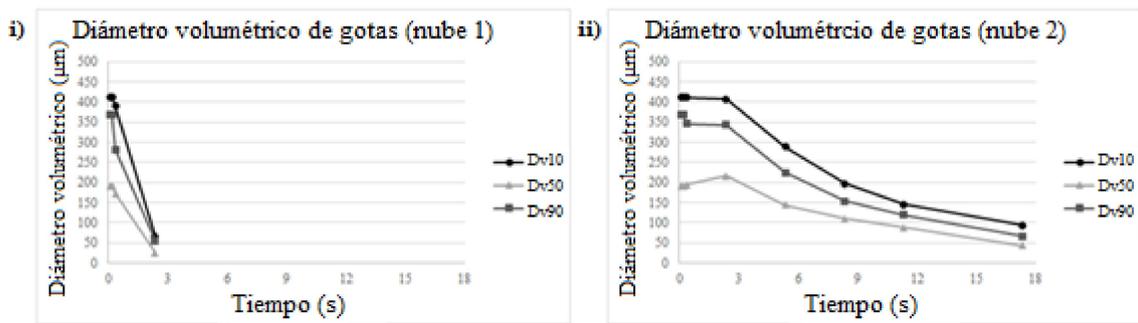


Figura 31. Diámetro volumétrico Dv_{10} , Dv_{50} y Dv_{90} de las gotas en cada nube. Diámetros en μm .

9.3.4. Cinética y evaporación de las gotas

i) Cinética de las gotas

La Tabla 8 muestra los valores medios y los errores estándar de los siguientes parámetros: módulo de velocidad de sedimentación U_s , tiempo de relajación en la sedimentación τ_s , tiempo de relajación τ y fuerza de resistencia aerodinámica F_d .

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Tabla 8. Valores medios y errores estándar de los parámetros asociados a la cinética de gota. Errores entre paréntesis

	<i>t=0,35 s</i>	<i>t=2,35 s</i>	<i>t=5,35 s</i>	<i>t=8,35 s</i>	<i>t=11,35 s</i>	<i>t=17,35 s</i>
U_s (m/s)	0,77 (0,02)	0,72 (0,02)	0,53 (0,02)	0,35 (0,02)	0,28 (0,01)	0,06 (0,01)
τ (ms)	31 (1)	48 (2)	40 (2)	29 (2)	26 (1)	8 (3)
τ_s (ms)	78 (2)	74 (2)	54 (2)	35 (2)	28 (1)	6 (1)
F_d (N)	$2,8 \cdot 10^{-6}$ ($8,8 \cdot 10^{-8}$)	$2,3 \cdot 10^{-7}$ ($5,3 \cdot 10^{-9}$)	$1,4 \cdot 10^{-7}$ ($5,0 \cdot 10^{-9}$)	$6,8 \cdot 10^{-8}$ ($6,5 \cdot 10^{-9}$)	$1,5 \cdot 10^{-8}$ ($1,9 \cdot 10^{-9}$)	$2,2 \cdot 10^{-9}$ ($3,4 \cdot 10^{-10}$)

Holterman (2003) relacionaba estas variables al tamaño de gota cuando se exponía al viento. No obstante, la Tabla 8 muestra que estos parámetros cambian a medida que pasa el tiempo debido a que el tamaño de las gotas no es constante por fenómenos externos, como el rozamiento del aire, o la coalescencia con otras gotas.

El módulo de la velocidad de sedimentación en la Tabla 8 era menor conforme pasaba el tiempo. Esta velocidad está directamente relacionada con el tamaño de gota (Ecuación 34). Como los diámetros de gota se reducían de un instante a otro, el valor de esta velocidad también se reducía. Además, esta reducción de la velocidad de sedimentación encajaría con la hipótesis de que las gotas pierden fuerza de impacto a medida que transcurre el tiempo.

De manera más detallada, la Tabla 9 muestra los módulos medios U_s en diferentes tramos de alturas, y la velocidad media del viento en cada tramo.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Tabla 9. Valores medios de U_s por tramos de alturas. Velocidades medias del viento incluidas.

Altura (m)	Módulo de velocidad de deposición U_s (m/s)						U viento (m/s)
	t=0,35 s	t=2,35 s	t=5,35 s	t=8,35 s	t=11,35 s	t=17,35 s	
]3,0-3,5]	1,06	1,29	0,62	0,25	0,22	0,12	0,92
]3,5-4,0]	1,06	1,23	0,44	0,18	-	-	0,94
]4,0-4,5]	1,05	0,81	0,24	0,11	0,29	-	0,95
]4,5-5,0]	0,95	0,61	0,17	0,05	-	-	0,97
]5,0-5,5]	0,72	0,29	0,11	0,04	-	-	0,98
]5,5-6,0]	0,70	0,13	0,09	0,03	-	-	0,99
]6,0-6,5]	0,57	0,06	0,06	-	-	-	1,00
]6,5-7,0]	0,08	0,06	0,03	-	-	-	1,01

En la Tabla 9 se observa como las velocidades de sedimentación eran menores conforme aumentaba la altura. Las velocidades en cada tramo también se reducían al pasar de un tramo a otro. Holterman (2003) establecía que la velocidad de sedimentación disminuía con el tamaño de gota. Esto encajaba con lo observado respecto al tamaño de gotas, que era menor a mayor altura, y como iban disminuyendo en el tiempo. De nuevo, se comprueba que la intensidad del impacto se reduce con el tiempo.

Cuando las gotas tienen un U_s inferior al 10% del módulo de la velocidad del viento son susceptibles de ser arrastradas por la corriente y convertirse en deriva atmosférica. Según la Tabla 9, el número de tramos de mayor riesgo aumentaba a medida que transcurría el tiempo. Eso indica que durante un determinado intervalo de tiempo después de pasar el turboatomizador, las alturas del dominio susceptibles al riesgo de deriva aumentan.

Los tiempos de relajación se reducen en cada instante (Tabla 8). Las gotas se adaptan a los cambios a medida que pasa el tiempo. Esto concordaría con la hipótesis de que las gotas van perdiendo inercia con el paso del tiempo. Además,

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

aunque τ_s era mayor al principio que τ , estos valores tendieron a aproximarse a medida que transcurre el tiempo.

La tabla 10 muestra los valores de τ_s respecto a la altura.

Tabla 10. Valores medios de τ_s por tramos de alturas.

Tiempo de relajación de deposición τ_s(ms)						
Altura (m)	$t = 0,35$ s	$t = 2,35$ s	$t = 5,35$ s	$t = 8,35$ s	$t = 11,35$ s	$t = 17,35$ s
]3,0-3,5]	108	131	63	25	22	11
]3,5-4,0]	108	125	45	19	-	-
]4,0-4,5]	107	83	25	11	30	-
]4,5-5,0]	97	62	17	5	-	-
]5,0-5,5]	74	29	11	4	-	-
]5,5-6,0]	72	13	7	3	-	-
]6,0-6,5]	59	6	6	-	-	-
]6,5-7,0]	8	6	3	-	-	-

En la Tabla 10 se observa como los tiempos eran menores a medida que aumentaba la altura. Los tiempos en cada tramo también se reducían al pasar de un tramo a otro. Esto se producía porque el tiempo τ_s era directamente proporcional a la velocidad de sedimentación. Por tanto, el tiempo que empleaban las gotas para adaptarse a la velocidad de sedimentación era menor a medida que las gotas tenían más altura o llevaban más tiempo en el aire.

A continuación se muestran los valores máximos, mínimo y medios del coeficiente de resistencia C_d y del coeficiente de resistencia a la sedimentación $C_{d,s}$ a lo largo de los diferentes intervalos de tiempo (Tabla 11).

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Tabla 11. Valores máximos, mínimos y medios para los coeficientes C_d y $C_{d,s}$ en cada instante.

		t=0,35 s	t=2,35 s	t=5,35 s	t=8,35 s	t=11,35 s	t=17,35 s
C_d (-)	Max	2,9	17,8	39,1	67,1	117,0	439,1
	Min	0,6	1,3	2,1	3,2	6,8	15,8
	Media	1,0	8,6	15,2	20,4	16,1	145,0
$C_{d,s}$ (-)	Max	1768,7	970,0	3137,4	35196,8	578,1	13272,8
	Min	1,6	1,6	2,2	3,0	6,5	21,3
	Media	97,9	74,0	66,1	2377,8	33,6	1283,3

El coeficiente medio de resistencia C_d era creciente en el tiempo según la Tabla 11, a excepción de $t=11,35$ s. Esta variable dependía inversamente del número de Reynolds, y este valor se reducía en cada instante. No obstante, este aumento del coeficiente no implica que las gotas adquirieran más resistencia aerodinámica. F_d se reducía con el paso del tiempo (Tabla 9). Como el módulo de las velocidades también se iba reduciendo, el rozamiento del aire con las gotas perdía intensidad en cada instante y la resistencia aerodinámica se reducía.

El coeficiente $C_{d,s}$ medio presentó un carácter errático en comparación con otras variables. Holterman (2003) establecía una relación entre $C_{d,s}$ y los diámetros de tal manera, que a menor diámetro el valor $C_{d,s}$ era mayor. No obstante en la Tabla 11, el mayor valor estaba en $t=8,35$ s, y no en $t=17,35$ s, donde las gotas tenían menor tamaño.

La Tabla 12 presenta a una relación entre el $C_{d,s}$ máximo, mínimo y medio en diferentes tramos de altura.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Tabla 12. Valores medios de $C_{d,s}$ por tramos de alturas.

Altura (m)		Coeficiente de Resistencia a la sedimentación $C_{d,s}$ (-)					
		$t=0,35$ s	$t=2,35$ s	$t=5,35$ s	$t=8,35$ s	$t=11,35$ s	$t=17,35$ s
3,0-3,5	Max	2,7	4,2	10,5	35196,8	36,2	55,7
	Min	2,5	1,7	3,8	6,4	14,4	55,7
	Media	2,6	2,3	5,1	20,43	24,9	55,7
3,5-4,0	Max	1768,7	970,0	23,0	35196,8	-	-
	Min	1,6	1,7	4,6	12,4	-	-
	Media	223,9	17,9	10,8	1999,5	-	-
4,0-4,5	Max	1768,7	970,0	153,4	35196,8	14,4	-
	Min	1,6	2,1	7,6	16,1	14,4	-
	Media	187,8	75,3	41,7	8865,7	14,4	-
4,5-5,0	Max	1768,7	970,0	467,0	35196,8	-	-
	Min	1,6	2,4	10,5	29,3	-	-
	Media	164,3	52,7	80,5	5641,9	-	-
5,0-5,5	Max	1768,7	970,0	467,0	408,6	-	-
	Min	1,7	3,0	23,0	189,3	-	-
	Media	43,0	131,5	111,8	262,4	-	-
5,5-6,0	Max	1768,7	970,0	467,0	408,6	-	-
	Min	1,8	6,5	37,9	408,6	-	-
	Media	44,6	193,6	215,3	408,6	-	-
6,0-6,5	Max	1768,7	970,0	467,0	-	-	-
	Min	2,2	29,0	69,8	-	-	-
	Media	147,6	373,2	268,4	-	-	-
6,5-7,0	Max	230,7	970,0	467,0	-	-	-
	Min	32,3	61,8	467,0	-	-	-
	Media	158,1	468,7	467,0	-	-	-

El comportamiento del coeficiente medio varió en los diferentes instantes.

En $t=2,35$ y $t=5,35$ s, $C_{d,s}$ disminuía a medida que la altura era menor. Pero en $t=0,35$ s y $t=8,35$ s, no había relación aparente entre la altura y $C_{d,s}$. Por otra parte, el valor del coeficiente aumentaba entre 3,0 y 3,5 m de altura conforme pasaba el tiempo, aunque esto no ocurría en el tramo siguiente de altura. La explicación más probable es que este coeficiente variaba con más intensidad conforme los diámetros se hacían más pequeños. Por ejemplo, una gota de diámetro de 500 μm tiene un $C_{d,s} = 1,3$, y otra de 200 μm tiene un $C_{d,s} = 4,5$. Los coeficientes sólo varían entre sí 3,2. Pero si comparamos dos gotas de 20 y 10 μm respectivamente,

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

los coeficientes son de 1561 y 12106. La diferencia es 3000 veces más grande que entre las gotas de 200 y 500 μm . En cada instante, los diámetros mínimos eran inferiores a 20 μm . La presencia de una sola gota en cada tramo podría afectar a la media, aunque el resto de gotas tuviesen un tamaño igual o superior a la media. Si se tiene en cuenta que en cada instante el número de gotas era menor, la influencia de las gotas más pequeñas sobre la media se hacía más grande.

Este comportamiento errático estaba repetido para el valor máximo, incluso puede ser apreciado que habían los mismos valores para diferentes secciones en un determinado instante. Sin embargo, para el coeficiente mínimo fue observado que los valores se incrementaban con el tiempo en cada sección. Por tanto, era muy complicado establecer una relación entre los coeficientes y las alturas.

ii) Evaporación de las gotas

La Tabla 13 muestra los ratios de evaporación k_0 promediados por diferentes tramos de alturas.

Tabla 13. Valores medios de k_0 por tramos de alturas.

Altura (m)	Ratio de evaporación k_0 ($\mu\text{m}^2/\text{s}$)					
	$t = 0,35 \text{ s}$	$t = 2,35 \text{ s}$	$t = 5,35 \text{ s}$	$t = 8,35 \text{ s}$	$t = 11,35 \text{ s}$	$t = 17,35 \text{ s}$
]3,0-3,5]	612	625	587	571	571	565
]3,5-4,0]	613	621	580	562	-	-
]4,0-4,5]	613	599	572	558	575	-
]4,5-5,0]	608	588	568	558	-	-
]5,0-5,5]	595	572	564	558	-	-
]5,5-6,0]	593	564	560	556	-	-
]6,0-6,5]	586	559	560	-	-	-
]6,5-7,0]	561	559	556	-	-	-

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Los ratios de evaporación disminuían a medida que se incrementaba la altura de las gotas o las gotas permanecían más tiempo en el aire. Las diferencias entre el primer y el último tramo de la altura también se iban reduciendo en cada instante. Esto podría deberse a que el rango de tamaños de las gotas también se iba reduciendo conforme pasaba el tiempo. Como la simulación siempre utilizaba los mismos datos de humedad y temperatura, sería interesante probar nuevos valores para estudiar el grado de variabilidad del ratio de evaporación en diferentes condiciones de trabajo.

Por otra parte, el tiempo de evaporación t_{life} para las gotas desde el instante $t=0,35$ s, que es justo antes de recibir la acción del viento, era de 20,2 s para 313 gotas. Cuando la simulación llegó a $t= 20,35$ s, se habían evaporado 320 gotas, lo que se consideró una buena aproximación. Por tanto, se consideró que una primera buena aproximación, pero era necesario hacer nuevas simulaciones para comprobar si el modelo simulaba correctamente los fenómenos de evaporación.

9.3.5. Balance final de masas y comparación con datos experimentales

El 44% del volumen empleado en la simulación se depositó en el árbol objetivo. El 28% del volumen se repartió entre la vegetación adyacente (segundo y tercer árbol). Las pérdidas al suelo representaron el 20%, y las pérdidas por deriva atmosférica supusieron el 8%. Estos datos se reflejaban en la Tabla 14, junto a los resultados experimentales de Garcerá *et al.* (2015).

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

Tabla 14. Comparación de los porcentajes del volumen aplicado entre el ensayo Garcerá *et al.* (2015) y los obtenidos en la simulación.

	Ensayo (%)	Simulación (%)
Árbol objetivo	43	44
Árboles adyacentes	5	28
Pérdidas totales en suelo	25	20
Deriva atmosférica	18	8
No localizado	9	-

La deposición media obtenida sobre los árboles objetivo fue de un 43% en el balance de masas de Garcerá *et al.* (2015) frente a un 44% en la simulación. La diferencia del 1% que se obtuvo se consideró aceptable. Hay que tener en cuenta que el tamaño del árbol objetivo era menor en el modelo que en el ensayo, aunque era necesario para poder reproducir correctamente el comportamiento del flujo de aire del ventilador frente a los cítricos.

La deposición en los árboles de las filas adyacentes fue de un 28% en el modelo frente a un 5% en el experimento. En este punto se encontró la mayor diferencia respecto a la simulación. Una de las razones puede ser debida a que en Garcerá *et al.* (2015) el viento iba en dirección paralela a las filas, mientras que en el modelo la dirección del viento se consideró perpendicular a los árboles. Además, había un hueco entre el primer árbol y el suelo por el que pasaba una nube de 250 gotas que llegaba directamente hasta el segundo árbol por el empuje del ventilador. Por esas razones, aumentaba el transporte de gotas a las calles adyacentes.

La cantidad total de pérdidas en el suelo durante los experimentos fue del 25% en Garcerá *et al.* (2015) frente al 20% de la simulación considerándose una buena aproximación entre ambos estudios.

Garcerá *et al.* (2015) calculó una fracción de deriva del 17% del volumen, frente al 8% estimado por el modelo. Respecto a este ensayo cabe decir que no se incluyeron las pérdidas por evaporación. Además, era muy difícil determinar cuál era la dirección de las gotas en el momento que se quedaron retenidas en el colector. Podría ser que en realidad esas gotas atrapadas estuvieran descendiendo y dirigiéndose a los árboles de las filas adyacentes. Las trayectorias obtenidas en la simulación reflejaron que muchas gotas que estaban a alturas superiores a los 5,0 m en el momento de la pulverización, van descendiendo hasta llegar a la segunda o tercera fila de árboles o directamente al suelo. Esto quiere decir que es posible que una parte de las gotas estimadas como deriva en el trabajo de Garcerá *et al.* (2015) se dirigiesen en realidad hacia las filas adyacentes y que fueran retenidas en los colectores a 5,0 m antes de depositarse de manera natural. También hay que tener en cuenta la dirección del viento en este trabajo respecto al modelo.

Por último, hay que considerar que el ensayo no pudo especificar la localización de un 9% del volumen, con lo que las diferencias de deposición en la vegetación adyacente y el modelo podrían ser realmente menores.

9.4. Conclusiones

El presente trabajo demuestra que el empleo de modelos CFD es un método útil para estudiar la eficiencia de los tratamientos con turboatomizador en cítricos. Este modelo ofreció la posibilidad de visualizar la posición exacta de cada gota en cualquier instante y de medir las variables asociadas, como la velocidad o el diámetro.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

El modeló simuló que las gotas salientes del turboatomizador alcanzaban su máxima altura en presencia de la corriente del ventilador. Cuando el flujo del equipo se sustituyó por el viento, las gotas empezaron a perder altura. No obstante, la corriente del viento del modelo era constante y de componente vertical despreciable, lo que influía en la forma de empuje sobre las gotas.

Las gotas también se alejaban del ventilador desde que salían, aunque a medida que transcurría el tiempo, las gotas ralentizaban su desplazamiento por la pérdida de velocidad.

Las gotas tuvieron un carácter más turbulento en presencia del ventilador, y más laminar con el viento.

El tamaño de las gotas se fue reduciendo desde que salieron al aire. Siempre había gotas susceptibles de perderse por evaporación a la atmósfera o a las variaciones del aire. Cuando en la simulación actuaba el viento, las gotas más próximas al suelo y menos lejanas del equipo coincidían con las de mayor tamaño, mientras que las más pequeñas coincidían con las que alcanzaban más altura.

Los diámetros volumétricos no presentaron cambios cuando la corriente procedía del ventilador, pero se fueron reduciendo en presencia del viento. Hasta el instante $t=8,35$ s, el diámetro medio tenía menos diferencia con $Dv10$ que con $Dv50$.

El centro de masas de las gotas se alejaba de la salida de aire del ventilador. Cuando la corriente procedía del viento, el centro de masas continuaba alejándose del equipo pero perdía altura y se aproximaba más al suelo.

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

El momento lineal y la energía cinética de las nubes fueron disminuyendo con el tiempo. Esto podría sugerir que el impulso y la fuerza de impacto de las gotas era menor en cada instante. Esta pérdida de momento y energía fue más intensa cuando ya no estaba la corriente del ventilador.

Al estudiar la variación de la velocidad de sedimentación, los tramos donde las gotas podían ser más susceptibles de acabar en deriva aumentaban con el paso del tiempo, debido a la disminución de los tamaños de gota. En cambio, el tiempo de relajación disminuía con el tiempo, lo que significaba que las gotas en el modelo requerían menos tiempo para adoptar una velocidad de sedimentación según transcurría el tiempo. Por último, no fue posible establecer una relación entre el coeficiente y las alturas debido a la sensibilidad del parámetro a las variaciones de diámetro.

También se estudió la variación del ratio de evaporación por alturas. Era mayor en las posiciones más cercanas a la copa debido a que los tamaños de gota eran más grandes que en las posiciones más elevadas. El número de gotas evaporadas al final de la simulación fue similar al predicho mediante la ecuación del tiempo de evaporación.

Se comparó los resultados de la simulación con ensayos en condiciones de campo. Se consideró que el modelo se aproximó de manera correcta la deposición en el primer árbol y en el suelo. Por otra parte, aunque la deriva en el modelo resultó ser la mitad que en el ensayo, había que tener en cuenta que era posible que en el experimento los colectores de deriva retuvieran gotas que en verdad iban hacia el suelo o la vegetación adyacente. Además, la dirección del viento

Estudio del comportamiento de las gotas en el modelo

experimental era perpendicular a la del modelo, por lo que las cantidades de deposición de gota y deriva podrían asemejarse más en caso de direcciones del viento similares. El ensayo tampoco pudo determinar el destino final del 9% del volumen.

10. Conclusiones generales

Se ha desarrollado un modelo CFD que simula el comportamiento del flujo del aire alrededor del árbol y la distribución de las gotas en los tratamientos fitosanitarios con turboatomizador en cítricos.

Por primera vez se ha descrito que el flujo del aire del ventilador de un turboatomizador cuando se enfrenta a la copa de un naranjo: la corriente se divide en dos ramas, una va a la atmósfera y otra pasa por debajo del árbol. Además, cuando el aire alcanza la vegetación se produce una separación de flujo, lo que da lugar a un vórtice encima del árbol y otro detrás. El vórtice detrás del árbol estará también condicionado por la distancia entre el árbol y la fila adyacente. Este comportamiento del flujo no ha sido descrito en otros tipos de cultivos arbóreos de menor densidad foliar y ancho de copa.

