

# DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES Y ZONAS DE AFECTACIÓN EN UN INCIDENTE QUÍMICO PARA LA PLANIFICACIÓN Y RESPUESTA

Erica Y. Sánchez <sup>a</sup>, Jorge E. Colman <sup>a,b</sup>, Alejandro D. Acquesta <sup>c</sup>, Atilio A. Porta <sup>a</sup>,  
Pablo M. Jacovkis <sup>d</sup>

*a. Centro de Investigaciones del Medio Ambiente (CIMA), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata. 47 y 115. 1900 La Plata, Argentina.*

*b. Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas "Dr. Jorge J. Ronco" CONICET CCT La Plata, UNLP, 47 N° 257 (1900) La Plata, Argentina.*

*c. Departamento Modelado y Manejo de Crisis/CITEDEF, San Juan Bautista de La Salle 4397 (1603) Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina.*

*d. Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina.*

**Palabras Clave:** incidente químico, análisis riesgo, exposición aguda, DDC, modelo atmosférico de dispersión.

**Resumen.** Los patrones espaciales y las variaciones en el tiempo de las concentraciones de sustancias peligrosas, junto a los efectos potenciales sobre la población subyacente, son necesarios para ayudar a la planificación y respuesta en una emergencia química. A tal fin, existen modelos que predicen el transporte y la dispersión de sustancias peligrosas y otros que estiman los efectos potenciales experimentados por la población expuesta. En conjunto, constituyen una poderosa herramienta para estimar las regiones vulnerables y evaluar los impactos potenciales en la población afectada.

El desarrollo de metodologías y de modelos, de aplicación directa al contexto en que vivimos, permiten acceder a una representación más clara del escenario de riesgo y consecuentemente disponer de las herramientas adecuadas para una respuesta óptima. A través del reciente desarrollo del modelo de exposición DDC (Damage Differential Coupling) se ha logrado optimizar, cuali y cuantitativamente, la estimación de la población afectada por una nube tóxica debido a su capacidad para acoplarse a cualquier modelo atmosférico de dispersión de contaminantes que disponga de una salida de datos en forma temporal. De este modo, DDC analiza los diferentes perfiles de concentración (salida del modelo de transporte) y los asocia con alguna concentración de referencia de alerta (LOC) para así identificar las áreas de riesgo.

En este trabajo se presenta el análisis de un escenario de desastre en Chicago-USA, a través del acoplamiento de DDC con dos modelos de transporte de diferente complejidad, dejando en manifiesto la estrecha relación que existe entre un resultado representativo y el tiempo de ejecución de los modelos. Del mismo modo, queda en evidencia la necesidad de contar con la evolución temporal de la nube tóxica y de las regiones de afectación para la adecuada toma de decisiones en la planificación y respuesta a la emergencia.

## **INTRODUCCION**

Los modelos de simulación de incidentes químicos constituyen un importante instrumento ya sea para la respuesta a una emergencia en tiempo real, como para la planificación de la misma bajo supuestos de escenarios y condiciones. El tipo de modelo adecuado para su aplicación en la gestión de la emergencia, dependerá del nivel de detalle de simulación y del tiempo disponible para la ejecución. Estas dos características están íntimamente relacionadas y, como se verá en los resultados de este trabajo, son directamente proporcionales (Warner et al., 2008; Hanna et al., 2009).

Por su parte, los modelos vigentes de exposición a incidentes agudos presentan serias limitaciones para su uso en la gestión: En primer lugar, no suelen contemplar la variable temporal en sus cálculos, sólo describen la situación final esperada, siendo el tiempo un factor condicionante en la respuesta a emergencias. Además, los valores de daño proporcionados por los modelos de uso corriente son sobreestimados por decisiones conservadoras que no se corresponden con la realidad de nuestro país, ya que al contar con recursos limitados debemos aspirar a un uso eficiente de los mismos. Finalmente, los métodos vigentes no cuantifican la severidad de los daños (Acquesta et al., 2011; Reynolds, 1992; Ruiz Boada et al., 2003; Sanchez y Acquesta, 2011)

En base a las limitaciones mencionadas, se desarrolló recientemente el modelo de exposición, DDC (Damage Differential Coupling), que asocia el efecto parcial de encontrarse expuesto a diferentes concentraciones a medida que transcurre el tiempo, ofreciendo de este modo un monitoreo continuo. Este modelo proporciona un rango de nivel de daño acotado por una estimación maximal y otra minimal, y además hace uso de los mismos índices toxicológicos para exposiciones agudas (AEGLs, ERPGs y TEELs) que los métodos vigentes, extendiendo sus definiciones a un campo continuo en tiempo y concentración.

Con los ajustes que DDC proporciona al sistema de emergencias actual, no sólo se logra estimaciones más exactas del nivel de daño esperado respecto a los métodos vigentes sino que, además, resulta sumamente útil en situaciones de triage donde los recursos son limitados y no hay margen para el error (Sanchez et al., 2011; Sanchez, 2012; Sanchez et al., 2012a; Sanchez et al., 2012b).

El modelo de exposición DDC fue utilizado en este trabajo, para el análisis de un incidente químico y consecuente uso en la gestión integral del riesgo, junto a dos modelos atmosféricos de dispersión de diferencias marcadas: el CFD FLACS (FLame ACceleration Simulator) (GexCon US, 2012) y un modelo numérico sencillo (Sanchez, 2012).

