

TECNOLOGÍA PARA REDUCIR LOS PRODUCTOS Y EL AIRE APLICADOS Y HERRAMIENTAS PARA COMPRENDER LA DERIVA

Estrategias integrales para una utilización segura y eficaz de los productos fitosanitarios

Este artículo describe el Proyecto Safespray, coordinado por el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad de Lleida. El objetivo del proyecto es minimizar los riesgos asociados a la utilización de los productos fitosanitarios en la agricultura y la reducción de la deriva, asegurando su eficacia. Para ello se ha trabajado en el desarrollo de dispositivos a fin de optimizar la dosificación adaptándose a las condiciones del entorno y en el desarrollo de sistemas para la modelización y medida del fenómeno de deriva.

Enrique Moltó¹, Joan Ramón Rosell²,
Emilio Gil³, Ramón Salcedo¹,
Patricia Chueca¹ y Cruz Garcerá¹.

¹ Centro de Agroingeniería. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Moncada. Valencia.

² Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Lleida. Lleida.

³ Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

2009/128/CE (UE, 2009) impone medidas específicas de gestión de este riesgo, así como el desarrollo de medidas paliativas que reduzcan la contaminación del entorno.

Una de estas medidas es la determinación de las denominadas bandas de seguridad, que son zonas de la parcela en las que se prohíbe realizar tratamientos fitosanitarios por resultar es-

pecialmente sensibles. Es importante que justifiquemos en España las dimensiones de estas bandas de seguridad con métodos científicos y que se cuantifique la influencia de los métodos conocidos para reducir la deriva (setos cortaviento, boquillas de baja deriva, dispositivos de transporte de gotas ajustados a la vegetación, túneles de reciclado o sistemas electrónicos de aplicación precisa, etc.), teniendo presente la especificidad de nuestras condiciones agroclimáticas.

También es importante conocer la cantidad de caldo que alcanza los diferentes sustratos (vegetación, suelo y atmósfera) tras una aplicación de fitosanitarios, lo que se conoce como balance de masas de la aplicación. Éste y otros tipos de estudios se utilizan para estimar el potencial de generación de deriva de los equipos o de los tratamientos. De hecho, en muchos países existen indicadores para clasificar las boquillas y los equipos y, en función de esta clasificación, se recomienda una banda de seguri-

Durante la aplicación de pesticidas, solo una fracción del caldo pulverizado alcanza el objetivo. Una parte de caldo que se pierde cae al suelo y otra parte se dispersa en la atmósfera, lo que se denomina deriva, que se aleja de la parcela de aplicación. Estas pérdidas pueden contaminar el ambiente (aire, suelo, agua, otros cultivos, edificaciones, etc.), afectando a la fauna, la flora y las personas.

Dado que existe una creciente conciencia medioambiental de la sociedad europea, así como una preocupación por preservar la salud de personas y animales, en los últimos años se han estimulado importantes acciones legislativas tendientes a minimizar los riesgos asociados a la utilización de fitosanitarios. La Directiva



Foto 1. Prototipo de aplicación precisa de fitosanitarios ensayado en viña.

dad de mayor o menor anchura (De Schampheleire *et al.*, 2007).

Sin embargo, es muy difícil cuantificar la deriva en ensayos de campo, ya que las condiciones ambientales varían durante los ensayos y los resultados dependen de éstas, de las máquinas que se emplean y de las características de la parcela en que se realiza el ensayo. El tipo de vegetación y su heterogeneidad espacial determina la cantidad de aerosol que se sale fuera de la zona prevista. Asimismo, el diseño de las máquinas afecta a la distribución y uniformidad de la aplicación y a la facilidad de deriva del producto.

De todo ello se desprende que para reducir los riesgos asociados a la pulverización de productos fitosanitarios, se necesita, por un lado, conocer el movimiento del aire y las partículas durante el proceso de pulverización y, por otro, generar una tecnología que permita adaptar instantáneamente la distribución del producto a las características de la vegetación, a las circunstancias atmosféricas y al entorno concreto en que se trabaja.