Los ensayos tradicionales estudian principalmente lo que sucede por delante y por detrás de la copa a una distancia relativamente corta de la vegetación. La presente tesis ha demostrado que es necesario recopilar más datos en otras áreas del árbol para detectar los principales fenómenos turbulentos que se producen, como la medición de velocidades a una altura por encima de la copa o en planos paralelos a la salida de aire del ventilador.

Las simulaciones han mostrado que si se diseña la copa enfrentada al ventilador como una región sólida, es posible reproducir las mismas estructuras turbulentas alrededor del árbol. Para el diseño de la geometría de la copa hay que

tener en cuenta que cuanto más fuerce la geometría a adoptar un comportamiento más vertical a la corriente, entonces el vórtice sobre la copa se situará más en el centro.

Se ha demostrado que el modelo SST $k-\omega$ se ajusta mejor a los datos experimentales respecto al tradicional modelo estándar $k-\varepsilon$, que no ha reproducido de una forma adecuada el vórtice generado detrás del primer árbol, así como respecto al modelo RSM, que además consume más recursos computacionales que los otros modelos.

De esta forma, también se demuestra que el uso de modelos 2D, pese a sus limitaciones frente a los modelos tridimensionales, permiten reproducir adecuadamente el comportamiento del aire alrededor del árbol en el plano de salida del ventilador y extraer conclusiones, simplificando operaciones y ahorrando tiempo.

La introducción de gotas en el modelo de aire ha permitido conocer como el modelo recrea el comportamiento de las gotas durante la pulverización. La simulación ha indicado que durante la intervención del turboatomizador es cuando más gotas se depositan en el árbol pero también cuando más altura alcanzan y, por tanto, hay más gotas expuestas a los flujos atmosféricos. De aquí se deduce que el momento más crítico en la formación de deriva es en presencia del turboatomizador y a una distancia horizontal próxima del ventilador.

En presencia del viento, el modelo ha indicado que las gotas menor tamaño son las que mantienen las posiciones más altas respecto al suelo. Además,

el modelo ha estimado que las gotas van perdiendo fuerza de impacto. Por tanto, la vulnerabilidad de las gotas a ser empujadas por el viento se incrementa con el tiempo.

Al comparar con los datos experimentales, el modelo propuesto representa de forma adecuada la cantidad de volumen depositada en el árbol objetivo y las pérdidas en el suelo. Las diferencias en cuanto a deriva atmosférica se deben a que la dirección del viento en el ensayo era perpendicular a la del modelo.

11. Trabajos futuros

Los trabajos futuros que se planean a partir de esta tesis son en primer lugar la validación del modelo CFD de gotas, para ver si la simulación reproduce adecuadamente el comportamiento de las gotas. Para ello, es necesario comparar el modelo con un nuevo balance de masas en condiciones mediterráneas y con una dirección del viento perpendicular al equipo, como se supone en el modelo.

Se debería también realizar diferentes simulaciones con nuevas condiciones iniciales para estudiar el grado de influencia en los tratamientos de la temperatura y humedad relativa del aire, propiedades físico-químicas y temperatura inicial de las gotas, tipo e inclinación de boquilla, velocidad de avance del tractor, la velocidad y la intensidad turbulenta del viento.

También sería interesante hacer simulaciones con diferentes tamaños específicos de gota para estudiar el tiempo de duración de las gotas en el aire, así como el fenómeno de la evaporación en los tratamientos. En este sentido, también se debería ampliar a lo largo el dominio computacional para ver cuanta distancia pueden recorrer las gotas en función de su tamaño.

El siguiente paso deberá ser la generación de un modelo que reproduzca los tratamientos en 3D. Será necesario comprobar si este modelo, además de reproducir lo que sucede en el plano central de salida del aire del ventilador, es capaz de simular el comportamiento del flujo en otros planos paralelos. Este modelo deberá incluir el desplazamiento del equipo, que también influye sobre el

comportamiento del flujo y las gotas. También se deberían seguir probando nuevas geometrías para la primera copa y estudiar la posibilidad de incluir una zona porosa alrededor de la región sólida que incluya términos sumidero-fuente para ajustar la velocidad y la energía del aire cuando atraviesa la vegetación, como se hace en otros modelos CFD. Para hacer esto último, será necesario plantearse una metodología para obtener el coeficiente de resistencia aerodinámico de la vegetación, puesto que el método tradicional parte de la hipótesis de que la corriente saliente del árbol sigue la misma dirección que antes de atravesar el árbol.

Paralelamente al desarrollo del modelo, será necesario la realización de nuevos ensayos de campo a mayores alturas que las presentadas en la tesis y en planos paralelos al de salida del ventilador a distancias superiores de 0,3 m. También se debería incluir la posibilidad de realizar un ensayo que registre la velocidad del aire cuando se desplaza el equipo. Además, a fin de que se puedan emplear también las intensidades turbulentas para seguir ajustando y validando el modelo, será necesario incrementar la frecuencia del muestreo y así poder realizar un análisis experimental de espectros de energía. Por último, sería recomendable hacer nuevos ensayos con diferentes tipos de turboatomizador o variando las velocidades del ventilador.

Por último, el modelo debería servir para reproducir el comportamiento de las gotas cambiando el tipo de boquillas (por ejemplo, boquillas antideriva), las condiciones de la máquina (presión de boquilla, velocidad de avance del equipo, volumen de aire...), propiedades físico-químicas de las gotas y las variables

externas (velocidad del viento, temperatura, humedad relativa...). También debería emplearse para comparar la eficiencia del tratamiento entre diferentes tipos de turboatomizadores, simulando distintos tipos de salida del aire.

12. Bibliografia

Abramovich GN, 1963. The theory of turbulent jets. MIT Press, Cambridge, UK.

Al Heidary M, Douzals JP, Sinfort C, Vallet A, 2014. Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: A literature review. *Crop Prot* 63: 120-130.

Alves GS, Cunha JPAR, 2014. Dados de campo e modelos de estimação de deriva nas aplicações de agrotóxicos na cultura do café. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 49(8): 622-629.

Arvidsson T, Bergström L, Krueger J, 2011. Spray drift as influenced by meteorological and technical factors. *Pest Manang Sci* 67: 586-598.

Arya SP, 1988. Introduction to micrometeorology. Academic Pres, San Diego.

Asman W, Jørgensen A, Jensen PK, 2003. Dry deposition and spray drift of pesticides to nearby water bodies. Danish Environmental Protection Agency, Pesticides Research Report Nr. 66.

Bache DH, Sayer WJD, 1975. Transport of aerial spray, I. A model of aerial dispersion. *Agr Meteorol* 15:257-271.

Baetens K, Ho QT, Nuyttens D, De Schampheliere M, Endalew AM, Hertog 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.

Baker T, 2005. Mesh generation: Art of Science? *Prog Aerosp Sci* 41: 29-63.

Balsari P, Marucco P, 2004. Sprayer adjustment and vine canopy parameters affecting spray drift: the Italian experience. *International Conference on Pesticide Application for Drift Management, Waikoloa (USA), Oct 27-29*. pp: 109-115.

Bassil KL, Vakil C, Sanborn M, Cole DC, Kaur JS, Kerr KJ, 2007. Cancer health effects of pesticides: Systematic review. *Can Family Physician* 53(10): 1704-1711.

Beketov MA, Kefford BJ, Schäfer RB, Liess M, 2013. Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. *Proc Natl Acad Sci USA* 110(27): 11039-11043.

Belcher SE, Jerram N, Hunt JCR, 2003. Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements. *J Fluid Mech* 488: 369-398.

Blocken B, Stathopoulos T, Carmeliet J, 2007. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmos Environ* 41: 238-252.

Bode LE, Butler BJ, Goering CE, 1976. Spray drift and recovery as affected by spray thickener, nozzle type and nozzle pressure. T ASAE 19: 213-218.

BOE (Boletín Oficial del Estado), 2012. 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. BOE N 223 de 15 de septiembre, 65127-65171.

Bouse LF, 1994. Effect of nozzle type and operation on spray droplet size. T ASAE 37: 1389-1400.

Brazee RD, Fox RD, Reichard DL, Hall FR, 1981. Turbulent jet theory applied to air sprayers. T ASABE 24(2): 266-272.

Brown RB, Sidahmed MM, 2001. Simulation of spray dispersal and deposition from a forestry airblast sprayer-Part II: Droplet trajectory model. T ASAE 44:11-17.

Brusselman E, Van Driessen K, Steurbaut W, Gabriels D, Cornelis W, Nuyttens D, Sonck B, Baetens K, Nicolai B, Ramon H, 2005. Wind tunnel evaluation of several tracer and collection techniques for the measurement of spray drift. Commun. Agric Appl Biol Sci 69(4):829-836.

Carter A, 2000. How pesticides get into water-and proposed reduction measures. Pestic Outlook 11(4): 149-156.

Castro I, 2003. CFD for external aerodynamics in the built environment, s.l.: The QNET-CFD Network Newsletter.

Celen IH, Arin S, Durgut MR, 2008. The effect of the airblast sprayer speed on the chemical distribution in vineyard. *Pak J Biol Sci* 11: 1472-1476.

Chen Y, Ozkan E, Zhu H, Derksen R, Krause CR, 2013. Spray deposition inside tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer. *T ASABE* 56(6): 1263-1272.

Chueca P, Garcerá C, Masip P, Moltó E, 2013. Methodology for a fast, in field estimation of the efficiency for antidrift measures. 12th International Workshop on Sustainable Plant Protection Techniques in Fruit Growing, Valencia (Spain), Jul 26-28. pp: 11-13.

CLAM, 2010. Les Exportation D'agrumes du bassin mediterraneen. Statistiques, Evaluations, Repartitions. Situation 2009-2010. Secretariat general de CLAM, Madrid Comité de gestión de cítricos, Madrid, Spain.

Connell RJ, Endalew AM, Verboven P, 2011. CFD Modelling of kiwifruit vines and leaves: A method of handling multiple thin surfaces. 19th International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM2011): Sustaining Our Future: Understanding and Living with Uncertainty, Perth (Australia), Dic 12-16. pp: 523-529.

Cooke BK, Hislop EC, Herrington PJ, Western NM, Humphersonjones F, 1990. Air-assisted spraying of arable crops, in relation to deposition, drift and pesticide performance. *Crop Prot* 9: 303-311.

Courshee R, 1959. Investigations on spray drift. Part II: the occurrence of drift. *J Agr EngRes* 4: 229-24.

Cross JV, Walklate PJ, Murray RA, Richardson GM, 2003. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 3. Effects of air volumetric flow rate. *Crop Prot* 22: 381-394.

Cunha J, Chueca P, Garcerá C, Moltó E, 2012. Risk assessment of pesticide spray drift from citrus applications with air-blast sprayers in Spain. *Crop Prot* 42: 116-123.

Cunningham GP, Harden J, 1998. Reducing spray volumes applied to mature citrus trees. *Crop Prot* 17:289-292.

Da Silva A, Sinfort C, Tinet C, Pierrat D, Huberson S, 2006. A Lagrangian model for spray behaviour within vine canopies. *J Aerosol Science* 37: 658-674.

De Moor A, Langenakens J, Jaeken J, 2002. Dynamic air velocity measurements of air-assisted sprayers in relation to static measurements. *Aspect Appl Biol* 66: 309-322.

De Schampheliere M, Spanoghe P, Steurbaut W, Nuyttens D, Sonck B, 2005. The assessment of spray drift damage for ten major crops in Belgium. *Commun Agric Appl Biol Sci* 70: 1037-1042.

De Schampheliere M, Spanoghe P, Brusselmann E, Sonck S, 2007. Risk assessment of pesticide spray drift damage in Belgium. *Crop Prot* 26: 602-611.

De Schampheliere M, Nuyttens D, Baetens K, Cornelis W, Gabriels D, Spanoghe P, 2009. Effects on pesticide spray drift of the physicochemical properties of the spray liquid. *Precision Agric* 10: 409-420.

De Snoo GR, Van der Poll RJ, 1999. Effect of herbicide drift on adjacent boundary vegetation. *Agric Ecosyst Environ* 73(1): 1-6.

Dekeyser D, Ashenafi TD, Verboven P, Endalew AM, Hendrickx N, Nuyttens D, 2013. Assessment of orchard sprayers using laboratory experiments and computational fluid dynamics modelling. *Biosyst Eng* 114: 157- 169.

Dekeyser D, Foque D, Duga AT, Verboven P, Hendrickx N, Nuyttens D, 2014. Spray deposition assessment using different application techniques in artificial orchard trees. *Crop Prot* 64: 187-197.

Delele MA, De Moor A, Sonck B, Ramon H, Nicolaï BM, 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: 165- 174.

Delele MA, Jaeken P, Debaer C, Baetens K, Endalew AM, Ramon H, Nicolaï BM, Verboven P, 2007. CFD prototyping of fan air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction. *Comput Electron Agric* 55: 16-27.

Derksen RC, Zhu H, Fox RD, Brazee RD, Krause CR, 2007. Coverage and drift produced by air induction and conventional hydraulic nozzles used for orchard applications. *T ASABE* 50: 1493-1501.

DOUE (Diario Oficial de la Unión Europea) 2009a. Directive 2009/128/EC of the European Parliament and the Council of the European Union of 21 October of 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides. Official Journal of the European Union L309 of 24 November of 2009, 71-86.

DOUE (Diario Oficial de la Unión Europea) 2009b. Reglamente (CE) 1107/2009 of the European Parliament and the Council of the European Union of 21 October of 2009 concerning the placing of plant protection products on the market and repealing Council Directives 79/117/EEC and 91/414/EEC. Official Journal of the European Union L309 of 24 November of 2009, 1-50.

Duga A, Defraeye T, Hendrickx N, Dekeyser D, Nuyttens D, Nicolai B, Verboven P, 2013. Sprayer-canopy characterization using field experiments and CFD modelling. 12th International Workshop on Sustainable Plant Protection Techniques in Fruit Growing, Valencia (Spain), Jul 26-28. pp: 100-102.

Duga A, Ruysen K, Dekeyser D, Nuyttens D, Bylemans D, Nicolai B, Verboven P, 2015a. Spray deposition profiles in pome fruit trees: Effects of sprayer design, training system and tree canopy characteristics. *Crop Prot* 67: 200-213.

Duga A, Ruysen K, Dekeyser D, Nuyttens D, Bylemans D, Nicolai B, Verboven P, 2015b. CFD Based analysis of the effect of wind in orchard spraying. 9th Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering Symposium. Milano, (Italy), May 19-22. pp. 289-294.

Elliott JG, Wilson BJ, 1983. The Influence of weather on the efficiency and safety of pesticide application-The drift of herbicides. Occasional Publication N°. 3, British Crop Protection Council, Croydon (UK) pp: 135.

Ellis MCB, Miller PCH, 2010. The Silsoe Spray Drift Model: A model of spray drift for the assessment of non-target exposures to pesticides. *Biosyst Eng* 107: 169-177.

Endalew AM, Hertog M, Verboven P, Delele MA, Baetens K, Ramon H, Nicolai BM, 2006. 3D Orchard Canopy Architectural Modelling for Use in Airflow and Drift Predictions. *ISHS Acta Horticulturae* 718: III International Symposium on Models for Plant Growth, Environmental Control and Farm Management in Protected Cultivation, Wageningen (Netherlands), Oct 29. pp: 67-74.

Endalew AM, Hertog M, Gebrehiwot MG, Baelmans M, Ramon H, Nicolai BM, Verboven P, 2009. Modelling airflow within model plant canopies using an integrated approach. *Comput Electron Agr* 66: 9-24.

Endalew AM, Debaer C, Rutten N, Vercammen J, Delele MA, Ramon H, Nicolai BM, 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 Agr* 71: 128- 136.

Endalew AM, Debaer C, Rutten N, Vercammen J, Delele M.A, Ramon H, Nicolai BM, Verboven P, 2010b. A new integrated CFD modelling approach

towards air-assisted orchard spraying. Part II. Validation for different sprayer types. *Comput Electron Agr* 71: 137-147.

Endalew AM, Debaer C, Rutten N, Vercammen J, Delele MA, Ramon H, 2011. Modelling the effect of tree foliage on sprayer airflow in orchards. *Boundary Layer Meteorol* 138: 139-162.

Endalew AM, Dekeyser D, Nuyttens D, Goossens T, Hendrickx N, Duga AT, Nicolai BM, Verboven P, 2012. Assessment of orchard sprayers using computational fluid dynamics. *Aspect Appl Biol* 114: 413-420.

European Union, 2009. Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides. *Official Journal of the European Parliament L 309 of 24/11/2009*, 71-86.

Fantke P, Friedrich R, Joliet O, 2012. Health impact and damage cost assessment of pesticides in Europe. *Environ Int* 49: 9-17.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2012. Frutos cítricos. Frescos y elaborados. Estadísticas anuales 2012. Disponible en http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Citrus/Documents/CITRUS_BULLETIN_2012.pdf (consultado en junio de 2015).

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2013. Statistics Division. Disponible en <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E> (Consultado en junio de 2015).

Farooq M, Salyani M, 2002. Spray penetration into the citrus tree canopy from two air-carrier sprayers. *T ASAE* 45(5): 1287-1293.

Farooq M, Salyani M, 2004. Modeling of spray penetration and deposition on citrus tree canopies. *T ASAE* 47(3): 619-627.

Felsot AS, 2005. Drift of insecticide residues from orchards: empirical and modeling results for exposure assessment and risk management. Abstracts of papers of the American Chemical Society, vol 229: 73-74.

Ferziger H, Peric M, 2001. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer-Verlag (Berlin Germany), 431 pp (Disponible en <https://docs.google.com/file/d/0B7WvmGcRs5CzanBEeDIDaEk3dEU/edit>. consultado en enero de 2011).

Finnigan J, 2000. Turbulence in plant canopies. *Annu Rev Fluid Mech* 32: 519 – 571.

Finnigan J, Shaw RH, Patton EG, 2009. Turbulence structure above a vegetation canopy. *J Fluid Mech* 637: 387-424.

Fox RD, Brazee RD, Svensson SA, Reichard DL, 1992. Air jet velocities from a cross-flow fan sprayer. *T ASAE* 35(5): 1381-1384.

Fox RD, Derksen RC, Zhu H, Brazee RD, Svensson SA, 2008. A history of air-blast sprayer development and future prospects. *T ASABE* 51(2): 405-410.

Franke J, Iellsten A, Schlünzen I, Carissimo B, 2007. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. COST office

(Brussels, Belgium), 52 pp. Disponible en <http://www.mi.uni-hamburg.de/Official-Documents.5849.0.html> (consultado en enero de 2012).

Franz E, Bouse LF, Carlton JB, Kirk IM, Latheef MA, 1998. Aerial spray deposit relations with plant canopy and weather parameters. *T ASAE* 41: 959-966.

Ganzelmeier H, Rautmann D, Spangeberg R, Streloke M, Herrmann M, Wenzelburger HJ, 1995. *Studies on the spray drift of plant protection products*, Blackwell Wissenschafts-Verlag GmbH, Berlin, Germany.

Ganzelmeier H, Rautmann D, 2000. Drift, drift reducing sprayers and sprayer testing. *Asp Appl Biol* 57: 1-10.

Garcerá C, 2013. Racionalización de las aplicaciones de productos fitosanitarios para el control de *Aonidiella aurantii* Maskell (Hemiptera: Diaspididae) en cítricos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en <https://riunet.upv.es/handle/10251/31666> (consultado en noviembre de 2014).

Garcerá C, Moltó E, Chueca P, 2015. Mass balance of spray applications in Mediterranean citrus orchards. *Biosyst Eng. Special Issue "Engineering approaches for reducing spray drift"* (enviado).

García Ramos FJ, Vidal M, Bone A, Malon H, Aguirre J, 2012. Analysis of the air flow generated by an air-assisted sprayer equipped with two axial fans using a 3D sonic anemometer. *Sensors* 12(6): 7598-7613.

García Ramos FJ, Malón H, Aguirre AJ, 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(2): 2399-2418.

Georgiadis T, Dalpane E, Rossi F, Nerozzi F, 1996. Orchard-atmosphere physical exchanges: modelling the canopy aerodynamics. *ISHS Acta Hort* 416: 177-182.

Gil E, Llorens J, Llop J, Fàbregas X, Gallart M, 2013. Use of a terrestrial LIDAR sensor for drift detection in vineyard spraying. *Sensors* 13(1): 516-534.

Gil Y, Sinfort C, 2005. Emission of pesticides to the air during sprayer application: a bibliographic review. *Atmos Environ* 39: 5183-5193.

Gil Y, Sinfort C, Brunet Y, Polveche V, Bonicelli B, 2007. Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying. *Atmos Environ* 41: 2945-2957.

Giles DK, BenSalem E, Bagheri N, 1991. Turbulent jet characteristics of a dual-port, air-atomization spray nozzle. *J Agr Eng Res* 49: 133-149.

Goering CE, Butler B, 1975. Paired field studies of herbicide drift. *T ASAE* 18: 27-34.

Granell R, 2014. Análisis del flujo ambiental y propuesta metodológica para simulaciones CFD aplicadas a la ventilación natural de invernaderos. Tesis

doctoral. Disponible en <https://riunet.upv.es/handle/10251/37194> (consultado en noviembre de 2014).

Gregorio E, Solanelles F, Rocadenbosch F, Rosell JR, Sanz R, 2011. Airborne spray drift measurement using passive collectors and lidar systems. Proceedings of the SPIE 8174, 8174IL1-12.

Gregorio E, Rosell-Polo JR, Sanz R, Rocadenbosch F, Solanelles F, Garcerá C, Chueca P, Arnó J, del Moral I, Camp F, Viana R, Masip J, Camp F, Escolà A, Gràcia F, Planas S, Moltó, E. (2014). LIDAR as an alternative to passive collectors to measure pesticide spray drift. Atmos Environ 82: 83-93.