El modelo CFD FLACS, cuyas salidas implementadas en este trabajo fueron proporcionadas por Hanna et al. (2009), fue originalmente desarrollado para simular explosiones. Actualmente también se emplea para simular otros fenómenos, tales como dispersión de contaminantes en aire, y su aplicación es avalada por vario estudios de validación (Hanna et al, 2004a; Hanna et al., 2009; GexCon US, 2012). Una descripción más detallada de FLACS puede ser consultada en Warner et al. (2008) y Hanna et al. (2004a; 2004b).

Por su parte, el modelo numérico sencillo utilizado surge de la resolución implícita de la ecuación de advección-difusión-reacción, mediante diferencias finitas, con un esquema upwind para el término advectivo y un término de reacción de primer orden. Una descripción más detallada puede encontrarse en Sanchez (2012).

## **METODOLOGÍA**

En este trabajo se ha recurrido al análisis de un escenario de desastre de características particulares, a través del acoplamiento de DDC con dos tipos diferentes de modelos atmosféricos de dispersión, mencionado en la sección 1: DDC- FLACS (D-F) y DDC-Modelo numérico simple (D-M), de acuerdo a la etapa de la gestión de riesgos en la que se pretenda trabajar. Para realizar una evaluación temprana

de los alcances de una emergencia y del grado de impacto sobre la población y los bienes (competente a la etapa de planificación de emergencias), los modelos atmosféricos de dispersión del tipo CFD son los más adecuados para un análisis profundo en áreas densamente pobladas ya que poseen una gran capacidad descriptiva de los escenarios (Delaunay, 1996; Hanna et al., 2007). Este tipo de modelos requiere de numerosos datos y de un tiempo grande de ejecución (desde minutos hasta días), por lo que su aplicación para la respuesta a emergencias en tiempo real no resulta factible (Sklavounos and Rigas, 2005). Para esta última situación, se utilizan modelos más sencillos: gaussianos, de nubes densas, numéricos simples, entre otros; que recurren a importantes simplificaciones en la descripción del fenómeno y del escenario. Si bien es sabido que los modelos sencillos describen pobremente el fenómeno en terrenos complejos, son los más adecuados para la etapa de respuesta ya que permiten obtener una primera aproximación de la situación en un tiempo breve de ejecución (Reynolds, 1992; Delaunay, 1996, Gavelli et al., 2008; Long et al., 2009).

## **2.1 Descripción del escenario**

Hemos considerado a Chicago como el escenario de estudio ya que Hanna et al. (2009) nos han autorizado amablemente a usar sus datos y corridas con el CFD FLACS. Ellos eligieron la ubicación de la fuente (N 41.860283, O 87.630733) en un importante nudo ferroviario, cerca del centro Chicago. El escenario de Chicago se representa en un lugar real, pero la liberación es puramente hipotética.

El contexto a la emisión se conforma por un terreno plano y abierto entorno a la fuente, compuesto de hierbas, árboles y arbustos, y zonas de arena / grava. Hanna et al. simularon una fuga de cloro presurizado desde un tanque de un tren de carga a través de un orificio de 10 cm de diámetro. Asumen una tasa de emisión de 225 kg s<sup>-1</sup> de cloro, durante 5 minutos.

Hanna et al. suponen condiciones atmosféricas muy estables y vientos ligeros de 3 m s<sup>-1</sup>. Un gradiente de velocidad vertical es considerado como condición inicial y el perfil de velocidades promedio del viento es logarítmico.

En el escenario de estudio, la nube se transporta hacia el norte, rumbo a una región densamente edificada, caracterizada por edificios altos, con una densidad poblacional de aproximadamente 3949 individuos km<sup>-1</sup> (Wendell Cox Consultancy, 2012). Este escenario se representa sobre un mallado de 5 km N-S por 2.5 km E-O, y 500 m de altura (900 mil celdas) para el acoplamiento D-F, y sobre un mallado de 5 km de lado, y de 500 m de altura (500 mil celdas) para el acoplamiento D-M.

La especie química de interés en este artículo es el cloro y su elección fue motivada por varias razones. En principio, el cloro es uno de los productos químicos más utilizados a nivel industrial, su reactividad puede complicar el transporte en la atmósfera y la dispersión desde la fuente, y además dada su densidad (2.5 veces más pesado que el aire) forma una nube densa que en su desplazamiento permanece cerca del suelo (Fauske y Epstein, 1988; Ruiz Boada, 2003; National Research Council, 2004; MANHAZ, 2006; Hansen et al., 2007)

Para la sustancia en cuestión, el AEGL será el índice toxicológico utilizado por DDC debido a su disponibilidad y prioridad en la jerarquía mencionada en Ruiz Boada et al. (2003).

Una descripción completa de este escenario puede encontrarse en el trabajo de Hanna et al. (2009).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Las figuras 1 a 4 muestran las salidas de los acoplamientos D-F y D-M para el escenario en la ciudad de Chicago.

