

## **CALIDAD DE AIRE E IMPACTO EN LA SALUD: HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL**

**Pablo A. Tarela**

Departamento de Computación, Facultad de Ingeniería  
Paseo Colón 850 (C1063ACV) Buenos Aires, Argentina  
e-mail: [ptarela@fi.uba.ar](mailto:ptarela@fi.uba.ar)

**Palabras clave:** Calidad de Aire, Modelo Lagrangeano, Modelo Gaussiano, Transporte de contaminantes, Impacto en la Salud.

**Resumen.** *Este trabajo describe brevemente la problemática de la contaminación atmosférica por la acción antrópica, y presenta algunos modelos y esquemas computacionales aplicables a la cuantificación de los impactos que este fenómeno puede ocasionar sobre la salud de la población afectada. El ánimo central de la presentación es el de mostrar la aplicabilidad y performance de esos modelos numéricos, los cuales han sido presentados anteriormente. Luego de una reseña que describe la metodología de control aplicada por las regulaciones locales de calidad de aire, la presentación ejemplifica el uso de distintas herramientas computacionales para tres casos particulares. Se trata inicialmente el impacto sobre un barrio debido a las emisiones de gases de combustión de una planta industrial. Luego se presenta la evaluación de las dosis de gases contaminantes recibidas por la población en una gran ciudad, y la posibilidad de aplicar modelos de simulación para caracterizar y seleccionar las políticas de mitigación de efectos más convenientes. Finalmente, se muestra el caso de la determinación del origen de fuentes de contaminación que impactan sobre un asentamiento poblacional ubicado en un área portuaria-industrial. En cada ejemplo se mencionan los modelos matemáticos utilizados, y sus respectivas implementaciones computacionales, dejándose los detalles técnicos de las mismas para consulta a través de las referencias del manuscrito. Como conclusión, el trabajo muestra la aptitud de las metodologías empleadas, y las ventajas de las mismas a la hora de la cuantificación de los impactos en la salud, medidos en términos de evaluación de dosis. También se mencionan sus limitaciones.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas del siglo XX se vivió a nivel mundial un creciente interés por la protección del recurso natural atmosférico, especialmente a partir de los problemas surgidos en los países industrializados, debidos al aumento sostenido de las emisiones de gases contaminantes. A través de estudios epidemiológicos y análisis en laboratorio, se han podido correlacionar algunos problemas de salud con la presencia y concentración de varios gases que naturalmente están prácticamente ausentes en el aire.

Esto dio lugar a la discusión y puesta en vigor de una amplia batería de leyes de alcance nacional, estatal y aún municipal, en los países mencionados, que formaron la base del sistema regulatorio actual, tendiente a minimizar las emisiones y controlar las concentraciones de los contaminantes atmosféricos. El fin último del marco regulatorio existente es la protección del medio ambiente, los bienes materiales y, principalmente, la salud humana.

En la Argentina, aunque existía un marco regulatorio desde los años 70, el proceso recién mencionado comenzó a efectivizarse en forma reciente, desde comienzos de la década del 90. Como consecuencia, existe hoy una amplia regulación referida tanto al control de emisiones como al nivel de concentración de gases contaminantes.

Pero el desarrollo de estos dos temas ha sido asimétrico. Mientras se realizan esfuerzos en medir y (a veces) minimizar las emisiones, no se guarda equilibrio en su contrapartida referida al real cumplimiento de los estándares de calidad de aire y, por ende, en la protección de la salud de los receptores humanos sometidos a atmósferas contaminadas.

En este trabajo, se presentan una serie de metodologías de investigación, análisis y control de la calidad de aire, en las cuales el uso de herramientas de la mecánica computacional ha demostrado ser eficiente y de bajo costo, potenciando los alcances que pueden lograrse hoy en día a partir de los respectivos estudios de impacto ambiental en la temática de calidad de aire.

Los alcances metodológicos se refieren a la salud de la población en sentido global y estadístico. Es decir, son herramientas que permiten determinar niveles de concentración de gases contaminantes, origen de las emisiones y predicción de eventos, a partir de cuyos resultados se evalúa el nivel de riesgo por impacto en la salud utilizando niveles guía, recomendados o estándares de calidad de aire.

Se ha optado por describir las metodologías presentando los siguientes casos de estudio:

- Barrio afectado por emisiones de gases de combustión
- Proyecciones de calidad de aire en un gran centro urbano
- Asentamiento poblacional junto a un polo petroquímico

Para cada uno, se mencionan las bases teóricas que sustentan algunos de los modelos matemáticos que se pueden aplicar, y las técnicas numéricas e implementaciones computacionales asociadas, además de presentarse resultados a modo de ejemplos.

## 2 BARRIO AFECTADO POR EMISIONES DE GASES DE COMBUSTIÓN

### 2.1 Problema y objetivo

Uno de los problemas más frecuentes referidos a la calidad de aire es el debido a las emisiones de los centros industriales. Distintos procesos industriales dependen de la generación de energía a través de la combustión de gas natural, fuel oil u otros combustibles alternativos. Los residuos gaseosos del proceso de combustión son eliminados usualmente a través de chimeneas, y no en todos los casos existe un proceso de lavado de gases y retención de material particulado, por lo cual las emisiones pueden producir impactos diversos en la calidad de aire.

Cuando la calidad y cantidad de gases erogados supera ciertos límites, o cuando las chimeneas son de relativamente baja altura, suelen ocurrir excedencias en los niveles guía definidos en la regulación vigente.

