

Simulación numérica de la eyección de pulverización desde boquillas de abanico plano para la aplicación de fitosanitarios: validación de la deriva

Sedano, C.G.; Aguirre, C.A.; Rondán, G.A. y Brizuela, A.B.

RESUMEN

En el presente trabajo, inicialmente se simuló y validó el alcance de la deriva de las partículas líquidas que son expulsadas por una aplicación, utilizando boquillas de abanico plano tipo HARDI™ ISO F110-03, tanto en túnel de viento como en el campo, conforme a lo establecido por el estándar ISO 22866 (2005). Teniendo validado el modelo, se realizó una pulverización virtual en el campo durante 65,5 s, georreferenciando un lote específico, considerando un equipo de arrastre con diez boquillas de abanico plano HARDI™ ISO F110-03, con una velocidad de avance, rectilínea y uniforme, de 2,22 m/s, utilizando el modelo de colisión binaria de gotas, evaporación de gotas núcleo sólido y las condiciones meteorológicas registradas en el lote. Al finalizar el proceso, la simulación registró que el 8,72% del volumen se encontraba en suspensión, alcanzando una altura máxima de 5,2 m. También, se registró la evaporación de 136.301 gotas, de las cuales 31 salieron del dominio de simulación, luego de haber recorrido aproximadamente 350 m desde su eyección. Las partículas en deriva, menores a 50 μm , recorrieron una distancia de 410,36 m considerado desde el lugar donde termina la aplicación.

Palabras clave: partículas líquidas, dispersión atmosférica, modelos numéricos

Sedano, C.G.; Aguirre, C.A.; Rondán, G.A. and Brizuela, A.B., 2023. Numerical simulation of spray ejection from flat fan nozzles for agro-chemical application: validation of drift. RADA XIV: 19-35

SUMMARY

In the present work, the extent of drift from spray ejection was simulated and validated using HARDI™ ISO F110-03 type flat fan nozzles, both in wind tunnel and in the field, in accordance with the ISO 22866 (2005) standard. After model validation, a virtual field spraying application was carried out for 65.5 s, georeferencing a specific batch, considering a sprayer with ten HARDI™ ISO F110-03 flat fan nozzles, with a forward rectilinear and uniform speed of 2.22 m/s. A binary collision model of droplets, with solid core droplet evaporation and the meteorological conditions recorded in the field was used. At the end of the

process, the simulation recorded 8.72% of the volume in suspension, reaching a maximum height of 5.2 m. In addition, evaporation of 136,301 droplets was recorded, where 31 droplets left the simulation domain, after having traveled approximately 350 m from their ejection. Drifting particles smaller than 50 μm traveled a distance of 410.36 m from the application.

Key words: fluid particles. atmospheric dispersión, numerical models.

Sedano, C.G. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos Ruta Provincial 11, km 10,5. Oro Verde, Entre Ríos. Argentina. Aguirre, C.A. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos Ruta Provincial 11, km 10,5. Oro Verde, Entre Ríos. Argentina. Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional, Almafuerde 1033, Paraná, Entre Ríos, Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Rondán, G.A. y Brizuela, A.B. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos Ruta Provincial 11, km 10,5. Oro Verde, Entre Ríos. Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Correspondencia a: carlos.sedano@uner.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la simulación relacionada con la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) se ha posicionado como una poderosa herramienta para la investigación y desarrollo de una amplia variedad de áreas o disciplinas del conocimiento. Actualmente, su utilización se puede observar en el diseño automotriz (Zhang *et al.*, 2009), salud (Larrabide *et al.*, 2012), inyectores utilizados para la combustión (Hardi *et al.*, 2014), industria aeroespacial (Zhang y Cen, 2016), diseño naval (Kim y Park, 2017), ingeniería nuclear (Zhang *et al.*, 2017) seguridad en edificios (Caliendo *et al.*, 2020) y, por supuesto, las ciencias agropecuarias no se encuentran fuera de estos avances tecnológicos. Por ello, se pueden observar importantes trabajos de simulación numérica de fotobiorreactores (Bitog *et al.*, 2011), simulación de la producción de algas en estanques de canal abierto (Amini *et al.*, 2018), modelado de la distribución del gas fosfina en silos (Agrafioti *et al.*, 2020), simulación de boquillas de pulverización (Musiu *et al.*, 2019; Sedano *et al.*, 2019; Sedano *et al.*, 2020) y pulverizaciones agropecuarias (Zhu *et al.*, 1994; Teske *et al.*, 1997; Holterman, 2003; Baetens, 2009). En este sentido, el valor de la simulación radica en su validación con respecto a pruebas de laboratorio y a campo, bajo estrictos estándares internacionales, replicando el mayor número de fenómenos intervinientes (mecánicos, atmosféricos, físicos, químicos, etc.). El primer objetivo del presente trabajo es

la validación de los modelos de distribución de diámetro de gotas eyectadas por una boquilla de abanico plano HARDI™ ISO F110-03, la eyección y los fenómenos de colisión de gotas y evaporación que se producen luego de la misma y antes de que se logre alcanzar la zona objetivo de la pulverización. Para ello se contrastan los valores de concentración de gotas simuladas con respecto a las mediciones realizadas en túnel de viento por Nuytens (2007) y en el campo siguiendo el estándar experimental ISO 22866 (2005). El segundo objetivo es la determinación de la deriva de una aplicación virtual en el campo considerando las condiciones meteorológicas y de aplicación del producto durante 65 s para obtener las siguientes características:

- a) Altura máxima alcanzada por las gotas más pequeñas simuladas.
- b) La proporción del producto eyectado que se evaporó antes de lograr alcanzar la zona objetivo, indicando el rango de diámetro de gotas inicial que tenían al momento de la eyección desde el pico y la distancia que lograron alcanzar los solutos desde la zona de aplicación.
- c) La proporción de gotas en suspensión que salieron de la zona objetivo de la pulverización, sus diámetros y la distancia recorrida desde su eyección.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. ARPS y la validación de los Métodos Numéricos

Para la validación de la simulación de la deriva, se parte del código euleriano provisto por ARPS (Advanced Regional Prediction System) desarrollado por CAPS (Center for Analysis and Prediction of Storms) y la Universidad de Oklahoma (USA) el cual utiliza, para la resolución de las ecuaciones de balance de cantidad de movimiento, balance de masa y de energía, la técnica de la Simulación de las Grandes Escalas (LES).

El código euleriano LES de diferencias finitas centradas en dirección horizontal e implícita de tipo Crank-Nicholson para la dirección vertical (Xue *et al.*, 1995) ha sido adaptado por Aguirre (2005) para la simulación de la dispersión de partículas fluidas acoplándolo a un modelo estocástico de seguimiento lagrangiano (LES-STO). Sus resultados de concentración de partículas fueron validados con mediciones de un gas pasivo realizadas en túnel de viento por Fackrell y Robins (1982) para una superficie plana rugosa y por Gong (1991) en presencia de una colina de suave pendiente. Posteriormente, fue utilizado por Aguirre *et al.*, (2006 a,b) para obtener una descripción de los fenómenos de dispersión atmosférica, difusión y reacciones químicas de especies en fases gaseosa, Aguirre *et al.* (2012) para la simulación de la pluma de dispersión de gases en un episodio de emisión con viento prevalente del este (Aguirre *et al.*, 2013) para una situación de dispersión de olores desde un basural a cielo abierto en la localidad de Paraná, Argentina. Posteriormente, Aguirre *et al.* (2014 a) incorpora un acople del modelo LES-STO con el Modelo de Capa Límite Atmosférica de Meso-escala (MCLM) propuesto por Berri (1987) a fin de tener en cuenta las variaciones de la circulación de viento durante un día en la región del Río de la Plata considerando condiciones de borde variables con el tiempo. Aguirre *et al.* (2014 b) contrastan los resultados de este modelo con mediciones de concentración de partículas de metales en cercanías a una planta de fundición en Tucumán (Argentina) que funcionó durante 24 años, realizadas por Fernandez-Turiel *et al.* (2001). Además, Aguirre *et al.* (2014 b) presentan el modelo LES-STO para la dispersión de partículas sólidas de diámetros del orden de las decenas de micrón. Orcellet *et al.* (2016) utilizan este modelo acoplado para representar la dispersión atmosférica de Total de Azufre Reducido (TRS) emanados desde la planta de fabricación

de celulosa durante varios días, contrastando los resultados de las simulaciones con reportes de olores de autoridades del Programa de Monitoreo Ambiental de la Comisión Administradora Binacional (Argentina-Uruguay). Otros autores utilizaron este modelo acoplado para dispersión de partículas líquidas (Vinkovic *et al.*, 2006) y partículas sólidas en movimiento de saltación o suspensión en túnel de viento (Vinkovic *et al.*, 2006). Sedano *et al.* (2019), determinan la velocidad de eyección, coeficiente de arrastre y distancia que deben recorrer las gotas hasta alcanzar la velocidad de sedimentación simulando la eyección desde una boquilla HARDI™ ISO F110-03 respecto a pruebas realizadas por Nuyttens *et al.* (2007), bajo estándar ISO 22866 (2005). Posteriormente, Sedano *et al.* (2020) validan la evaporación de gotas de agua eyectadas desde un pico de pulverización HARDI ISO F110 03 respecto a pruebas realizadas en túnel de viento por Williamson y Threadgill (1974) con diámetros medios de gotas de 100 µm y 200 µm para condiciones de temperatura del aire de 5 °C y 20 °C y presentan un modelo de colisión binaria con generación de gotas satélites.