El proyecto “Estrategias integrales para una utilización de fitosanitarios segura y eficaz” combina tanto el desarrollo de tecnología que permita reducir la cantidad de producto y de aire aplicados mediante la distribución adaptada al entorno, como la generación de herramientas para comprender mejor los fenómenos de deriva y, por tanto, a establecer objetiva y rigurosamente las medidas que palien su efecto y está siendo abordado por el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad de Lleida. Este pro-

Es importante señalar que, pese a que se siguieron los protocolos de buenas prácticas agrícolas y se empleó un equipo adecuado, solo el 50% del producto quedó sobre la vegetación de los árboles

yecto se realiza en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia, el Centre de Mecanització Agrària de la Generalitat de Catalunya y la Fundación Maqcentre.

Optimización de las dosis en función del entorno

Uno de los objetivos principales marcados por la Directiva 2009/128/CE es reducir la cantidad de producto utilizado, mejorando al mismo tiempo la calidad de las aplicaciones.

En los tratamientos fitosanitarios de los frutales se emplean altos caudales de aire para favorecer el transporte del caldo hasta el interior de las copas y permitir el control efectivo de las plagas. Adaptar la dosis de producto fitosanitario a las características estructurales y morfológicas de la vegetación es imprescindible para reducir los riesgos derivados de la aplicación de fitosanitarios. El desarrollo de equipos automáticos capaces de realizar una aplicación variable en

función de las características de la vegetación ha demostrado ser una solución para el ahorro de productos fitosanitarios y la reducción del riesgo de contaminación.

Los avances científicos y tecnológicos permiten integrar nuevos sensores para mejorar la caracterización de la vegetación y para adquirir datos en tiempo real sobre otros factores que influyen en la eficiencia de las aplicaciones, como son las condiciones atmosféricas. En la actualidad, el equipo está trabajando sobre un prototipo que incorpora los siguientes aspectos:

- Gestión automática de la corriente de aire del ventilador. Se está adaptando y ensayando un ventilador que permite la variación continua y automática del caudal de aire suministrado.

- Sistema de posicionamiento y navegación. Se ha incorporado un sistema satelital de navegación global GPS-RTK y un sistema inercial IMU y se ha realizado un programa para determinar la posición exacta del prototipo sobre un mapa digital. Posteriormente se programará una dosificación variable que se plasmará en un mapa digital de actuación.

- Caracterización de la vegetación en tiempo real. Se está trabajando por una parte en la selección de sensores para la medida simultánea de varias filas de árboles y, por otra, en la mejora de los procesos teóricos para mejorar las estimaciones de la vegetación en tiempo real.

- Generación de mapas digitales de vegetación. Se ha implementado un sistema capaz de generar mapas de Índice de Área Foliar, a partir de los datos del escaneo de una plantación de viña mediante un sensor láser terrestre (Lidar). Para ello se ha desarrollado un protocolo de utilización de los sensores láser terrestres en campo y del manejo de datos en post-proceso.

- Generación de mapas de actuación. A partir del mapa de vegetación se ha desarrollado un programa que permite la definición de zonas de manejo diferencial.

Todos estos sistemas se han incorporado sobre un pulverizador hidroneumático de salidas individuales (**foto 1**), que se ha ensayado en viña con resultados muy alentadores, ya que se consigue un ahorro medio de producto superior al 40%. Estos resultados se han obtenido utilizando sensores de ultrasonidos para determinar en cada momento el espesor de la vegetación y enviando la señal correspondiente a las electroválvulas para modificar el caudal emitido por las boquillas. De manera similar, se ha construido un prototipo para el trabajo en frutales (**foto 2**).



Foto 2. Prototipo de aplicación precisa de fitosanitarios construido para frutales.

