

SIMULACION NUMÉRICA DE LA COLISIÓN BINARIA DE GOTAS MEDIANTE UN MODELO WEBER SIMÉTRICO

NUMERICAL SIMULATION OF THE BINARY DROPLET COLLISION USING A SYMMETRICAL WEBER MODEL

Carlos G. Sedano^{a,c}, Cesar A. Aguirre^{a,b,c}, Armando B. Brizuela^{a,b}, Guillermo A. Rondan^b, Alejandro J. Olmos^c y Facundo Collado^c

^a*Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Ruta 11 – Km 10 (3101), Oro Verde, Entre Ríos, Argentina, sedanocarlog@gmail.com; cesaraguirredalotto@gmail.com*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.*

^c*Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad Autónoma de Entre Ríos, Ruta 11 – Km 10 (3101), Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.*

Palabras clave: Modelos de simulación, Weber Simétrico, Tensoactivo, Herbicidas.

Resumen. El uso de códigos CFD (Computational Fluid Dynamics) permiten simular las condiciones atmosféricas y fenómenos tales como dispersión de spray líquido emitidos desde una boquilla a elevada presión. En este trabajo se estudia específicamente la interacción entre las gotitas con ayuda de un modelo de colisión binaria para determinar el efecto que produce la colisión entre ellas en la nube de spray. El resultado de las colisiones se obtiene utilizando mapas de impacto que representan un coeficiente de impacto respecto del número de Weber simétrico. Se contrastaron tres tensoactivos de uso comercial a 20 °C con el agua a diferentes temperaturas sin tener en cuenta el proceso de evaporación ni la generación de gotas satélites. Los resultados de las colisiones binarias de Separación Reflexiva y Estiramiento son los responsables de originar gotas satélite, con su consecuente riesgo de deriva. Se pudo observar en los resultados de la simulación que la mejor opción para reducir la deriva entre los productos analizados en este trabajo es utilizar agua a 5 °C.

Keywords: Simulation Models, Symmetric Weber, Surfactant, Herbicides.

Abstract. The use of CFD (Computational Fluid Dynamics) codes allows the simulation of atmospheric conditions and phenomena such as dispersion of liquid spray emitted from a nozzle at high pressure. In this work we specifically study the interaction between droplets with the help of a binary collision model to determine the effect of the collision between them in the spray cloud. The result of the collisions is obtained using impact maps that represent an impact coefficient with respect to the symmetric Weber number. Three surfactants for commercial use at 20 °C were tested with water at different temperatures without taking into account the evaporation process or the generation of satellite droplets. The results of the Reflective Separation and Stretching binary collisions are responsible for originating satellite droplets, with their consequent risk of drift. It was observed in the simulation results that the best option to reduce the drift among the products analyzed in this work is to use water at 5 °C.

1 INTRODUCCION

Actualmente, existe un creciente interés en la determinación de las variables que permitan minimizar la deriva de las pulverizaciones agropecuarias. Para ello, es necesario conocer los diferentes fenómenos físicos que sufren las partículas durante su trayectoria.

Uno de estos fenómenos físicos, es la colisión de gotas que da origen a los procesos de coalescencia, rebote, separación reflexiva y separación por estiramiento. Estos últimos dos procesos, pueden generar gotas satélites de bajo diámetro, lo que aumenta el riesgo de deriva potencial.