Guler H, Zhu H, Ozkan HE, Derksen RC, Yu Y, Krause CR , 2006. Spray characteristics and wind tunnel evaluation of drift reduction potential with air induction and conventional flat fan nozzle. T ASABE, Paper N° 06111.

Hall CD, 1975. The simulation of particle motion in the atmosphere by a numerical random-walk model. J. Royal Meteorol Soc 101(428): 235-244.

Hall FR, 1991. Influence of canopy geometry in spray deposition and IPM. HortScience 26: 1012-1017.

Haq K, Akesson NB, Yates WE, 1983. Analysis of droplet spectra and spray recovery as a function of atomizer type and fluid physical properties. ASTM STP 828, 67-82, Philadelphia, USA.

Herrera MI, García de la Figal A, Ramos E, Martín M, 2012. Simulación mediante la dinámica de fluidos por computadora del efecto de la velocidad del

viento en el desempeño de los pulverizadores agrícolas de ventilador. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 21(1): 19-25.

Hetherington MH, 1997. Measurement of the air flow characteristics of agricultural air carrier sprayer. Dissertation. Department of Agricultural Engineering, Michigan State University.

Hewitt AJ, Valcore DL, 1998. Nozzle selection and use for effective Spray application and drift minimization. ASAE Paper presented at Joint NAAA/ ASAE Technical Session, Las Vegas (USA).

Hewitt AJ, Maber J, Praat JP, 2002. Drift management using modeling and GIS systems. Proc. World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources. St. Joseph, (USA). pp: 290-296.

Hiscox AL, Miller DR, Nappo CJ, RossJ, 2006. Dispersion of fine spray from aerial applications in stable atmospheric conditions. T ASABE 49(5): 1513-1520.

Hobson PA, Miller PCH, Walklate PJ, Tuck CR, Western NM, 1993. Spray drift from hydraulic spray nozzles: the use of a computer simulation model to examine factors influencing drift. J Agri Eng Res 54: 293-305.

Hofman V, 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 2014).

Hołownicki R, Doruchowski G, Swiechowski W, Jaeken P, 2002. Methods of evaluation of spray deposit and coverage on artificial targets. EJPAU, Agricultural Engineering 5(1) #3. Disponible en <http://www.ejpau.media.pl/volume5/issue1/engineering/art-03.html>) (Consultado en enero de 2011).

Holterman HJ, Van de Zande JC, Porskamp HAJ, Huijsmans JFM, 1997. Modelling spray drift from boom sprayers. Comput Electron Agr 19: 1-22.

Holterman HJ, 2003. Kinetics and evaporation of water drops in air. IMAG report 2003-12. Wageningen UR, Holland.

Holterman HJ, Van de Zande JC, 2003. IMAG draft report. IMAG Drift Calculator v 1.1, User Manual.

ISO (International Standards Organization), 2005. ISO/FDIS 22866. Equipment for crop protection-Methods for the field measurement of spray drift. ISO, Geneva (Switzerland).

ISO (International Standards Organization), 2007. ISO/FDIS 22522. Crop Protection Equipment e Field Measurement of Spray Distribution in Tree and Bush Crops. ISO, Geneva (Switzerland).

ISO (International Standards Organization), 2008. ISO/FDIS 22856. Equipment for crop protection-Methods for the laboratory measurement of spray drift- Wind tunnels. ISO, Geneva (Switzerland).

Jurewicz J, Hanke W, 2008. Prenatal and childhood exposure to pesticides and neurobehavioral development: review of epidemiological studies. *Int J Occ Med Environ Health* 21(2): 121-132.

Jensen PK, Olesen MH, 2014. Spray mass balance in pesticide applications: A review. *Crop Prot* 61: 23-31.

Johansen CA, Mayer DF, 1990. Pollinator protection: a bee & pesticide handbook. Wicwas Press.

Jørgensen L, 2000. Physics: the physics of sprays, en: Hardi International. *International Application Technology Course 2000*. Taastrup, 1 (2): 38-48.

Juste F, Sanchez S, Ibañez R, Val L, García C, 1990. Measurement of spray deposition and efficiency of pesticide application in citrus orchards. *J Agr Eng Res* 46(3): 187-196.

Kuchnicki TC, Clarke AE, François DL, Glaser JD, Hodge VA, Wolf TM, 2004. Use of buffer zones for the protection of environmental habitats in Canada. *Asp Appl Biol* 71: 133-140.

Larbi PA, Salyani M, 2011. Model to predict spray deposition in citrus airblast sprayer applications: Part I. Spray dispersion. *Trans. ASABE*. 55, 29-39.

Launder B, Spalding D, 1972. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London.

Launder BE, Sharma BI, 1974. Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Lett. Heat Mass Trans* 1: 131-138.

Launder BE, Reece GJ, Rodi W, 1975. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulent Closure. *J Fluid Mech* 68: 537-566.

Verstraete A, Schiffers B, Destain MF, 2009. Evaluation of realtime spray drift using RTDrift Gaussian advection-diffusion model. *Commun Agric Appl Biol Sci* 74:11-24.

Lešnik M, Stajniko D, Vajs S, 2014. Interactions between spray drift and sprayer travel speed in two different apple orchard training systems. *Int J Env Sci & Tech*, 12: 3017-3028.

MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). Anuario de Estadística, 2013. Disponible en http://www.magrama.gob.es/estadistica/pags/anuario/2013/AE_2013_13.pdf (consultado en enero de 2015).

Márquez L, 2007. Pulverización y pulverizadores neumáticos. *Agrotécnica* 2:34-41.

Maybank J, Yoshida K, Grover R. 1978. Spray drift from agricultural pesticide applications. *J Air Pollut Control Assoc* 28: 1009-1014.

Meli SM, Renda A, Nicelli M, Capri E, 2003. Studies on pesticide spray drift in a Mediterranean citrus area. *Agronomie* 23: 667–672.

Menter FR, 1994. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. AIAA, 93-2906.

Menter F, 2002. CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor Safety Applications, European commission: 5th EURATOM FRAMEWORK PROGRAMME.

Mercader G, Pellicer J, Fabado F, Moltó E, Juste F, 1995. Influencia de los colectores sobre los parámetros característicos de la pulverización en cítricos. VI Congreso de la SECH, 322. Barcelona (Spain), Abr 25-27. pp: 322.

Mickle RE, 1996. Influence of aircraft vortices on spray cloud behaviour. J Am Mosq Control Assoc 12(2): 372-379.

Mickle RE, 1999. Analysis of Lidar studies conducted during aerial spray drift trials. REMPSpC Report, Ayr, Canada.

Hiscox AL, Miller DR, Nappo CJ, Ross J, 2006. Dispersion of fine spray from aerial applications in stable atmospheric conditions. T ASABE 49(5): 1513-1520.

Miller PCH, Hadfield DJ, 1989. A simulation model of the spray drift from hydraulic nozzles. J Agr Eng Res 42: 135-147.

Miller DR, Stoughton TE, Steinke WE, Huddleston EW, Ross JB, 2000. Atmospheric stability effects on pesticide drift from an irrigated orchard. T ASAE 43: 1057-1066.

Miller DR, Salyani M, Hiscox A, 2003. Remote measurement of spray drift from orchard sprayers using lidar. ASAE Paper N°. 031093.

Miller GT, 2004. Sustaining the Earth. Thompson Learning, Inc. Pacific Grove, USA.

Miller PCH, Smith RW, 1997. The effects of forward speed on the drift from boom sprayers. The 1997 Brighton Crop Protection Conference- Weeds. Brighton (UK). pp: 399-406.

Moltó E, Garcerá C, Chueca P, 2006. Manejo de turboatomizadores para el cultivo de cítricos. *Vida Rural* 237: 56-62.

Moltó E, Chueca P, Santiago S, Garcerá C, 2007. Modelización de la eficacia de insecticidas para el control del piojo rojo de California. *Vida Rural* 257: 36-40.

Moltó E, Cruz C, Chueca P, 2011. Balance de masas en las aplicaciones de fitosanitarios en cítricos. *Levante Agríc. Rev. Int. Cítricos* 79-87.

Moltó E, Rosell JR, Gil E, Salcedo R, Chueca P, Garcerá C, 2012. Estrategias integrales para una utilización segura y eficaz de los productos fitosanitarios. *Vida rural* 353: 32-37.

Moltó E, Garcerá C, Chueca P, 2013. La reducción de la deriva de los tratamientos fitosanitarios en citricultura. *Vida rural* (369): 66-70.

Nesheim ON, Fishel FM, 2009. Protecting Water Resources from Agricultural Pesticides. University of Florida EDIS Publication P11. Disponible en <http://edis.ifas.ufl.edu/pi001> (consultado en junio de 2012).

Nikuradse J, 1933. Strömungsgestze in rauhen rohren. VDIF orschungsheft, 1-22(4).

Nordby A, Skuterud R, 1975. The effects of boom height, working pressure and wind speed on spray drift. Weed Res 14: 385-395.

Nuyttens D, De Schamphelire M, Steurbaut W, Baetens K, Verboven P, Nicolai B, Ramon H, Sonck B, 2006. Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers: Part 1. Meteorological conditions. Aspects Appl Biol 77(2): 331-339.

Nuyttens D, 2007. Drift from field crop sprayers: The influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means. Tesis doctoral. Universidad Católica de Leuven. Disponible en http://www.researchgate.net/profile/David_Nuyttens/publication/28360407_Drift_from_field_crop_sprayers__the_influence_of_spray_application_technology_determined_using_indirect_and_direct_drift_assessment_means/links/0fcfd50fe428b447f3000000.pdf (Consultado en enero de 2015).

Nuyttens D, Taylor WA, De Schamphelire M, Verboven P, Dekeyser D, 2009. Influence of nozzle type and size on drift potential by means of different wind tunnel evaluation methods. Biosyst Eng 103(3): 271-280.

Nuyttens D, De Schampheleire M, Verboven P, Sonck B, 2010. Comparison between indirect and direct spray drift assessment methods. *Biosyst Eng* 105(1): 2-12.

Panneton B, Lacasse B, Thériault R, 2005. Penetration of spray in apple trees as a function of airspeed, airflow, and power for tower sprayers. *Biosyst Eng* 47(2): 13-20.

PascuzziS, GuarellaA, 2008. Kinematic study of the air flow produced by some sprayers used in “tendome” sprayers. *J Agr Eng* 3: 1-6.

Pergher G, PetrisR, 2007. Canopy structure and deposition efficiency of vineyard sprayers. *J Agr Eng* 38(2): 31-38.

Pope SB, 2000. *Turbulent flows*. Cambridge University Press, Cambridge.

Pratt JP, Maber JF, Manktelow DWL, 2000. The effect of canopy development and sprayer position on spray drift from a pipfruit orchard. *NZ Plant Protect* 53: 241-247.

Raupach MR, Leys FL, 1999. The efficacy of vegetation in limiting spray drift and dust movement. Report prepared for the Department of Land and Water Conservation, Gunnedah, Australia by CSIRO, Canberra, Australia. Disponible en <<http://www.clw.csiro.au/publications/technical99/tr47-99.pdf>> (consultado en junio de 2014).

Reichard DL, Retzer HJ, Liljedahl LA, Hall FR,1977. Spray droplet size distributions delivered by airblast orchard sprayers. *T ASAE* 20(2):232-237.

Reichard DL, Fox RD, Brazee RD, Hall FR, 1979. Air velocities delivered by orchard air sprayers. *T ASAE* 22(1): 69-74.

Reichard DL, Zhu H, Fox RD, Brazee RD, 1992. Computer simulations of variables that influences spray drift. *T ASAE* 35: 1401-1407.

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*, pp. 174:935-982.

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. Series A, 210, 307-357.

Rockets, R. (2007). Down On The Farm? Yields, Nutrients And Soil Quality. Disponible en www.scienceagogo.com (consultado en octubre de 2010).

Salcedo R, Granell R, Garcerá C, Palau G, Moltó E, Chueca P, 2012. CFD model of the effect of canopy on air velocity in air-assisted treatments in mandarin orchards. *International Conference of Agricultural Engineering (CIGR-EurAgEng2012)*. IVIA, Valencia (Spain). Jul 8-12.

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-blaster sprayer. *12th International Workshop on Sustainable*

Plant Protection Techniques in Fruit Growing (SuproFruit2013). IVIA, Valencia (Spain), Jun 26-28. pp: 95-97.

Sanz C, 2003. A note on k- ϵ modelling of vegetation canopy air-flows. Bound-Layer Meteor 108: 191-197.

Salyani M, 1988. Droplet size effect on spray deposition efficiency of citrus leaves. T ASAE 31: 1680-1684.

Salyani M, Whitney JD, 1990. Ground speed effect on spray deposition inside citrus trees. T ASAE 33: 361-366.

Salyani M, Farooq M, 2004. Drift potential of citrus air-carrier sprayers. FSHS Proceedings 117, 130-135.

Salyani M, Farooq M, Sweeb R, 2007. Spray depositions and mass balance incitrus orchards applications. T ASABE 50: 1963-1969.

Salyani M, Miller DR, Farooq M, Sweeb RD, 2013. Effects of sprayer operating parameters on airborne drift from citrus air-carrier sprayers. Agr Eng Inte: CIGR J 15(1): 27-36.

Shayler HA, Lepak JM, Kraft CE, Knuth BA, 2009. Mercury contamination in sport fish in the Northeastern United States: considerations for future data collection. BioScience 59(2): 174-181.

Shelton AB, Neuman RD, 2011. Vegetation canopy airflow modelling for airborne dispersion of DMDS. 2nd International Research Conference on Huanglongbing (IRCHLB 2011). Huanglongbing (USA), En 10-14, pp: 287-292.

Shih TH, Liou WW, Shabbir A, Yang Z, Zhu J. 1995. A new $k-\varepsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Comput Fluids* 24(3): 227-238.

Smith DB, Harris FD, Goering CE, 1982. Variables affecting drift from ground boom sprayers. *T ASABE* 25(6): 1499-1503.

Smith DB, Askew SD, Morris WH, Shaw DR, Boyette M, 2000. Droplet size and leaf morphology effects on pesticide spray deposition. *T ASAE* 43: 255-259.

Stainier C, Destain MF, Schiffers B, Lebeu F, 2006. Droplet size spectra and drift effect of two phenmedipham formulations and four adjuvants mixtures. *Crop Prot* 25: 1238-1243.

Steinke WE, Yates WE, 1989. Modifying gaussian models to obtain improved drift predictions. *T ASAE* 89152.

Stover E, Scotto D, Wilson C, Salyani M, 2002. Spray Applications to Citrus: Overview of Factors Influencing Spraying Efficacy and Off-target Deposition. EDIS HS-128. Disponible en <http://ufdc.ufl.edu/IR00002698/00001> (consultado en diciembre de 2014).

Su HB, Schmid HP, Vogel CS, Curtis PS, 2008. Effects of canopy morphology and thermal stability on mean flow and turbulence statistics observed inside a mixed hardwood forest. *Agri Forest Meteor* 148: 862-882.

Svensson SA, Brazee RD, Fox RD, Williams KA, 2003. Air jet velocities in and beyond apple trees from a two-fan cross-flow sprayer. *T ASAE* 46(3): 611-621.

Teske ME, Bird SL, Esterly DM, Curbishley TB, Ray SL, Perry SP, 2002. AgDrift: A model for estimating near-field spray drift from aerial applications. *Environl Toxicol Chem* 21: 659-671.

Teske ME, Thistle HW, Schou WC, Miller PCH, Strager JM, Richardson B, Butler Ellis MC, Barry JW, Twardus DB, Thompson DG, 2011. A review of computer models for pesticide deposition prediction. *T ASABE* 54:1-14.

Thistle HW, 2000. The role of stability in fine pesticide droplet dispersion in the atmosphere: a review of physical concepts. *T ASAE* 43: 1409-1413.

Thistle HW, 2004. Meteorological concepts in the drift of pesticides. *International Conference on Pesticide Application for Drift Management, Waikoloa (USA), Oct 27-29. pp: 156-162.*

Thompson N, Ley AJ, 1983. Estimating spray drift using a random-walk model of evaporating drops. *J Agr Eng Res* 28: 419-435.

Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, Kataoka H, Nozu T, Yoshikawa M, Shirasawa T, 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *J Wind Eng Ind Aerod*, 96(10): 1749-1761.

Tsai MY, Elgethun K, Ramaprasad J, Yost MG, Felsot AF, Hebert VR, 2005. The Washington aerial spray drift study: modeling pesticide spray drift deposition from an aerial application. *Atmos Environ* 39, 6194-6203.

Tsay JR, Liang LS, Lu LH, 2004. Evaluation of an air-assisted boom spraying system under a no-canopy condition using CFD simulation. *T ASAE* 47(6): 1887-1897.

Urbaneja A, Catalán J, Tena A, Jacas J. *Gestión Integrada de Plagas de Cítricos*, <http://gipcitricos.ivia.es>, 2015.

Van de Zande JC, Stallinga H, Michielsen JMG, Van Velde P, 2004. Effects of sprayer speed on spray drift. *International Conference on Pesticide Application for Drift Management, Waikoloa (USA), Oct 27-29*. pp: 339-339.

Van de Zande JC, Stallinga H, Michielsen JMG, Van Velde P, 2005. Effect of sprayer speed on spray drift. *Annu Rev Agric Eng* 4(1): 129-142.

Vercruyse F, Steurbaut W, 2002. POCER, the pesticide occupational and environmental risk indicator. *Crop Prot* 21: 301-315.

Walklate PJ, 1987. A random-walk model for dispersion of heavy-particles in turbulent air-flow. *Bound-Layer Meteor* 39: 175-190.

Walklate PJ, 1992. A simulation study of pesticide drift from an air-assisted orchard sprayer. *J Agr Eng Res* 51: 263-283.

Walklate PJ, Weiner KL, Parkin CS, 1993a. *Computational Fluid Dynamics: A tool for evaluating air assistance sprayer design concepts*. ANPP-

BCPC Second International Symposium on Pesticides Application Techniques, Strasbourg (France), Sept 22-24. pp: 101-108.

Walklate PJ, Weiner KL, Parkin CS 1993b. A simple model for operational control of crop penetration by an air-assistance sprayer. ANPP-BCPC Second International Symposium on Pesticides Application Techniques, Strasbourg(France), Sept 22-24. pp: 255-261.

Walklate PJ, Weiner KL, 1994. Engineering models of air assistance orchard sprayers. *Acta Hort* 372: 75-82.

Walklate PJ, Weiner KL, Parkin CS, 1996. Analysis of experimental measurements made on a moving air-assisted sprayer with two-dimensional air-jets penetrating a uniform crop canopy. *J Agr Eng Res* 63: 365-378.

Walklate PJ, Cross JV, Richardson GM, Murray RA, Baker DE, 2002. Comparison of different spray volume deposition models using LIDAR measurements of apple orchards. *Biosyst Eng* 82: 253-267.

Wang M, Rautmann D, 2008. A simple probabilistic estimation of spray drift-Factors determining spray drift and development. *Environ Toxicol Chem* 27: 2617-2626.

Waxman MF, 1998. *Agrochemical and Pesticide Safety Handbook*. Boca Raton, USA: CRC Press.

Weiner KL, Parkin CS, 1993. The use of computational fluid dynamic code for modelling spray from a mistblower. *J Agr Eng Res* 55: 313-324.

Wilcox DC, 1988. Re-assessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. AIAA 26: 1299-1310.

Williamson RE, Threadgill ED, 1974. A simulation for the dynamics of evaporating spray droplets in agricultural spraying. T ASAE 17: 254-261.

Wolf TM, Grover R, Wallace K, Shewchuk SR, Maybank J, 1993. Effect of protective shields on drift and deposition characteristics of field sprayers. Can J Plant Sci 73(4), 1261-1273.

Wolters A, Linnemann V, Van de Zande JC, Vereecken H, 2008. Field experiment on spray drift: Deposition and airborne drift during application to a winter wheat crop. Sci Total Environ 405(1): 269-277.

Womac A, Etheridge R, Seibert A, Hogan D, Ray S, 2001. Sprayer speed and venturi nozzle effects on broadcast application uniformity. T ASAE 44: 1437-1444

Xu ZG, Walklate PJ, Rigby SG, Richardson GM, 1998. Stochastic modelling of turbulent spray dispersion in the near-field of orchard sprayers. J Wind Eng Ind Aerodyn 74-76: 295-304.

Yakhot V, Orszag SA, Thangam S, Gatski TB, Speziale CG, 1992. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Phys Fluids 4(7): 1510-1520.

Yates WE, Cowden RE, Akesson NB, 1983. Nozzle orientation, air speed and spray formulation affects on drop size spectrums. T ASAE 26(6): 1638-1643.

Yates WE, Cowden RE, Akesson NB, 1985. Drop size spectra from nozzles in highspeed airstreams. *T ASAE* 28(2): 405-410.

Yi C, 2008. Momentum transfer within canopies. *J Appl Meteor Clim* 47: 262-275.

Yue W, Meneveau C, Parlange MB, Zhu W, Kang HS, Katz J, 2008. Turbulent kinetic energy budgets in a model canopy: comparisons between LES and wind-tunnel experiments. *Environ Fluid Mech* 8(1): 73-95.

Zhu H, Zondag RH, Derksen RC, Reding ME, Krause CR, 2008. Influence of spray volume on spray deposition and coverage within nursery trees. *J Environ Hort* 26(1): 51-57.

13. Anejo 1: Simulaciones preliminares considerando el primer árbol como un medio poroso.

Tradicionalmente, la vegetación se ha considerado como un medio poroso en CFD. Partiendo de esta premisa, las simulaciones preliminares a la presente tesis (Salcedo *et al.*, 2012) consideraban la copa del primer árbol como un medio poroso (Figura 30). Además, en este modelo preliminar había una sola fila de árboles, con la misma geometría de copa que las filas adyacentes del modelo de la tesis (Figura 11) y también dotando de resistencia porosa al espacio entre la copa y el suelo ("tronco" en la Figura 32). La entrada de aire en el modelo también era diferente, tomando únicamente las velocidades registradas del poste A del ensayo explicado en el epígrafe 8.2.1 (Figura 10). El modelo turbulento del aire era el k - ϵ estándar.