Medidas de deriva y generación de modelos

El estudio de fenómenos de flujo en aplicaciones complejas, como es el de la deriva, se realiza normalmente mediante experimentos de campo a gran escala, que son caros y difíciles de ejecutar. En la actualidad, la evaluación normalizada de la deriva se basa en la investigación desarrollada en Alemania (Ganzelmeier *et al.*, 1995). Para inscribir nuevos formulados, el Registro Oficial de Productos Fitosanitarios en España requiere aportar información relativa a la deriva. Sin embargo, dicha información no se basa en resultados empíricos, sino más bien en estimaciones o en la transposición de resultados obtenidos en países centroeuropeos, donde las condiciones climáticas y operativas son muy distintas a las del sur de Europa. Además, cultivos como los cítricos, de características vegetativas muy específicas, no están representados en estos estudios.

El trabajo en este apartado ha estado dividido en dos líneas, por un lado, la estimación del balance de masas, es decir, de la cantidad de producto que se deposita en los árboles, en el suelo y que deriva a la atmósfera durante los tratamientos de cítricos. Por otro, en la generación de un modelo CFD del movimiento del aire generado por el ventilador.

Todos los sistemas se han incorporado sobre un pulverizador hidroneumático de salidas individuales, que se ha ensayado en viña con resultados muy alentadores, ya que se consigue un ahorro medio de producto superior al 40%

Para la determinación del balance de masas se llevaron a cabo ensayos en una parcela comercial de naranjas que se considera representativa de las condiciones de cultivo en la Comunidad Valenciana. Las aplicaciones se realizaron con un pulverizador hidráulico asistido por aire a una velocidad de avance de 1,65 km/h y con un caudal medio de aire de 24,4 m³/s. Se emplearon boquillas de cono convencionales a una presión de 10 bar (1 MPa), aplicando un volumen de caldo de 2.930 l/ha. Al caldo se añadió sulfoflavina a una concentración de 1 g/l, que actuó como trazador.

En cada ensayo se situaron diversos tipos

de colectores para estimar las pérdidas de producto por deriva atmosférica y las deposiciones sobre las superficies adyacentes al tratamiento (figura 1). Para recoger muestras de la deposición del caldo se colocaron colectores de papel secante que se situaron en las siguientes zonas:

1. En las copas de los árboles objetivo de la aplicación. Para ello se muestrearon 36 zonas diferentes de cada copa (figura 2).
2. Sobre el suelo de la calle por la que pasaba el pulverizador (lo que denominamos pérdidas directas al suelo).
3. Debajo de los árboles que reciben directamente la pulverización, lo que también forma parte de las denominadas pérdidas directas al suelo.
4. En el suelo de las cinco calles adyacentes, tanto a la derecha como a la izquierda de la calle pulverizada, lo que denominamos deriva depositada.

Para recoger muestras del caldo que se dispersa en el aire se emplearon hilos de nylon de 2 mm de diámetro (figura 1). Estos hilos se colocaron para estimar:

1. Las pérdidas en el aire (deriva atmosférica). Se emplearon hilos que se colocaron horizontalmente a 2 m por encima de la vegetación, paralelamente a la dirección de avance del equipo. Se dispusieron dos sobre la calle de paso del pulverizador y dos más sobre las dos calles paralelas al tratamiento, tanto a la izquierda como a la derecha.

2. La deposición sobre la vegetación de las filas adyacentes. Para ello se colocaron colectores verticales en cada parte de la copa recayente sobre la calle, considerándolas como la cara de "entrada" y de "salida" del árbol, en referencia al avance de la nube de pulverización.

Los colectores se lavaron en laboratorio con un volumen conocido de agua desionizada y se cuantificó la concentración de trazador en la solución resultante mediante fluorimetría. A partir de estos datos se determinó el volumen de caldo recogido en los colectores y se calculó el porcentaje que representaba respecto al total de caldo pulverizado.