Atendiendo la problemática, en el presente trabajo se utilizaron técnicas de simulación numérica a fin de obtener el mapa de colisión binaria por medio del parámetro adimensional Weber simétrico con respecto al coeficiente de impacto. Se utilizó el código acoplado eulerolagrangiano de partículas LES-STO (Large-eddy Simulation – Lagrangian Stochastic model) con el fin de simular la trayectoria de dichas partículas en su fase líquida. El código euleriano LES a diferencias finitas Advanced Regional Prediction Systems (ARPS) desarrollado por el Centro de Análisis y Predicción de tormentas (CAPS) de la Universidad de Oklahoma, (Xue *et al.*, 1995) ha sido adaptado por Aguirre (2005) para la simulación de la dispersión de partículas fluidas y validado con mediciones de concentración de un gas pasivo realizadas en túnel de viento para una superficie plana rugosa por Fackrell and Robins (1982) y en presencia de una colina de suave pendiente llevadas a cabo por Gong (1991). Posteriormente, fue utilizado por Aguirre *et al.* (2006a, 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. Aguirre *et al.* (2014a) incorpora un acople del modelo LES-STO con el Modelo de Capa Límite Atmosférica de Meso-escala (MCLM) propuesto por Berri (1987) para 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. Orcellet *et al.* (2016) utiliza 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). Además, Aguirre *et al.* (2014b) presentan el modelo LES-STO para la dispersión de partículas sólidas de diámetros del orden de las decenas de micrón. Aguirre *et al.* (2016) contrastan los resultados de este modelo con mediciones de concentración de partículas de metales en cercanías de una planta de fundición en Tucumán (Argentina) que funcionó durante 24 años, realizadas por Fernández-Turiel *et al.* (2001). Otros autores utilizaron este modelo acoplado para dispersión de partículas líquidas (Vinkovic *et al.*, 2006a) y partículas sólidas en movimiento de saltación o suspensión en túnel de viento (Vinkovic *et al.*, 2006b). Sedano *et al.* (2017), presenta un algoritmo de eyección aleatoria de gotas de diferentes diámetros cuya función de densidad de probabilidad ajusta a una distribución Weibull de dos parámetros. Estos parámetros son ajustados previamente utilizando datos de mediciones experimentales en laboratorio usando un analizador de partículas de fase doppler (PDPA) realizadas por Nuyttens (2007). Luego, presentan los resultados preliminares de la eyección del producto desde una boquilla pulverizadora HARDI™ ISO F110 03, contrastando los valores de velocidades de partículas líquidas en función del diámetro con mediciones experimentales de laboratorio realizadas por Sidahmed *et al.* (1998); Tuck *et al.* (1997); Holterman (2003) y Nuyttens (2007).

Este trabajo, presenta los mapas de colisión binaria de gotas que son eyectadas desde una boquilla de pulverización HARDI™ ISO F110 03, variando la tensión superficial por medio

de la temperatura, para el caso de la aplicación de agua, y manteniendo la temperatura constante a 20 °C cuando se realiza la simulación de mezclas con la incorporación de diferentes tensoactivos.

2 MATERIALES Y METODOS

2.1 Identificación de los parámetros de colisión binaria

El método de resolución determinístico para la simulación numérica de la colisión binaria de gotas depende de la proximidad de las partículas, de su velocidad y dirección. Para ello, establece tres parámetros adimensionales:

$$We = \frac{\rho d_s |\vec{u}_r|^2}{\sigma}, \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{d_s}{d_l}, \quad (2)$$

$$Imp = \frac{2X}{d_l + d_s}, \quad (3)$$

siendo:

We : Número de Weber.

Imp : Coeficiente de impacto.

$|\vec{u}_r|$: Módulo de la velocidad relativa entre las dos gotas. $\vec{u}_r = \vec{u}_s - \vec{u}_l$

d_s y d_l : Diámetros de la gota chica y grande, respectivamente.

Δ : Relación de diámetros.

σ : Tensión superficial del fluido.

ρ : Densidad del fluido.

X : Proyección de la distancia entre centros b al momento del impacto en la dirección normal a \vec{u}_r . $X = b \sin(\theta)$.

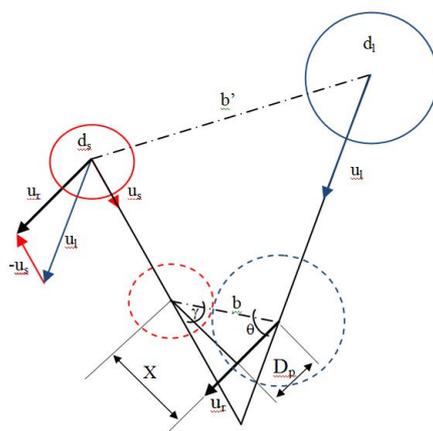


Figura 1: Representación gráfica de las gotas participantes de la colisión.