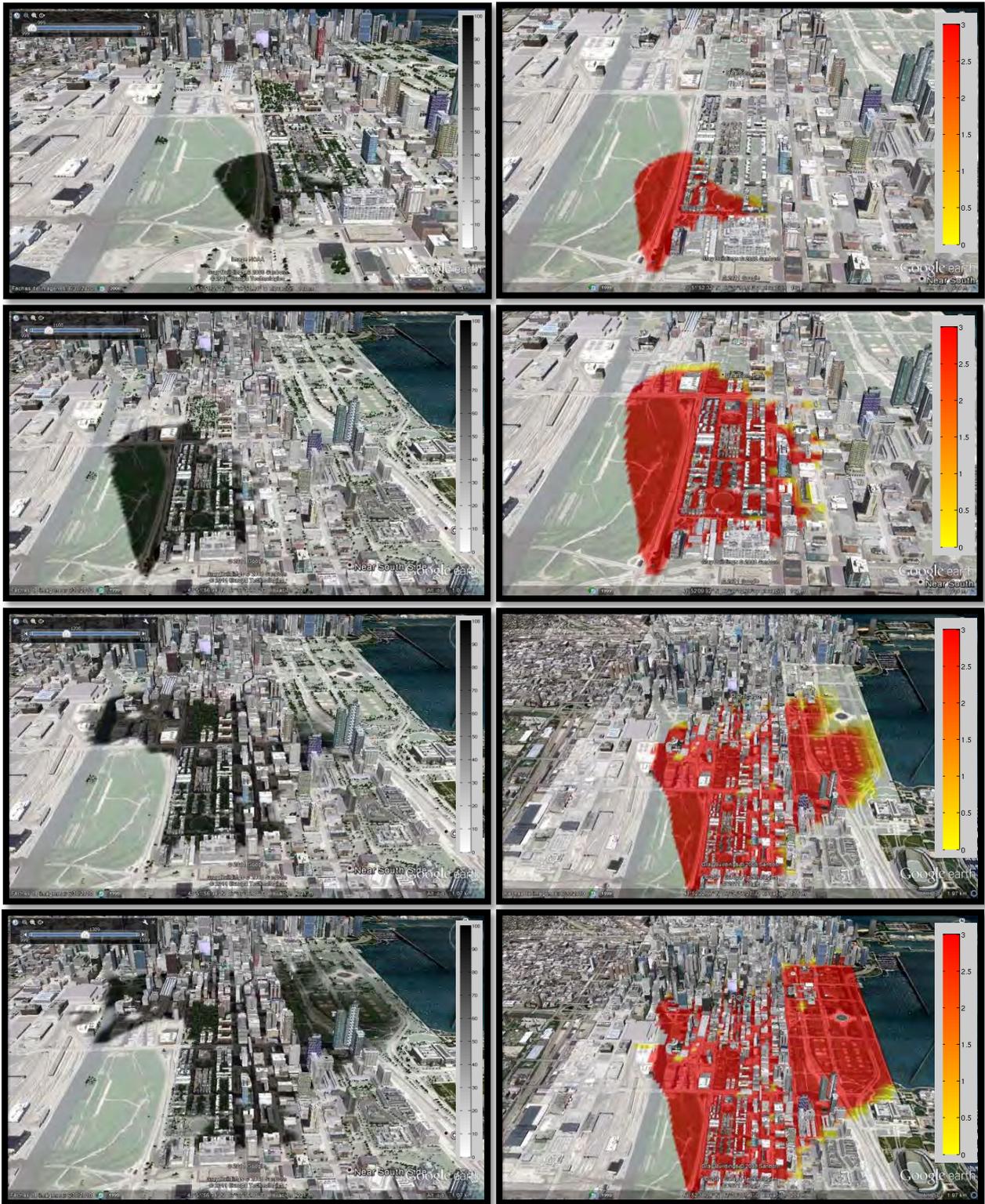


Figura 1: Acoplamiento D-F. Representación de la evolución de la nube tóxica (primera columna) y de la región de daño maximal (segunda columna) para el escenario de Chicago sobre una imagen satelital proporcionada por Google Earth, 2011. Tiempos de simulación: 200, 400, 800 y 1200 segundos.