En los resultados se observó que sobre los árboles de la fila directamente tratada se depositaba aproximadamente el 40% del caldo pulverizado y un 10% sobre los árboles de las dos filas adyacentes. Las pérdidas directas en el suelo alcanzaron hasta un 16% del volumen pulverizado. De este porcentaje, prácticamente

FIGURA 1.

Distribución de los colectores en el ensayo de balance de masas.

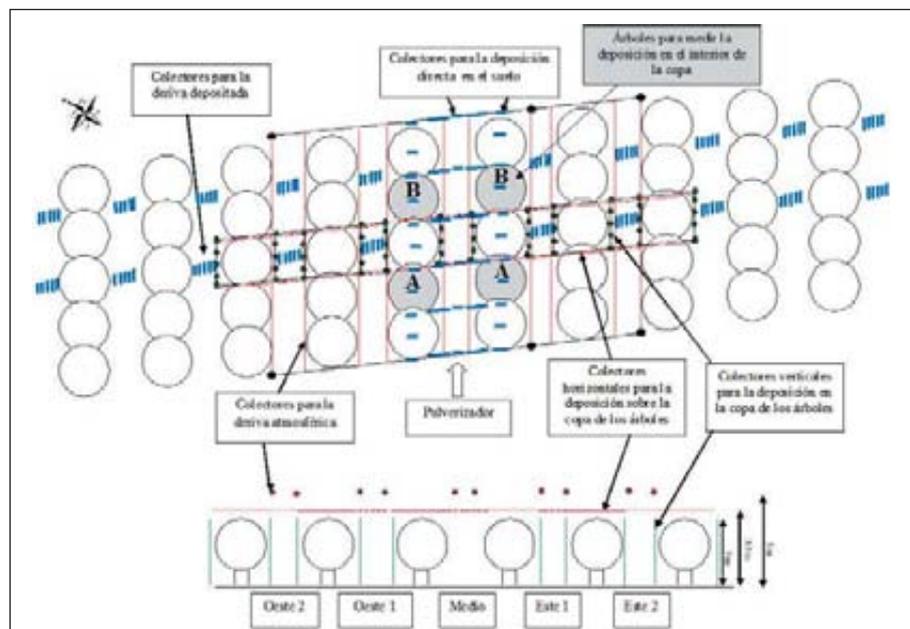
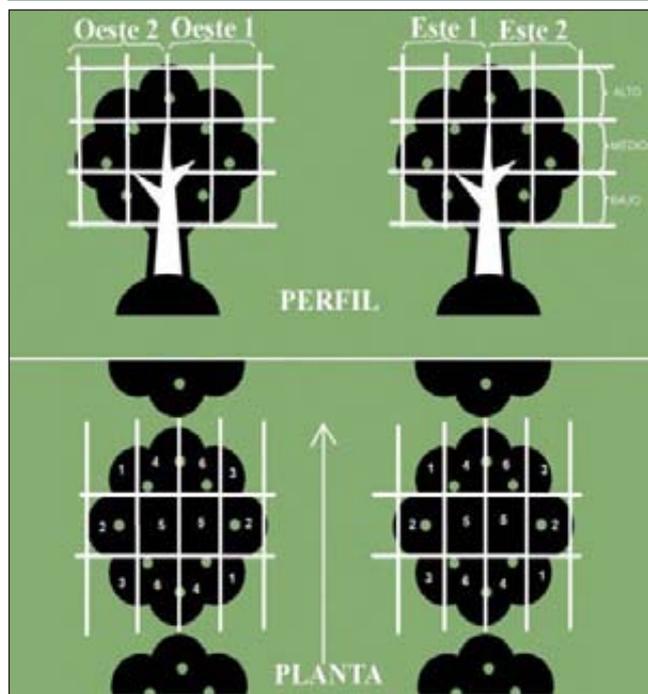


FIGURA 2.

Situación de los colectores para medir la deposición en el interior de la copa en el ensayo de balance de masas.



el 10% se perdió bajo los árboles directamente pulverizados, y el restante 6% en el suelo de la calle por donde avanzaba el pulverizador. Se perdió aproximadamente un 17% por deriva atmosférica y un 7% por deriva depositada. Existe un 10% que no puede asignarse a ninguno de los sustratos, lo que evidencia el margen de error de esta aproximación.