El Coeficiente de Impacto Imp debe ser calculado al momento de la colisión debido a diferencia de las velocidades de las gotas: $b = \frac{1}{2}(d_l + d_s) \neq b'$.

2.1.1 Determinación del Coeficiente de Impacto.

Considerando la velocidad relativa de las gotas, se realiza la descomposición en las tres componentes de la velocidad:

$$\vec{u}_r = u_r \vec{i} + v_r \vec{j} + w_r \vec{k}. \quad (4)$$

Para el cálculo del plano perpendicular a \vec{u}_r , se tienen en cuenta las coordenadas del centro de una de las partículas que pasa por el plano, siendo para la partícula chica $P_s(x_s, y_s, z_s)$ entonces, el plano que pasa por el centro de la gota P_s se puede calcular considerando la ecuación del plano que contiene al punto P_s y es perpendicular al vector \vec{u}_r :

$$D = -u_r x_s - v_r y_s - w_r z_s, \quad (5)$$

La distancia del centro de masa de la gota grande, $P_l(x_l, y_l, z_l)$ al plano esta dado por:

$$D_p = \left| \frac{u_r x_l + v_r y_l + w_r z_l + D}{(u_r^2 + v_r^2 + w_r^2)^{\frac{1}{2}}} \right|. \quad (6)$$

El Coeficiente de Impacto (*Imp*), definido como la proyección del segmento b sobre el plano perpendicular a la velocidad relativa, será igual que el coseno del ángulo γ :

$$Imp = \cos \gamma = \left[1 - \left(\frac{2D_p}{d_s + d_l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

2.2 Determinación de las curvas de transición del mapa de colisión binaria.

Rabe et al. (2010) desarrollaron un parámetro basado en la suma de las energías cinéticas y la tensión superficial de las partículas involucradas en la colisión binaria. Este parámetro lo denominó Weber Simétrico:

$$Wes = \frac{\rho d_s \Delta^3 |\vec{u}_{ms}|^2 + |\vec{u}_{ml}|^2}{12 \sigma \Delta (1 + \Delta^2)}, \quad (8)$$

siendo:

\vec{u}_{ms} y \vec{u}_{ml} : Velocidades relativas al centro de masa de la gota chica y grande respectivamente.

$$\begin{cases} \vec{u}_{ml} = \vec{u}_l - \vec{u}_{mr}, \\ \vec{u}_{ms} = \vec{u}_s - \vec{u}_{mr}, \end{cases} \quad (9)$$

donde \vec{u}_{mr} es la velocidad del centro de masa de ambas gotas. Asumiendo que las gotas son esféricas y poseen densidad uniforme:

$$\vec{u}_{mr} = \frac{\vec{u}_s d_s^3 + \vec{u}_l d_l^3}{d_s^3 + d_l^3}. \quad (10)$$

Reemplazando (10) en (9) y haciendo uso de (2), las velocidades de ambas partículas líquidas relativas al centro de masa se expresan según:

$$\begin{cases} \vec{u}_{ml} = + \frac{\Delta^3 \vec{u}_{mr}}{\Delta^3 + I}, \\ \vec{u}_{ms} = - \frac{\vec{u}_{mr}}{\Delta^3 + I}. \end{cases} \quad (11)$$

Para el desarrollo del mapa de colisión, se deben representar las curvas de transición de Weber Simétrico (Wes) con respecto Coeficiente de Impacto (Imp), calculando los diferentes Coeficientes de Impacto Crítico (Imp_c), que representan las fronteras de cada resultado de la colisión.

La transición entre Coalescencia y Separación por estiramiento:

$$Imp_c \approx \frac{\sqrt{Wes_{Stretch}^2 + 8Wes_{Stretch}Wes} - Wes_{Stretch}}{4Wes}, \quad (12)$$

Rabe (2010), propone un $Wes_{Stretch} = 0,53$

En el modelo para la transición entre la Separación Reflexiva y la Separación por Estiramiento, se considera que a partir de $Wes = 2,5$ el Coeficiente de Impacto Crítico que separa ambas regiones en el mapa es constante e igual a: $Imp_c = 0,28$.

