

## MODELO Y SIMULACIÓN DE REGIONES DE AFECTACIÓN POR UN INCIDENTE QUÍMICO

E. Y. Sánchez <sup>a</sup>, E. M. González <sup>b</sup>, J.E. Colman <sup>a</sup>, A. A. Porta <sup>a</sup>, P. M. Jacovkis <sup>c,d</sup> y A. D. Acquesta <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Centro de investigaciones del Medio Ambiente (CIMA)/Fac. de Ciencias Exactas, UNLP, Argentina.

<sup>b</sup> Departamento Modelado y Manejo de Crisis/CITEDEF, Argentina.

<sup>c</sup> Departamento de Computación e Instituto de Cálculo/Fac. de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina.

<sup>d</sup> Departamento de Matemática/Fac. de Ingeniería, UBA, Argentina.  
yaninasanch@gmail.com

### Resumen

El rápido desarrollo industrial ofrece prosperidad y altos niveles de vida, sin embargo, la contaminación asociada a este desarrollo junto a los incidentes con materiales peligrosos sigue siendo motivo de preocupación y estudio. Generalmente, los errores humanos o las fallas de equipos crean condiciones propicias para la ocurrencia de un incidente. A tal efecto, la necesidad de conocer el riesgo potencial asociado a una descarga química impulsa el desarrollo de modelos matemáticos para estimar zonas vulnerables y evaluar los potenciales impactos en las poblaciones afectadas.

Los autores consideran de suma importancia el desarrollo de metodologías y de modelos de aplicación directa al contexto en que vivimos, ya que los recursos limitados disponibles para la gestión requieren de un uso eficiente para una respuesta óptima. En tal sentido, toda mejora y optimización que contribuya a la menor sobreestimación de los daños potenciales en la población expuesta, resulta útil para la gestión integral de la emergencia al suministrar una idea más precisa de las consecuencias de un incidente.

A través del modelo DDC se ha logrado optimizar la forma de estimar cuali y cuantitativamente la población afectada por una nube tóxica. El análisis temporal y la estimación progresiva que ofrece DDC permiten un enfoque más descriptivo y preciso que otras metodologías de uso corriente, contribuyendo además al mejor análisis del escenario y al conocimiento del tiempo disponible para la intervención oportuna. Por último, la modularidad de DDC permite tomar como entrada los datos de salida de cualquier modelo de transporte, logrando de este modo una aplicación versátil en todas las etapas de la gestión integral de emergencias.

### INTRODUCCIÓN

Para obtener respuestas eficientes a situaciones de emergencias, se requiere de una estrecha coordinación y colaboración entre los actores para garantizar que las necesidades sean atendidas, que no se dupliquen los esfuerzos, que se utilicen los recursos de manera óptima y que la calidad de los servicios de salud sea adecuada. (El Proyecto Esfera, 2011) Sin embargo, este conjunto de pautas no puede cumplirse en su totalidad, si se desconoce cómo evoluciona el fenómeno y su potencial impacto sobre la población. Este desconocimiento puede incurrir en, por ejemplo, el inapropiado uso de los recursos (situación preocupante en países en vías de desarrollo, donde los recursos son limitados), toma de decisiones no acertadas, etc.

Por lo expuesto, constituye una necesidad para nuestra sociedad pasar de la actual situación artesanal-burocrática a un modelo de gestión y toma de decisiones que,

frente a una emergencia, pueda ofrecer una protección completa de la salud de la población afectada, el ambiente y los bienes involucrados. En tal sentido, es importante disponer de una herramienta para la adecuada toma de decisiones, minimizando la confusión, los rumores y la exageración.

Como muestran Acquesta y Sanchez en sus trabajos (Acquesta et al., 2010; Sanchez et al., 2011), es certero que una estimación más detallada y dinámica de la distribución del contaminante en un incidente químico, y del daño sobre la población expuesta, ofrece un mejor conocimiento de la situación y del tiempo disponible para la intervención oportuna.

### **Respuesta y Planificación**

En una emergencia es sabido que es tan importante la respuesta como la planificación, por tal motivo resulta significativo poder contar con una herramienta que sea útil en todas las etapas de la gestión integral de la emergencia (Sanchez y Acquesta, 2011). A tal fin, DDC constituye un modelo de exposición para situaciones de emergencias químicas aplicable tanto a la respuesta en tiempo real como al estudio y análisis de escenarios para la planificación de estrategias ante un incidente. Su modularidad permite acoplarse a cualquier modelo de transporte que ofrezca una salida de datos en función del tiempo.