2. Validación de la deriva

La deriva producida por las pulverizaciones agropecuarias terrestres fue evaluada por Nuyttens *et al.* (2007) realizando dos experimentos de acuerdo a lo establecido en el estándar ISO 22866 (2005):

- Determinación experimental en laboratorio.
- Determinación experimental a campo.

2.1 Determinación experimental en laboratorio

2.1.1 Descripción de la medición en túnel de viento

Para la determinación experimental en laboratorio, Nuyttens *et al.* (2007) utilizaron el túnel de viento de recirculación del Silsoe Research Institute. Este túnel, posee una sección de trabajo de 2 m de alto, 3 m de ancho y 7 m de longitud (Figura 1).

Las condiciones meteorológicas del ensayo fueron: humedad relativa superior al 90% y temperatura ambiente relativamente constante próxima a los 20 °C. Se impuso un perfil de viento con una velocidad aproximada de 2 m/s en la parte superior de la capa límite. La turbulencia fue desarrollada mediante un generador de turbulencia ubicado a barlovento del pico de pulverización.

Para la captura de las gotas en deriva, se utilizaron colectores de polietileno dispuestos en forma perpendicular al flujo, con una apertura

de 0,002 m. A una distancia de 2 m del pico, se colocaron 6 líneas de colectores separados 1 m de distancia entre cada uno de ellos y a 0,1 m del suelo (Figura 1).

Para el estudio, Nuyttens *et al.* (2007) dispusieron una boquilla estática de abanico plano HARDI™ ISO F110-03 dispuesta en forma tal que, el semieje mayor de la elipse d_{x0} (Sedano *et al.*, 2019), se encuentre perpendicular al flujo de viento a una altura de 0,6 m del piso, utilizando una presión de 0,3 MPa y un caudal de 1,2 l/min (Figuras 1 y 2).

2.1.2 Validación de la deriva en túnel de viento

Para la simulación y validación de la deriva de las pulverizaciones en túnel de viento se diseñó, siguiendo la metodología descrita por Aguirre (2005), un mallado de cálculo con un total de 92 celdas en dirección (x), 32 celdas en dirección (y) y 42 celdas en dirección (z). Las dimensiones de las celdas fueron de 0,1 m en las direcciones (x) e (y), teniendo una altura promedio de las celdas de 0,0414 m en dirección (z). El parámetro de rugosidad del suelo fue de $Z_0 = 0,003$ m, la altura del Layer1

= 0,015 m disponiendo la capa límite Layer2 a una altura de 1,2 m. Se consideró una temperatura ambiente de 20 °C y 95% de humedad relativa. Teniendo en cuenta el flujo de aire desarrollado y el mallado antes descrito, se determinó un paso de tiempo de $2 \cdot 10^{-4}$ s. Para asegurar que la capa límite de la vena fluida en el túnel de viento esté completamente desarrollada se realizó una corrida previa del modelo LES sin la incorporación de gotas durante 10 s utilizando condiciones de borde dinámicas en la entrada corriente arriba con un perfil de velocidad media de tipo logarítmico y perfiles de turbulencia normalizados por su valor medio en las tres direcciones. Esto asegura que las condiciones de la dinámica del aire en el túnel de viento concuerden con las condiciones experimentales antes de la inyección de spray líquido. A continuación, se simuló, durante 10 s, la inyección de 30 partículas (gotas) por paso de tiempo, alcanzando un total de 1.500.000 gotas, teniendo en cuenta el ajuste de la velocidad de las gotas (Sedano *et al.*, 2019) y los fenómenos de colisión binaria y evaporación (Sedano *et al.*, 2020) según la densidad y tensión superficial del líquido

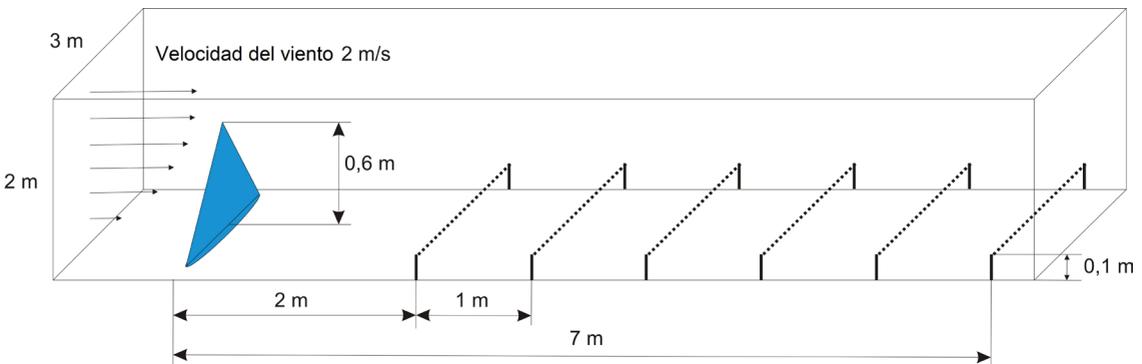


Figura 1. Esquema gráfico del túnel de viento utilizado por Nuyttens, et al. (2007)

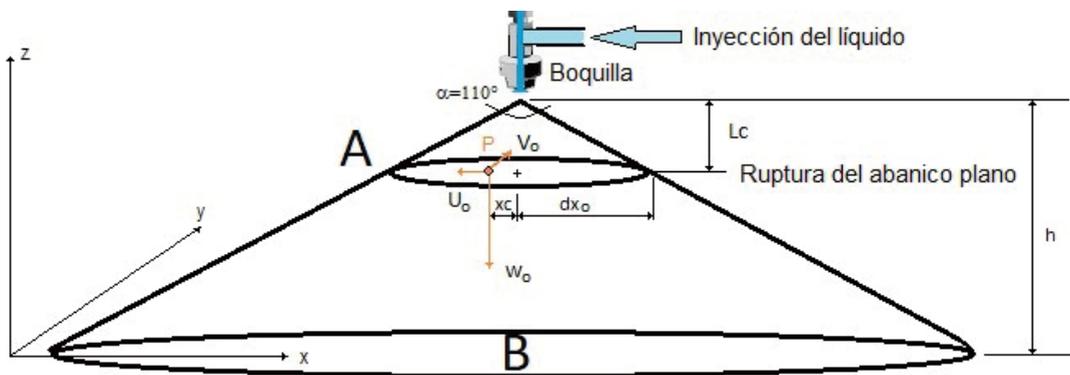


Figura 2. Esquema gráfico de la boquilla y el abanico formado (Sedano et al. 2019).

inyectado en la simulación con las características del agua a 20 °C.

2.2 Determinación experimental en el campo

2.2.1 Descripción de la medición en el campo

Siguiendo el estándar ISO 22866 (2005) para la medición de la deriva de las pulverizaciones, Nuyttens *et al.* (2007) desarrollaron una experiencia a campo utilizando, como trazador, sulfoflavina brillante con una concentración de 3 g/l, el cual posee un límite de detección entre 0,0005 y los 0,005 µg/cm².

Con el objeto de lograr una semejanza con las características físicas de los preparados líquidos utilizados en las aplicaciones agropecuarias, los autores agregaron como tensoactivo Tween 20 con una concentración del 0,1%, alcanzando una tensión superficial de 47,9 ± 0,6 mN/m y una densidad del líquido de 1,01 ± 0,02 kg/l.

Como colector, utilizaron papel de filtro Machery-Nachel, tipo 751, de 0,25 m x 0,25 m. Su distribución, fue dispuesta en tres franjas separadas a 10 m cada una sobre el eje (x; y) a una distancia de 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 15 y 20 m a sotavento de la línea de pulverización indicadas como Línea A, Línea B y Línea C (Figura 3).

Luego del paso del tractor, los colectores fueron depositados en recipientes herméticos a la luz ultravioleta, con 0.70 l de agua para solubilizar el trazador. Se agitaron durante 20

minutos y, posteriormente, fueron analizados en un espectrofotómetro de fluorescencia.

La deposición de la deriva es calculada como un promedio (D_{med}%) de los tres puntos de medición (Líneas A, B y C de cada distancia perpendicular a la dirección en que avanza el tractor) y es representado como el porcentaje de la aplicación realizada para esa área:

$$D_{med} \% = \frac{(C_{ol} 10^7)}{V_a} \quad [1]$$

donde,

C_{ol}: Volumen de deriva medida en el colector en ml/cm².

V_a: Volumen aplicado en l/ha.

Para la aplicación, se utilizó un botalón de 27 m de largo, colocado a 0,5 m de altura del suelo, con 54 boquillas de abanico plano HARDI™ ISO F110-03, separadas a 0,5 m y con una inclinación de 8°, una velocidad de avance del tractor de 2,22 m/s que resulta en una tasa de aplicación de 59,94 m²/s con una presión de trabajo de 0,3 MPa que implica 1,2 l/min por pico. Esto hace un caudal aproximado de 1,08 l/s y 180 l/ha a esa velocidad del tractor. Se realizaron 21 días de mediciones en el período comprendido desde septiembre de 2004 hasta abril de 2006.