En cuanto a la distribución del caldo en la vegetación, lo que a menudo está muy ligado a la eficacia insecticida del tratamiento, destaca que aproximadamente el 24% del volumen del tratamiento quedó en el exterior de las copas de los árboles (0-1 m de profundidad); alrededor del 7,5% a una profundidad entre 1 y 2 m, alrededor del 4% a los 2-3 m y otro 4% a una profundidad de 3-4 m (Moltó *et al.*, 2011).

Es importante señalar que, pese a que se siguieron los protocolos de buenas prácticas agrícolas y se empleó un equipo adecuado, solo el 50% del producto quedó sobre la vegetación de los árboles. Estos resultados deben hacer reflexionar sobre la necesidad de mejorar la forma en que se realizan los tratamientos fitosanitarios en cítricos y resaltan el interés de introducir mejoras técnicas en la maquinaria y en los procedimientos de aplicación que permitan reducir la deriva.

La enorme complejidad de estos ensayos ha generado un interés creciente en modelizar las aplicaciones de fitosanitarios. Cuando se trabaja con modelos de pulverización asistida por aire sobre árboles es muy importante tener en cuenta la masa vegetal del cultivo para estudiar cómo afecta a la corriente de aire (Walkate, 1992; Xu *et al.*, 1998; Farooq y Salyani, 2004). Cuando la corriente de aire atraviesa la masa vegetal, ésta actúa como un sumidero de momento, oponiendo re-

SIMA
SIMAGENA SIMAVIP
75th EDITION
100% Innovation
FERIA MUNDIAL DE LOS PROVEEDORES DE AGRICULTURA Y GANADERÍA
PARIS NORD VILLEPINTE - FRANCE



24 > 28 FEBRERO 2013

La cita mundial de la agricultura profesional y sostenible

Junto con SIMAGENA, SIMA es también la cita de los negocios ganaderos a escala internacional

- 400 bovinos leche y carne
- Los núcleos de selección reunidos en la zona de genética
- Open shows y subastas

PREPARE SU VISITA EN simaonline.com

- Imprima su pase y evite esperas en la entrada de la feria
- Solicite el catálogo de expositores y prepare eficazmente su visita
- Reserve su almuerzo en el recinto ferial



CULTURE agri CULTURE
WORLD AGRICULTURE AND LIVESTOCK WEEK IN PARIS
PARIS INTERNATIONAL AGRICULTURAL SHOW
24 February - 28 February - 3 March 2013
SIMA
100th edition - 24 > 28 February 2013

Para más información, contacte con nosotros: promo@promosalons.com

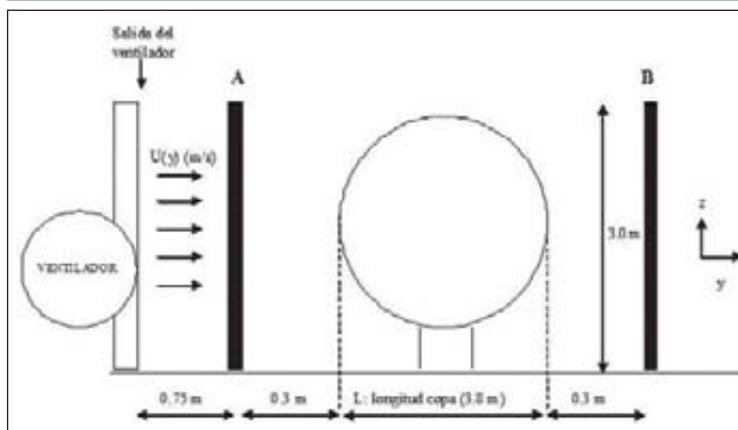


sistencia al avance del flujo. Esto se traduce en una caída de presión y en una pérdida de la velocidad del aire, lo que provoca importantes perturbaciones en las trayectorias de las gotas pulverizadas.