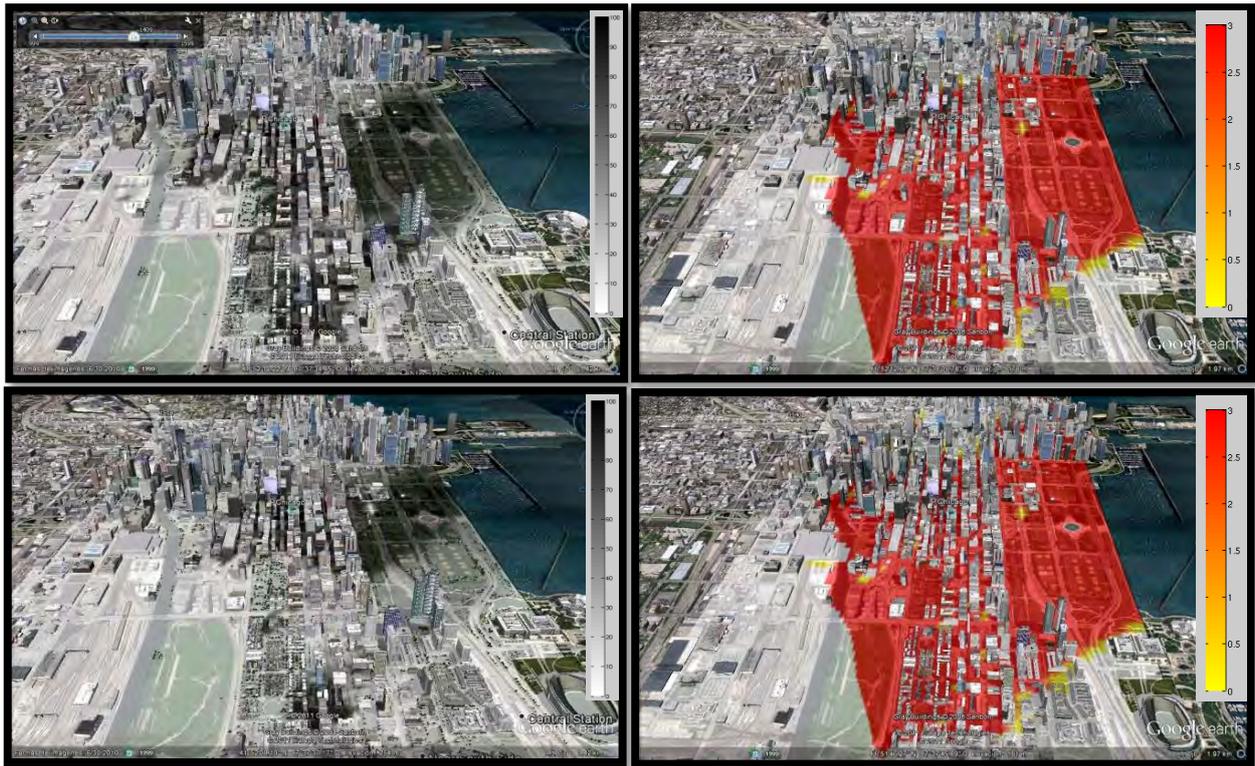


Figura 2: Acoplamiento D-F. Representación de la evolución de la nube tóxica (primera columna) y de la región de daño maximal (segunda columna) para el escenario de Chicago sobre una imagen satelital proporcionada por Google Earth, 2011. Tiempos de simulación: 1600 y 2000 segundos.

Si bien ambos acoplamientos muestran que la nube tóxica se extiende más de 1000 m desde la fuente de emisión en la dirección del viento durante los primeros 400 s, sólo el acoplamiento D-F contempla que la nube de cloro se desplaza a mayor velocidad y con menor dilución a través del terreno plano y abierto que en zonas edificadas. Además, cuando la nube experimenta la mezcla turbulenta del área densamente edificada que encuentra en su desplazamiento, sólo D-F refleja esta situación limitando así la extensión de la nube tóxica a sotavento. Las regiones de daño de las Figuras 1 y 2 muestran lo expuesto, restringiendo la extensión de la mayor proporción del frente de las regiones maximal y minimal a unos 2500-3000 m a favor del viento (distancia a la cual predominan los edificios de gran altura). En D-M por su parte, la nube continúa con movimiento uniforme sin interacción con los obstáculos, con el terreno y con la naturaleza turbulenta de la atmósfera.

Por otra parte, sólo con D-F se observa que para tiempos avanzados de simulación un volumen de gas queda atrapado al sudeste, entre los edificios elevados que actúan como área de atrapamiento.

Como muestran la Figura 1 a 4, las simulaciones de DDC (segunda columna) representan regiones de acuerdo a una escala de nivel de daño (ND). La escala de colores cálidos situada a la derecha de cada gráfica nos permite estimar la magnitud de los daños. Un valor de ND tal que  $0 \leq ND < 1$  representan niveles de exposición que producen ligero olor, sabor u otra irritación sensorial leve. Si  $1 \leq ND < 2$ , la población en general, incluyendo a las personas susceptibles como los lactantes, niños, ancianos, personas con asma, y aquellas con otras enfermedades, podría experimentar molestias notables, irritación o ciertos efectos asintomáticos. Estos efectos son transitorios y reversibles una vez que cesa la exposición. Si  $2 \leq ND < 3$ , la población mencionada podría experimentar efectos duraderos serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar, y si  $ND = 3$ , puede experimentar efectos amenazantes para la vida o incluso provocar la muerte.