Respecto a las condiciones meteorológicas, el autor registró, entre otros, los siguientes valores:

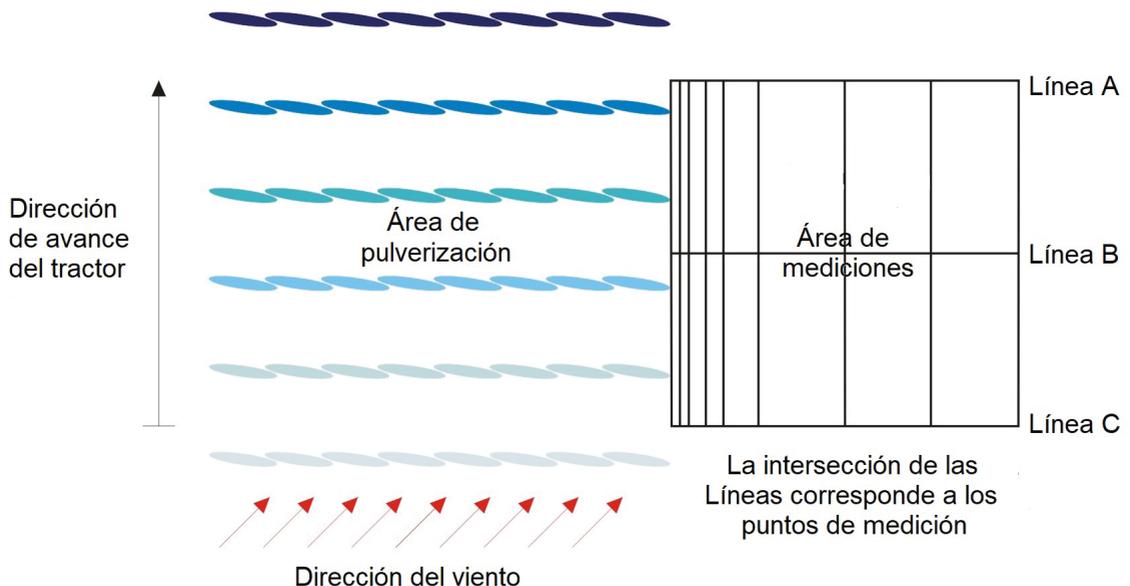


Figura 3. Esquema y diseño de experimento realizado por Nuyttens *et al.* (2007). La escala de azul, indica la evolución en el tiempo del avance del tractor.

- Humedad relativa.
- Humedad específica.
- Temperatura de bulbo seco.
- Velocidad del viento.
- Dirección del viento respecto al botallón.

Es importante destacar que, las condiciones del perfil de viento utilizadas en las mediciones en el campo se ajustan a las descritas por la FAO (2002). Asimismo, la temperatura y humedad relativa se encuentran dentro de los rangos establecidos por el Manual de Buenas Prácticas propuesto por la Red de Buenas Prácticas Agropecuarias de la República Argentina (Red BPA, 2015) pudiéndose considerar este escenario como el más favorable para reducir la deriva.

2.2.2 Validación de la pulverización en el campo (Nuyttens *et al.*, 2007)

Para la simulación y validación de la deriva de las pulverizaciones en el campo, se consideró el ensayo RS24 realizado por Nuyttens *et al.* (2007). Para la simulación de esta experiencia, se diseñó un mallado con 36 celdas en dirección (x), 36 celdas en dirección (y) y 41 celdas en dirección (z). Las dimensiones de las celdas fueron de 2 m en las direcciones (x) e (y) y 20,55 m en dirección (z), parámetro de rugosidad $Z_0 = 0,005$ m, altura de las celdas adyacentes al suelo Layer1 = 2,5 m y de la capa límite Layer2 a una altura de 600 m.

Previo a comenzar a lanzar las partículas, se simularon durante 10 s las condiciones meteorológicas del ensayo RS24 con el fin de estabilizar la solución numérica, de acuerdo con el siguiente detalle:

- Humedad Relativa: 62,8%.
- Humedad Específica: 6,1 g/kg.
- Temperatura de bulbo seco: 13,8 °C.
- Velocidad del viento a 1,5 m: 2,68 m/s.
- Velocidad del viento a 3,25 m: 2,97 m/s.
- Velocidad del viento a la altura del botallón (0,5 m): 2,0 m/s.
- Velocidad media del viento: 2,83 m/s.
- Dirección de viento respecto a la dirección de avance del tractor: 11°.

El viento fue simulado mediante un perfil logarítmico ajustado a los valores de laboratorio.

Habiéndose estabilizado la simulación numérica de las condiciones meteorológicas, se emitieron durante 27,93 s, 162 partículas por paso de tiempo (3 partículas por boquilla) con un paso de tiempo de $2 \cdot 10^{-4}$ s, que implica 810.000 partículas/s con un diámetro medio de 350 μm . Una partícula promedio tiene un volumen de 2,24493E-08 l. Como

el caudal en la experiencia se calculó en 1,08 l/s, se deberían haber lanzado 48.108.404 partículas para una relación volumétrica $1 \equiv 1$. Entonces, cada partícula lanzada corresponde a 59 gotas. Las características físicas del líquido, presión de trabajo, picos y avance del tractor se ajustaron a la descripción de las pruebas experimentales realizadas a campo por Nuyttens *et al.* (2007).

3. Pulverización virtual en el campo

Habiendo validado la deriva producida por las pulverizaciones agropecuarias terrestres, utilizando boquillas HARDI™ ISO F110-03, con respecto a pruebas bajo estándar ISO 22866 (2005). Se simula un caso de pulverización virtual considerando una hipotética aplicación realizada en el campo de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos, denominado "Campo Atanor".

Dicho campo, se encuentra ubicado al sur de la Comuna de Colonia Ensayo, provincia de Entre Ríos, Argentina, específicamente en las coordenadas 31°51'45" S, 60°38'47" O, siendo utilizado para actividades de docencia, investigación y producción por parte de la Facultad.

En la Figura 4 se observa el Campo Atanor y el lote objeto de la pulverización virtual.

3.1 Descripción del caso de estudio

Para la simulación de la pulverización virtual, se consideró una aplicación sobre barbecho, tomando como fecha el 28 de diciembre de 2017, a las 10:00 horas locales (UTC - 3). Las condiciones meteorológicas correspondientes al día y hora de la aplicación fueron obtenidas mediante la estación meteorológica, perteneciente a la Cátedra Climatología Agrícola de la Facultad, dispuesta en el mismo campo, la cual registró:

- Presión atmosférica: 0,10084 MPa.
- Intensidad del viento a la altura del botallón: 3,66 m/s.
- Dirección del viento: sureste.
- Temperatura de Bulbo Seco: 25,7 °C.
- Humedad Relativa: 66%.

Teniendo la posibilidad de georreferenciar las posiciones y trayectorias del tractor, se simula la pulverización virtual considerando la terraza dispuestas en el campo.

Previo a la simulación de la eyección de gotas, se simularon durante 10 s las condiciones meteorológicas conforme a los datos obtenidos de la estación. Posteriormente, se simuló la eyección

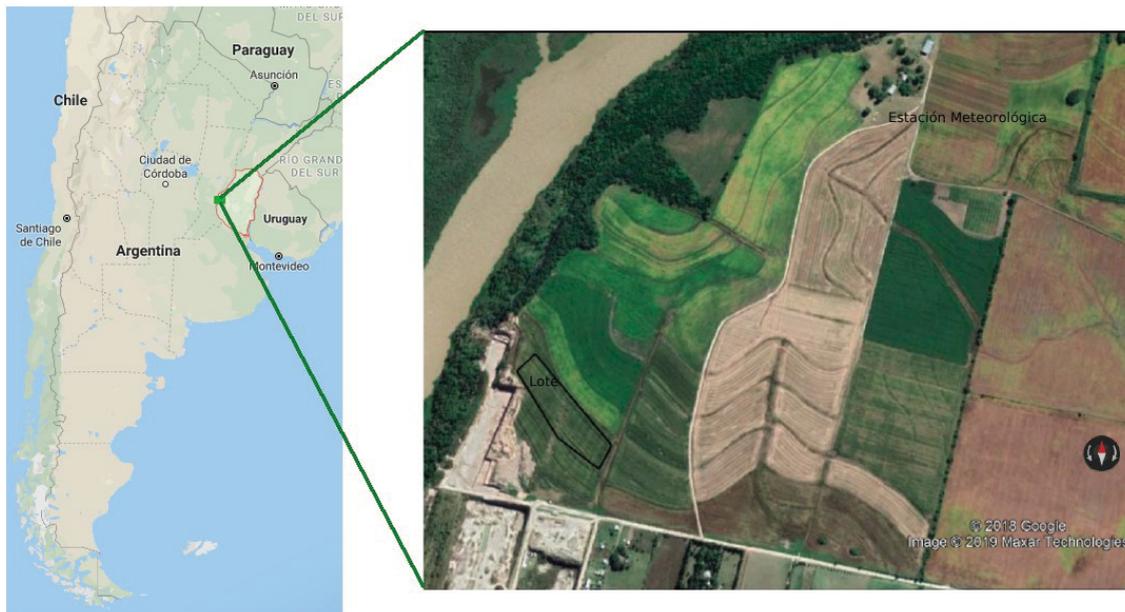


Figura 4. Ubicación geográfica del lote donde se realizó la simulación de una pulverización virtual (Campo Atanor).

de spray en 10 boquillas de abanico plano HARDI™ ISO F110-03, separados 0,5 m entre ellas dispuestas a 0,5 m del suelo. El avance del tractor fue configurado con una velocidad rectilínea y uniforme de 2,22 m/s con una presión en el circuito de 0,3 MPa con un caudal de 1,2 l/min por pico. Esto hace un caudal de 0,2 l/s y consecuentemente 180 l/ha.