Para la curva de transición entre Coalescencia y Separación Reflexiva, se propone el siguiente modelo para el cálculo del Imp_c :

$$Imp_c = 0,28 \sqrt{1 - \frac{0,45}{Wes}}. \quad (13)$$

Para el fenómeno de Rebote, se utiliza el modelo propuesto por Estrade et al. (1999), el cual calcula el número de We , de acuerdo al Parámetro de Impacto, la relación de tamaño de las gotas Δ y un parámetro de forma φ :

$$We > \frac{\Delta(1 + \Delta^2)(4\varphi - 12)}{\chi(1 - Imp^2)}, \quad (14)$$

donde:

$$\chi = \begin{cases} 1 - (2 - \tau)^2(1 + \tau) / 4 & \text{si } \tau > 1,0 \\ \tau^2(3 - \tau) / 4 & \text{si } \tau \leq 1,0 \end{cases}$$

$$\tau = (1 - Imp)(1 + \Delta)$$

$$\varphi = 3,35I$$

Considerando la relación propuesta por Rabe et al. (2010) entre el We y el Wes , se pueden determinar los límites del fenómeno de Rebote en el mapa de colisión:

$$Wes = We \frac{\Delta^2}{12(1+\Delta^3)(1+\Delta^2)}, \quad (15)$$

Cuando menor sea la relación de tamaño entre las gotas, la curva límite del fenómeno de Rebote será más asintótica a $Imp = 1$ al incrementarse el Wes .

2.3 Simulación de la Tensión Superficial

Para la determinación de la tensión superficial del agua y su variación con respecto a la temperatura, se utiliza el modelo propuesto por la International Association for the Properties of Water and Steam (2014):

$$\sigma = B\theta^m(1 + \beta\theta), \quad (16)$$

donde

$$\theta = 1 - \frac{T}{T_c}$$

T = Temperatura Absoluta del agua en °K

$T_c = 647,096$ °K

$B = 0,2358$ Nm⁻¹

$\beta = -0,625$

$m = 1,256$

3. RESULTADO Y DISCUSION

3.1 Diseño computacional de las simulaciones

La simulación se realizó en condiciones de viento calmo para poder comparar los resultados con las mediciones de laboratorio. La celda de la grilla de cálculo euleriano tiene dimensiones de $dx = 0,1$ m, $dy = 0,1$ m en la dirección horizontal y su tamaño en dirección vertical es variable desde $dz = 3 \times 10^{-3}$ m para las celdas adyacentes al suelo hasta 8×10^{-2} m en la parte superior del dominio. El mismo posee una altura de $1,8$ m y horizontalmente abarca una extensión de $14,2$ m en dirección longitudinal y $3,6$ m en dirección transversal. Se escogió un tiempo de 2×10^{-4} s debido al pequeño tamaño de las celdas de la grilla de cálculo por lo que las partículas líquidas cuyos diámetros son inferiores a $7 \mu\text{m}$ están en régimen de sedimentación antes de que transcurra un paso de tiempo. El tiempo total de simulación alcanza los 40 s, eyectando 25 partículas en cada paso de tiempo lo que implica que se han computado $5.000.000$ de partículas líquidas en cada simulación. Se realizaron 6 simulaciones, 3 de ellas utilizando agua a diferentes temperaturas (5 °C, 20 °C y 40 °C), una mezcla de agua y tensoactivo denominado AgBem al $0,05$ % y una mezcla de agua con otro tensoactivo denominado Silwet al $0,1$ % y la última al $0,2$ %, éstas últimas 3 mezclas a 20 °C de temperatura según lo propuesto por Oliveira (2011).

3.2 Mapa de Colisión Binaria de gotas

Se tomaron registros de la totalidad de las colisiones, realizando un agrupamiento por tipo de fenómeno (Coalescencia, Separación reflexiva, Separación por estiramiento y Rebote), teniendo en cuenta las curvas de transición, con un rango de Weber Simétrico entre 0 y 16 . Como se puede observar en la Tabla 1 y la Figura 2, existe una relación directa entre la tensión superficial y los fenómenos de las colisiones.