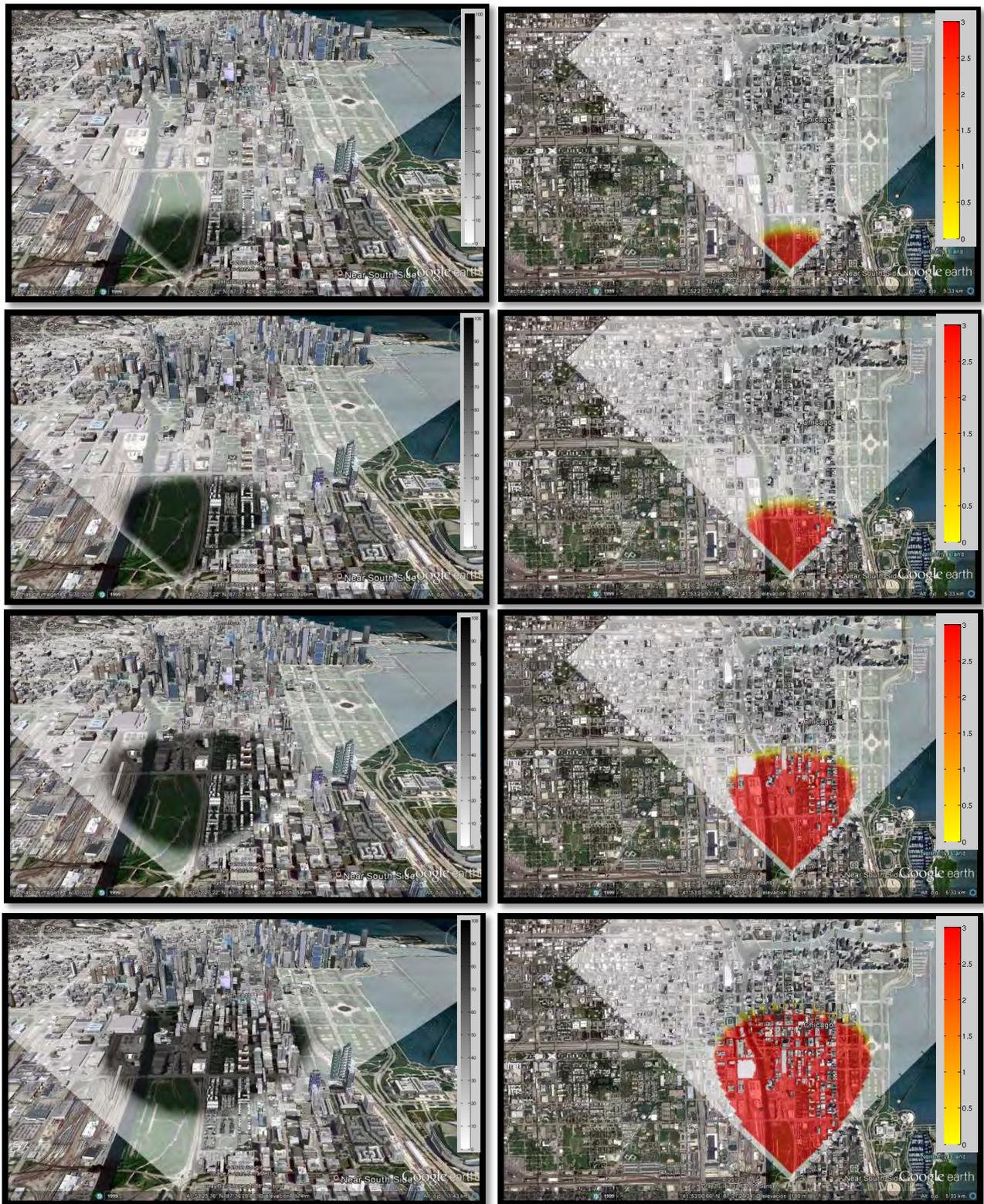


Figura 3: Acoplamiento D-M. Representación de la evolución de la nube tóxica (primera columna) y de la región de daño maximal (segunda columna) para el escenario de Chicago sobre una imagen satelital proporcionada por Google Earth, 2011. Tiempos de simulación: 200, 400, 800 y 1200 segundos.

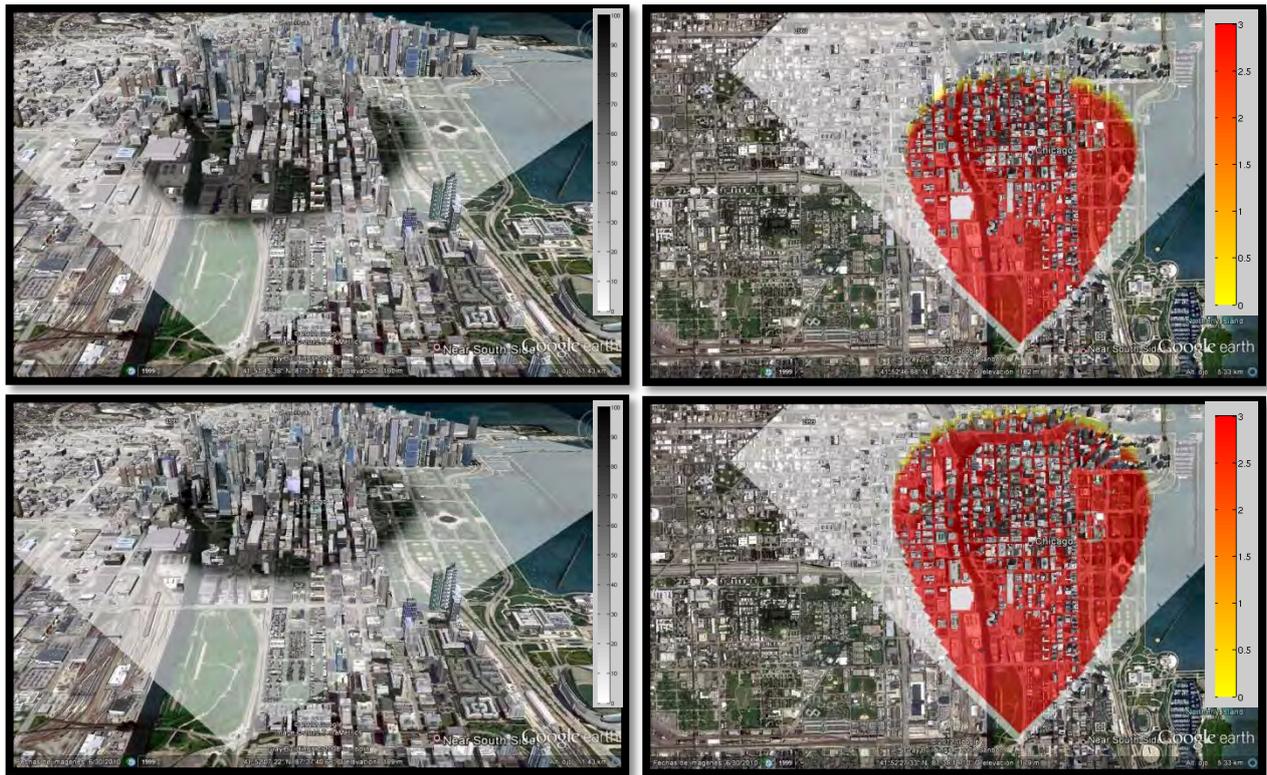


Figura 4: Acoplamiento D-M. Representación de la evolución de la nube tóxica (primera columna) y de la región de daño maximal (segunda columna) para el escenario de Chicago sobre una imagen satelital proporcionada por Google Earth, 2011. Tiempos de simulación: 1600 y 2000 segundos.