Durante 65,5 s se eyectaron 30 partículas por paso de tiempo, siendo el paso de tiempo de $2 \cdot 10^{-4}$ s, resultando en 150.000 partículas por segundo repartidas en forma proporcional en los 10 picos, con un diámetro medio de 350 μm , incluyendo los procesos de colisión y evaporación de gotas (Sedano *et al.*, 2020), alcanzando una relación volumétrica de simulación de 1 partícula \equiv 59 gotas.

El mallado fue diseñado con un total de 27 celdas en dirección (x), 27 celdas en dirección (y) y 41 celdas en dirección (z). Las dimensiones de las celdas fueron de 30 m en las direcciones (x; y) y 20,55 m de altura promedio en la dirección (z); la altura de las celdas de cálculo adyacentes al suelo fue de $Z_{\min} = 0,5$ m disponiendo la capa límite a una altura de 822,2 m.

El preparado a pulverizar es el glifosato marca Roundup Classic™ (MGA, 2017 a), cuyo ingrediente activo es la sal Glifosato; N-(fosfonometil) glicina en forma de sal Isopropilamina al 48%, con la incorporación de 100 cm^3 de Inertes y coadyuvantes” (MGA, 2017b). Se observa que

dicho producto no presenta, en su descripción, las propiedades físicas (densidad, presión de vapor, tensión superficial) del producto preparado en las diferentes dosis recomendadas para la aplicación y su variación respecto de la temperatura, presión atmosférica y humedad relativa. Es por ello que, en el presente caso, el líquido simulado a eyectar se ajusta a las características del líquido utilizado en la Sección 2.2.1), donde se realizó la validación a campo bajo estándar ISO 22866 (2005), siendo sus características:

- Tensión Superficial: $47,9 \pm 0,6$ mN/m.
- Densidad del líquido: $1,01 \pm 0,02$ kg/l.
- Temperatura del líquido: 20 °C.
- Difusividad de vapor de agua en el aire.

Durante el proceso de evaporación, se considera el modelo de “núcleo sólido” el cual establece que, en las gotas de suspensiones acuosas (>90% de agua), la evaporación suele ocurrir como si la gota fuera agua pura, hasta el momento en que toda el agua se ha evaporado y solo queda el material en suspensión (Holterman, 2003) pudiendo, de esta forma, simular la trayectoria de las partículas sólidas una vez que el solvente se ha evaporado.

Actualmente, el sistema no permite simular condiciones de borde inmersa por lo cual no pueden simularse, entre otras cosas, cortinas de árboles y el tractor. La incorporación de condiciones de borde inmersa a fin de representar diferentes obstáculos será objeto de futuros trabajos.

3.2 Procesamiento de imágenes para la simulación de una pulverización en el campo

Con el fin de simular una pulverización terrestre virtual en un lote del Campo Atanor se procedió a la adquisición de imágenes satelitales de dicha área de estudio, las que fueron adquiridas del banco de datos del Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) de USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (LP-DAAC, 2019).

Estas imágenes caracterizan el área de estudio desde el punto de vista de los elementos que se encuentran en el terreno e interactúan con la circulación de viento como relieve y cobertura vegetal.

Además, permiten estimar los flujos de calor y vapor de agua desde el suelo a la atmósfera debido a la radiación solar y temperatura. Estos datos proporcionados como imágenes al código ARPS han sido procesados a partir de datos de satélites y cartas de suelo.

Los datos georreferenciados necesarios para incorporar como condiciones iniciales en la simulación son los siguientes:

- Temperatura de los elementos sobre la superficie del terreno (TSOIL).
- Fracción de la vegetación que cubre un pixel del terreno (FRACVEG).
- Índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI).
- Parámetro de rugosidad del terreno (Z_0).
- Modelo digital de elevación (MDE).
- Tipo de vegetación según la clasificación de Olson World Ecosystem Classes (Olson *et al.*, 1985) VEGTYPE).
- Tipo de suelo según la clasificación de Wilson y Henderson-Sellers, (1985) (SOILTYPE).

3.3 Sensores utilizados, plataformas y bases de datos

Se utilizaron las imágenes satelitales para obtener los productos (3.3.1), (3.3.2), (3.3.3) y (3.3.4):

- Imagen del sensor TEMATIC MAPPER de la plataforma Landsat 8.
- Fecha de la imagen: 25/12/2017.
- Hora de pasada: 10:00 Hora local (13:00 UTC).
- Resolución espacial: 30 m.
- Escena: 227/82.
- Proyección: UTM 20N.
- Bandas: Rojo (R) banda 4, Infrarrojo cercano

(IRC) banda 5, Infrarrojo medio (IRM_{2,2}) banda 7, Infrarrojo térmico (IRT) banda 10.

3.3.1 Temperatura de los objetos sobre el suelo (Figura 5)

A partir de la imagen de B10 (IRT) se utilizó el módulo THERMAL del IDRISI con el fin de obtener la temperatura de los objetos sobre la superficie del suelo. Este módulo convierte los valores de energía en onda larga emitida por los mismos a valores de temperatura:

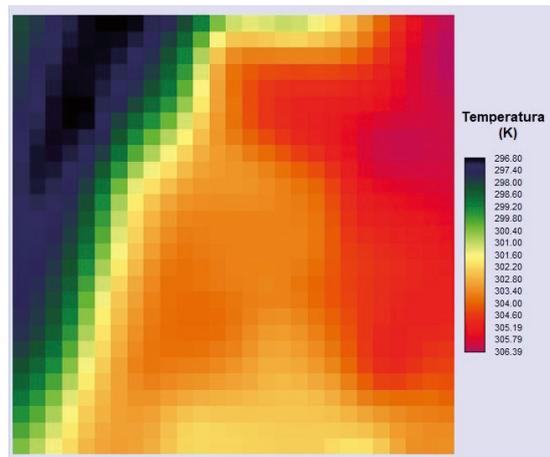


Figura 5. Imagen de temperatura (°K) de los objetos sobre el suelo obtenida a partir del módulo THERMAL de IDRISI

3.3.2 Fracción de la Vegetación (Figura 6)

Esta representa la porción de un pixel ocupada por vegetación. Esta variable, junto con el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) es importante para estimar el flujo de vapor transpirado por los vegetales a la atmósfera. Para obtener la Fracción de la Vegetación se procedió en dos etapas. Primero se obtiene el índice de Suelo (SI) (Aguirre *et al.*, 2016) que considera la superficie que no es ocupada por la vegetación a partir del cálculo de un índice:

$$SI = \frac{IRM_{2,2} - IRC}{IRM_{2,2} + IRC} \quad [2]$$

Este índice toma valores entre -1 (toda la superficie está ocupada por vegetación) a +1 (toda la superficie es suelo descubierto de vegetación). De esta forma, la imagen de Fracción de la Vegetación puede obtenerse según:

$$FRACVEG = \frac{IS_{max} - IS}{IS_{max} - IS_{min}} \quad [3]$$

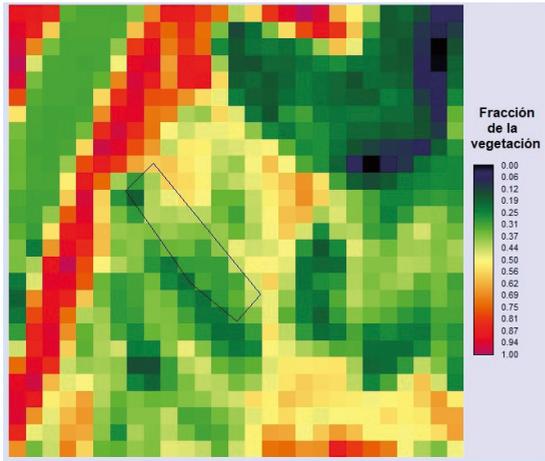


Figura 6. Imagen de la Fracción de la Vegetación en un pixel obtenida usando el método propuesto por Aguirre *et al.* (2016) en IDRISI.

3.3.3 Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (Figura 7)

Este permite considerar la biomasa verde en la superficie del suelo expresada como un índice de vigor vegetal. Este índice propuesto por (Rouse *et al.*, 1974) es ampliamente utilizado en estimaciones agrícolas:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad [4]$$

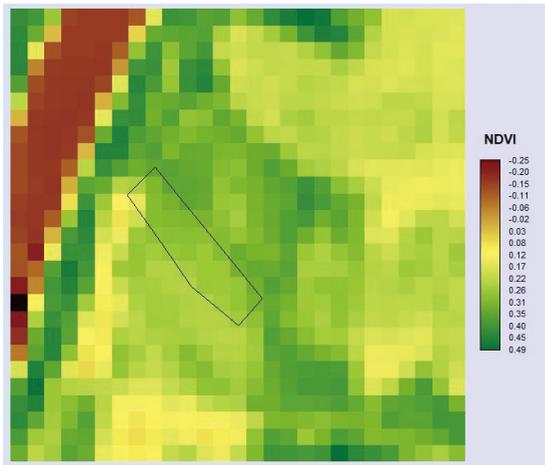


Figura 7. Imagen del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) obtenida según lo propone Rouse *et al.* (1974) en IDRISI..

3.3.4 Parámetro de rugosidad del suelo (Z_0) (Figura 8)

Es utilizado por el modelo ARPS para simular el perfil de viento sobre el terreno. Este parámetro

depende en gran medida de la altura y flexibilidad de los elementos sobre el terreno. (Ramli, 2009) propone una relación entre el NDVI y Z_0 que puede ser utilizada en zonas rurales:

$$\ln(Z_0) = C_1 + C_2 \text{NDVI} \quad [5]$$

A partir de los ajustes realizados en la Pampa Húmeda por los autores, se determinó el valor de los coeficientes C_1 y C_2 : $C_1 = -7,0875$; $C_2 = 7,1573$.