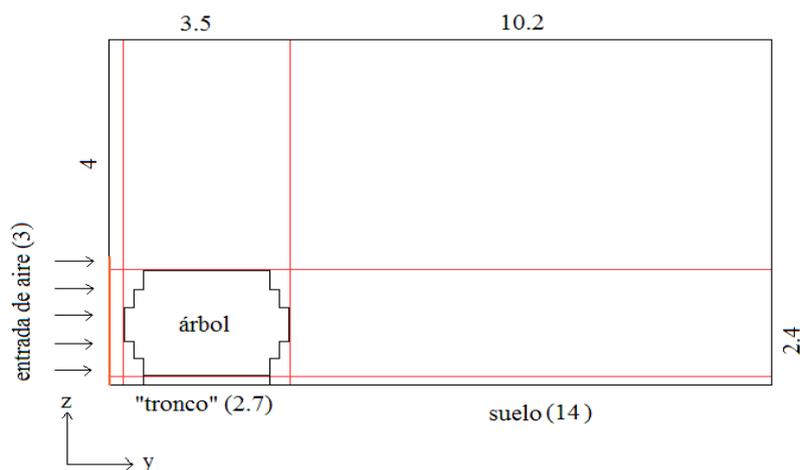


Figura 32. Descripción de la geometría del modelo. Cotas en m.

En las simulaciones siguientes a Salcedo *et al.* (2012) se trabajaba ya con la presencia de las dos filas adyacentes de árboles y la salida de aire ya era como

en la presente tesis (Figura 11). Sin embargo, se continuó considerando la primera copa porosa (aunque sin resistencia entre la copa y el suelo), con la misma geometría que la Figura 32. El objetivo era tratar de ajustar la resistencia de la copa.

Para determinar la resistencia de un cuerpo poroso al paso de un flujo, Fluent® relaciona la caída de presión que se produce con la ecuación de Darcy. Esta ecuación es una suma de las pérdidas por la inercia y de las pérdidas por viscosidad. Como la viscosidad se consideraba despreciable, se trabajaba directamente con la inercia (m^{-1}). Para ajustar el valor de la resistencia de la vegetación, se comparaban los valores medios de velocidad en el poste C del ensayo con los de cada simulación. Esta forma de trabajar se adoptó a partir de la metodología de Da Silva *et al.* (2006), que determinaba la resistencia de la copa a partir de la diferencia de velocidades antes y después de atravesar la vegetación.

Las tablas 15, 16 y 17 muestran los valores numéricos de estas simulaciones en función de la resistencia del primer del árbol frente al ensayo

Tabla 15. Velocidades en la simulación frente al ensayo.

Altura (m)	Ensayo (m/s)		32 m^{-1} (m/s)		36 m^{-1} (m/s)		40 m^{-1} (m/s)	
	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,2	5,32	-0,34	9,26	0,52	9,32	0,53	9,37	0,54
0,4	3,23	-0,38	5,26	0,31	5,23	0,30	5,21	0,30
0,6	1,56	-0,40	2,73	-0,10	2,65	-0,12	2,59	-0,14
0,8	0,98	-0,22	1,68	-0,28	1,60	-0,31	1,53	-0,34
1,0	0,62	-0,38	1,23	-0,28	1,17	-0,31	1,11	-0,34
1,2	0,09	-0,44	1,00	-0,22	0,94	-0,25	0,90	-0,29
1,4	-0,61	-0,34	0,86	-0,11	0,82	-0,14	0,79	-0,18
1,6	-0,12	-0,34	0,75	0,04	0,72	0,00	0,69	-0,04
1,8	-0,76	-0,52	0,64	0,19	0,61	0,16	0,58	0,12
2,0	-0,63	-0,41	0,51	0,36	0,49	0,33	0,46	0,30
2,2	-0,78	-0,33	0,36	0,53	0,33	0,50	0,31	0,47
2,4	-0,64	-0,42	0,19	0,67	0,16	0,65	0,13	0,63

2,6	-2,26	-0,33	0,02	0,79	-0,02	0,78	-0,05	0,76
2,8	-1,49	-0,50	-0,16	0,90	-0,20	0,89	-0,24	0,89
3,0	-1,44	-0,49	-0,31	0,98	-0,35	0,99	-0,40	0,99

Tabla 16. Velocidades en la simulación frente al ensayo.

Altura (m)	Ensayo (m/s)		44 m ⁻¹ (m/s)		50 m ⁻¹ (m/s)		60 m ⁻¹ (m/s)	
	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,2	5,32	-0,34	9,42	0,54	9,49	0,55	9,58	0,57
0,4	3,23	-0,38	5,19	0,30	5,17	0,30	5,13	0,29
0,6	1,56	-0,40	2,53	-0,16	2,45	-0,19	2,33	-0,22
0,8	0,98	-0,22	1,47	-0,36	1,39	-0,40	1,27	-0,45
1,0	0,62	-0,38	1,06	-0,37	0,99	-0,41	0,90	-0,46
1,2	0,09	-0,44	0,86	-0,31	0,81	-0,36	0,75	-0,42
1,4	-0,61	-0,34	0,76	-0,21	0,72	-0,25	0,67	-0,32
1,6	-0,12	-0,34	0,66	-0,07	0,63	-0,11	0,59	-0,18
1,8	-0,76	-0,52	0,56	0,09	0,53	0,04	0,50	-0,03
2,0	-0,63	-0,41	0,44	0,26	0,42	0,22	0,38	0,16
2,2	-0,78	-0,33	0,29	0,44	0,26	0,41	0,22	0,35
2,4	-0,64	-0,42	0,11	0,61	0,07	0,58	0,02	0,54
2,6	-2,26	-0,33	-0,08	0,75	-0,12	0,73	-0,19	0,71
2,8	-1,49	-0,50	-0,27	0,88	-0,32	0,88	-0,41	0,88
3,0	-1,44	-0,49	-0,44	1,00	-0,50	1,01	-0,61	1,03

Tabla 17. Velocidades en la simulación frente al ensayo.

Altura (m)	Ensayo (m/s)		100 m ⁻¹ (m/s)		125 m ⁻¹ (m/s)		150 m ⁻¹ (m/s)	
	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,2	5,32	-0,34	9,84	0,61	9,96	0,64	10,05	0,65
0,4	3,23	-0,38	5,05	0,29	5,02	0,29	4,99	0,29
0,6	1,56	-0,40	2,03	-0,31	1,90	-0,35	1,80	-0,37
0,8	0,98	-0,22	0,96	-0,58	0,84	-0,64	0,74	-0,69
1,0	0,62	-0,38	0,68	-0,62	0,59	-0,69	0,53	-0,76
1,2	0,09	-0,44	0,60	-0,60	0,55	-0,69	0,51	-0,77
1,4	-0,61	-0,34	0,57	-0,52	0,53	-0,62	0,50	-0,71
1,6	-0,12	-0,34	0,51	-0,40	0,48	-0,51	0,45	-0,60
1,8	-0,76	-0,52	0,42	-0,25	0,39	-0,35	0,37	-0,44
2,0	-0,63	-0,41	0,29	-0,04	0,25	-0,13	0,22	-0,21
2,2	-0,78	-0,33	0,09	0,19	0,03	0,12	-0,03	0,07
2,4	-0,64	-0,42	-0,15	0,43	-0,24	0,39	-0,33	0,37
2,6	-2,26	-0,33	-0,42	0,67	-0,54	0,67	-0,66	0,67
2,8	-1,49	-0,50	-0,71	0,91	-0,87	0,94	-1,01	0,97
3,0	-1,44	-0,49	-0,97	1,12	-1,16	1,18	-1,32	1,22

Para comparar los valores de estas simulaciones se utilizaba el coeficiente

R^2 y el error medio de predicción $RMSEP$ (Tabla 18). También se usaban las

gráficas con los valores de las velocidades de las simulaciones frente a los datos experimentales (Figura 33).

Tabla 18. R^2 y el error medio de predicción RMSEP de las simulaciones.

Simulación	R^2		RMSEP (m/s)	
	U_y	U_z	U_y	U_z
32 m ⁻¹	0,93	0,16	1,62	0,81
36 m ⁻¹	0,92	0,16	1,60	0,80
40 m ⁻¹	0,92	0,16	1,58	0,79
44 m ⁻¹	0,92	0,16	1,57	0,78
50 m ⁻¹	0,91	0,15	1,55	0,77
60 m ⁻¹	0,91	0,03	1,53	0,76
100 m ⁻¹	0,90	0,01	1,49	0,75
125 m ⁻¹	0,89	0,01	1,48	0,76
150 m ⁻¹	0,89	0,01	1,48	0,78

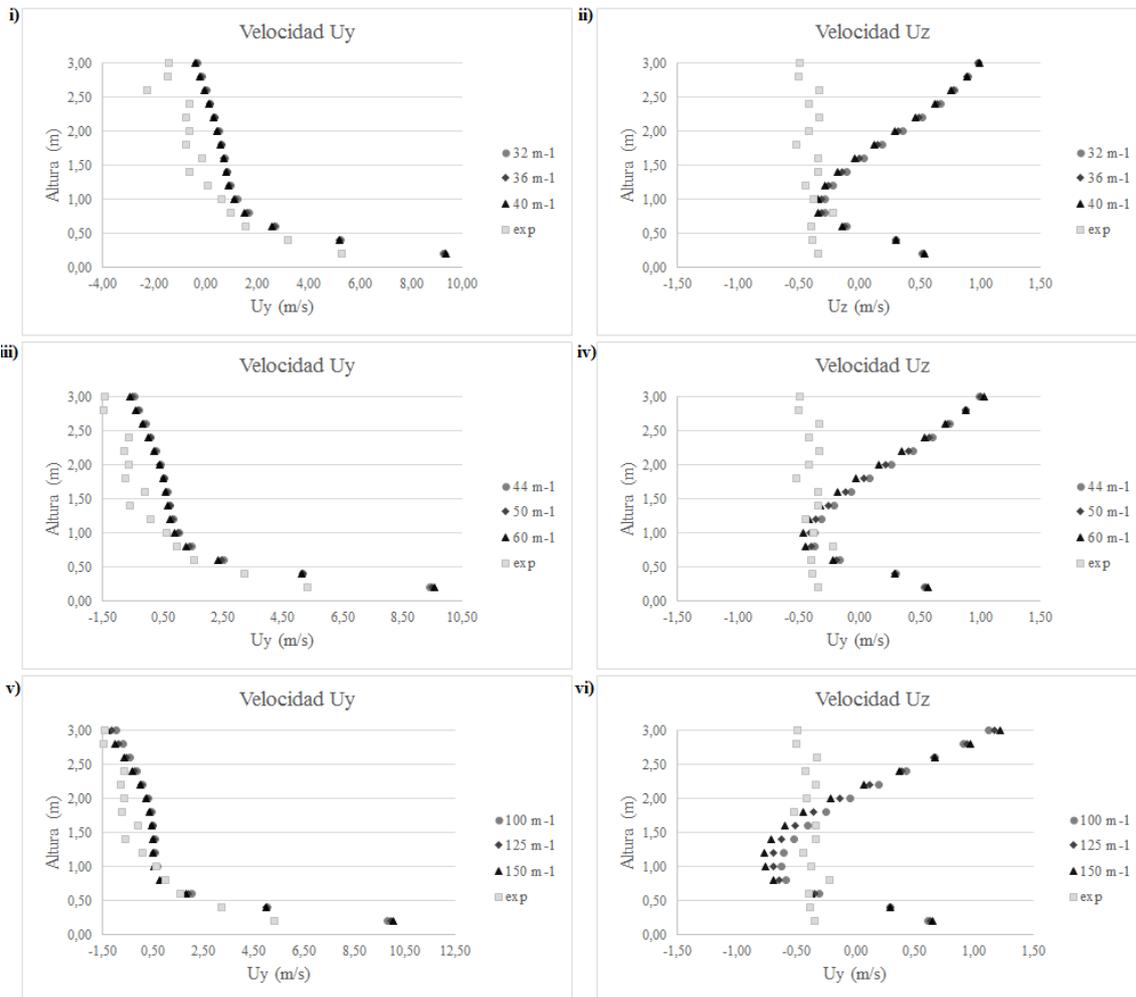


Figura 33. Representación de los valores de cada componente de la velocidad (U_y , U_z) frente a las velocidades experimentales.

Las simulaciones fueron capaces de reproducir el vórtice detrás de la copa, pero ninguna reprodujo el vórtice situado encima. A modo de ejemplo, la Figura 34 muestra los vectores de la velocidad de la simulación con una resistencia de copa de 100 m^{-1} . Entre el primer y el segundo árbol se observaba que los vectores rotan en forma de vórtice.

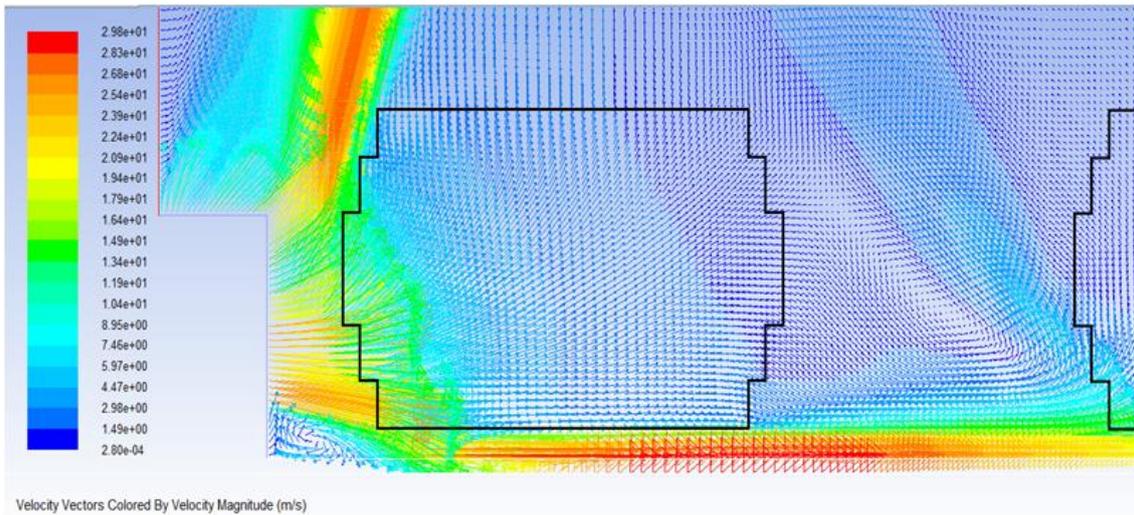


Figura 34. Diagrama de los vectores considerando la primera copa como un medio poroso. Colores según el valor del módulo (m/s).

Los resultados invitaron a pensar en nuevas formas para simular el comportamiento de los naranjos en la simulación y plantearse el modelo de turbulencia del aire.

14. Anejo 2: Resultados experimentales y del modelo

14.1. Valores empleado en el ajuste del modelo

A continuación, primero se presentan los datos experimentales y computacionales durante la fase de ajuste del modelo (epígrafes 8.3.1 y 8.3.3) para cada geometría.

14.1.1. Resultados con la geometría 1

Se presentan las velocidades en el poste C (Tabla 19), poste D (Tabla 21) y postes E, F y G (Tabla 22). La Tabla 20 muestra las variaciones de los módulos de las velocidades y los ángulos entre los vectores experimentales y los simulados en el poste C.

Tabla 19. Velocidades en la simulación con la geometría 1 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste C.

Poste C	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,2	4,73	-1,08	0,12	0,66	0,09	2,10	-0,43	0,72
0,4	22,67	-4,39	21,51	-2,62	20,40	-2,45	21,10	-2,49
0,6	20,42	-2,71	22,22	-2,07	22,26	-1,99	22,25	-1,99
0,8	21,90	0,40	19,07	-0,44	19,03	-0,37	19,03	-0,38
1,0	20,77	4,05	22,52	1,52	22,50	1,64	22,51	1,57
1,2	17,73	6,60	16,81	2,91	16,80	3,00	16,88	2,94
1,4	18,70	9,18	7,35	2,56	7,37	2,60	7,38	2,59
1,6	15,86	10,15	10,67	6,14	10,68	6,15	10,73	6,17
1,8	13,24	11,15	13,19	8,99	13,23	8,98	13,23	8,97
2,0	10,98	10,93	13,61	10,18	13,67	10,11	13,67	10,11
2,2	8,58	9,81	7,93	6,30	7,96	6,22	7,80	6,10
2,4	5,91	8,20	7,18	5,73	7,30	5,68	7,27	5,71
2,6	3,72	5,83	6,02	4,98	5,96	4,78	5,97	4,83
2,8	3,57	6,90	3,13	2,63	3,05	2,45	3,05	2,49
3,0	3,16	6,03	1,45	1,10	1,44	1,03	1,49	1,13

Tabla 20. Diferencias de ángulos y variaciones de los módulos entre las velocidades experimentales y simuladas en el poste C.

Poste C Altura (m)	Diferencia de ángulos (°)			Variaciones de los módulos (%)		
	$k-\varepsilon$	SST $k-\omega$	RSM	$k-\varepsilon$	SST $k-\omega$	RSM
0,2	4,14	4,15	4,25	20,01	19,58	19,75
0,4	7,31	7,34	7,45	22,16	20,48	20,19
0,6	15,81	15,72	16,08	13,00	12,53	12,84
0,8	11,99	9,12	12,24	4,60	2,93	3,58
1,0	2,16	54,11	18,85	0,61	0,74	0,23
1,2	26,87	47,46	54,85	0,80	1,11	0,94
1,4	26,82	13,71	11,14	1,02	1,06	0,79
1,6	25,27	37,16	34,79	1,59	1,76	1,31
1,8	3,32	8,03	2,95	1,25	1,37	0,73
2,0	4,15	13,03	6,90	1,77	1,69	0,94
2,2	2,53	8,49	1,95	1,62	1,59	0,84
2,4	11,55	23,38	16,26	1,71	1,61	0,94
2,6	9,69	4,15	4,61	0,39	0,36	0,75
2,8	4,47	23,24	9,98	0,39	0,62	0,34
3,0	10,40	53,35	17,73	0,30	1,24	0,69

Tabla 21. Velocidades en la simulación con la geometría 1 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste D.

Poste D Altura (m)	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,2	5,32	-0,34	25,32	0,21	24,89	0,21	25,06	0,25
0,4	3,23	-0,38	25,38	0,24	23,70	0,24	23,41	0,28
0,6	1,56	-0,40	14,54	0,41	14,07	0,37	14,37	0,47
0,8	0,98	-0,22	5,57	-0,06	3,91	-0,24	4,55	-0,03
1,0	0,62	-0,38	1,11	-0,73	0,07	-0,88	0,45	-0,54
1,2	0,09	-0,44	-0,31	-1,14	-0,80	-1,11	-0,77	-0,82
1,4	-0,61	-0,34	-0,90	-1,31	-1,27	-1,16	-1,12	-0,94
1,6	-0,12	-0,34	-1,34	-1,36	-1,69	-1,12	-1,29	-0,93
1,8	-0,76	-0,52	-1,72	-1,32	-2,04	-1,00	-1,41	-0,86
2,0	-0,63	-0,41	-2,20	-1,22	-2,27	-0,83	-1,51	-0,74
2,2	-0,78	-0,33	-2,22	-1,07	-2,35	-0,62	-1,57	-0,61
2,4	-0,64	-0,42	-2,28	-0,90	-2,25	-0,39	-1,58	-0,48
2,6	-2,26	-0,33	-2,17	-0,70	-1,95	-0,14	-1,51	-0,35
2,8	-1,49	-0,50	-1,88	-0,48	-1,43	0,11	-1,32	-0,20
3,0	-1,44	-0,49	-1,35	-0,20	-0,58	0,40	-0,94	-0,02

Tabla 22. Velocidades en la simulación con la geometría 1 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales en los postes E, F y G.

Poste E		Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	
3,1	1,98	3,41	11,73	9,20	10,64	7,50	10,61	7,73	
3,6	-0,50	0,27	5,74	4,36	5,01	3,45	5,38	3,82	
4,1	-0,35	0,55	1,63	1,08	1,35	7,19	1,42	0,85	
Poste F									
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	
3,1	-1,37	-0,42	13,08	9,30	12,01	7,45	11,39	7,45	
3,6	-1,12	-0,20	14,53	9,90	14,32	8,57	14,68	9,30	
4,1	-1,20	-0,05	7,23	4,77	5,87	3,41	6,70	4,14	
Poste F									
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	
3,1	-2,05	-0,54	3,26	2,18	6,80	3,56	4,06	2,37	
3,6	-1,91	-0,43	12,98	7,91	13,90	7,39	13,75	7,85	
4,1	-1,61	-0,39	14,15	8,41	14,65	7,44	15,08	8,32	

14.1.2. Resultados con la geometría 2

Se presentan las velocidades en el poste C (Tabla 23), poste D (Tabla 25) y postes E, F y G (Tabla 26). La Tabla 24 muestra las variaciones de los módulos de las velocidades y los ángulos entre los vectores experimentales y los simulados en el poste C.

Tabla 23. Velocidades en la simulación con la geometría 2 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste C.

Poste C	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,2	4,73	-1,08	0,82	1,28	0,96	1,31	-0,31	1,14
0,4	22,67	-4,39	21,65	-2,68	19,43	-2,57	21,23	-2,59
0,6	20,42	-2,71	22,21	-2,19	22,20	-2,16	22,24	-2,11
0,8	21,90	0,40	19,16	-0,59	19,04	-0,52	19,13	-0,53
1,0	20,77	4,05	22,51	1,30	22,47	1,41	22,49	1,33
1,2	17,73	6,60	16,79	2,76	16,79	2,86	16,86	2,78
1,4	18,70	9,18	7,26	2,53	7,29	2,58	7,28	2,56
1,6	15,86	10,15	10,45	6,31	10,42	6,38	10,47	6,37
1,8	13,24	11,15	12,70	9,44	12,59	9,55	12,63	9,50
2,0	10,98	10,93	13,08	11,18	12,96	11,41	13,03	11,32
2,2	8,58	9,81	7,95	7,61	7,98	7,96	7,88	7,73
2,4	5,91	8,20	6,03	6,07	5,80	6,14	5,78	6,04
2,6	3,72	5,83	6,02	6,50	5,93	6,78	5,99	6,77
2,8	3,57	6,90	3,89	4,48	3,98	4,90	3,96	4,78
3,0	3,16	6,03	2,11	2,49	2,25	2,89	2,18	2,75

Tabla 24. Diferencias de ángulos y variaciones de los módulos entre las velocidades experimentales y simuladas en el poste C.