	Agua 5 °C	Agua 20 °C	Agua 40 °C	AgBem 0.05% 20 °C	Silwet 0.1% 20 °C	Silwet 0.2% 20 °C
Tension Superficial Nm ⁻¹	0.07494	0.07273	0.06959	0.0485	0.0195	0.0175
% Coalescencia	22,12	21,12	21,95	20,54	19,93	18,49
% Separación Reflexiva	0,32	0,60	0,62	1,05	2,57	2,54
% Separación por Estiramiento	8,47	8,76	9,33	18,01	30,81	33,84
% Rebote	69,10	69,52	68,10	60,40	46,68	45,12
% Total	100	100	100	100	100	100

Tabla I: Colisiones de diferentes mezclas de líquidos.

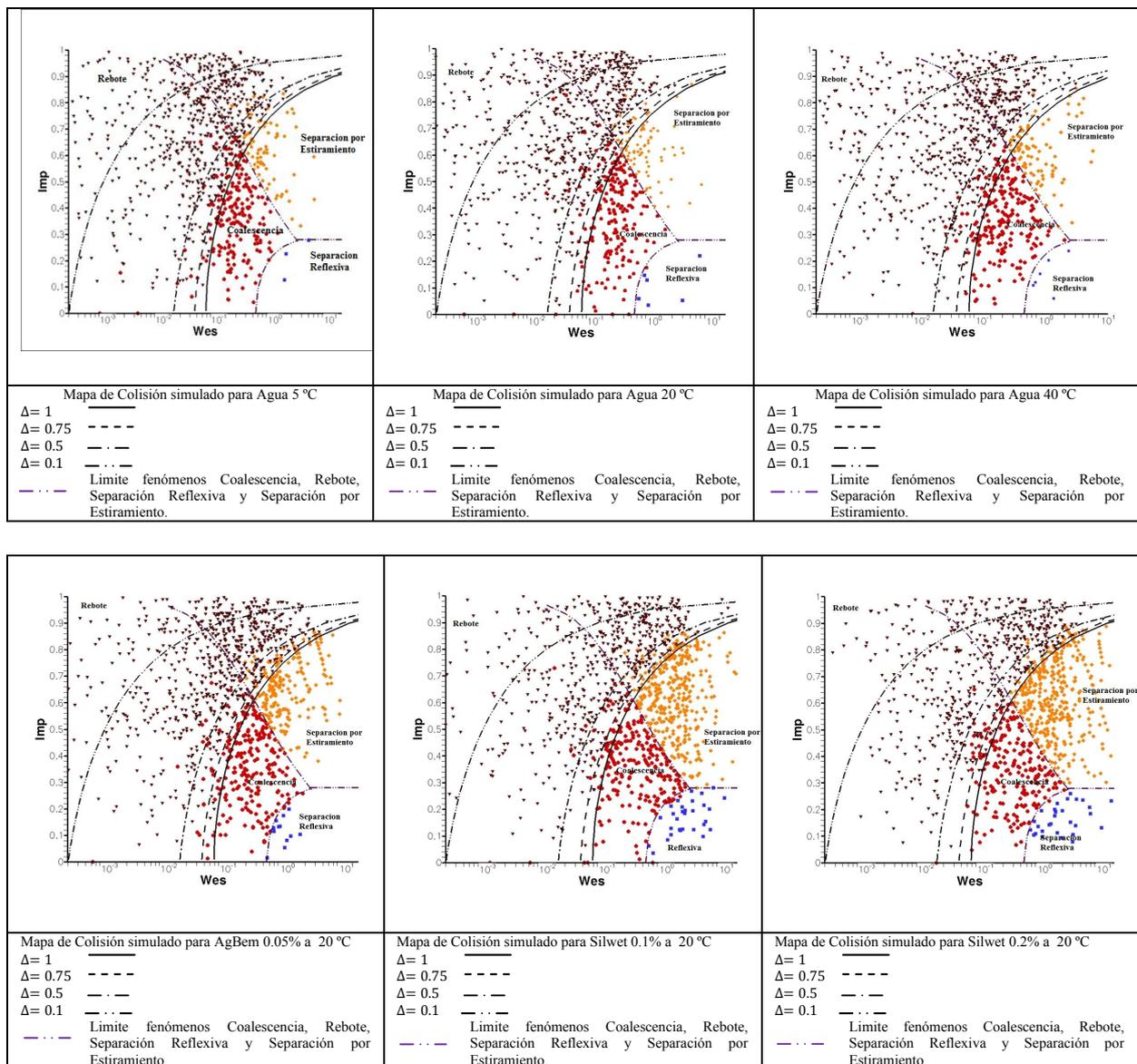


Figura 2 Mapa de colisiones para agua a diferentes temperaturas y mezclas con tensoactivos.

Aumentando la tensión superficial, aumenta la Coalescencia y el Rebote disminuyendo, consecuentemente, los fenómenos de Separación Reflexiva y por Estiramiento. Al disminuir

la tensión superficial, disminuye la Coalescencia y el Rebote aumentando la presencia de los fenómenos de Separación Reflexiva y por Estiramiento que son los que pueden generar gotas satélites propensas a deriva (Kim *et al.*, 2009; Munnannur *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2017).

Se puede observar en la Figura 2 que el agua a 5 °C es la sustancia que presenta menor proporción de fenómenos de separación Reflexiva y por Estiramiento. El cumplimiento de los requisitos descritos anteriormente dependerá de las futuras investigaciones en reología y del desarrollo tecnológico para permitir la generación de equipos y tensoactivos cuyas propiedades físicas garanticen una Separación de Reflexión y por Estiramiento baja o nula, así como la seguridad y la capacidad de mantener las propiedades del producto aplicado, independientemente de las condiciones de aplicación.

4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han simulado partículas líquidas que son expulsadas por una boquilla de abanico plano del tipo HARDI™ ISO F110 03 colocada a 0,75 m sobre el suelo. Se consideró la tensión superficial de las mezclas para agua a 20 °C, con tensoactivos (AgBem 0,05 %, Silwet 0,1 % y Silwet 0,2 %) y sólo agua a diferentes temperaturas (5 °C, 20 °C y 40 °C) a fin de variar la tensión superficial, obteniendo los mapas de colisión binaria de gotas. Entre las condiciones simuladas, se observaron las alternativas que muestran una mejor opción para minimizar la Separación Reflexiva y por Estiramiento, lo que significaría una reducción en el riesgo de deriva, para el agua a 5 °C.