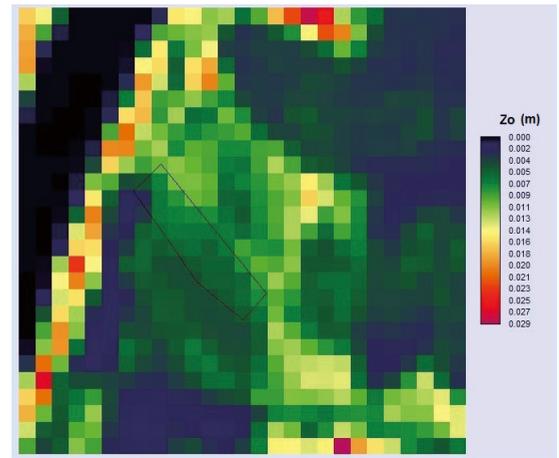


Figura 8. Imagen del Parámetro de rugosidad debida a los elementos sobre el terreno obtenida usando el método de Ramli (2009) en IDRISI.

3.3.5 Modelo Digital de Elevación (Figura 9)

Este factor es de suma importancia para considerar la influencia del relieve en la circulación de viento. Una imagen que representa el modelo de elevaciones del terreno es provista a partir del repositorio de imágenes de la USGS (United States Geological Survey) que contiene imágenes de la misión Shuttle Radar Topography Mission (STRM). La imagen correspondiente a la zona de estudio fue obtenida a partir del sensor de radar montado en el satélite Space Shuttle Endeavour de la NASA. Como la imagen proviene de una fuente diferente a las mencionadas anteriormente, fue necesario realizar un proceso de remuestreo (*resample*) para llevarla a las mismas coordenadas de proyección geográfica y con la misma resolución espacial. Este procesamiento fue realizado utilizando el módulo RESAMPLE de IDRISI.

3.3.6 Tipos de cobertura

Una imagen correspondiente al tipo de vegetación es utilizada por ARPS para estimar los flujos de calor y vapor de agua (evapotranspiración).

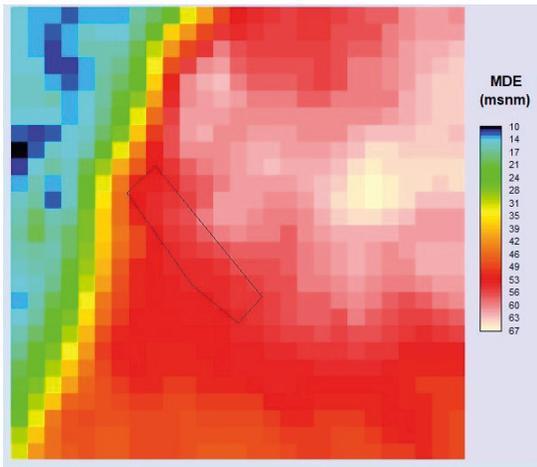


Figura 9. Modelo Digital de Elevación (MDE) en metros sobre el nivel del mar (msnm) obtenido a partir una imagen radar STRM en IDRISI.

Esta imagen fue obtenida a partir de un proceso de clasificación supervisada utilizando las bandas R, IRC e IRM_{2,2} del satélite Landsat 8. A partir de la imagen clasificada se obtuvieron datos de la cobertura del terreno como el tipo de vegetación en el área de Atanor y zonas cubiertas por agua. Estos tipos de vegetación fueron llevados a categorías (Figura 10) según la tipología de Olson World Ecosystem Classes (Olson *et al.*, 1985):

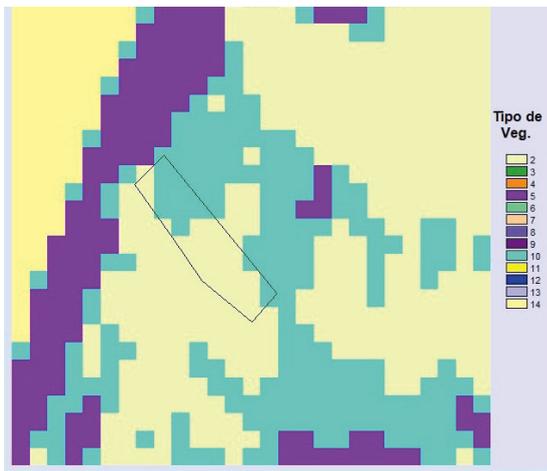


Figura 10. Tipos de cobertura según la clasificación de Olson *et al.* (1985). 2: Barbecho; 5: Gramíneas con vegetación arbórea; 10: Cultivos; 14: Agua, en IDRISI.

3.3.7 Tipos de suelos

La imagen de Tipos de Suelo es necesaria para determinar los flujos de calor y vapor de agua (evaporación) de las zonas descubiertas de vegetación. Esta imagen fue obtenida a partir

del trabajo realizado por el Plan Mapa de Suelos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria en colaboración con el Gobierno de la Provincia de Entre Ríos (Plan Mapa de Suelos, 1998) y expresada según la tipología propuesta por Wilson y Henderson Sellers (1985) que permite ser correctamente interpretada por el código ARPS. La Figura 11 muestra la imagen de tipo de suelos según esta clasificación. En ella puede verse que, debido a la escasa extensión del área de estudio, sólo se encuentra el tipo de suelo Franco arcillo arenoso (Molisol, Hapludol ácuico) y al borde superior izquierdo de la imagen se encuentra agua.

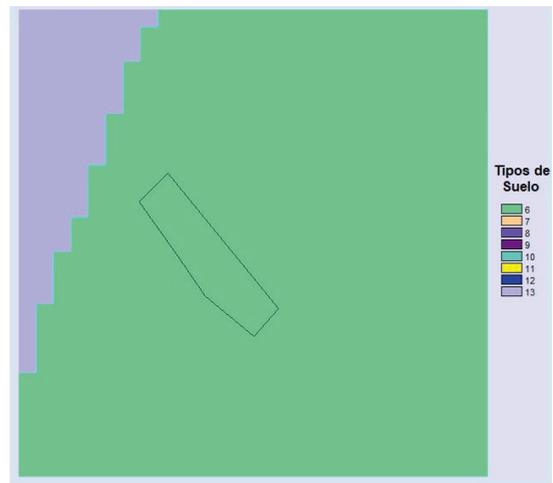


Figura 11. Tipos de suelo correspondiente al área de estudio. 6: Franco arcillo arenoso (molisol, hapludol ácuico); 13: Agua. Imagen obtenida realizando una clasificación en con el software IDRISI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados de las simulaciones realizadas en el túnel de viento y en el campo en comparación con los obtenidos por Nuyttens *et al.* (2007) y luego se muestran los resultados obtenidos con la simulación virtual. Se realiza una discusión de los mismos al finalizar cada subsección.

1. Validación de la deriva en laboratorio (Nuyttens *et al.*, 2007)

El autor de las experiencias de medición de fracción del volumen de líquido depositado en túnel de viento presenta los valores medios y el desvío estándar en los resultados de sus mediciones para cada sitio de medición corriente abajo. A partir de esos valores se realizó un test de significancia para el 5% considerando que la distribución del volumen de líquido sedimentado

sigue una distribución normal. Los resultados se muestran en la Tabla 1. Se observa el valor medio y desvío estándar ($V_{med} \pm d.e.$) de las mediciones en laboratorio realizadas por Nuyttens *et al.* (2007) en los sitios de medición ubicados a una distancia (D) en metros desde el pico de eyección. También se presentan los valores de la fracción de volumen simulados por el modelo V_s y el p-value. Del análisis de estos datos se asume que a partir de los 3 m de la eyección corriente abajo, los valores de la fracción de volumen depositado simulados no representan adecuadamente las observaciones realizadas por el autor de la experiencia en túnel de viento debido a que el valor de p-value $< 0,025$.

Esto también se muestra en la Figura 12 que presenta los valores medios y el desvío estándar de la concentración de gotas en cada sitio de medición corriente debajo de la eyección. A partir de los 3 m de distancia corriente abajo, la simulación subestima el valor registrado en el túnel de viento alcanzando la máxima diferencia a los 4 m del pico con 46,98 $\mu\text{l/l}$ y la mínima de 18,15 $\mu\text{l/l}$ a los 7 m del pico. Es posible que la cantidad de partículas líquidas utilizadas para simular esta

experiencia no haya sido suficiente lo que podría explicar la subestimación de las concentraciones respecto de las mediciones experimentales.

2. Validación de la deriva en el campo (Nuyttens *et al.*, 2007)

En la Figura 13 se puede observar la cobertura de la aplicación simulada, evaluada en cuadros de 0,25 m de lado, representando el volumen sedimentado en 1 cm^{-2} . Se aprecia una deriva en la forma cónica siguiendo la dirección del viento. Esto se debe a que la velocidad de avance del tractor (2,2 m/s) es mayor a la velocidad del viento a la altura del pico de la pulverizadora.

Como se puede observar en la Figura 14, se registró sedimentación de partículas a lo largo de toda la trayectoria de avance, alcanzando una distancia superior de 30 m en la dirección transversal (x), considerada desde límite de la aplicación.