Poste C	Diferencia de ángulos (°)			Variaciones de los módulos (%)		
Altura (m)	$k-\varepsilon$	SST $k-\omega$	RSM	$k-\varepsilon$	SST $k-\omega$	RSM
0,2	70,08	66,78	117,87	0,69	0,67	0,76
0,4	3,91	3,45	4,02	0,06	0,15	0,07
0,6	1,92	1,99	2,12	-0,08	-0,08	-0,08
0,8	2,80	2,62	2,64	0,12	0,13	0,13
1,0	7,74	7,45	7,65	-0,07	-0,06	-0,06
1,2	11,09	10,75	11,07	0,10	0,10	0,10
1,4	6,90	6,60	6,75	0,63	0,63	0,63
1,6	1,53	1,16	1,30	0,35	0,35	0,35
1,8	3,49	2,93	3,15	0,09	0,09	0,09
2,0	4,33	3,48	3,86	-0,11	-0,11	-0,11
2,2	5,08	3,91	4,38	0,16	0,14	0,15
2,4	9,04	7,60	7,98	0,15	0,16	0,17
2,6	10,24	8,64	8,97	-0,28	-0,30	-0,31
2,8	13,59	11,74	12,28	0,24	0,19	0,20
3,0	12,54	10,23	10,71	0,52	0,46	0,49

Tabla 25. Velocidades en la simulación con la geometría 2 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste D.

Poste D	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,2	5,32	-0,34	26,24	0,05	25,76	0,03	25,58	0,04
0,4	3,23	-0,38	23,56	0,07	24,13	0,03	23,77	0,06
0,6	1,56	-0,40	14,05	0,29	13,47	0,23	13,74	0,32
0,8	0,98	-0,22	5,29	-0,19	3,64	-0,42	4,44	-0,19
1,0	0,62	-0,38	1,02	-0,87	0,71	-0,98	0,61	-0,72
1,2	0,09	-0,44	0,13	-1,22	0,50	-1,17	-0,25	-1,10
1,4	-0,61	-0,34	-0,09	-1,40	0,33	-1,30	-0,42	-1,15
1,6	-0,12	-0,34	-0,29	-1,49	0,15	-1,37	-0,55	-1,20
1,8	-0,76	-0,52	-0,50	-1,54	-0,06	-1,39	-0,68	-1,19
2,0	-0,63	-0,41	-0,74	-1,56	-0,32	-1,40	-0,83	-1,16
2,2	-0,78	-0,33	-0,99	-1,56	-0,57	-1,41	-0,97	-1,11
2,4	-0,64	-0,42	-1,24	-1,55	-0,84	-1,44	-1,10	-1,05
2,6	-2,26	-0,33	-1,47	-1,55	-1,11	-1,48	-1,21	-1,00
2,8	-1,49	-0,50	-1,68	-1,55	-1,38	-1,53	-1,31	-0,95
3,0	-1,44	-0,49	-1,86	-1,54	-1,62	-1,57	-1,39	-0,90

Tabla 26. Simulaciones con la geometría 2 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales en los postes E, F y G.

Poste E	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
3,1	1,98	3,41	9,96	12,973	8,76	12,69	8,90	12,687
3,6	-0,50	0,27	9,61	12,412	10,40	14,93	10,37	14,729
4,1	-0,35	0,55	5,11	6,426	5,60	7,85	5,43	7,607

Poste F	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
3,1	-1,37	-0,42	1,52	2,376	-0,12	0,97	0,18	1,064
3,6	-1,12	-0,20	8,40	10,149	5,73	7,78	0,56	7,507
4,1	-1,20	-0,05	9,90	12,154	10,06	14,07	9,43	13,085

Poste F	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
3,1	-2,05	-0,54	-1,54	-0,454	-1,74	-0,93	-1,25	-0,397
3,6	-1,91	-0,43	-0,67	0,233	-1,54	-0,55	-0,99	-0,154
4,1	-1,61	-0,39	2,23	2,784	0,33	1,18	0,38	1,119

14.1.3. Resultados con la geometría 3

Se presentan las velocidades en el poste C (Tabla 27), poste D (Tabla 29) y postes E, F y G (Tabla 30). La Tabla 28 muestra las variaciones de los módulos de las velocidades y los ángulos entre los vectores experimentales y los simulados en el poste C.

Tabla 27. Velocidades en la simulación con la geometría 3 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste C.

Poste C Altura (m)	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,2	4,73	-1,08	0,13	0,64	0,05	2,07	-0,45	0,70
0,4	22,67	-4,39	21,38	-2,47	20,33	-2,37	21,01	-2,39
0,6	20,42	-2,71	22,30	-1,98	22,33	-1,97	22,32	-1,94
0,8	21,90	0,40	19,20	-0,49	19,20	-0,48	19,18	-0,46
1,0	20,77	4,05	22,62	1,29	22,60	1,31	22,60	1,28
1,2	17,73	6,60	16,91	2,49	16,91	2,50	16,98	2,48
1,4	18,70	9,18	7,42	2,29	7,41	2,29	7,44	2,30
1,6	15,86	10,15	11,01	5,56	10,99	5,58	11,04	5,61
1,8	13,24	11,15	13,88	8,02	13,85	8,07	13,85	8,08
2,0	10,98	10,93	14,21	8,59	14,17	8,67	14,19	8,68
2,2	8,58	9,81	7,99	4,90	7,97	4,96	7,81	4,88
2,4	5,91	8,20	8,08	4,91	8,03	4,97	8,02	5,01
2,6	3,72	5,83	5,16	3,17	5,18	3,25	5,17	3,27
2,8	3,57	6,90	2,24	1,30	2,32	1,39	2,37	1,46
3,0	3,16	6,03	0,91	0,36	1,02	0,45	1,19	0,59

Tabla 28. Diferencias de ángulos y variaciones de los módulos entre las velocidades experimentales y simuladas en el poste C.

Poste C Altura (m)	Diferencia de ángulos (°)			Variaciones de los módulos (%)		
	$k-\varepsilon$	SST $k-\omega$	RSM	$k-\varepsilon$	SST $k-\omega$	RSM
0,2	91,70	101,50	135,39	0,87	0,57	0,83
0,4	4,38	4,32	4,47	0,07	0,11	0,08
0,6	2,47	2,52	2,57	-0,09	-0,09	-0,09
0,8	2,51	2,49	2,44	0,12	0,12	0,12
1,0	7,77	7,73	7,79	-0,07	-0,07	-0,07
1,2	12,05	12,00	12,11	0,10	0,10	0,09
1,4	9,00	8,94	8,94	0,63	0,63	0,63
1,6	5,84	5,72	5,68	0,35	0,35	0,34
1,8	10,08	9,88	9,84	0,07	0,07	0,07
2,0	13,70	13,41	13,39	-0,07	-0,07	-0,07
2,2	17,33	16,94	16,83	0,28	0,28	0,29
2,4	22,95	22,47	22,23	0,06	0,07	0,06
2,6	25,92	25,33	25,17	0,12	0,12	0,12
2,8	32,45	31,65	30,93	0,67	0,65	0,64
3,0	40,97	38,62	35,88	0,86	0,84	0,81

Tabla 29. Velocidades en la simulación con la geometría 3 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste D.

Poste D Altura (m)	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,2	5,32	-0,34	22,84	0,24	22,65	0,19	23,07	0,23
0,4	3,23	-0,38	21,36	0,33	21,83	0,26	21,50	0,27
0,6	1,56	-0,40	13,02	0,49	13,20	0,39	13,19	0,44
0,8	0,98	-0,22	4,65	0,17	3,64	-0,07	3,82	0,02
1,0	0,62	-0,38	0,25	-0,29	-0,31	-0,62	-0,10	-0,47
1,2	0,09	-0,44	-1,67	-0,55	-1,73	-0,84	-1,38	-0,67
1,4	-0,61	-0,34	-2,44	-0,60	-2,37	-0,82	-1,80	-0,64
1,6	-0,12	-0,34	-2,55	-0,51	-2,63	-0,65	-1,92	-0,53
1,8	-0,76	-0,52	-2,14	-0,34	-2,55	-0,41	-1,86	-0,38
2,0	-0,63	-0,41	-1,15	-0,13	-2,10	-0,13	-1,63	-0,21
2,2	-0,78	-0,33	0,55	0,13	-1,20	0,14	-1,14	-0,02
2,4	-0,64	-0,42	3,22	0,51	0,33	0,43	-0,20	0,21
2,6	-2,26	-0,33	7,12	1,20	2,94	0,86	1,57	0,59
2,8	-1,49	-0,50	11,84	2,27	7,11	1,72	4,85	1,36
3,0	-1,44	-0,49	14,03	3,00	12,54	3,16	11,11	3,10

Tabla 30. Velocidades en la simulación con la geometría 3 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales en los postes E, F y G.

Poste E		Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
Altura (m)		U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
3,1		1,98	3,41	7,53	3,57	7,70	3,99	7,77	4,13
3,6		-0,50	0,27	2,01	0,83	2,38	1,15	2,38	1,18
4,1		-0,35	0,55	0,34	-0,11	0,57	0,02	0,68	0,11
Poste F									
Altura (m)									
3,1		-1,37	-0,42	14,75	5,48	15,07	6,62	14,98	6,81
3,6		-1,12	-0,20	6,32	2,30	7,20	3,07	7,58	3,37
4,1		-1,20	-0,05	1,75	0,51	2,42	0,94	2,46	1,01
Poste F									
Altura (m)									
3,1		-2,05	-0,54	12,12	3,49	10,27	3,74	9,63	3,73
3,6		-1,91	-0,43	11,14	3,22	14,14	4,99	14,69	5,51
4,1		-1,61	-0,39	4,23	1,19	5,55	1,91	6,18	2,30

14.1.4. Resultados con la geometría 4

Se presentan las velocidades en el poste C (Tabla 31), poste D (Tabla 33) y postes E, F y G (Tabla 34). La Tabla 32 muestra las variaciones de los módulos de las velocidades y los ángulos entre los vectores experimentales y los simulados en el poste C.

Tabla 31. Velocidades en la simulación con la geometría 4 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste C.

Poste C	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,2	4,73	-1,08	0,12	0,64	0,05	2,07	-0,45	0,70
0,4	22,67	-4,39	21,40	-2,49	20,34	-2,38	21,02	-2,40
0,6	20,42	-2,71	22,30	-2,00	22,33	-1,98	22,32	-1,95
0,8	21,90	0,40	19,21	-0,50	19,20	-0,49	19,18	-0,47
1,0	20,77	4,05	22,62	1,27	22,60	1,29	22,60	1,27
1,2	17,73	6,60	16,91	2,47	16,91	2,49	16,98	2,47
1,4	18,70	9,18	7,41	2,28	7,41	2,29	7,44	2,30
1,6	15,86	10,15	10,99	5,57	10,98	5,59	11,03	5,62
1,8	13,24	11,15	13,85	8,05	13,83	8,08	13,83	8,11
2,0	10,98	10,93	14,18	8,65	14,16	8,70	14,17	8,73
2,2	8,58	9,81	7,96	4,94	7,96	4,99	7,79	4,92
2,4	5,91	8,20	8,03	4,96	8,01	4,99	7,98	5,05
2,6	3,72	5,83	5,21	3,26	5,20	3,29	5,20	3,33
2,8	3,57	6,90	2,28	1,36	2,34	1,42	2,39	1,50
3,0	3,16	6,03	0,93	0,38	1,03	0,46	1,20	0,61

Tabla 32. Diferencias de ángulos y variaciones de los módulos entre las velocidades experimentales y simuladas en el poste C.

Poste C	Diferencia de ángulos (°)			Variaciones de los módulos (%)		
Altura (m)	$k-\varepsilon$	SST $k-\omega$	RSM	$k-\varepsilon$	SST $k-\omega$	RSM
0,2	91,90	101,44	135,38	0,87	0,57	0,83
0,4	4,34	4,30	4,45	0,07	0,11	0,08
0,6	2,42	2,50	2,55	-0,09	-0,09	-0,09
0,8	2,55	2,52	2,46	0,12	0,12	0,12
1,0	7,83	7,76	7,82	-0,07	-0,07	-0,07
1,2	12,11	12,03	12,14	0,10	0,10	0,09
1,4	9,01	8,94	8,93	0,63	0,63	0,63
1,6	5,76	5,67	5,62	0,35	0,35	0,34
1,8	9,93	9,81	9,72	0,07	0,07	0,07
2,0	13,47	13,30	13,21	-0,07	-0,07	-0,07
2,2	17,01	16,78	16,57	0,28	0,28	0,29
2,4	22,55	22,28	21,93	0,07	0,07	0,07
2,6	25,44	25,11	24,82	0,11	0,11	0,11
2,8	31,82	31,35	30,49	0,66	0,65	0,64
3,0	39,84	38,13	35,21	0,85	0,83	0,80

Tabla 33. Velocidades en la simulación con la geometría 3 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales del poste D.

Poste D	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,2	5,32	-0,34	22,97	0,23	22,68	0,20	23,12	0,23
0,4	3,23	-0,38	21,47	0,32	21,86	0,27	21,56	0,27
0,6	1,56	-0,40	13,12	0,48	13,24	0,41	13,25	0,45
0,8	0,98	-0,22	4,70	0,16	3,63	-0,05	3,84	0,02
1,0	0,62	-0,38	0,30	-0,34	-0,41	-0,59	-0,09	-0,48
1,2	0,09	-0,44	-1,63	-0,62	-1,92	-0,81	-1,38	-0,69
1,4	-0,61	-0,34	-2,45	-0,71	-2,58	-0,80	-1,81	-0,68
1,6	-0,12	-0,34	-2,68	-0,65	-2,81	-0,65	-1,94	-0,58
1,8	-0,76	-0,52	-2,45	-0,51	-2,67	-0,43	-1,91	-0,45
2,0	-0,63	-0,41	-1,74	-0,31	-2,16	-0,18	-1,72	-0,30
2,2	-0,78	-0,33	-0,47	-0,05	-1,20	0,07	-1,32	-0,12
2,4	-0,64	-0,42	1,50	0,29	0,37	0,36	-0,57	0,10
2,6	-2,26	-0,33	4,38	0,83	2,82	0,78	0,80	0,43
2,8	-1,49	-0,50	8,22	1,70	6,45	1,54	3,28	1,04
3,0	-1,44	-0,49	12,41	2,87	11,14	2,75	7,86	2,32

Tabla 34. Velocidades en la simulación con la geometría 3 y los diferentes modelos turbulentos del aire frente a los datos experimentales en los postes E, F y G.

Poste E	Ensayo (m/s)		$k-\varepsilon$ (m/s)		SST $k-\omega$ (m/s)		RSM (m/s)	
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
3,1	1,98	3,41	7,70	3,92	7,76	4,13	7,77	4,31
3,6	-0,50	0,27	2,25	1,05	2,49	1,25	2,51	1,33
4,1	-0,35	0,55	0,38	-0,08	0,58	0,04	0,72	0,16

Poste F								
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
3,1	-1,37	-0,42	15,15	6,37	15,05	6,82	14,76	7,12
3,6	-1,12	-0,20	7,07	2,89	7,50	3,28	7,81	3,67
4,1	-1,20	-0,05	2,19	0,80	2,59	1,06	2,71	1,21

Poste F								
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
3,1	-2,05	-0,54	10,45	3,53	10,37	3,90	9,73	4,08
3,6	-1,91	-0,43	13,55	4,51	14,66	5,28	14,97	5,98
4,1	-1,61	-0,39	5,23	1,70	5,89	2,06	6,88	2,71

14.2. Valores empleados en la validación del modelo

A continuación se presentan las velocidades experimentales del capítulo 7 (epígrafe 7.3.1) y las simuladas durante la validación del modelo (8.3.4). La Tabla 35 presenta los valores en los postes delante del árbol *A*, *C* y *D*. La Tabla 36 muestra las velocidades en el poste *E* inmediatamente detrás de la copa. La Tabla 37 muestra los datos en los postes restantes *F* y *G*.

Tabla 35. Velocidades experimentales y simuladas en los postes A, C y D.

Poste A	Ensayo (m/s)		Modelo (m/s)	
Altura (m)	U_y	U_z	U_y	U_z
2,0	1,70	2,14	0,57	0,91
2,5	0,12	0,24	4,15	7,03
3,0	-0,02	0,78	2,76	5,31
3,5	-0,66	0,19	1,07	2,28
4,0	-0,28	0,73	-	-
4,5	-0,29	0,53	-	-
Poste C				
Altura (m)				
2,5	0,83	0,77	0,82	2,30
3,0	0,83	1,29	0,98	2,43
3,5	0,56	0,86	2,63	5,63
4,0	0,58	0,81	-	-
4,5	-0,18	0,88	-	-
Poste D				
Altura (m)				
3,0	1,32	1,38	1,75	5,90
3,5	1,26	1,17	1,36	4,00
4,0	0,39	0,73	1,37	3,44
4,5	0,64	0,95	2,45	5,30

Tabla 36. Velocidades experimentales y simuladas en el poste E.

Poste E Altura (m)	Ensayo (m/s)		Modelo (m/s)	
	U_y	U_z	U_y	U_z
0,3	4,31	-0,40	15,02	0,13
0,6	1,45	-0,20	7,97	0,23
0,9	0,05	-0,33	0,58	-0,50
1,2	0,00	-0,30	-0,18	-0,73
1,5	-0,12	-0,30	-0,24	-0,78
1,8	-0,34	-0,30	-0,31	-0,77
2,1	-0,44	-0,16	-0,41	-0,73
2,4	-0,65	-0,33	-0,49	-0,69
2,7	-0,88	-0,39	-0,56	-0,65
3,0	-1,39	-0,58	-0,61	-0,62
3,5	-1,24	-0,53	-0,66	-0,58
4,0	-1,06	-0,43	-0,68	-0,55
4,5	-1,14	-0,54	-	-

Tabla 37. Velocidades experimentales y simuladas en los postes F y G.

Altura (m)	Postes F				Poste G			
	Ensayo (m/s)		Modelo (m/s)		Ensayo (m/s)		Modelo (m/s)	
	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z	U_y	U_z
0,3	2,55	-0,28	14,77	0,37	2,53	0,79	12,22	1,41
0,6	0,96	-0,18	7,78	0,36	1,64	0,35	8,79	1,35
0,9	-0,17	-0,11	2,35	-0,17	0,36	0,00	4,06	0,99
1,2	-0,01	-0,19	0,21	-0,63	0,17	-0,22	1,26	0,57
1,5	-0,07	-0,22	-0,12	-0,78	0,05	-0,16	-0,01	0,34
1,8	-0,22	-0,12	-0,34	-0,79	0,02	-0,14	-0,34	0,19
2,1	0,67	-0,37	-0,51	-0,75	-0,20	-0,01	-0,46	-0,06
2,4	0,64	-0,35	-0,59	-0,71	0,54	-0,09	-0,51	-0,26
2,7	0,17	-0,08	-0,64	-0,67	0,20	-0,05	-0,58	-0,40
3,0	0,26	-0,24	-0,67	-0,65	0,50	-0,24	-0,63	-0,48
3,5	-0,19	-0,03	-0,70	-0,63	0,43	-0,13	-0,68	-0,56
4,0	1,39	0,69	-0,70	-0,62	0,39	0,05	-0,68	-0,59
4,5	0,70	-0,11	14,77	0,37	-	-	-	-

14.3. Diagramas de las velocidades del aire del modelo Euleriano-Lagrangiano

14.3.1. Corriente procedente del turboatomizador

A continuación se representa el contorno del módulo de las velocidades (Figura 35) y el diagrama vectorial (Figura 36) cuando la corriente del aire del modelo procede del turboatomizador.

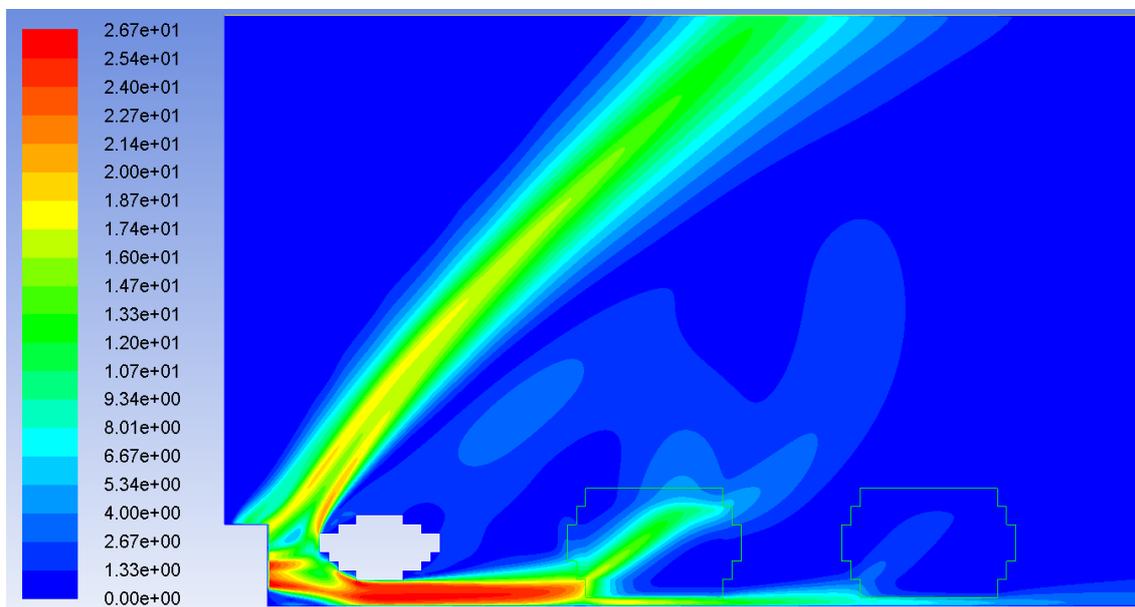


Figura 35. Contorno del módulo de las velocidades cuando la corriente procede del ventilador. Valores en m/s.