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo, se encuentra financiado a través del Proyecto PIO CONICET-UNER 2015-2016 “Desarrollo de metodologías y software específico para la asimilación de datos provenientes de sensores remotos y redes de medición orientados a la producción agropecuaria en la Provincia de Entre Ríos” y el Proyecto de Investigación FCyT – UADER Titulado: “Desarrollo de un modelo de simulación para el estudio de la deriva de las pulverizaciones agrícolas, utilizando una boquilla de abanico plano, desde un equipo de arrastre.”

REFERENCIAS

- Aguirre C. A. *Dispersión et Mélange Atmosphérique Euléro-Lagrangien de Particules Fluides Réactives. Application à des cas simples et complexes. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon 1, France. 115-2005*, 323 pp. 2005.
- Aguirre C. A., Brizuela A. B., Vinkovic I. and Simoëns S. A sub-grid Lagrangian stochastic model for turbulent passive and reactive scalar dispersion. *International Journal of Heat and Fluid Flow. Ed. Elsevier Science. 27 (4)*, pp: 627-635. 2006a.
- Aguirre C. A., Brizuela A. B., Vinkovic I. y Simoëns S. Modelo acoplado Eulero-Lagrangiano de simulación de la dispersión atmosférica de especies químicamente reactivas en la capa límite. *Serie Mecánica Computacional Vol XXV*, pp: 185-205. 2006b.
- Aguirre C. A., Brizuela A. B., Berri G. J. y Orcellet E. E. 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)*. 5 al 7 de diciembre de 2012, La Plata, Argentina. 2012. doi: 10.13140/2.1.3596.1283.
- URL: <http://www.cliv2.ing.unlp.edu.ar/public/actas%20congreso/18.Aguirre.CLIV2.pdf>
- Aguirre C. A., Brizuela A. B. y Hildt L. E. Computational tools for the simulation of atmospheric pollution events. *Ed. Scientia Interfluvius. 4 (1-2)*. Ed: Universidad Autónoma