En la tabla 1 se presentan las dimensiones superficiales de las regiones maximal y minimal, bajo diferentes rangos de ND, para los distintos tiempos de simulación con los acoplamientos D-F y D-M. Una primera mirada de las Figuras 1 a 4, y de la tabla 1, nos muestra que para cualquier tiempo de simulación predomina el mayor nivel de daño: ND 3 (superior al 85 % de las superficies de las regiones maximal y minimal), asociado a efectos graves en la salud, e incluso la muerte. Tal situación se encuentra directamente relacionada con la magnitud de la emisión. Por lo expuesto, es que enfocaremos la discusión de resultados a la superficie total de las regiones maximal y minimal, sin discriminar en función del nivel de daño aún cuando en la tabla 1 se encuentre detallada esta información.

Tabla 1: Acoplamientos D-F y D-M. Área de cobertura de las regiones maximal y minimal, de acuerdo a rangos de nivel de daño.

TIEMPO (s)	Nivel de daño (ND)	D-F		D-M	
		REGIÓN MAXIMAL	REGIÓN MINIMAL	REGIÓN MAXIMAL	REGIÓN MINIMAL
		Área cobertura (Km <sup>2</sup> )			
200	1<=ND<2	0.003	0.002	0.08	0.07
	2<=ND<3	0.005	0.005	0.03	0.04
	ND=3	0.082	0.082	0.29	0.29
	<b>TOTAL</b>	<b>0.090</b>	<b>0.090</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>
400	1<=ND<2	0.034	0.033	0.13	0.03
	2<=ND<3	0.028	0.028	0.04	0.14
	ND=3	0.487	0.485	0.73	0.73

	<i>TOTAL</i>	<b>0.550</b>	<b>0.546</b>	<b>0.9</b>	<b>0.9</b>
<b>800</b>	<b>1&lt;=ND&lt;2</b>	0.288	0.282	0	0
	<b>2&lt;=ND&lt;3</b>	0.106	0.087	0.22	0.21
	<b>ND=3</b>	2.040	1.900	1.87	1.88
	<i>TOTAL</i>	<b>2.434</b>	<b>2.269</b>	<b>2.09</b>	<b>2.09</b>
<b>1200</b>	<b>1&lt;=ND&lt;2</b>	0.083	0.080	0	0
	<b>2&lt;=ND&lt;3</b>	0.168	0.159	0.26	0.25
	<b>ND=3</b>	4.000	3.720	3.23	3.14
	<i>TOTAL</i>	<b>4.251</b>	<b>3.958</b>	<b>3.49</b>	<b>3.39</b>
<b>1600</b>	<b>1&lt;=ND&lt;2</b>	0.063	0.060	0	0
	<b>2&lt;=ND&lt;3</b>	0.319	0.405	0.26	0.25
	<b>ND=3</b>	5.370	4.890	4.77	4.4
	<i>TOTAL</i>	<b>5.752</b>	<b>5.355</b>	<b>5.03</b>	<b>4.65</b>
<b>2000</b>	<b>1&lt;=ND&lt;2</b>	0.003	0.000	0	0
	<b>2&lt;=ND&lt;3</b>	0.364	0.414	0.26	0.24
	<b>ND=3</b>	6.250	5.720	6.43	5.66
	<i>TOTAL</i>	<b>6.617</b>	<b>6.134</b>	<b>6.69</b>	<b>5.9</b>

En el análisis de la Figura 5, se aprecia que hasta los 400 s de simulación, el acoplamiento D-M sostiene un valor mayor de área de cobertura respecto a D-F. Sin embargo, esta situación se invierte para tiempos mayores de simulación debido a la capacidad descriptiva de D-F, ya que la nube simulada con este acoplamiento contempla la dispersión por lugares, tales como calles, que D-M no puede representar.

Por otra parte, en la Figura 5 queda expuesto cómo la tasa de crecimiento del área de cobertura de la región maximal, para el acoplamiento D-F, disminuye después de los 800 segundos de simulación. Este suceso se corresponde con el tiempo en el que la nube encuentra a su paso la zona de edificios altos y, en consecuencia, ve limitada su extensión a sotavento. Por lo contrario, el acoplamiento D-M mantiene una tasa de crecimiento del área de la región maximal aproximadamente constante, encontrando su fundamento en la interacción nula con los obstáculos, dado que las condiciones atmosféricas se mantienen constantes.

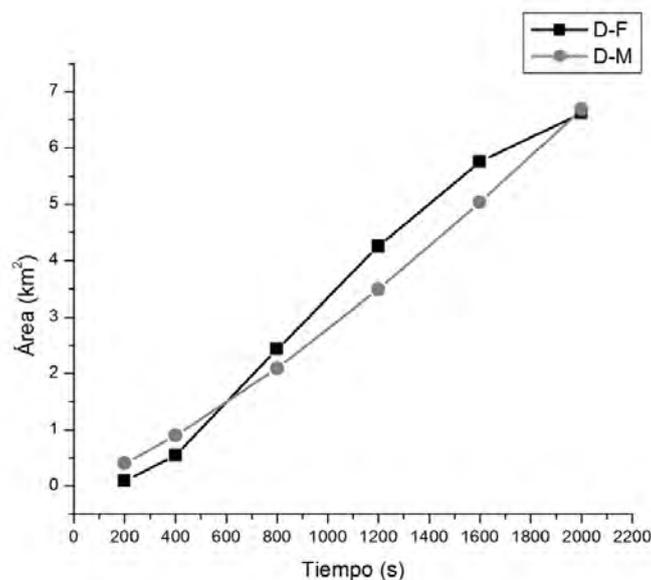


Figura 5: Áreas de cobertura de las regiones de afectación con los acoplamientos D-F y D-M.