En la literatura científica existen numerosos intentos de modelizar la interacción de la masa de aire con la copa de los árboles introduciendo un coeficiente de resistencia que varía en función del tipo de cultivo (Da Silva *et al.*, 2006; Endalew *et al.*, 2010). Hasta la fecha no se han publicado trabajos que puedan ser aplicados a los tratamientos de cítricos. En este contexto, el trabajo se dividió en dos fases: determinar experimentalmente el coeficiente de resistencia de naranjos y mandarinos y proponer y validar modelos sencillos que simulen el efecto de la copa del árbol sobre el paso del aire mediante CFD.

Para estimar el coeficiente de resistencia se midió experimentalmente la pérdida de velocidad del aire al atravesar la copa en ensayos de campo en parcelas comerciales. En los ensayos se utilizó el ventilador de un pulverizador hidráulico asistido por aire. El ventilador se colocó perpendicularmente a las líneas de árboles, a 105 cm de distancia de la parte más ex-

FIGURA 3.
Puntos de medida de las velocidades del aire para estimar el coeficiente de resistencia y realizar las simulaciones CFD.



terna de la copa y enfrentando la salida del aire hacia el tronco. Se midieron las velocidades del aire en dos planos verticales situados a 30 cm delante de la copa del árbol (plano A), lo que sería el plano de entrada del aire, y a 30 cm detrás de la misma (plano B), que sería el plano de salida (figura 3).

En los trabajos de generación de modelos se definió un dominio rectangular con unas dimensiones de 14 m de largo y 8 m de altura con un cuerpo sin tocar el suelo, que simulaba ser la copa, frente a una salida de aire, donde surgía la velocidad del aire de entrada al árbol medida experimentalmente. Se utilizaron las ecuaciones de Navier-Stokes para resolver el

flujo, utilizando el método de las ecuaciones promediadas de Reynolds y el modelo turbulento k-ε. El aire se asumió como un fluido newtoniano, incompresible e isotérmico. Las pérdidas por viscosidad se despreciaron. El campo de velocidades que proporciona el modelo se representa en la figura 4.

Para ajustar el modelo se siguió un proceso iterativo basado en la comparación de las velocidades simuladas y observadas. Se comprobó que el modelo se ajustaba adecuadamente a los datos experimentales. Así, se obtuvo un R^2 mayor que 0,75 para la predicción de la compo-

nente horizontal U de la velocidad del aire.

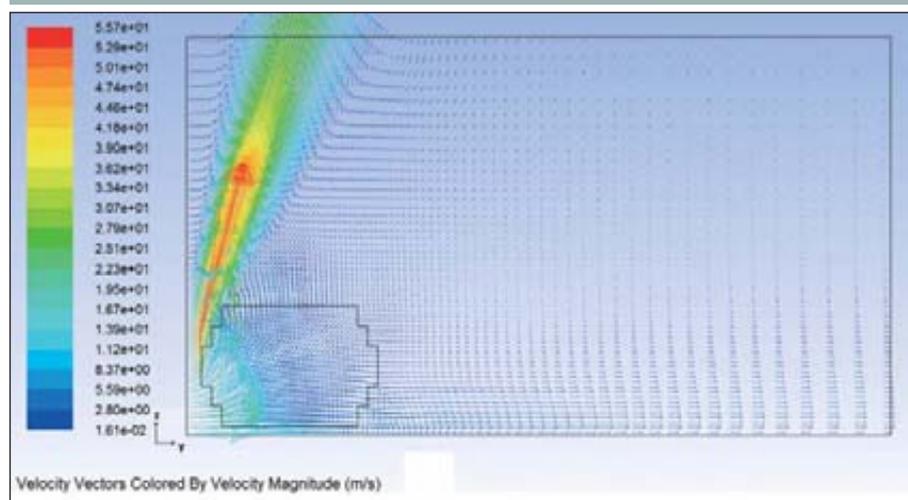
Éste es el primer paso en el objetivo final de conseguir un modelo 3D para estimar la deriva, que tenga en cuenta la presencia de varias filas de árboles y las condiciones meteorológicas durante la aplicación. El modelo deberá ser capaz de simular los flujos turbulentos del aire y de describir las trayectorias de las partículas de las gotas pulverizadas.