En la Figura 14, se identifican los colectores de papel de filtro utilizados en la experiencia de

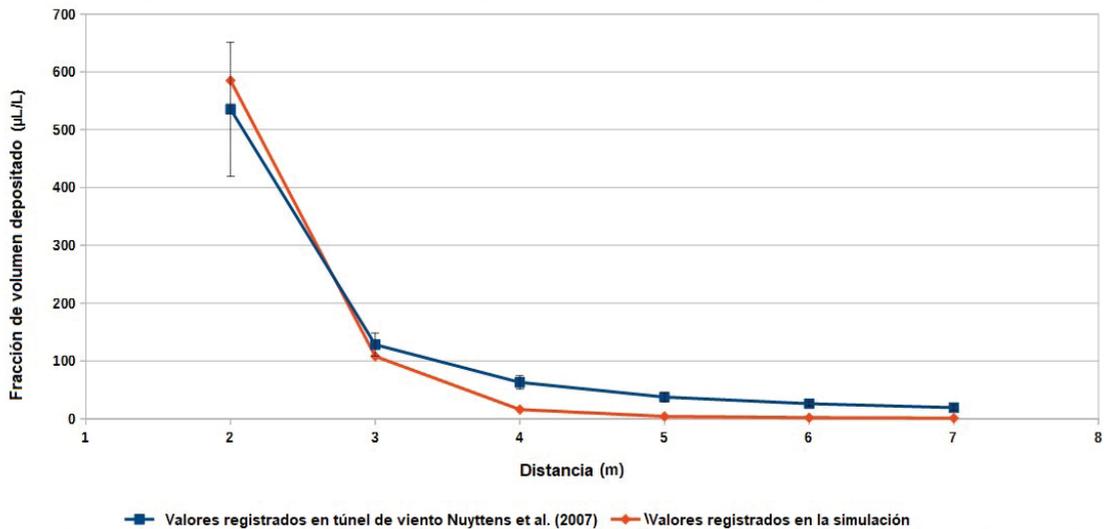


Figura 12. Curva de fracción de volumen depositado en túnel de viento. Valores de Laboratorio (Nuyttens *et al.*, 2007) vs Simulación. Las barras verticales indican el desvío estándar para las mediciones experimentales.

Tabla 1. Resultados de las mediciones de volumen de líquido sedimentado ($V_{med} + d.e.$) en túnel de viento (Nuyttens *et al.*, 2007), valores simulados (V_s) y test de confianza para una distribución normal de los datos con un nivel de significancia del 5% (p-value $< 0,025$ se considera un valor muy alejado de la distribución de las mediciones).

D (m)	2	3	4	5	6	7
$V_{med} + d.e. \mu\text{l/l}$	535,4 ± 115,9	128,2 ± 20,0	63,0 ± 11,6	37,6 ± 7,8	26,1 ± 3,7	19,3 ± 4,6
$V_s \mu\text{l/l}$	584,990	108,051	16,014	4,078	1,881	1,151
p-value	0,334	0,157	2,56E-5	8,64E-6	1,33E-9	3,98E-5

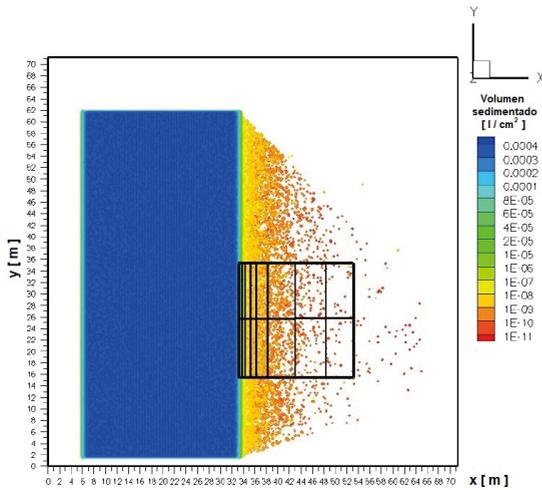


Figura 13. Resultados de la simulación de la deriva sedimentada en el campo - Experimento RS24 (Nuyttens *et al.*, 2007).

medición de la deriva. Estos, están a una distancia de 0,51 m; 1,01 m; 2,03 m; 3,04 m; 5,07 m; 10,15 m; 15,22 m y 20,29 m por fuera del límite de pulverización.

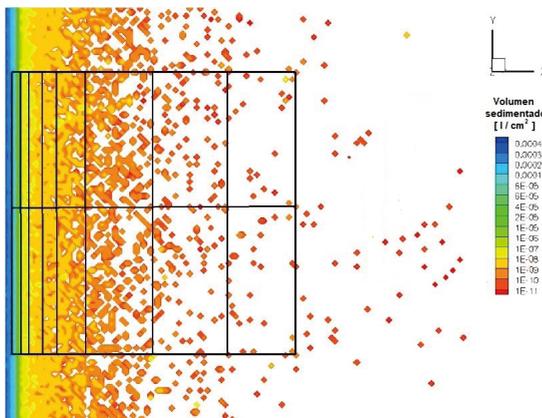


Figura 14. Zoom zonificación de la zona de medición de deriva sedimentada en el campo del experimento RS24 (Nuyttens *et al.*, 2007) y resultados de la simulación.

La Tabla 2 muestra los resultados del porcentaje de deriva obtenido con la ecuación (1) para la

experiencia denominada RS24 (valor medio y desvío estándar ($D_{med} \% \pm d.e$) También en la misma tabla se presentan los valores de porcentaje de deriva simulados ($D_s \%$) Un análisis de significancia al 5% fue realizado para determinar estadísticamente si los resultados de la simulación pertenecen a la distribución de probabilidad de los valores obtenidos experimentalmente, considerando que esta última admite normalidad. Del análisis presentado en la Tabla 2 se observa que en todos los casos el *p-value* supera el límite de 0,025 por lo que los resultados de la deriva simulada con el código pertenecen a la distribución normal de las mediciones realizadas por Nuyttens *et al.* (2007).

Nuyttens *et al.* (2007) señalan que el elevado valor del desvío estándar en el porcentaje de deriva obtenido puede deberse, en primer lugar, a los movimientos de la barra de pulverización (van de Zande *et al.*, 2006) y, en segundo lugar, a pequeñas variaciones de la velocidad y dirección del viento y de la línea de pulverización al pasar por los distintas transectas de muestreo. Fox *et al.* (1993) y Salyani y Cromwell (1993) encontraron variaciones similares en los valores de deriva.

Como se puede apreciar en la Figura 15, el volumen sedimentado sobre los puntos de medición de la simulación subestima los valores obtenidos en el campo para el ensayo RS24 pero esta diferencia se encuentran dentro del nivel de confianza del 95%.

En relación con las partículas en deriva, se registró que el 0,065% de la aplicación se encuentra aerotransportada al momento de la evaluación (28 s luego del inicio de la simulación), alcanzando una altura máxima de 331,8 m (Figura 16).

Asimismo, el 0,001% superó los 38 metros en la dirección transversal (x) del dominio de simulación, por fuera del límite de la aplicación. Es importante destacar que, si bien la altura máxima alcanzada por la deriva no puede ser contrastada con los datos publicados por Nuyttens *et al.* (2007), estos podrían ser sustentados por la presencia de fitosanitarios en agua de lluvia descritos por Alonso *et al.* (2018).

Tabla 2. Resultados de las mediciones de deriva de las pulverizaciones en el campo (Nuyttens *et al.*, 2007), valores de porcentaje de deriva simulados y test de confianza para una distribución normal de los datos con un nivel de significancia del 5% ($p\text{-value} < 0,025$ se considera un valor muy alejado de la distribución de las mediciones experimentales).

Dc(m)	0,51	1,01	2,03	3,04	5,07	10,15	15,22	20,29
$D_{med} \%$	21,12	11,99	4,73	2,50	1,37	0,65	0,53	0,45
d.e. (m)	12,99	6,26	2,88	2,11	0,99	0,61	0,31	0,29
$D_s \%$	21,24	8,76	1,53	0,80	0,28	0,53	0,15	0,14
p-value	0,499	0,308	0,133	0,210	0,135	0,422	0,110	0,104

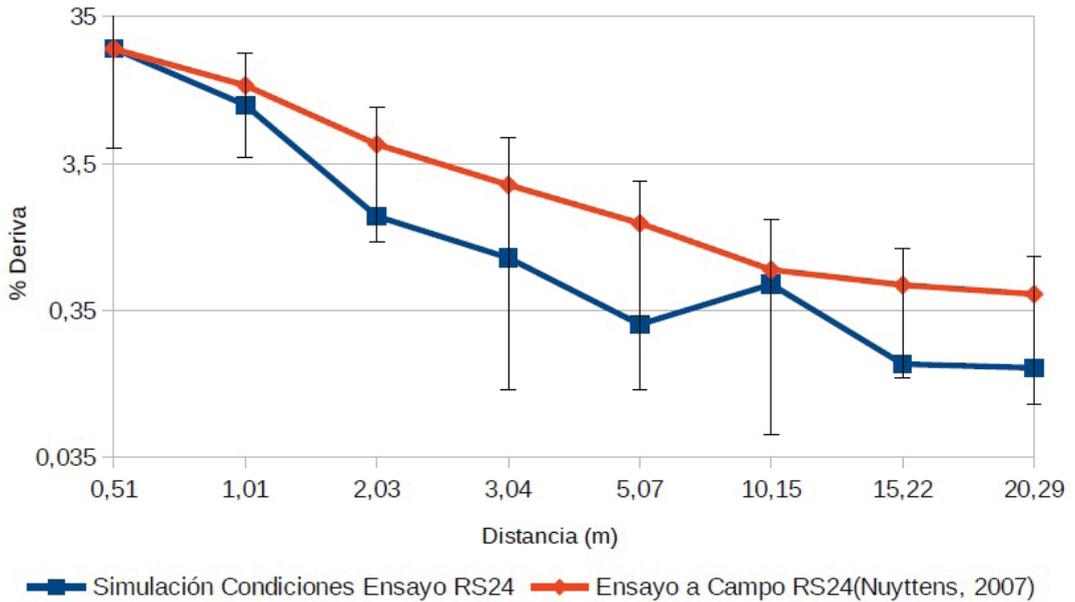


Figura 15. Curva de medición de la deriva sedimentada en el campo. Valores experimentales (Nuyttens *et al.*, 2007) vs Simulación. Las barras verticales indican un intervalo de confianza del 95% para las mediciones experimentales.