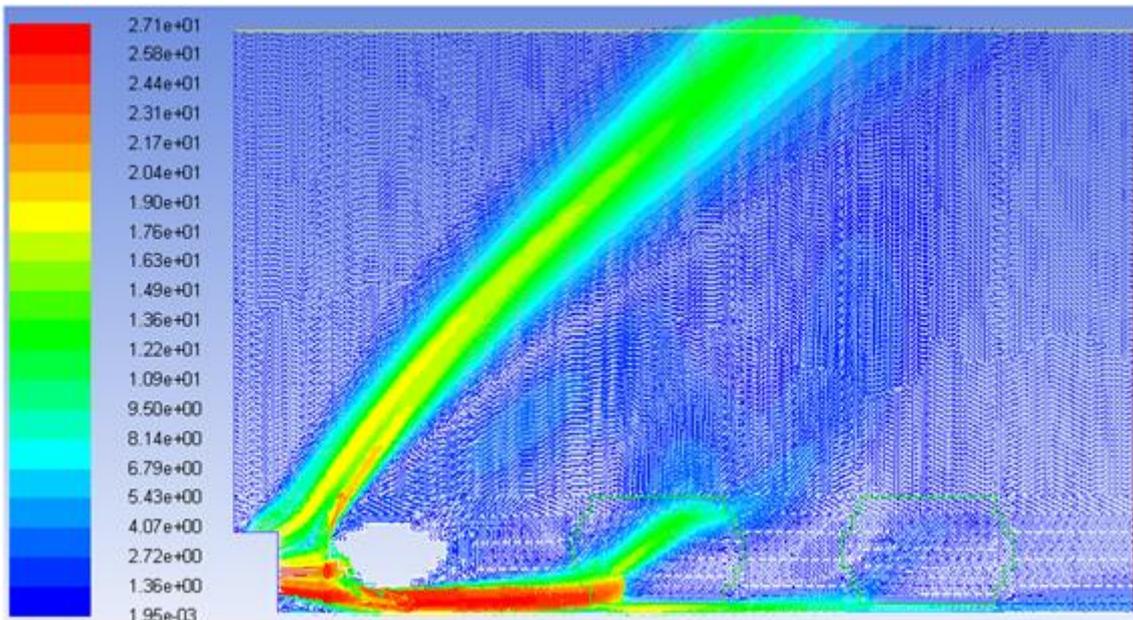


Figura 36. Diagrama vectorial de las velocidades cuando la corriente procede del ventilador. Colores según el valor del módulo (m/s).

14.3.2. Corriente procedente del viento

A continuación se representa el contorno del módulo de las velocidades (Figura 37) y el diagrama vectorial (Figura 38) cuando la corriente del aire del modelo procede del turboatomizador.

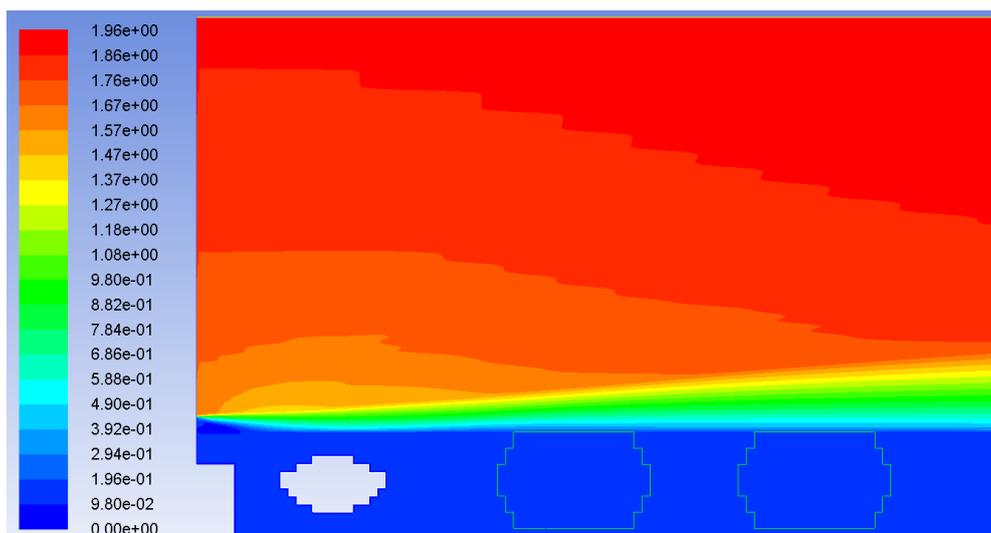


Figura 37. Contorno del módulo de las velocidades cuando la corriente procede del viento. Valores en m/s.

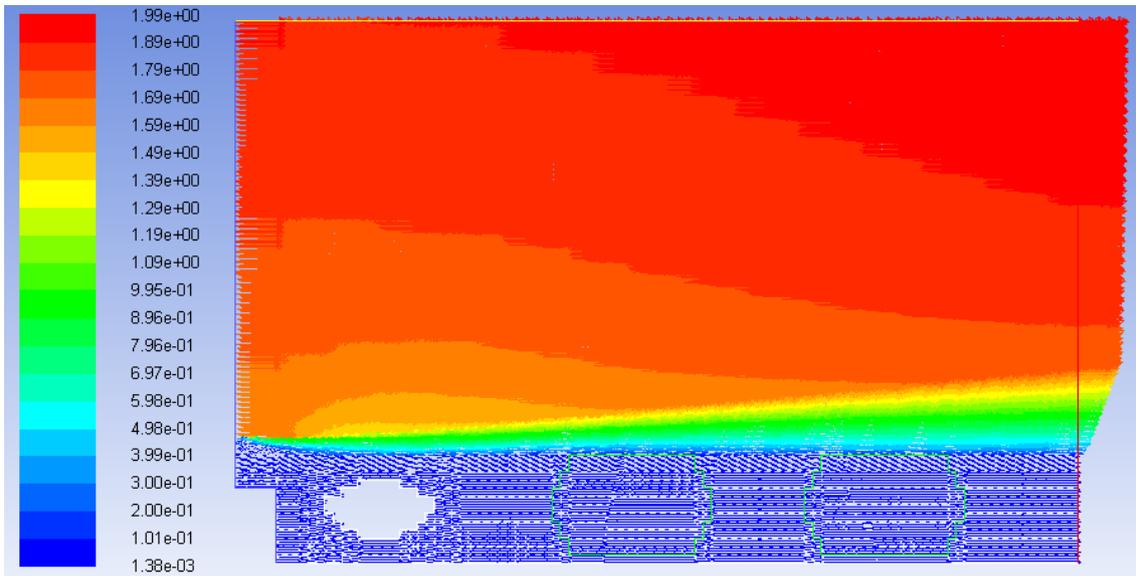


Figura 38. Diagrama vectorial de las velocidades cuando la corriente procede del viento. Colores según el valor del módulo (m/s).

14.4. Diagramas de gotas coloreadas por sus propiedades

En este apartado se presentan las gotas coloreadas según sus propiedades físicas: distancia, altura, componente horizontal y vertical de la velocidad, número de Reynolds, temperatura y diámetro geométrico.

14.4.1. Gotas según distancia al origen

A continuación se muestran las gotas coloreadas según su distancia al origen de coordenadas del modelo (Figura 20) entre $t = 0,10$ s y $t = 2,35$ s (Figura 39) y $t = 5,35$ s y $t = 17,35$ s (Figura 40). Valores en m.

Anejo 2

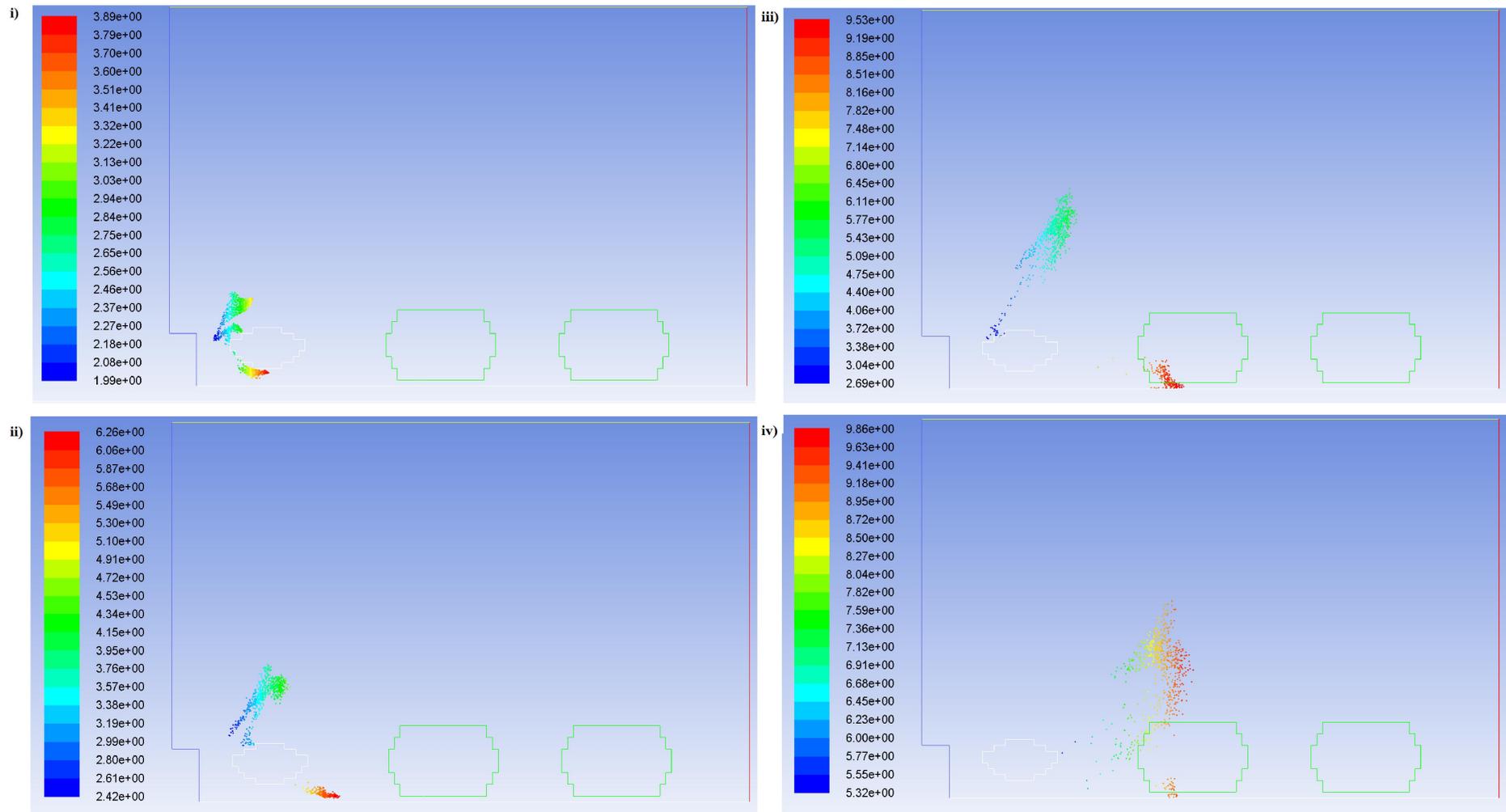


Figura 39. Gotas coloreadas según su distancia al origen de coordenadas en $t=0,10$ s (i), $t=0,20$ s (ii), $t=0,35$ s (iii) y $t=2,35$ s (iv). Valores en m.

Anejo 2

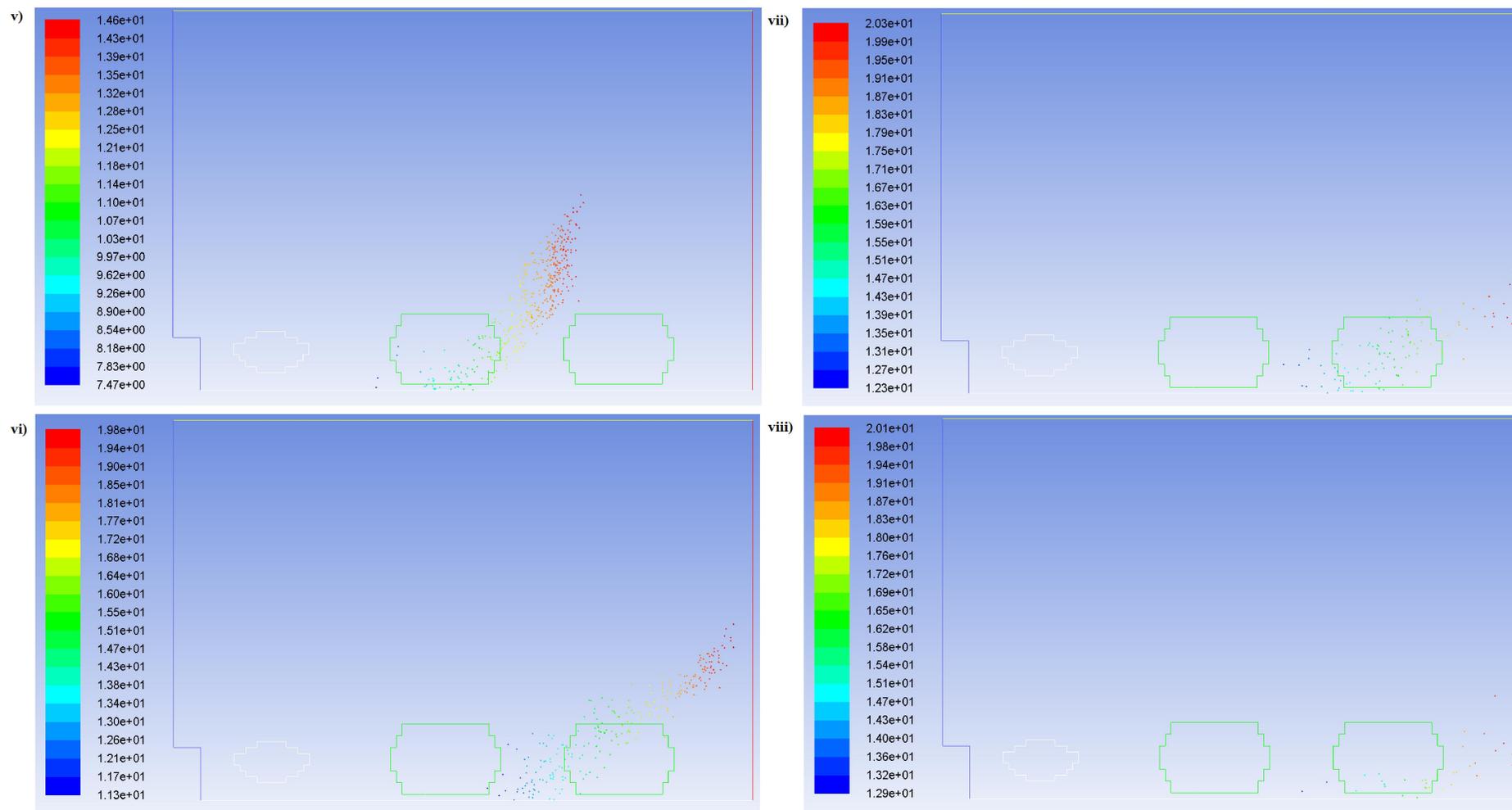


Figura 40. Gotas coloreadas según su distancia al origen de coordenadas en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valores en m.

14.4.2. Gotas según su altura

A continuación se muestran las gotas coloreadas según su altura respecto al suelo entre $t = 0,10$ s y $t = 2,35$ s (Figura 41) y $t = 5,35$ s y $t = 17,35$ s (Figura 42). Valores en m.

Anejo 2

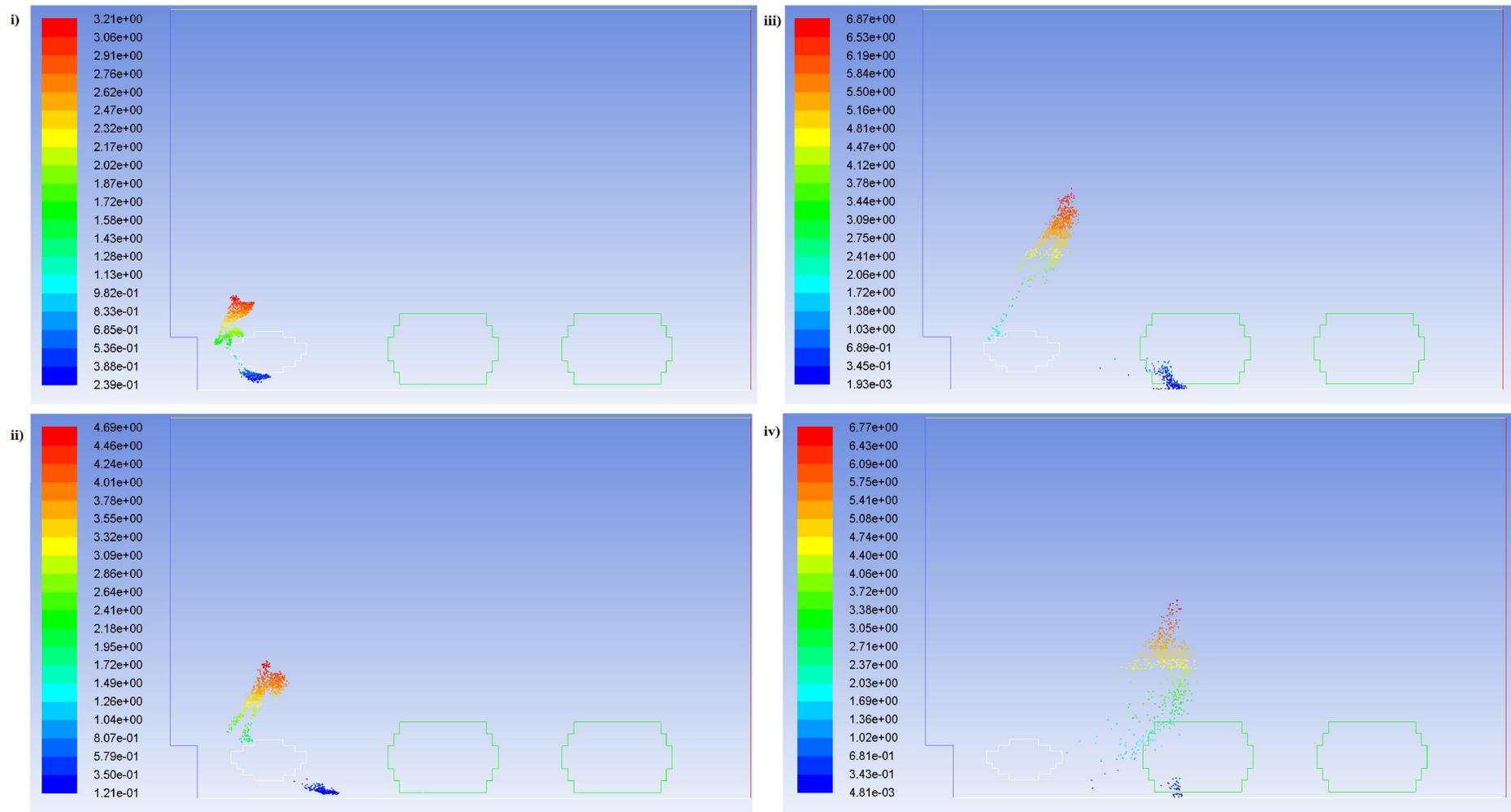


Figura 41. Gotas coloreadas según su altura en $t=0,10$ s (i), $t=0,20$ s (ii), $t=0,35$ s (iii) y $t=2,35$ s (iv). Valores en m.

Anejo 2

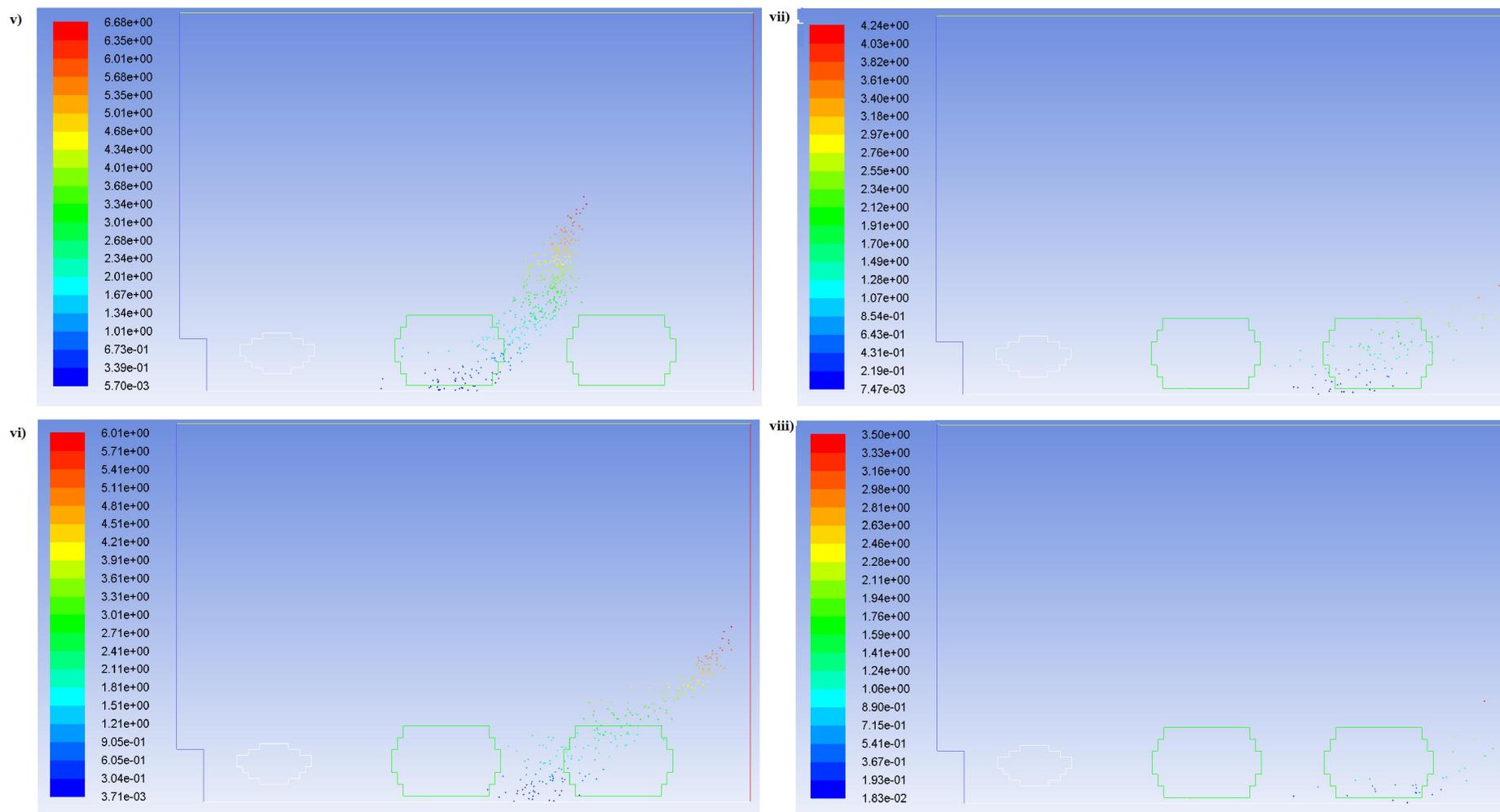


Figura 42. Gotas coloreadas según su altura en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valores en m.