Medidas de la deriva con Lidar

Las medidas de la deriva de los tratamientos fitosanitarios realizadas siguiendo la vigente norma ISO 22866 (ISO, 2005) son difíciles de llevar a cabo y no permiten la detección de irregularidades espaciales en la pluma, ya que están limitadas por el número, la localización y la altura de los colectores. Asimismo, aparecen incertidumbres debidas a la variación de las condiciones ambientales durante los ensayos y al diferente efecto de la cubierta vegetal según la parcela en que se realiza el ensayo. Tampoco tienen en cuenta la variación temporal y espacial de la fuente de deriva. Los ensayos presentan enormes dificultades logísticas y consumen ingentes cantidades de tiempo y de recursos humanos. Frente a ello, los instrumentos basados en Lidar (radar láser) se presentan como una técnica de teledetección de la deriva que proporciona una elevada resolución espacial y temporal que permite la obtención de secciones o imágenes tridimensionales de la nube de deriva en tiempo real.

FIGURA 4.

Campo de velocidades de aire proporcionado por el modelo CFD.



Los sistemas Lidar son ampliamente utilizados en estudios atmosféricos y se basan en los diferentes tipos de interacción entre la radiación electromagnética cercana al visible y los aerosoles y moléculas presentes en la atmósfera, siendo la retrodispersión elástica la técnica más comúnmente empleada. Esta técnica se basa en la emisión de un pulso de luz láser de muy corta duración (del orden de nanosegundos) y la posterior detección de la radiación retrodispersada con la misma longitud de onda (figura 5). El tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la luz permite conocer la distancia a la que se encuentran las partículas objeto de estudio (en nuestro caso, las gotas de deriva del fitosanitario aplicado).

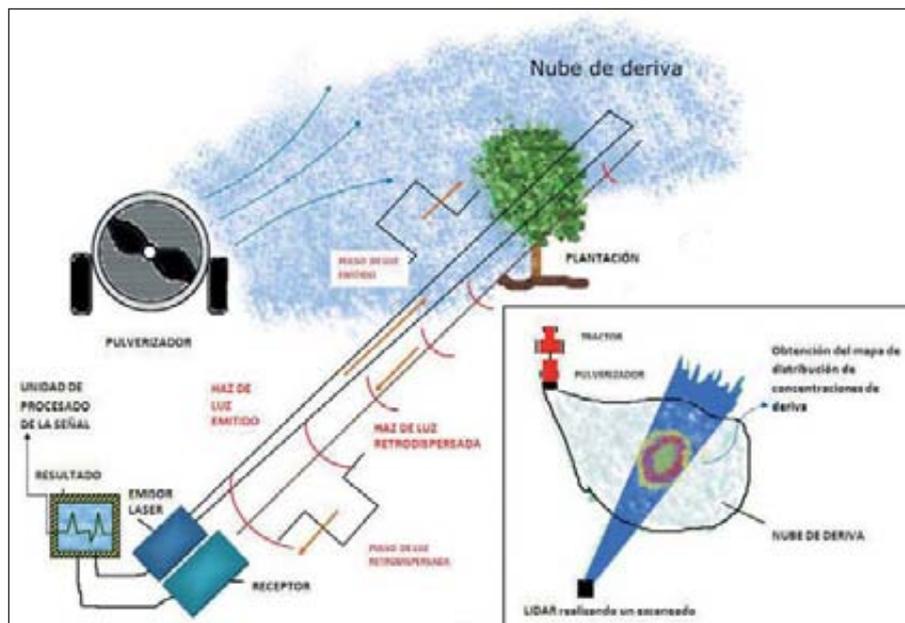
Si bien las primeras aplicaciones del Lidar para medir deriva datan de los años 60 del pasado siglo (Collis, 1968), hasta final de los 80 no empezaron a ser frecuentes para medir la nube de pesticidas generada en aplicaciones aéreas (Hoff *et al.*, 1989). Mediante estos sistemas se pueden generar imágenes en tiempo real de la sección de la nube de deriva en las que se muestra la densidad relativa de fitosanitarios. Posteriormente, se realizaron los primeros intentos de cuantificar la concentración absoluta de los mismos en la atmósfera (Hiscox *et al.*, 2006). En los últimos años se ha utilizado Lidar ultravioleta para monitorizar la deriva de pesticidas en aplicaciones de frutales y se han comparado con modelos teóricos de dispersión de la deriva, poniéndose en evidencia su interés para superar las importantes limitaciones de predicción de dichos modelos.