Por lo expuesto, cabe destacar que el tipo de modelo de transporte elegido debe ser funcional a la aplicación ya que el nivel de detalle simulado será directamente proporcional al tiempo de ejecución. El tipo de modelo apropiado para un uso particular dependerá de la magnitud del problema, del nivel de detalle de la información disponible como entrada al modelo, del nivel necesario de la salida del modelo, de la precisión requerida y del tiempo disponible de espera para concluir los cálculos del modelo (Beychok, 1994; Dandrieux, 2006). Por tal motivo, lo apropiado es contar con un modelo que ofrezca el máximo nivel de detalle con el menor tiempo posible de ejecución, en función de la etapa de la gestión de riesgos a la que se quiera responder.

### **METODOLOGÍA**

Las metodologías de uso frecuente para la evaluación de riesgos y gestión en emergencias, relativas a la exposición aguda a sustancias peligrosas (llámese exposiciones agudas, según la NOAA's, a aquéllas de características individuales, no repetitivas y que no exceden de 8 horas), consisten básicamente de dos partes: un modelo para la liberación y transporte de sustancias químicas tóxicas (*MT*), y una representación de las áreas de riesgo (*RAR*). Estas dos partes se conjugan por medio de algún método que, para cada ubicación donde la nube tóxica pasa, analiza el perfil de concentración (salida de modelo de transporte) y se asocia con alguna concentración de referencia de alerta (*LOC*)<sup>7</sup> para así identificar las áreas de riesgo. DDC (*D*amage *D*ifferential *C*oupling) forma parte de los métodos capaces de conjugar *MT* y *RAR*, tomando los datos de salida de algún modelo de transporte, evaluando luego los daños potenciales sobre la población expuesta y generando así una representación de las regiones de afectación, asociadas a los niveles de daño correspondientes. En ventaja a los métodos vigentes, DDC proporciona una estimación progresiva en el tiempo de los daños experimentados. Por lo tanto, los datos cronológicos de los posibles efectos experimentados por la población

<sup>7</sup> LOC es el valor por encima del cual la concentración de gases tóxicos podría ser lo suficientemente grande como para dañar a las personas (Peña, 2001).

expuesta se encuentran disponibles y, a su vez, se puede mantener un registro de las consecuencias más probables para la salud de la población. Teniendo en cuenta que DDC se basa en la noción de un campo continuo de curvas de isodaño, el resultado concluye en un enfoque más descriptivo. DDC proporciona, además, información sobre el nivel de daño mínimo y máximo de exposición; lo cual resulta útil para los responsables en la gestión de emergencias ya que ofrece un intervalo de estimación que asegura contener al daño "verdadero". Un mayor detalle de DDC se puede encontrar en Acquesta et. al, 2010.

En lo que a gestión se refiere, 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 planificación de emergencias), los modelos de transporte del tipo CFD son los más adecuados para un análisis profundo en áreas densamente pobladas (Delaunay, 1996; Hanna et al., 2007). Este tipo de modelo tiene una gran capacidad descriptiva de los escenarios con una muy buena aproximación. No sólo poseen un elevado grado de complejidad sino que además demandan un gran costo computacional, requieren 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. Para esta última situación, se utilizan modelos más simples (como pueden ser los gaussianos o los de caja) que recurren a simplificaciones en la descripción del fenómeno y del escenario y obtienen, en tiempos de ejecución del orden de los segundos, simulaciones bastante fiables para escenarios sencillos. Si bien es sabido que los modelos sencillos describen pobremente el fenómeno en terrenos complejos, son los más adecuados para la etapa de respuesta debido al compromiso que existe entre el nivel de detalle descripto y el costo computacional.

## RESULTADOS

En esta sección se mostrará la modularidad y los alcances de DDC a través del acoplamiento con un modelo CFD y con un modelo euleriano sencillo.

### Aplicación de DDC en la planificación

Por lo expuesto en la sección 2, se presentan aquí los resultados obtenidos mediante el acoplamiento de un modelo CFD, FLACS (FLame ACceleration Simulator), con el método DDC. Esta herramienta se aplicó para la simulación de una liberación de cloro cerca del centro de Chicago, IL, Estados Unidos. Los resultados muestran cómo esta herramienta es capaz de predecir con gran nivel de detalle la dispersión atmosférica de sustancias químicas peligrosas, y el daño potencial en la población expuesta, para apoyar a los decisores en la planificación y preparación de emergencia (Sanchez et. al, 2011).

A modo de ejemplo se supone un escenario en el que la nube de cloro se transporta hacia el norte, rumbo a una región densamente edificada, caracterizada por edificios altos, con una densidad poblacional de aproximadamente  $3949 \text{ individuos km}^{-1}$ . Una mejor descripción del escenario estudiado, del mallado y de los modelos implementados se encuentra en Sanchez et. al, 2011.