- de Entre Ríos. ISSN on line: 1853-4430. ISSN printed: 1853-4422, pp: 7-29. 2013.
URL: <http://www.youblisher.com/p/948280-Scientia-Interfluvius-Vol-4-1-2-2013>
- Aguirre C. A., Berri G. J., Brizuela A. B and Orcellet E. E. External Weather Data Assimilation to Simulate Wind and Temperature Fields in the Region of Gualeguaychú, Argentina. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*. **4**. Ed: David Publishing Company. Print ISSN 2159-5275; Online ISSN 2159-5283, USA, pp: 887 – 899. 2014a. URL: <http://www.davidpublisher.org/Public/uploads/Contribute/5509138ac37fd.pdf>
- Aguirre C. A., Aceñolaza P. G., Brizuela A. B. y Sedano C. G. Simulación Computacional de la Dispersión de Partículas Sólidas en la Atmósfera utilizando un Modelo Acoplado. *Revista Científica de Mecánica Computacional*. **XXXIII (52)**. Ed: Asociación Argentina de Mecánica Computacional AMCA. ISSN 1666-6070, pp: 3431 – 3453. 2014b. Recuperado de: URL: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4928/4857>
- Aguirre C. A. and Brizuela A. B. Computational Tools for the Simulation of Atmospheric Pollution Transport During a Severe Wind Event in Argentine. *Atmospheric Hazards*. **Chapter 6 - INTECH Open Science, Open Minds**. Ed. Jill Coleman. ISBN: 978-953-51-4680-3, pp: 111-136. 2016. URL: <http://www.intechopen.com/books/atmospheric-hazards-case-studies-in-modeling-communication-and-societal-impacts>
- Berri G. J. Estudio del comportamiento termo-hidrodinámico de la capa límite atmosférica sobre la región del Río de La Plata con un modelo de simulación numérica. *Tesis doctoral, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires*. 189 p. 1987.
- Brown P., Lawler D., Sphere drag and setting velocity revisited, *Journal of Environmental Engineering, ASCE Library*, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2003\)129:3\(222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:3(222)), 2003.
- Cheng N. S., Comparison of formulas for drag coefficient and setting velocity of spherical particles, *Powder Technology* 189 (2009) 395-398, doi: 10.1016/j.powtec.2008.07.006, 2009.
- Estrade J.P., Carentz H., Lavergne G., Biscos Y., Experimental investigation of dynamic binary collision of ethanol droplets-a model for droplet coalescence and bouncing, *International Journal Heat Fluid Flow* 20(5):486–491, [https://doi: 10.1016/S0142-727X\(99\)00036-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00036-3), 1999.
- Fackrell J. E. and Robins A. G. Concentration Fluctuation and Fluxes in Plumes from Point Sources in a Turbulent Boundary Layers. *Journal of Fluid Mechanics*. **117**, pp: 1-26, 1982.
- Fernandez-Turiel J. L., Aceñolaza P., Medina M. E., Llorenz J. F. and Sardi F. Assesment of a smelter impact area using surface soils and plants. *Environmental Geochemistry and Health*, **23**, pp: 65 – 78, 2001.
- Flemmer R., Blanks C., On the drag coefficient of a sphere, *Powder Technology* 48 (3) (1986) 217–221, doi: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(86\)80044-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(86)80044-4), 1986.
- Gong W. 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**, pp: 211-230. 1991.
- Holterman H. J. Kinetic and evaporation of waterdrops in air. *Wageningen: IMAG. Report 2003-12/Wageningen UR, InstituutvoorvMilieu – en Agritechniek*; ISBN 90-5406-234-7. 2003.
- International Association for the Properties of Water and Steam, Revised Release on Surface Tension of Ordinary Water Substance IAPWS R1-76, Russia, <http://www.iapws.org/relguide/Surf-H2O-2014.pdf>, 2014.
- Kim S., Lee D. J., Lee, C. S., Modeling of binary droplet collisions for application to inter-impingement sprays, *International Journal of Multiphase Flow*, 35 pp. 533-549,