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, los sistemas Lidar se han utilizado de manera muy limitada en la medida de la deriva, principalmente porque los instrumentos disponibles heredaban el diseño de la arquitectura de los sistemas para aplicaciones atmosféricas, lo que los hace costosos y de funcionamiento complejo. Además, muchos de estos instrumentos no son ocularmente seguros, lo que dificulta su aplicación en estudios terrestres, en los que se realizan medidas casi horizontales (Gregorio *et al.* 2011).

Por este motivo, en el proyecto se está desarrollando un instrumento específico para la caracterización de la deriva. Consta de un diodo láser que emite pulsos a una longitud de onda de 1.550 nm. Para alcanzar los niveles de seguridad ocular requeridos y reducir la divergencia del haz láser, se ha construido un expansor de

FIGURA 5.

Esquema de funcionamiento de un sistema Lidar para el escaneado de una nube de pulverización.



haz y actualmente se está diseñando el sistema óptico receptor.

Por otra parte, existen escáneres Lidar con capacidad para medir distancias disponibles comercialmente. Estos dispositivos se han convertido en un excelente equipamiento para la modelización rápida de la geometría de los árboles y para la obtención de parámetros que permitan la estimación de la superficie foliar (Rosell *et al.* 2009; Llorens *et al.* 2011) y se han empleado con éxito para el ajuste de la dosis en los tratamientos de manzano y perales (Walkate y Cross, 2005; Escolà *et al.*, 2007).

Potencial de deriva de los equipos

Como alternativa a las medidas directas y a los modelos CFD también se trabaja en un procedimiento para la caracterización en laboratorio del potencial de deriva de los equipos de tratamiento. Para ello se realizan estudios sobre:

- La caracterización de la población de gotas generada por las boquillas mediante un sistema láser de efecto Doppler, ya que se sabe que cuando aumenta la proporción de gotas de diámetros pequeños aumenta la posibilidad de generar deriva.

- El transporte de las gotas en un túnel de viento, simulando condiciones de movimiento de aire que proporcionan los equipos de tratamiento. De este modo se pueden establecer relaciones entre los tamaños de las gotas y las distancias a las que pueden viajar.

A partir de los resultados obtenidos, se podrá establecer una clasificación y un modelo de predicción del potencial de deriva que incorpore la tipología y condiciones operativas de los tratamientos (presión, tamaño de gotas, flujo de aire y nivel de obstaculización por la vegetación). ●

Agradecimientos

Este proyecto está parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto AGL2010-22304-C04) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Agradecemos a Iván Carrillo, Vicente Alegre, Belinda Carmona y Rosana Moreno su trabajo en los ensayos, a Pulverizadores Fede S.L. su apoyo técnico y a Fontestad S.A. la cesión de los campos experimentales.

Bibliografía

Existe una amplia bibliografía a disposición de nuestros lectores que pueden solicitar a través del e-mail: redaccion@eumedia.es