Los resultados de la simulación mostraron que, la nube de cloro se desplaza a mayor velocidad y con menor dilución a través de un terreno plano y abierto, extendiéndose más de 1000 m desde la fuente de emisión en la dirección del viento durante los primeros 400 s. Cuando la nube encuentra en su trayectoria al área densamente edificada, su extensión a sotavento se ve limitada debido a que la mezcla turbulenta (característica de terrenos complejos y zonas con edificaciones

altas) contribuye a la disminución de la concentración local. Del mismo modo se observa que un volumen de gas queda atrapado al sudeste, entre los edificios elevados que actúan como área de atrapamiento, aún para tiempos avanzados de simulación. Por otra parte, queda en evidencia que para cualquier tiempo de simulación predomina el mayor nivel de daño (color rojo): ND 3 (superior al 85 % de las regiones), el cual está asociado a efectos graves en la salud, e incluso la muerte. Tal situación se encuentra directamente relacionada con la magnitud de la liberación de cloro. Ver figura 1.

DDC no sólo proporciona una representación gráfica de las regiones de afectación sino que además da conocimiento de la cantidad de personas que han sido potencialmente afectadas en función del nivel de daño. Finalmente, en la figura 2 se muestra el crecimiento cuantitativo de las regiones de afectación y la cantidad de población alcanzada por dichas regiones. El cambio de pendiente se asocia al momento en el que la nube tóxica se encuentra con el área de edificios altos, característica que sólo puede ser contemplada con un modelo de tipo CFD.

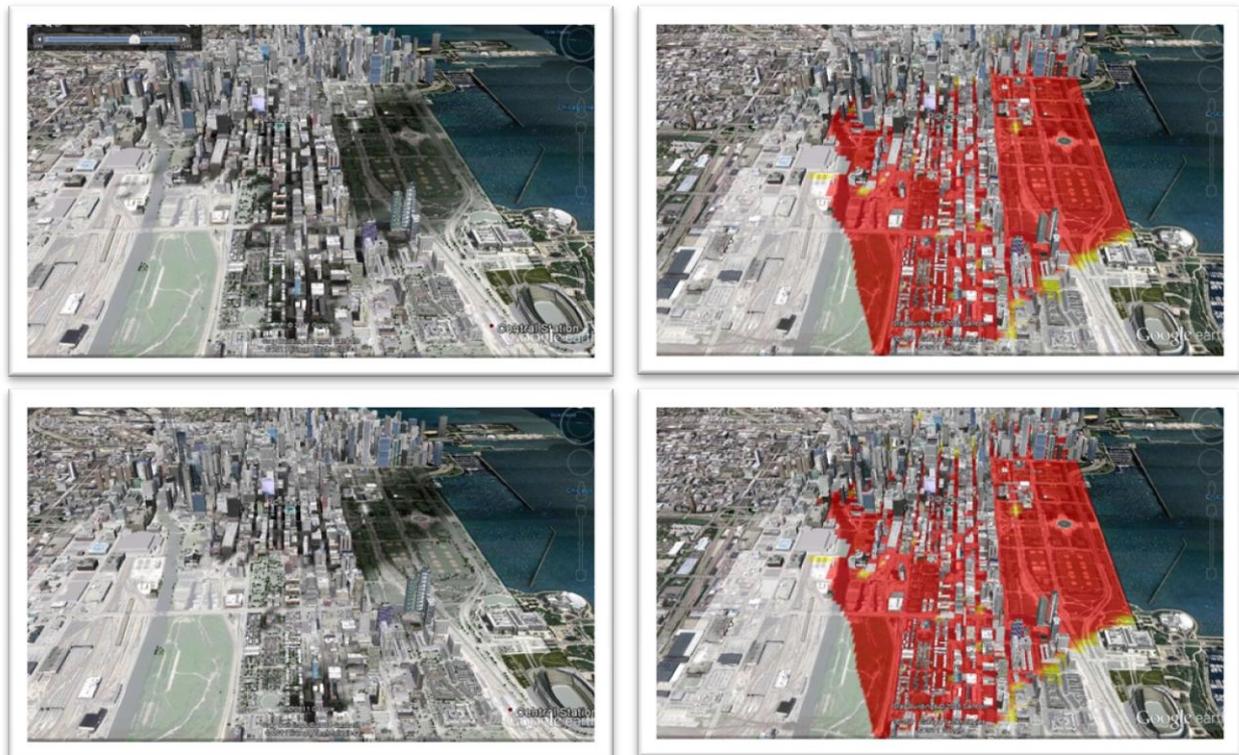


Figura 1: REPRESENTACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA NUBE TÓXICA (izq.) Y DE LA REGION DE afectación (DER.), PARA EL ESCENARIO DE CHICAGO SOBRE UNA IMAGEN SATELITAL PROPORCIONADA POR GOOGLE EARTH, 2011. TIEMPOS DE SIMULACION: 1600 (arriba) Y 2000 s (abajo).