- <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.02.010>, 2009.
- Mikhailov M., Silva Freire A., The drag coefficient of a sphere: An approximation using Shanks transform, *Powder Technology* 237 (2013) 432-435, site: <https://pdfs.semanticscholar.org/e34e/b8701255bff610c6e13f8f7a57ecbe193cdb.pdf>, 2012.
- Munnannur A., Reitz R. D., A new predictive model for fragmenting and non-fragmenting binary droplet collisions, *International Journal of Multiphase Flow*, Volume 33, Issue 8, Pages 873-896, <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.03.003>, 2007.
- Nuyttens D. Drift from field crops prayers: The influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means. *Doctoral Thesis. Faculteit Bio-ingenieurs wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven*. ISBN 978-90-8826-039-1. 2007.
- Orcellet E. E., Berri G. J., Aguirre C. A. and Müller G. V. Atmospheric dispersion study of TRS compound semitted from a pulp mill plant in coastal regions of the Uruguay River, South America. *Aerosol and Air Quality Research*, 16. Ed. Taiwan Association for Aerosol Research. ISSN: 1680-8584 print / 2071-1409 online. 2016. doi: 10.4209/aaqr.2015.02.0112. Taiwan, pp: 1473 – 1482.
URL: <http://www.aaqr.org/article/detail/AAQR-15-02-OA-0112>
- Oliveira R. B., Caracterização Funcional de Adjuvantes em Soluções Aquosas, *Tese Doutorado, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” Brasil*, 134 pp, <http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0596.pdf>, 2011.
- Rabe C., Malet J., Feuillebois F., Experimental investigation of water droplet binary collisions and description of outcomes with a symmetric Weber number, *Physics of Fluids* 22, 047101, <https://doi.org/10.1063/1.3392768>, 2010.
- Sedano C., Aguirre C., Brizuela A., Simulación de la Eyección de Spray Líquido desde un Pico de Pulverizadora para Aplicación de Herbicidas, *Asociación Argentina de Mecánica Computacional AMCA - Mecánica Computacional Vol XXIII*, pp: 1049-1068. <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/5325/5269>, 2017.
- Sidahmed M., Brown R. B. and Darvishvand M.. Drop-size/velocity correlations at formation of sprays from fan nozzles. *Transactions of the ASAE*, 42 (1), pp: 1557-1564. 1999.
- Tuck C. R., Butler Ellis M. C. and Miller P. C. H. Techniques for measurement of droplet size and velocity distributions in agricultural sprays. *Crop Prediction*. 16 (7), pp: 619-629. 1997.
- Turton R., Levenspiel O., A short note on the drag correlation for sphere, *Powder Technology* 47 (1986) 83-86, doi: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(86\)80012-2](https://doi.org/10.1016/0032-5910(86)80012-2), 1986.
- Vinkovic I., Aguirre C. A., Simoëns S. and Gorokhovski M. Large-Eddy Simulation of Droplet Dispersion for Inhomogeneous turbulent Wall flow. *International Journal of Multiphase Flow*. 32, pp: 344-364. 2006a.
- Vinkovic I., Aguirre C. A., Ayrault M. and Simoëns S. Large-Eddy Simulation of the Dispersion of Solid Particles in a Turbulent Boundary Layers. *Boundary-Layer Meteorology. Srpinger*, pp: 1-29. 2006b.
- Xue M., Droegemeier K. K. and Wong V. The Advanced Regional Prediction System and Real-time Storm Weather Prediction. *International Workshop on Limited-area and Variable Resolution Models. Beijing, China. Word Meteorology Organization*. 1995.
- Zhang H., Li Y., Li J., Liu Q., Study on separation abilities of moisture separators based on droplet collision models, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 325, Pages 135-148, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.09.030>, 2017.