En la figura 6 puede apreciarse la diferencia entre los valores de las áreas de cobertura de las regiones maximal y minimal. Este concepto está íntimamente ligado a la velocidad de desplazamiento de la nube tóxica, ya que la estimación minimal del daño se vuelve cero en aquellas celdas en las que la concentración es inferior a la concentración umbral que delimita a la nube (condición de contorno de DDC) (Acquesta et al., 2010). Debido a la característica de fuente continua y, consecuentemente, a la permanencia de concentraciones altas cerca de la fuente de emisión, es que no se observa una diferencia marcada entre las áreas de cobertura de las regiones maximal y minimal para los primeros 400 s de simulación. Sin embargo, a partir de los 800 s de simulación, el acoplamiento D-F muestra una diferencia importante entre las áreas maximal y minimal, dada en principio por la velocidad de avance de la nube en la zona abierta pero a una tasa de crecimiento pequeña (respecto a D-M) por la limitación física de la zona densamente edificada. Por lo contrario, D-M rige la velocidad de desplazamiento de la nube sólo por el campo de velocidades atmosférico (velocidad promedio), sin tener en cuenta la complejidad del terreno.

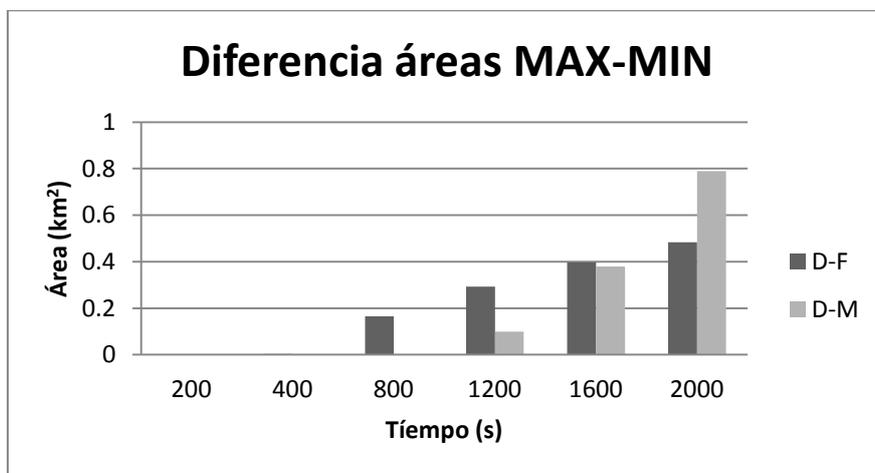


Figura 6: Diferencia entre los valores de las áreas de cobertura de las regiones maximal y minimal, para los acoplamientos D-F y D-M.

Con este ejemplo se pretende analizar la importancia de los acoplamientos presentados como herramientas para la planificación y respuesta a emergencias en ciudades, ya que reconocemos que una mejora en la planificación está estrechamente vinculada con sistemas de alarma temprana y esto contribuye sustantivamente a la mejora en la respuesta a una emergencia.

Finalmente, en este trabajo queda expuesto cómo el nivel de descripción de un modelo es función de la complejidad del mismo, del tiempo de ejecución y, en consecuencia, de la aplicación a la etapa pertinente en la gestión de emergencias y desastres.

## CONCLUSIONES

Los acoplamientos D-F y D-M constituyen una herramienta muy interesante para el análisis de riesgo, ya que conocer en forma temporal las regiones de afectación y el nivel de daño asociado, ofrece a los decisores en una emergencia química la información pertinente para una llevar a cabo una respuesta eficiente. Estos acoplamientos permiten sacar conclusiones acerca del tiempo disponible para evacuar a aquellos individuos que en el futuro inmediato serán alcanzados por la nube tóxica, cuánta población necesitará de atención médica inmediata de acuerdo al grado de afectación y de cuánta logística se requerirá disponer para responder a la emergencia, entre otras cosas.

El acoplamiento D-F, por comprender a un modelo de dispersión del tipo CFD complejo, tiene una gran capacidad descriptiva de los escenarios con una muy buena aproximación de la realidad, sin embargo no sólo posee un elevado grado de complejidad sino que además demanda un gran costo computacional, requiere de numerosos datos y de un gran tiempo de ejecución, por lo que su aplicación para el manejo de emergencias en tiempo real no resulta factible. Sin embargo, D-F constituye una excelente herramienta para la etapa de planificación de emergencias y desastres.

Para situaciones de respuesta a emergencias en tiempo real, resulta apropiada la aplicación del acoplamiento D-M por su corto tiempo de ejecución, proporcionando así una rápida y aproximada estimación de la evolución de la nube tóxica y de las potenciales regiones de afectación.

Los autores sostenemos que aún cuando un modelo de dispersión pueda ofrecer detalles del movimiento del flujo de modo muy preciso, este nivel de detalle en situaciones de emergencia resulta insuficiente si no se realiza un análisis conjunto con los aspectos toxicológicos de la población expuesta. En tal sentido, resulta fundamental lograr estimar dónde y cuándo los niveles guía toxicológicos (llámese AEGLs, ERPGs y/o TEELs) son superados.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), y a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC-PBA), quienes junto al subsidio UBACYT 20020100100536 han facilitado el desarrollo de este trabajo.

A.A. Porta es miembro de la carrera de investigación de la CIC-PBA, P.M. Jacovkis pertenece a la Universidad de Buenos Aires y a la Universidad Nacional de Tres de Febrero, y JE Colman Lerner son becarios doctorales del CONICET.