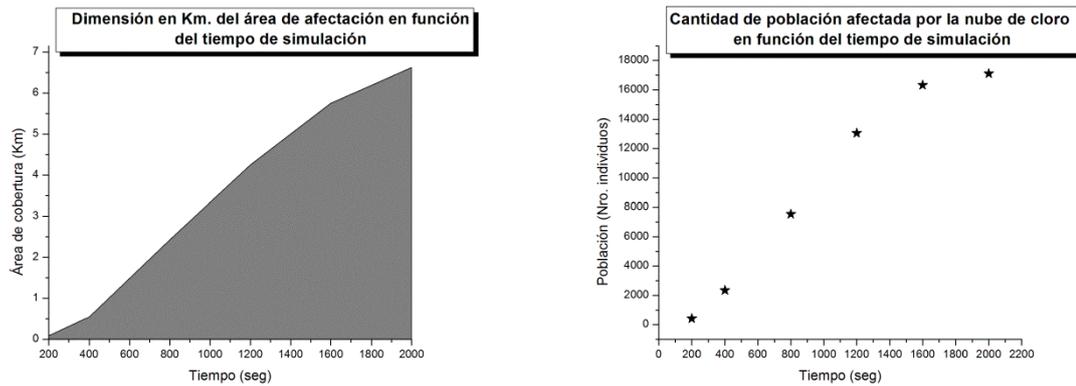


Figura 2: Análisis de la dimensión de las regiones de afectación y de la cantidad de población afectada en función del tiempo de simulación.

### Aplicación de DDC en la respuesta

En la figura 3 se presenta una simulación de un escape de cloro en una industria química de Pilar, en la que puede observarse la evolución de la nube tóxica en las primeras dos horas y media de simulación, y las regiones de afectación relacionadas a las zonas de alto riesgo. Lo primero que llama la atención en contraste a la figura 1, es que aquí la nube se representa como formas muy redondeadas y no se visualizan las edificaciones. Esto se debe a que, como bien mencionamos, los modelos de transporte simples recurren a simplificaciones tales como terrenos llanos.

Una herramienta de la que dispone el INDEC se ha utilizado en esta sección para estudiar la cantidad de población potencialmente expuesta a la nube tóxica. La misma nos ha permitido deducir que a los 28 minutos de simulación las poblaciones