14.4.3. Gotas según su velocidad

A continuación, se muestran las gotas coloreadas según la componente horizontal y vertical de su velocidad (U_{dy} , U_{dz}) entre:

- $t = 0,10$ s y $t = 0,20$ s (Figura 43).

- $t = 0,35$ s y $t = 2,35$ s (Figura 44).

- $t = 5,35$ s y $t = 8,35$ s (Figura 45).

- $t = 11,35$ s y $t = 17,35$ s (Figura 46).

Valores en m/s.

Anejo 2

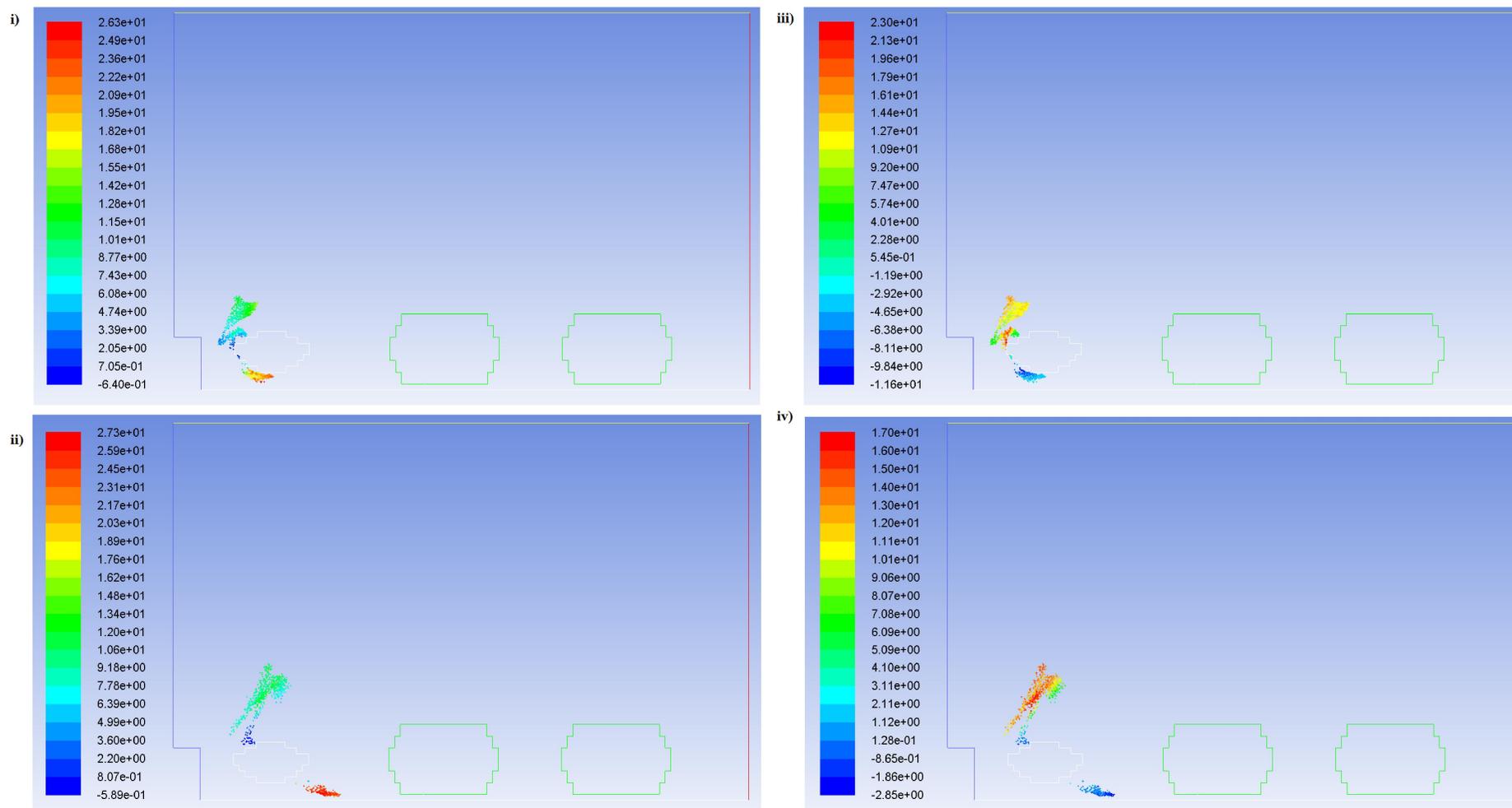


Figura 43. Gotas coloreadas según U_{dy} en $t=0,10$ s (i) y $t=0,20$ s (ii), y U_{dz} en $t=0,10$ s (iii) y $t=0,20$ s (iv). Valores en m/s.

Anejo 2

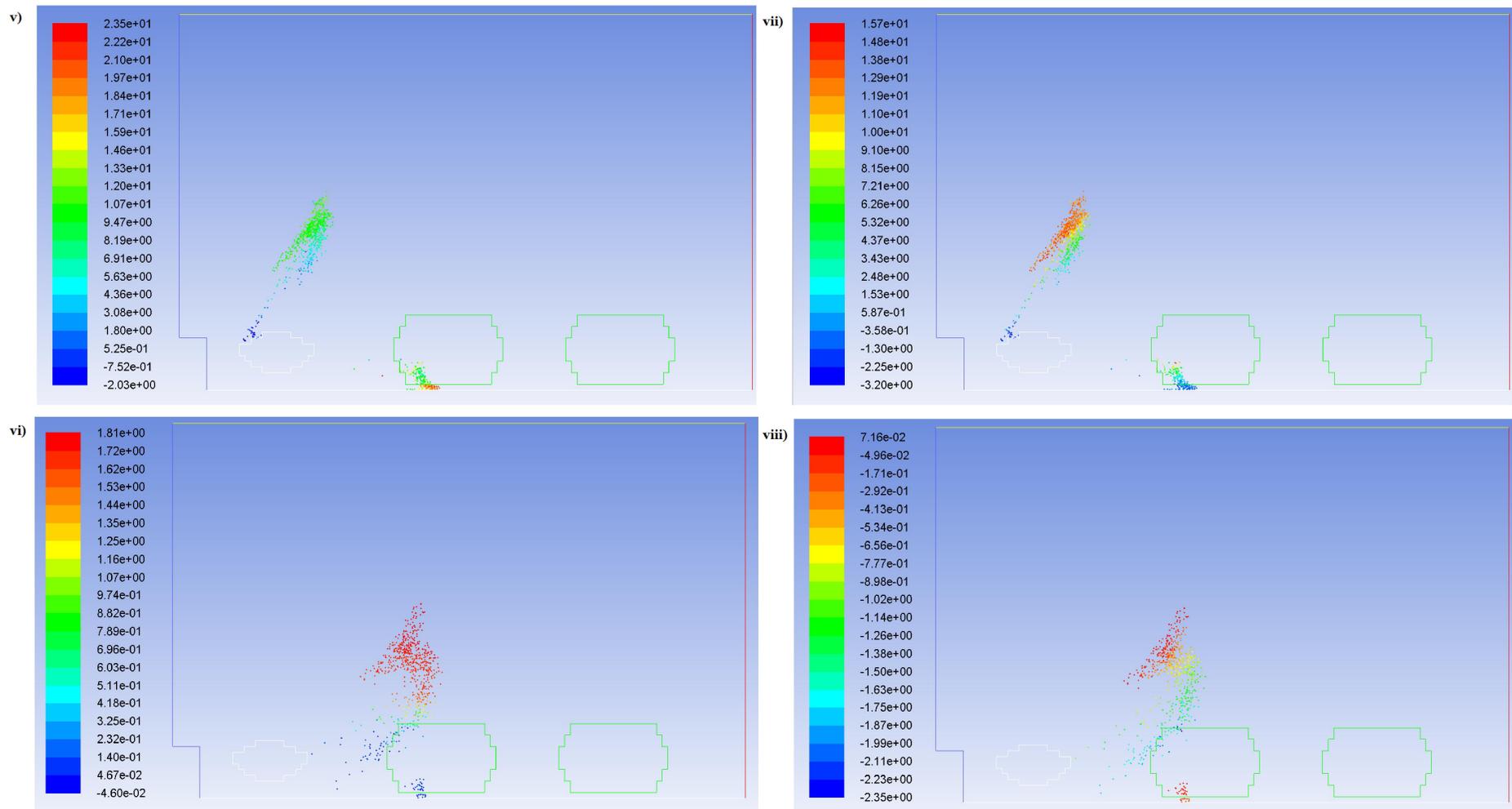


Figura 44. Gotas coloreadas según U_{dy} en $t=0,35$ s (v) y $t=2,35$ s (vii), y U_{dz} en $t=0,35$ s (vi) y $t=2,35$ s (viii). Valores en m/s.

Anejo 2

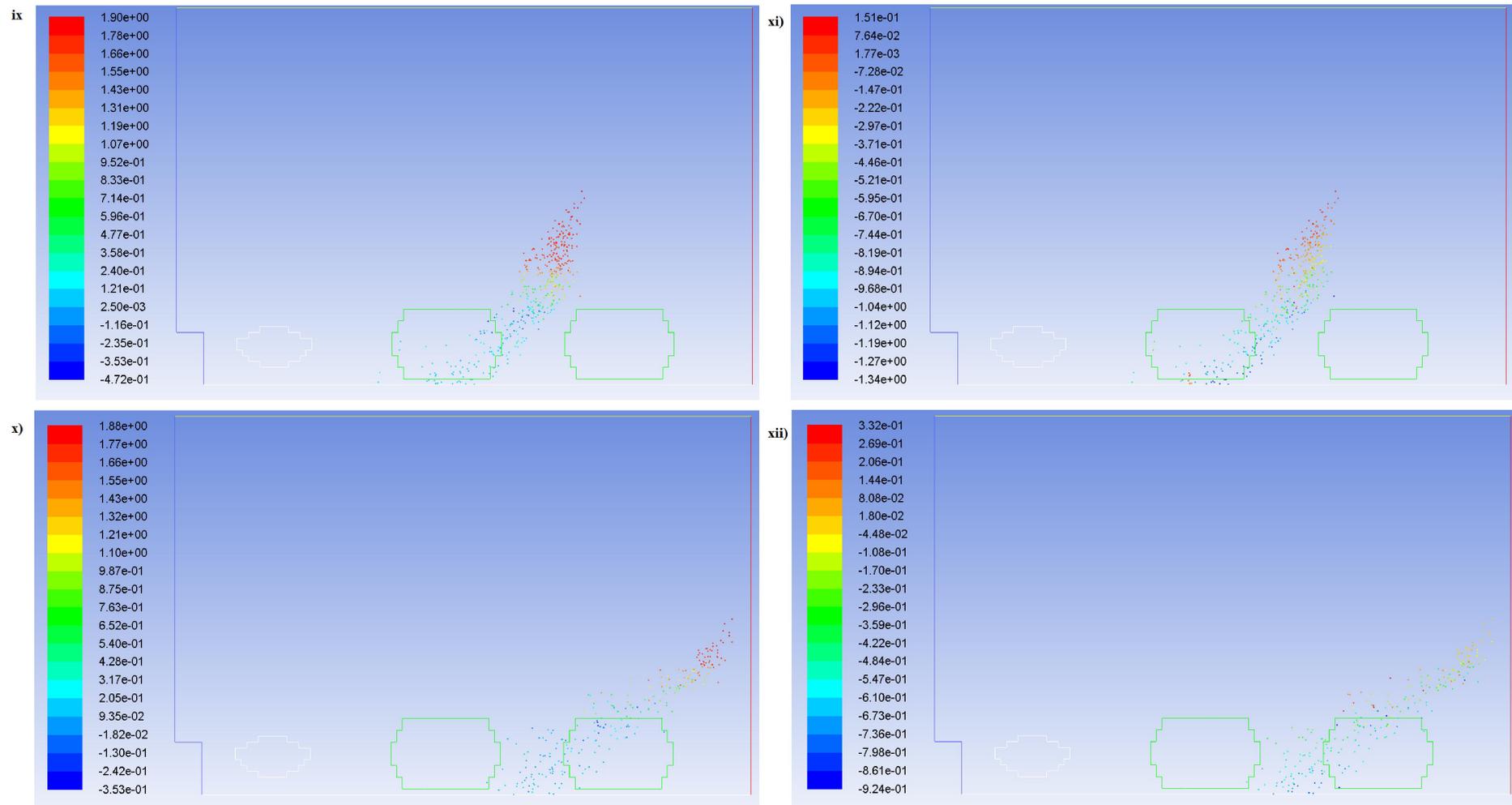


Figura 45. Gotas coloreadas según U_{dy} en $t=5,35$ s (ix) y $t=8,35$ s (x), y U_{dz} en $t=5,35$ s (xi) y $t=8,35$ s (xii). Valores en m/s.

Anejo 2

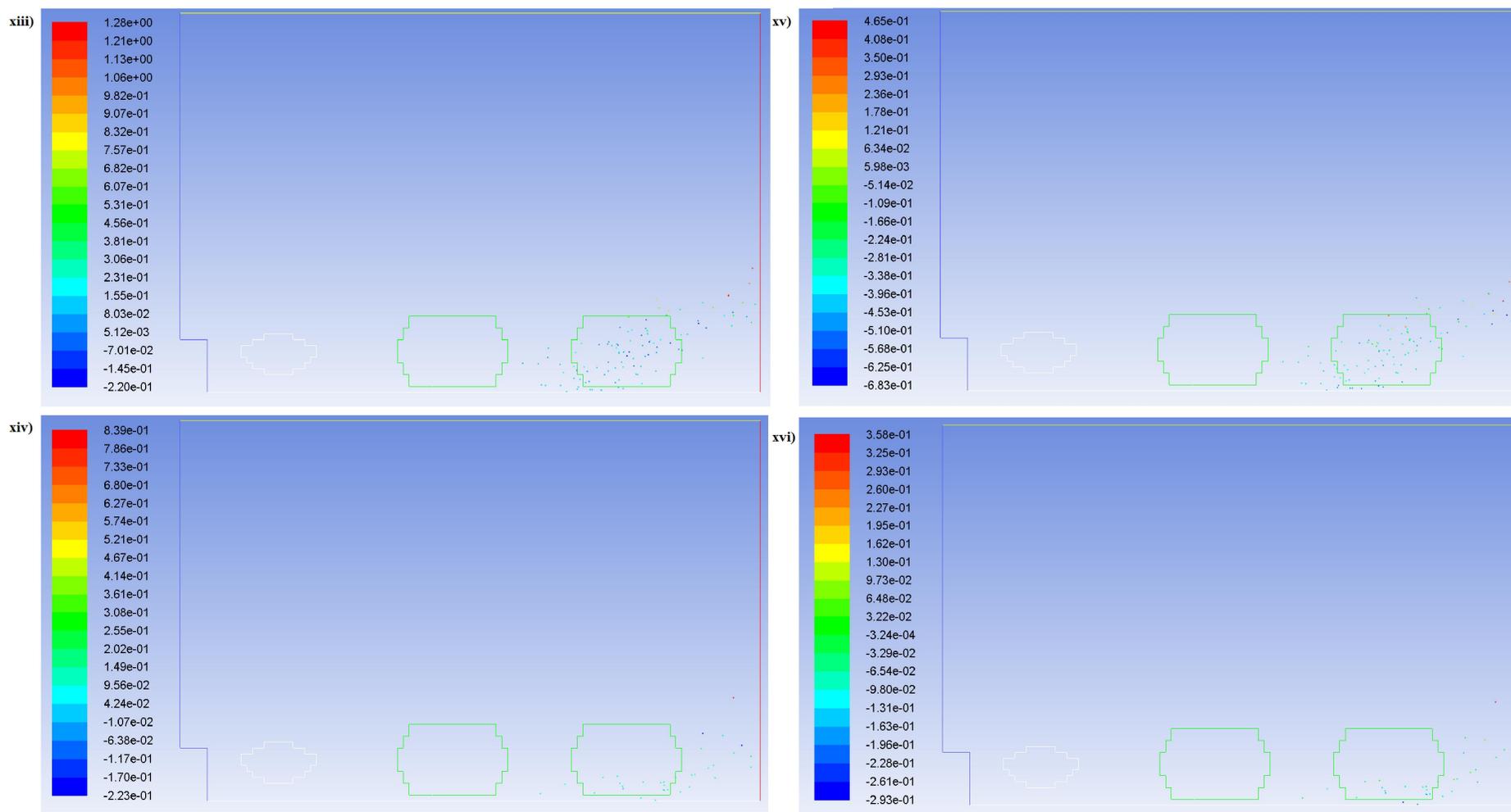


Figura 46. Gotas coloreadas según U_{dy} en $t=11,35$ s (xiii) y $t=17,35$ s (xiv), y U_{dz} en $t=11,35$ s (xv) y $t=17,35$ s (xvi).

14.4.4. Gotas según el número de Reynolds

A continuación se muestran las gotas coloreadas según su número de Reynolds entre $t = 0,10$ s y $t = 2,35$ s (Figura 47) y $t = 5,35$ s y $t = 17,35$ s (Figura 48).

	Parámetro	adimensional.
--	-----------	---------------

Anejo 2

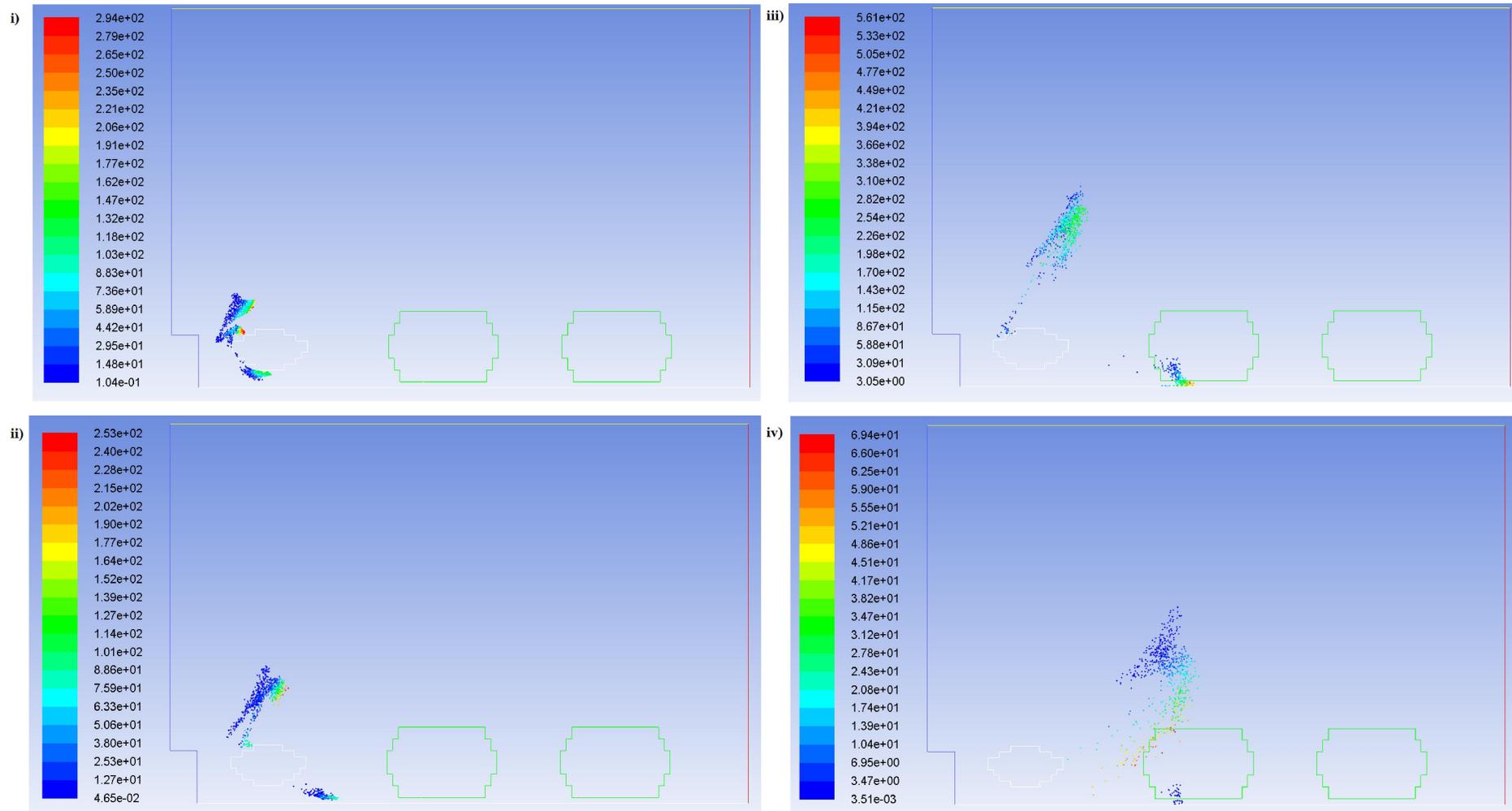


Figura 47. Gotas coloreadas según su número de Reynolds en $t=0,10$ s (i), $t=0,20$ s (ii), $t=0,35$ s (iii) y $t=2,35$ s (iv). Valor adimensional.