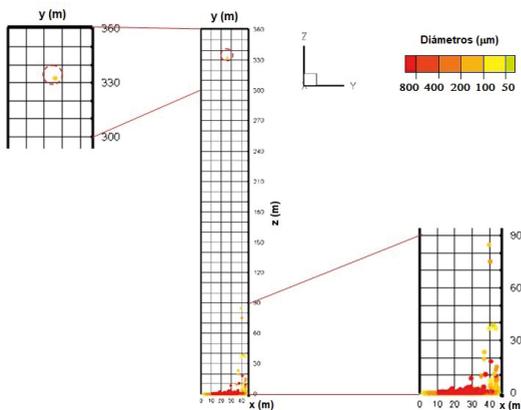


Figura 16. Altura alcanzada por las partículas líquidas en deriva de la simulación de la experiencia de mediciones en el campo RS24 (Nuyttens *et al.*, 2007).

Por otra parte, se registró la evaporación de 31.892 gotas cuyos diámetros iniciales se encuentran comprendidos entre 0,0097 µm y 148,0 µm, representando un total de 0,0379% de la aplicación.

3. Simulación de una pulverización virtual en el campo

Respecto de la simulación de la aplicación virtual de fitosanitarios en el campo experimental de la FCA-UNER, se observa que transcurridos los 65,5 s de la eyección de la pulverización, se

registró que el 8,72% del volumen de líquido se encontraba en suspensión, alcanzando una altura máxima de 5,2 m. Este valor considera la totalidad de las partículas que se encuentran por encima de 0,1 m del suelo en todo el dominio de simulación, despreciando el volumen de líquido conformado por los abanicos de la aplicación simulada.

También se registró la evaporación de 136.301 gotas, cuyos diámetros iniciales se encontraban entre 176,17 µm y 0,005 µm, alcanzando un 0,47% del volumen total eyectado. De las 136.301 partículas sólidas que representan el soluto luego de la evaporación, 31 de ellas salieron del dominio de la simulación luego de haber recorrido aproximadamente 350 m desde su eyección. Los diámetros iniciales de sus gotas padres al momento de la eyección correspondían a valores entre 121,55 µm y 90 µm. El rango de los diámetros de dichas partículas sólidas estuvo entre valores de 4,36 µm y 5,83 µm (con un valor medio de 5,07 µm y un desvío estándar de 0,21 µm).

De igual manera, se registró que 231 gotas que no se evaporaron completamente al momento de finalizar la simulación, salieron del dominio luego de haber recorrido aproximadamente 350 m desde su eyección, cuyos diámetros iniciales se encontraban entre 159,1 µm y 93,24 µm; representando un porcentaje del volumen total de líquido eyectado de 0,0018%. Estas gotas salieron del dominio de la simulación con diámetros de entre 87,07 µm y 8,94 µm (con un valor medio de 49,18 µm y un desvío estándar de 16,11 µm).

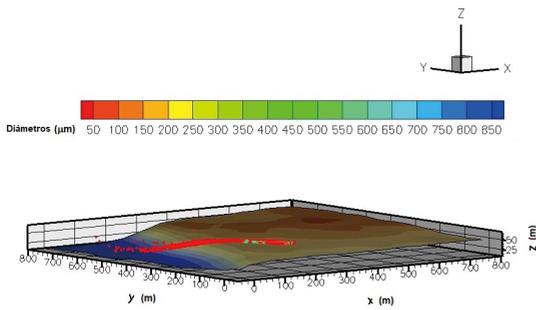


Figura 17. Vista 3D de la pulverización virtual realizada en el campo Atanor.

Como se puede observar en la Figura 17, las gotas menores de 50 μm son más propensas a evaporarse antes de alcanzar el suelo (Zhu *et al.*, 1994). Esto se debe a que las gotas menores a 50 μm alcanzan rápidamente la distancia media de frenado a 0,0587 m desde punto de eyección a partir de la cual adquieren la velocidad de sedimentación y son propensas a la deriva y a permanecer más tiempo en aire con la consecuente evaporación (Sedano *et al.*, 2019).

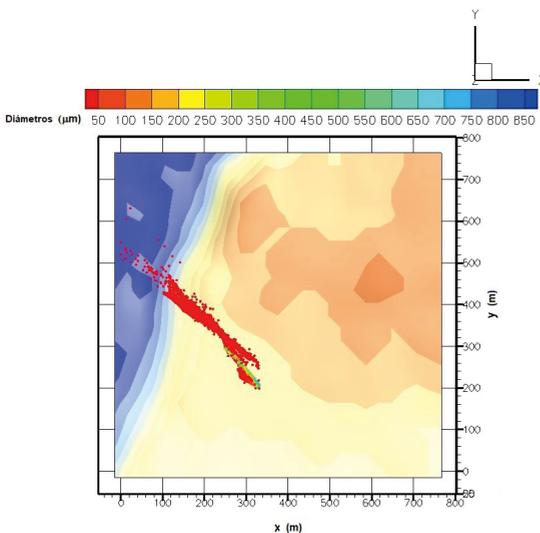


Figura 18. Vista superior de la pulverización virtual realizada en el campo Atanor.

Por otra parte, como se puede observar en la Figura 18, las partículas en deriva recorren una distancia máxima de 410,36 m, considerada desde el punto donde termina la aplicación.

Es importante destacar que, la distancia recorrida por las partículas supera ampliamente la zona de exclusión de 100 m establecida por el Decreto Provincial N°2239/19 (2019). Esto indica que estas gotas que transportan el fitosanitario,

lo hacen fuera del área de exclusión establecida por decreto. Además de ser una pérdida de insumo para el productor, puede perjudicar a los pobladores rurales aún cuando las normas de buenas prácticas sean cumplidas por el aplicador.

CONCLUSIONES

Inicialmente, se pudo simular y validar el alcance de la deriva de las partículas líquidas que son eyectadas por boquillas de abanico plano tipo HARDI™ ISO F110-03, tanto en túnel de viento como a campo, conforme a lo descrito por el estándar ISO 22866 (2005).

En la simulación en túnel de viento el modelo presenta un buen ajuste respecto a las pruebas de laboratorio hasta los 3 m del punto de eyección. A partir de allí, la simulación subestima los valores de laboratorio.

Considerando los valores obtenidos en la simulación a campo respecto al ensayo denominado RS24 realizado por Nuytens *et al.* (2007), se observa que la simulación subestima el valor obtenido, pero los resultados se encuentran dentro del intervalo de confianza del 95%.

Finalmente, para la pulverización virtual a campo se registró que el 8,72% del volumen se encontraba en suspensión, alcanzando una altura máxima de 5,2 m. Por otra parte, la simulación registró que se produjo evaporación de gotas antes de que las mismas alcanzaran la zona objetivo de la aplicación, llegando a un 0,47% del volumen total aplicado.

Las partículas en deriva menores a 50 μm recorrieron una distancia de 410,36 m considerado desde el lugar donde termina la aplicación. La distancia recorrida por las partículas supera ampliamente la zona de exclusión de 100 m establecida por el Decreto Provincial N°2239 (2019) y alcanzó el 82% de la zona de restricción determinada por el mismo Decreto.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es financiado a través del PID UNER N° 2242 y del PICTO UNER-UADER N° 11. El mismo, es dedicado a la memoria del Profesor Lic. Armando Benito Brizuela quién, además de mentor del presente grupo y coautor del artículo, fue un gran compañero y amigo al cuál extrañaremos siempre.