## REFERENCIAS

- Acquesta A.D., Sanchez E.Y., Porta A., Jacovkis P.M., 2011. A method for computing the damage level due to the exposure to an airborne chemical with a time-varying concentration. *R. Analysis*. 31(9), 1451-1469.
- Delaunay D., 1996. Numerical simulation of atmospheric dispersion in an urban site: Comparison with field data. *J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn.* 64(2-3), 221-231.
- Gavelli F., Bullister E., Kytomaa H., 2008. Application of CFD to LNG spills into geometrically complex environments. *J. Haz. Materials*. 159(1), 158-168.
- GexCon US. "FLACS CFD". Disponible en: [http://gexconus.com/FLACS\\_CFD](http://gexconus.com/FLACS_CFD). Accedido el 12 de Julio de 2012.
- Fauske H.K. y Epstein M., 1988. Source term considerations in connection with chemical accidents and vapour cloud modelling. *J. Loss Prev. Process Ind.*; 1, 75-83.
- Hanna S.R., Hansen O.R., Dharmavaram S., 2004a. FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. *Atm. Env.* 38(28), 4675-4687.
- Hanna S.R., Hansen O.R., Dharmavaram S., 2004b. Evaluation of FLACS CFD model with MUST data. *AMS meeting*. Vancouver, Canada.
- Hanna S, White J, Hannan J, Kolbe R, Kiley C, Brown M, Harris T, Wang Y, Fry R, Bowers J, Garvey D, Williamson C, Moussafir J, 2007. An intercomparison of diagnostic urban wind flow models based on the röckle methodology using the joint urban 2003 field data. *Proceedings of the 6th International Conference on Urban Air Quality*. Limassol, Cyprus.

- Hanna S.R., Hansen O.R., Ichard M., Strimaitis D., 2009. CFD model simulation of dispersion from chlorine railcar releases in industrial and urban areas. *Atm. Env.* 43, 262–270.
- Hansen O.R., Melheim J.A., Storvik I.E., 2007. CFD-Modeling of LNG dispersion experiments. *Proceedings of 7th Topical Conference on Natural Gas Utilization*, AIChE Spring Meeting, Houston, TX.
- Long H.J., Zajackowski F.J., Haupt S.E., Peltier L.J., 2009. Modelling a Hypothetical Chlorine Release on a College Campus. *J. of Computers.* 4 (9), 881-890.
- MANHAZ, 2006. Models and techniques for health and environmental hazard assessment and management. Markiewicz, Part 2.4: Mathematical modelling heavy gas dispersion. Otwock-Swierk, Poland.
- National Research Council, 2004. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 4. Washington, DC: The National Academies Press.
- Reynolds R.M., 1992. ALOHA Theoretical Description; Draft Technical Memorandum NOS ORCA-65 Hazardous Materials Response and Assessment Division (HMRAD) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): Seattle, WA.
- Ruiz Boada F., González Ferradas E., Miñana Aznar A., 2003. Zonas de Planificación para accidentes graves de tipo tóxico. Guía técnica (en el ámbito del Real Decreto 1254/99 [Seveso II]). Murcia: Universidad de Murcia.
- Sánchez E.Y., 2012. Formulación, implementación y acoplamiento de un modelo de exposición aguda a una nube tóxica con modelos de propagación de contaminantes en aire, para su aplicación en emergencias químicas. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Sanchez E.Y. y Acquesta A.D., 2011. El Sistema CRISIS para la gestión de riesgos. El Sistema CRISIS para la Gestión de Riesgos. Tesina de la diplomatura en Gestión de Riesgo para Emergencias y Desastres. Consejo Provincial de Emergencias e Instituto Provincial para la Administración Pública, PBA. La Plata, Argentina.
- Sanchez E.Y., Gonzalez E.M., Porta A.A., Jacovkis P.M., Acquesta A.D., 2011. Simulación de un accidente químico con la herramienta CFD-DDC: planificación de respuesta a emergencias en ciudades. *Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina*; E. Puliafito (Ed.). Universidad Tecnológica Nacional. pp 257-268. ISBN 978-950-42-0136-6
- Sanchez E.Y, Gonzalez E.M, Colman J.E, Porta A.A, Jacovkis P.M, Acquesta A.D., 2012a. Modelo y simulación de regiones de afectación por un incidente químico. *Ciencia y Tecnología Ambiental, un enfoque integrador*. Ed. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias. p 333-338. ISBN 978-987-28123-1-7.
- Sanchez E.Y, Acquesta A.D, Colman Lerner J.E, Porta A.A, Jacovkis P.M., 2012b. Análisis de escenarios de escape de cloro mediante la simulación con DDC acoplado a diferentes modelos de dispersión en aire. *Memorias del II Congreso Regional SRA LA- Sociedad para el Análisis de Riesgos-*, Capítulo Latinoamérica. F. Muñoz (Ed.). pp 119- 125.
- Sklavounos S., Rigas F., 2005. Simulation of Coyote series trials – Part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparisons with box-model predictions. *Chem. Eng. Science.* 61, 1434–1443.
- Warner S., Platt N., Urban J.T., Heagy J.F., 2008. Comparisons of transport and dispersion model predictions of the joint urban 2003 field experiment. *J. Appl. Meteor. and Climat.* 4, 1910–1928.
- Wendell Cox Consultancy, 2012. Chicago Neighborhoods: Population & Population Density: 1980 to 2000. Demographia. Belleville, USA. Disponible en: <http://www.demographia.com/db-chi-nhd2000.htm>. Accedido en Julio de 2012.