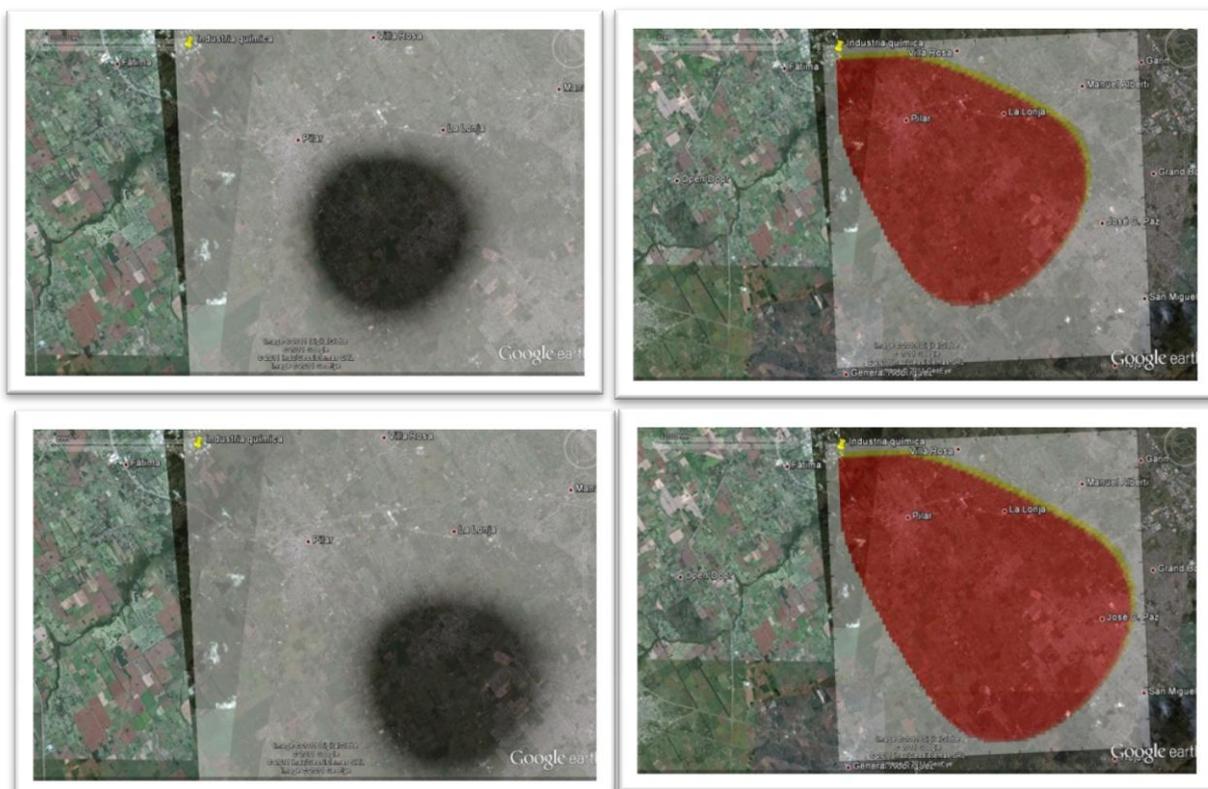


Figura 3: Representación de la evolución de la nube tóxica (PRIMERA COLUMNA) y de las regiones de daño maximal (SEGUNDA COLUMNA) para el escape en el parque industrial de pilar, EN los tiempos de SIMULACIÓN DE 120 (arriba) y 180 (abajo) minutos. FUENTE: GOOGLE EARTH, 2011.

de Pilar (231639 habitantes) y del Barrio Parque Almirante Irizar (3085) comienzan a percibir al cloro en el aire, superando la concentración a las 0.31 ppm que representa al umbral olfativo. De este modo, los afectados sumarían un total de 234724 habitantes. Tiempo más tarde, aproximadamente a las 2 horas y 20 minutos, la nube alcanza a la población de José C. Paz con un total de 230208 habitantes.

## CONCLUSIONES

En este trabajo hemos analizado la modularidad de DDC y la capacidad de dos modelos de transporte para la gestión de emergencias, concluyendo que en conjunto constituyen una interesante herramienta para el análisis de riesgo. Conocer en forma temporal cuántas personas son potencialmente afectadas y en qué nivel, ofrece a los decisores en una emergencia química las herramientas para sacar conclusiones acerca de cuánto tiempo se dispone 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. Cabe destacar que, aún cuando se disponga de la mejor herramienta para simular un fenómeno, no resulta suficiente si no se cuenta con información propia del sitio y/o de la población que se está estudiando. Situación muy frecuente en nuestro país que debería poner en alerta a las autoridades competentes, a fin de elaborar una base de datos completa para el manejo de emergencias en distintos escenarios.

Palabras claves: DDC, incidente químico, emergencia, exposición aguda, sustancias peligrosas.

## REFERENCIAS

- Acquesta A.; Sánchez E.; Porta A.; Jacovkis P., 2010. *A method for computing the damage level due to the exposure to an airborne chemical with a time-varying concentration*. Risk Analysis. 31(9), 1451-1469.
- Beychok M, 1994. *Fundamentals of stack gas dispersion*. 3rd Ed. Irvine, CA.
- Dandrieux A, Dimbour JP, Dusserre G, 2006. *Are dispersion models suitable for simulating small gaseous chlorine releases?* Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19: 683–689.
- Delaunay D, 1996. *Numerical simulation of atmospheric dispersion in an urban site: Comparison with field data*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 64(2–3): 221–231.
- El Proyecto Esfera. *Carta Humanitaria y normas mínimas para la respuesta humanitaria*. Tercera edición 2011. ISBN 978-1-908176-02-8.
- 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.
- NOAA's (National Ocean Service), Office on Response and Restoration.
- Peña CE, Carter DE, Ayala-Fierro F, 2001. *Toxicología Ambiental: Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental*. 1996-2001, The University of Arizona.
- Sánchez E.; Gonzalez E.; Porta A.; Jacovkis P; Acquesta A., 2011. *Simulación de un accidente químico con la herramienta CFD-DDC: planificación de respuesta a emergencias en ciudades*. Contaminación Atm. e Hídr. en Argentina. UTN. 257-268.
- Sánchez EY y Acquesta AD, 2011. *El Sistema CRISIS para la Gestión de Riesgos*. Tesina de la diplomatura en Gestión de Riesgo a para Emergencias y Desastres. Consejo Provincial de Emergencias e IPAP, Argentina.