BIBLIOGRAFÍA

- Agrafioti, P.; E. Kaloudis, S. Bantas, V. Sotiroudas and C. Athanassiou, 2020. Modeling the distribution of phosphine and insect mortality in cylindrical grain silos with Computational Fluid Dynamics: Validation with field trials. *Computers and Electronics in Agriculture* 173:105383. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105383>.
- Aguirre, C.A., 2005. *Dispersion et Mélange Atmosphérique Euléro-lagrangien de Particules Fluides Réactives. Application à des cas simples et complexe. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon 1, France.*
- Aguirre, C.; A. Brizuela, I. Vinkovic y S. Simoëns, 2006. Modelo acoplado Eulero-Lagrangiano de simulación de la dispersión atmosférica de especies químicamente reactivas en la capa límite. *Revista Científica de Mecánica Computacional* 25:185-205.
- Aguirre, C.; A. Brizuela, I. Vinkovic and S. Simoëns, 2006. A sub-grid lagrangian stochastic model for turbulent passive and reactive scalar dispersion, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 27(4):627-635.
- Aguirre, C.; A. Brizuela, G. Berri y E. Orcellet, 2012. Dispersión de gases emanados desde la fábrica Botnia utilizando un modelo de simulación de las grandes escalas acoplado a un modelo estocástico lagrangiano. II Congreso Latinoamericano de Ingeniería del Viento (CLIV2) 2:1-17.
- Aguirre, C.; A. Brizuela and L. Hildt, 2013. Computational tools for the simulation of atmospheric pollution events. *Scientia Interfluvius* 4(1,2):7-29.
- Aguirre, C.A.; P. Aceñolaza, A. Brizuela y C. Sedano, 2014 a. Simulación computacional de la dispersión de partículas sólidas en la atmósfera utilizando un modelo acoplado. *Revista Científica de Mecánica Computacional* 33:3431-3453.
- Aguirre, C.; G. Berri, A. Brizuela and E. Orcellet, 2014 b. External Weather Data Assimilation to Simulate Wind and Temperature Fields in the Region of Gualaguaychú, Argentina. *Journal of Mechanics Engineering and Automation* 4:887-899.
- Aguirre, C.A.; N. Maltese, A. Kemerer, A. Brizuela y N. Vaiman, 2016. Sensibilidad de índices de vegetación en situación de estrés hídrico para cultivo de maíz. XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SELPER) 2295-2312.
- Alonso, L.; P. Demetrio, M. Etchegoyen and D. Marino, 2018. Glyphosate and atrazine in rainfall and soils in agroproductive areas of the pampas region in Argentina. *Science of the Total Environment* 645:89-96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.134>
- Amini, H.; L. Wang, A. Hashemsohi, A. Shahbazi, M. Bikdash, K. Dukka and W. Yuan, 2018. An integrated growth kinetics and computational fluid dynamics model for the analysis of algal productivity in open raceway ponds. *Computers and Electronics in Agriculture* 145:363-372. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.010>
- Baetens, K.; 2009. Development and application of drift prediction models in field spraying. Doctoral dissertation No. 839. Faculty Bioscience Engineering. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium. 225 pp.
- Berri, G. J.; 1987. Estudio del comportamiento termo-hidrodinámico de la capa límite atmosférica sobre la región del Río de La Plata con un modelo de simulación numérica, Ph.D. thesis, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Bitog, J.; I. Lee, C. Lee, K. Kim, H. Hwang and S. Hong, 2011. Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 76 (2): 131-147. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.015>
- Caliendo, C.; P. Ciambelli, R. Del Regno, M. Meo and P. Russo, 2020. Modelling and numerical simulation of pedestrian flow evacuation from a multi-storey historical building in the event of fire applying safety engineering tools. *Journal of Cultural Heritage* 188-199. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.06.010>.
- Decreto N°2239, 2019. Gobernador de la Provincia de Entre Ríos.
- Fackrell, J.E. and A.G. Robins, 1982. Concentration fluctuation and fuxes in plumes from point sources in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics* 117:1-26.
- FAO, 2002. Guías sobre Buenas Prácticas para la Aplicación Terrestre de Plaguicidas. Roma. ISBN 92-5-304717-8.
- Fernandez-Turiel, J.; P. Aceñolaza, M. Medina, J. Llorenz and F. Sardi, 2001. Assesment of a smelter impact area using surface soils and plants, *Environmental Geochemistry and Health* 23:65-78. <https://doi.org/10.1023/A:1011071704610>.
- Fox, R.D.; D.L. Reichard, R.D. Brazee, C.R. Krause and F.R. Hall, 1993. Downwind residues from spraying a semi-dwarf apple orchard. *Transactions of the ASAE* 36(2):333-340.
- Gong, W., 1991. A Wind Tunnel Study of Turbulent Dispersion over two - and three - dimensional Gentle Hills from Upwind Point Sources in Neutral Flow. *Boundary Layers Meteorology* 54:211-230. <https://doi.org/10.1007/BF00183954>.
- Hardi, J.; W. Hallum, C. Huang and W. Anderson, 2014. Development of Validation Approaches for Numerical Simulation of Combustion Instability

- using Flame Imaging. In 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference 3775. <https://doi.org/10.2514/6.2014-3775>.
- Holterman, J.H., 2003. Kinetic and evaporation of waterdrops in air. Wageningen: IMAG.
- ISO 22866, 2005. Equipment for crop protection - methods for field measurement of spray drift. International Organization for Standardization.
- Kim, G. and S. Park, 2017. Development of a numerical simulation tool for efficient and robust prediction of ship resistance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 9(5):537-551. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.01.003>.
- Larrabide, I.; P. Blanco, S. Urquiza, E. Dari, M. Vénere, N. de Sousa e Silva and R. Feijóo, 2012. HeMoLab Hemodynamics Modelling Laboratory: An application for modelling the human cardiovascular system. *Computers in Biology and Medicine* 42 (10):993-1004. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2012.07.011>.
- LP-DAAC, 2019. Land Processes Distributed Active Archive Center (LP-DAAC) de USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. Sioux Falls, South Dakota. <https://lpdaac.usgs.gov/>
- MGA, 2017a. Monsanto Global Argentina: Herbicida roundupTM registro SENASA N°31.098. Monsanto Global Argentina.
- MGA, 2017b. Monsanto Global Argentina: Herbicida roundup, hoja de datos y seguridad de materiales. Monsanto Global Argentina.
- Musiu, E.; L. Qi and Y. Wu, 2019. Evaluation of droplets size distribution and velocity pattern using Computational Fluid Dynamics modelling. *Computers and Electronics in Agriculture* 164:104886. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104886>.
- Nuyttens, D., 2007. Drift from field crop sprayers: The influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means. Doctoral dissertation No 772. Faculteit Bio-ingenieurs wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium. 293 pp.
- Olson, J.; J. Watts and L. Allison, 1985. Major world ecosystem complexes ranked by carbon in live vegetation: A database (NDP-017). Carbon Dioxide Information Analysis Center.
- Orcellet, E.; G. Berri, C. Aguirre and G. Muller, 2016. Atmospheric dispersion study of TRS compounds emitted from a pulp mill plant in coastal regions of the Uruguay river, South America. *Aerosol and Air Quality Research* 16:1473-1482. <http://hdl.handle.net/11336/104519>.
- Plan Mapa de Suelos, 1998. Carta de Suelos de la República Argentina, Departamento Paraná, Provincia de Entre Ríos. Acuerdo Complementario del Convenio INTA - Gobierno de Entre Ríos, EEA Paraná, Serie Relevamiento de Recursos Naturales No 17, (ISSN-0325-9099), 114 pp.
- Ramli, N.I., 2009. Estimation of the roughness length (Z_0) in Malaysia using satellite image. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE-VII). Taipei, Taiwan. 8-12.
- Red BPA, 2015. Directivas y requisitos para cultivos extensivos. Red de Buenas Prácticas Agrícolas. Comisión de Cultivos Extensivos. MAGyP. https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/bpa/bibliografia/Red_BPA_Seminario_SENASA_31_10_17.pdf
- Rouse, J.; R. Haas, J. Schel and D. Deering, 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA. Spec. Publ* 351(1):309.
- Salyani, M. and R. Cromwell, 1993. Adjuvants to reduce drift from handgun spray applications. In *Pesticide Formulations and Application Systems*. Eds.: DeVissety B N, Chasin D G, Berger P D. 12th Vol., ASTM STP 1146, 363 - 376.
- Sedano, C.; C. Aguirre, G. Rondan and A. Brizuela, 2020. Numerical simulation of spray ejection from a nozzle for herbicide application: Evaporation and binary collision models. *Computers and Electronics in Agriculture* 175:105551. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105551>.
- Sedano, C.; C. Aguirre and A. Brizuela, 2019. Numerical simulation of spray ejection from a nozzle for herbicide application: Comparison of drag coefficient expressions. *Computers and Electronics in Agriculture* 157:136-145. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.032>.
- Teske, M.; S. Bird, D. Esterly, S. Ray and S. Perry, 1997. A user's guide for AgDRIFT 1.0: A tiered approach for the assessment of spray drift of pesticides. *Technical Note*, 95.
- van de Zande, J.C.; H.J. Holterman, J.M. Michielsen and G.P. Stallinga, 2006. Temporal and spatial variability of spray drift around a sprayed field. *Aspects of Applied Biology* 77:295-302.
- Vinkovic, I.; C. Aguirre, S. Simoëns and M. Gorokhovski, 2006. Large eddy simulation of droplet dispersion for inhomogeneous turbulent wall flow. *International Journal of Multiphase Flow* 32(3):344-364. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.10.005>.
- Williamson, R. and E. Threadgill, 1974. A simulation for the dynamics of evaporating spray droplets in agricultural spraying. *Transactions of the ASAE* 17(2):254-261.
- Wilson, M. and A. Henderson Sellers, 1985. A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models. *Journal of Climatology* 5(2):119-143.

- Xue, M.; K. Droegemeier, V. Wong, A. Shapiro and K. Brewster, 1995. ARPS user's guide, version 4.0. Center for Analysis and Prediction of Storms. 380 pp.
- Zhang, Y.; Z. Zhang, S. Luo and J. Tian, J., 2009. Aerodynamic numerical simulation in the process of car styling. *Applied Mechanics and Materials* 16:862-865.
- Zhang, Q. and S. Cen, 2016. Application and development of computational fluid dynamics simulation in the aerospace field. Published by Elsevier Inc, pp 295-328.
- Zhang, H.; Y. Li, J. Li and Q. Liu, 2017. Study on separation abilities of moisture separators based on droplet collision models. *Nuclear Engineering and Design* 325:135-148. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.09.030>.
- Zhu, H.; D. Reichard, R. Fox, R. Brazee and H. Ozkan, 1994. Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers. *Transactions of the ASAE* 37(5):1401-1407.