Anejo 2

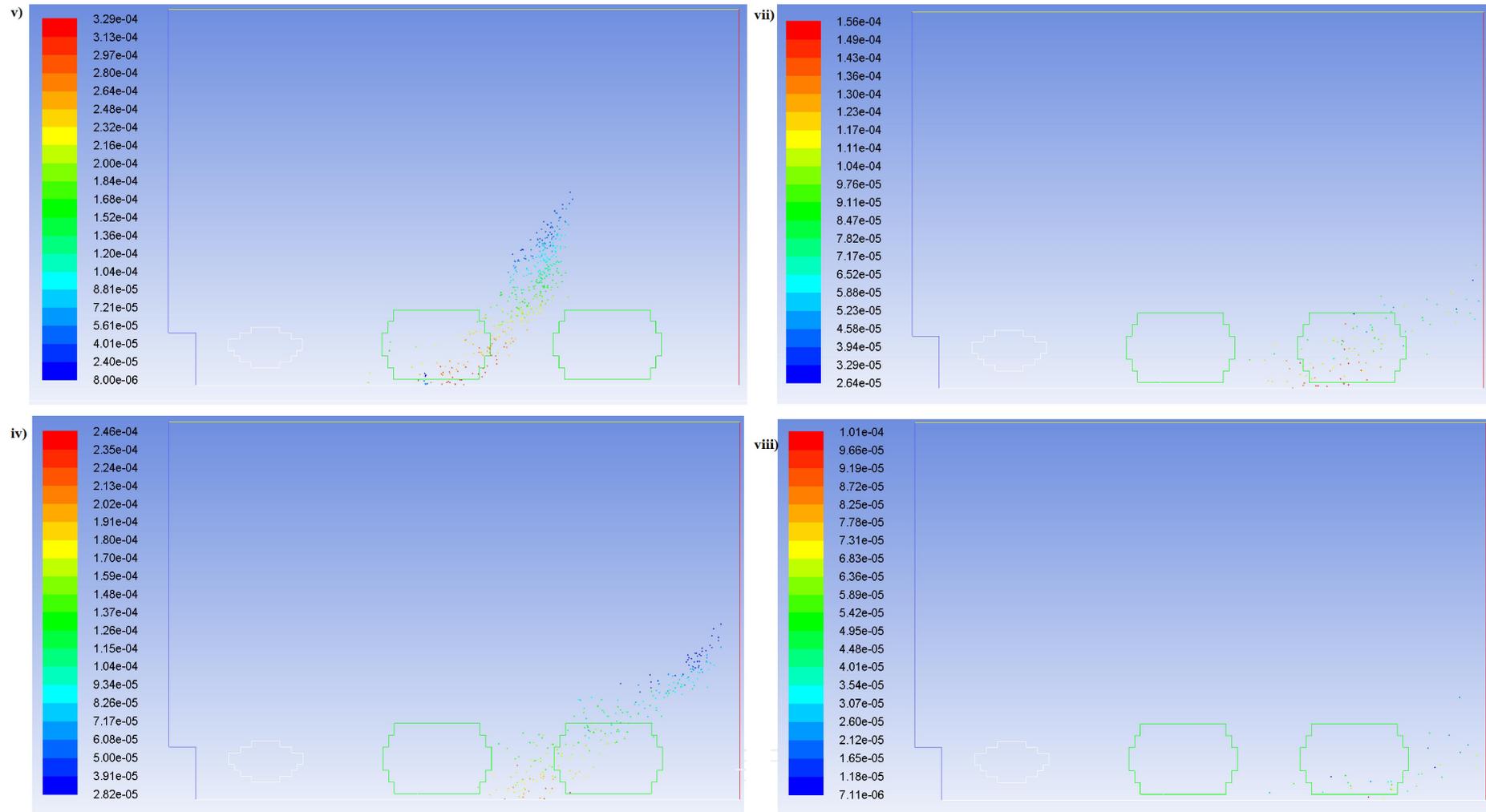


Figura 48. Gotas coloreadas según su número de Reynolds en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valor adimensional.

14.4.5. Gotas según su temperatura

A continuación se muestran las gotas coloreadas según su número de Reynolds entre $t = 0,10$ s y $t = 2,35$ s (Figura 49) y $t = 5,35$ s y $t = 17,35$ s (Figura 50). Valores en K.

Anejo 2

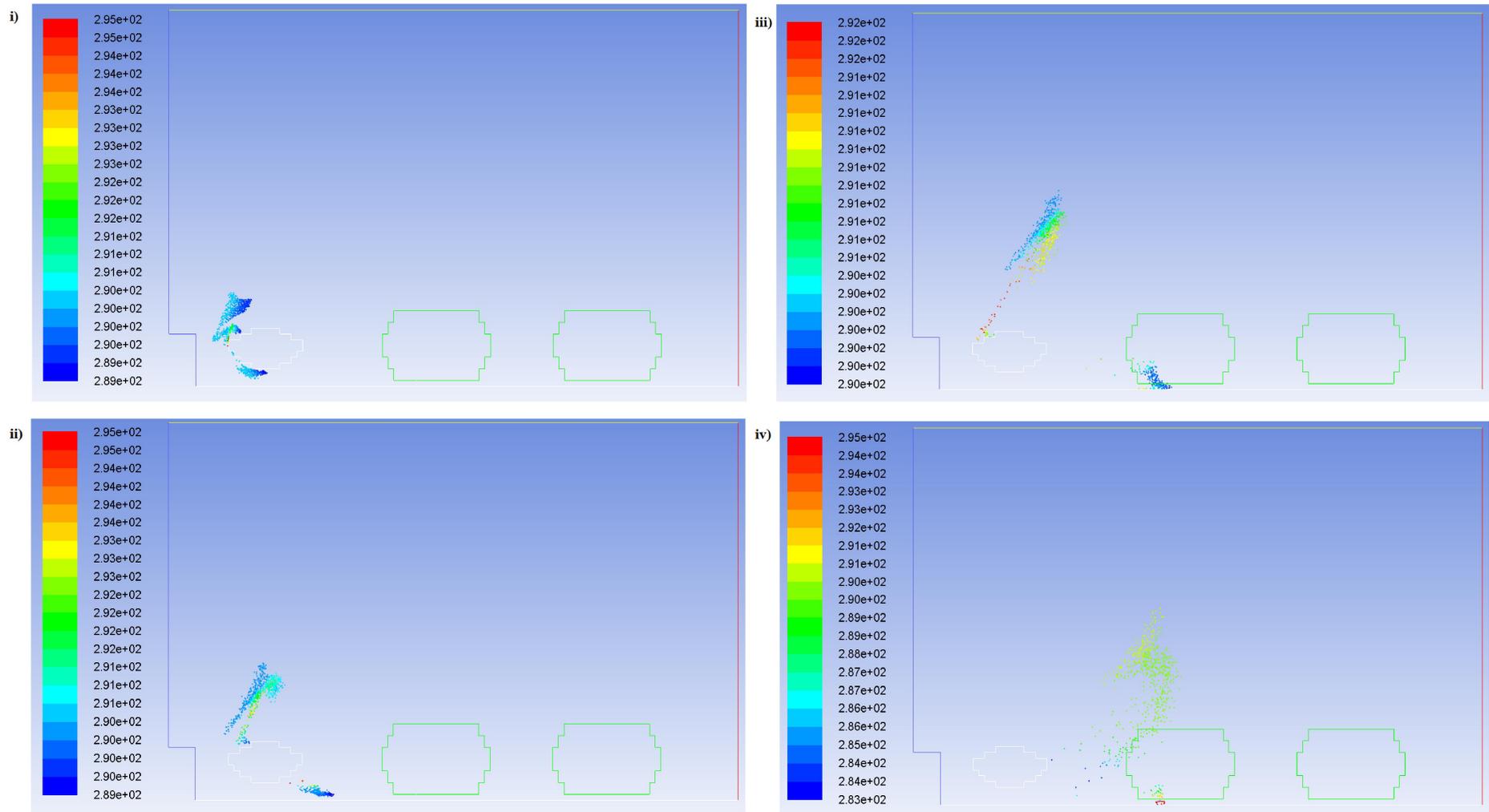


Figura 49. Gotas coloreadas según su temperatura en $t=0,10$ s (i), $t=0,20$ s (ii), $t=0,35$ s (iii) y $t=2,35$ s (iv). Valores en K.

Anejo 2

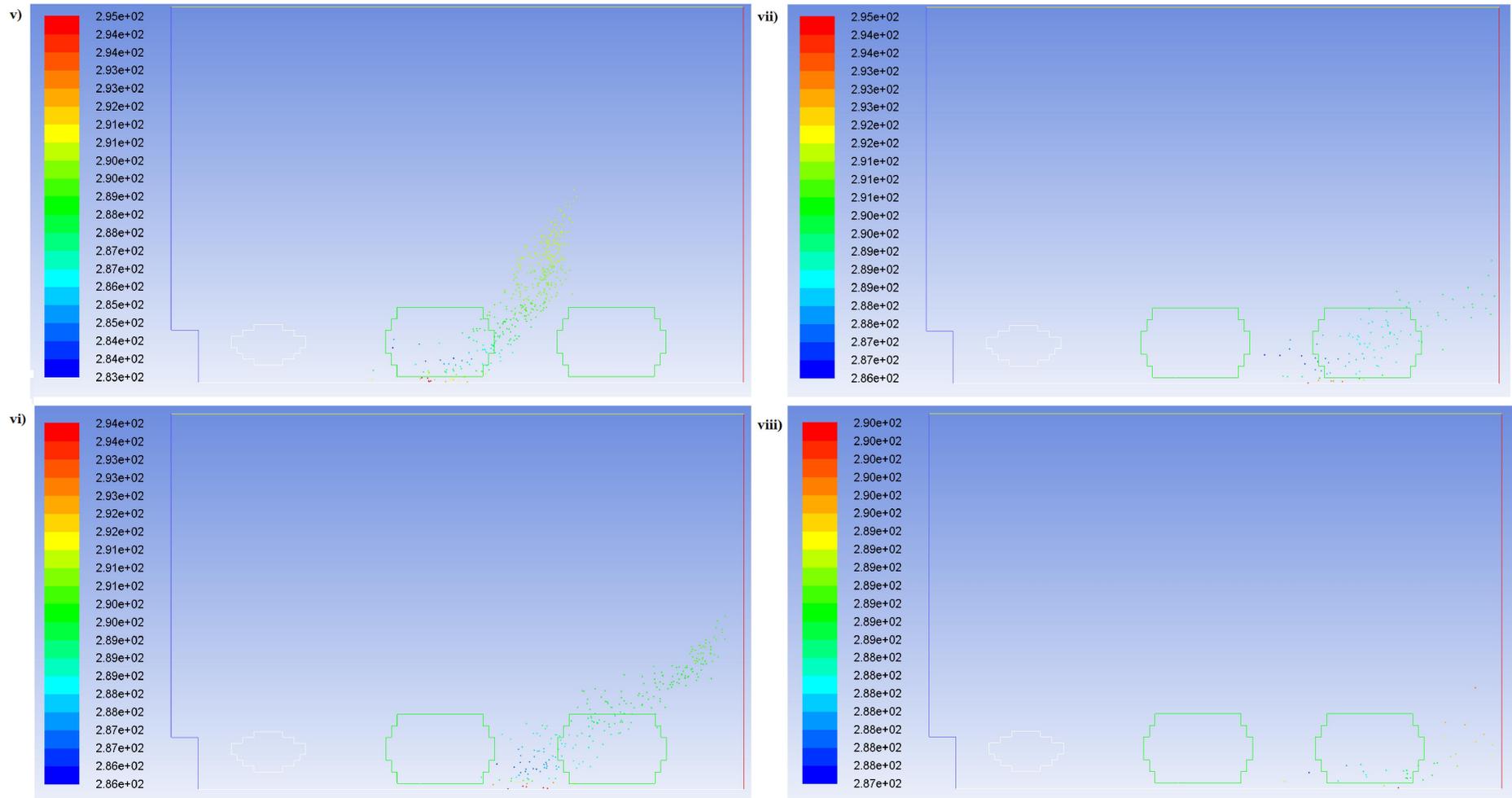


Figura 50. Gotas coloreadas según su temperatura en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valores en K.

14.4.6. Gotas según su diámetro geométrico

A continuación se muestran las gotas coloreadas según su diámetro geométrico entre $t = 0,10$ s y $t = 2,35$ s (Figura 51) y $t = 5,35$ s y $t = 17,35$ s (Figura 52). Valores en m.

Anejo 2

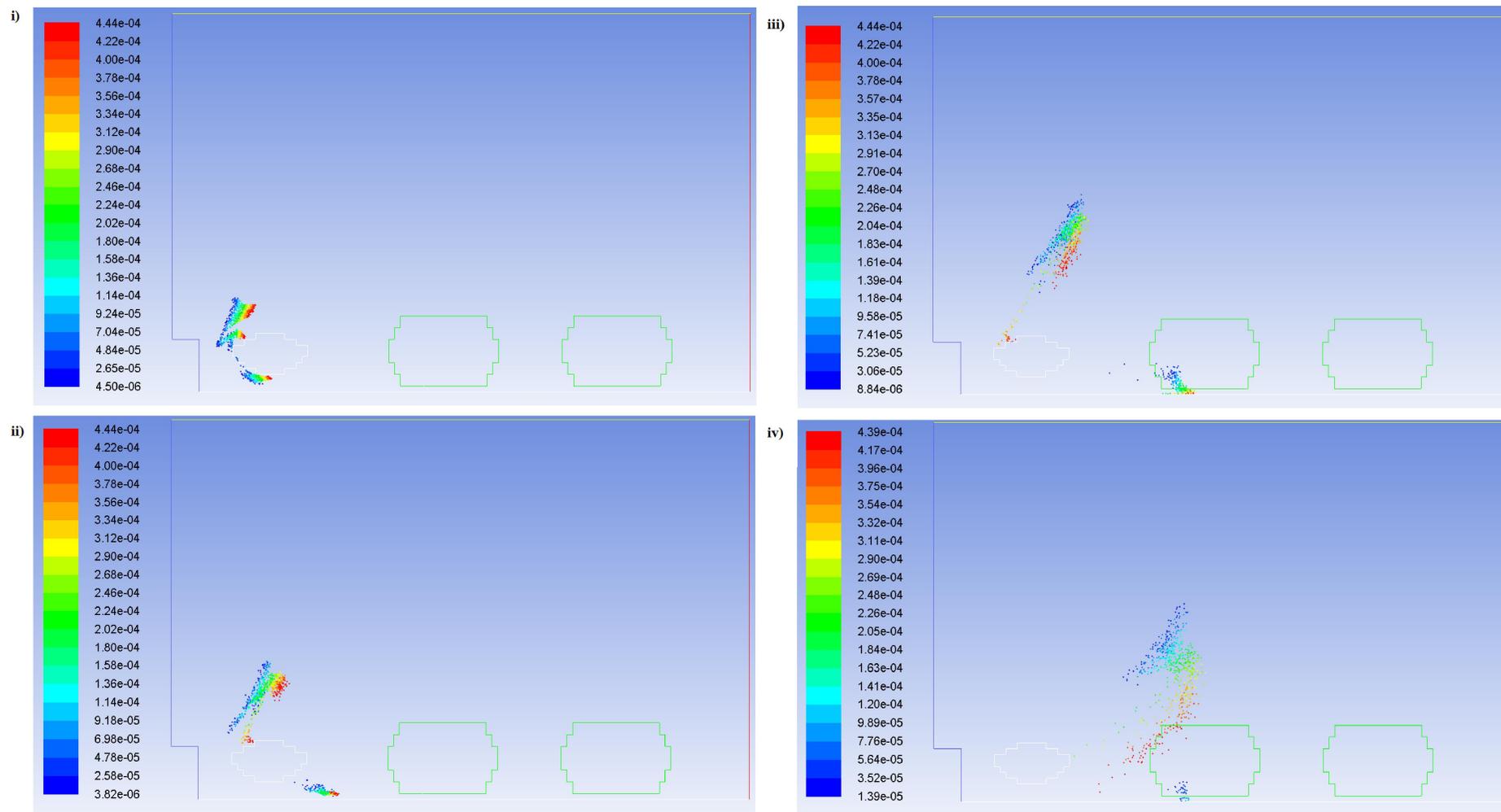


Figura 51. Gotas coloreadas según su diámetro en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valores en m.

Anejo 2

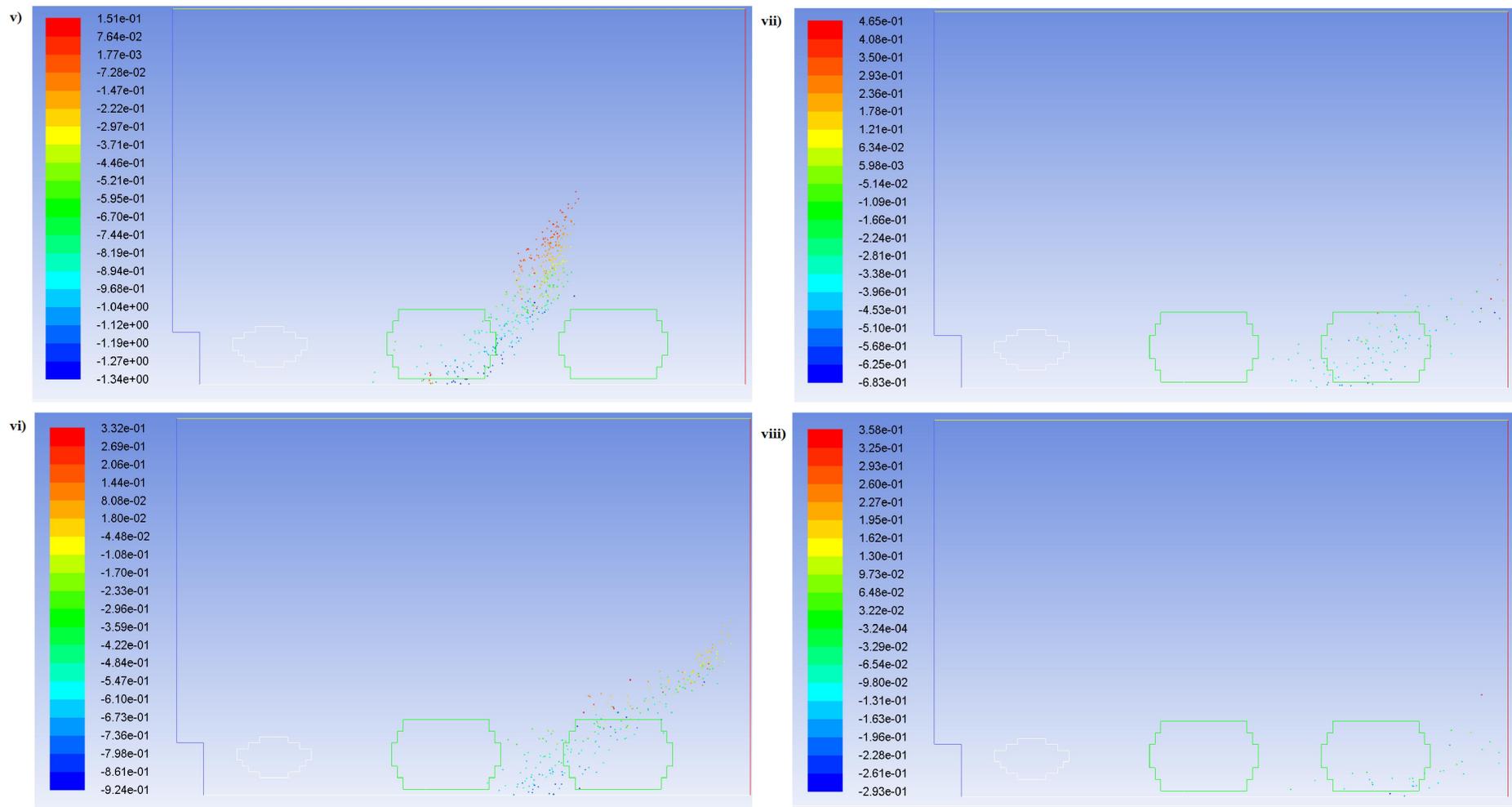


Figura 52. Gotas coloreadas según su diámetro en $t=5,35$ s (v), $t=8,35$ s (vi), $t=11,35$ s (vii) y $t=17,35$ s (viii). Valores en m.

15. Anejo 3: Fotografías de los ensayos

A continuación se muestran fotografías del ensayo usado para la descripción del flujo alrededor del árbol (capítulo 7) y posteriormente para la validación del modelo (capítulo 8) (Figura 53).



Figura 53. En la imagen (i) se muestra el equipo empleado para los ensayos de esta tesis. En la imagen (ii) se muestra el equipo en posición frente al árbol junto a los postes de medida antes del árbol. En la imagen (iii) se muestra el anemómetro, que se deslizaba a lo largo de los postes. También se ven los postes al otro lado del árbol. En la imagen (iv), aparece el único poste horizontal del ensayo sobre el ventilador.

A continuación, la Figura 54 muestran fotografías durante el ensayo para usar los datos en el ajuste del modelo del capítulo 8.



Figura 54. La imagen (i) enseña al equipo en posición midiendo las velocidades antes del árbol en el poste C. La imagen (ii) muestra los dos anemómetros en posición en los postes C y D.