Este es el caso del presente ejemplo, en el cual una planta industrial quema grandes volúmenes de gas natural y eroga los gases de combustión a través de 7 chimeneas: 5 están asociadas al propio proceso de generación de energía para el proceso industrial, y otras 2 a sendos equipos generadores de electricidad para la planta. La altura de las chimeneas es de entre 10 y 15 m respecto del nivel de suelo.

La planta está ubicada en un área principalmente industrial, en las afueras de una ciudad. Pero a unos 500 m del predio de la planta se encuentra un barrio de unas 10 manzanas de extensión. Estudios preliminares mostraron que las concentraciones de óxidos de nitrógeno (NOx) sobre el barrio estarían en exceso respecto de los niveles recomendables.

El objetivo del estudio fue determinar con mayor precisión la influencia de la planta industrial sobre el barrio, de modo de determinar los niveles de concentración de NOx en el mismo y, consecuentemente, el nivel de riesgo asociado y el eventual impacto sobre la salud de los pobladores del lugar.

### 2.2 Metodología y modelos

Para evaluar si la situación actual de una planta industrial puede presentar problemas, inicialmente se pueden aplicar ciertos modelos simplificados<sup>1</sup>, que requieren poca información para operar, pero sobrestiman los resultados.

En este caso, se optó por realizar un monitoreo específico de calidad de aire en el lugar, y aplicar un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. Con los resultados del monitoreo se estudió el nivel de concentración de NOx en el sitio de interés, a la vez que se pudo calibrar el modelo.

El modelo utilizado es del tipo Gaussiano, el cual proviene de proponer una solución analítica para una versión simplificada de la ecuación de advección-difusión-reacción:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c = \nabla \cdot ((\nu + \nu_t) \nabla c) + R + S \quad (1)$$

$c$  : concentración  
 $t$  : tiempo  
 $\mathbf{u}$  : campo de velocidad atmosférica  
 $\nu$  : viscosidad molecular del aire  
 $\nu_t$  : viscosidad de torbellino  
 $R$  : tasa de reacción  
 $S$  : fuente/sumidero de contaminante

La ecuación (1) fue obtenida considerando condiciones de incompresibilidad y realizando un promedio de Reynolds sobre las ecuaciones de Navier-Stokes. También, se consideró que el contaminante es pasivamente transportado por la atmósfera.

Además, se consideran las siguientes simplificaciones:

- El flujo es estacionario y está caracterizado por una dirección principal de movimiento (dirección del viento)
- La viscosidad efectiva (suma de las viscosidades definidas en la ec. (1)) tiene componentes no nulas solamente sobre el plano que es perpendicular a la dirección del viento.

Así, considerando una fuente puntual la ec. (1) se reduce a:

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \nu_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \nu_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + R + Q\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \quad (2)$$

$u$  : velocidad del viento  
 $x, y, z$  : coordenadas cartesianas, asumiendo que  $x$  está en la dirección del viento y  $z$  está en la dirección vertical  
 $\nu_y, \nu_z$  : viscosidades efectivas en las direcciones  $y, z$   
 $Q$  : tasa de emisión de contaminante  
 $\mathbf{r}$  : vector posición  
 $\mathbf{r}_0$  : ubicación de la fuente

La ecuación (2) permite obtener la solución clásica para el campo tridimensional viento abajo del punto fuente:

$$c(\mathbf{r}) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{(z - h_e)^2}{2\sigma_z^2} - \frac{(z + h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (3)$$

donde la tasa de reacción se assume que representa una reacción de primer orden, y el terreno se considera plano y reflejante, siendo:

$x_0, y_0$  : posición de la fuente en el plano  $x-y$

$h_e$  : altura efectiva de la pluma

$\sigma_y, \sigma_z$  : funciones de dispersión (desviaciones estándar de la pluma Gaussiana en las direcciones  $y, z$ )

Los detalles que permiten aplicar la solución (3) a casos prácticos se presentan las referencias<sup>2,3,4</sup>. En particular, las funciones de dispersión se calculan utilizando la metodología de Hanna et al.<sup>3</sup>.

La expresión (3), debido a su carácter lineal, permite simular fuentes puntuales múltiples apelando al principio de superposición. Su implementación computacional resulta directa, y su costo en tiempo de CPU es bajo para este tipo de aplicaciones. No obstante, requiere del uso de un modelo meteorológico para determinar las condiciones de turbulencia atmosféricas, y submodelos para el cálculo de los efectos de campo cercano (dominado por el momentum inicial del flujo de gases de la chimenea), flotación térmica de las plumas debido a la temperatura de los gases de combustión, la formación de capas de inversión atmosférica y capas límites térmicas internas en las costas, remoción por estructuras edilicias, etc. En este caso se utilizó el sistema computacional SofIA<sup>4</sup> (Software de Impacto Atmosférico).

Para el caso de estudio, por ejemplo el campo de vientos se obtuvo por medición directa, a través de la instalación de una estación meteorológica in situ, con registro automático de variables cada 1 minuto (temperatura ambiente, humedad, presión, vientos, etc.).

### 2.3 Resultados

Típicamente, un modelo Gaussiano como SofIA permite obtener aproximaciones con un error de +/- 50% respecto de mediciones ambientales de concentración de contaminantes atmosféricos. Siendo que las propias mediciones tienen errores involucrados no despreciables, el margen de error suele ser aceptable a nivel de ingeniería ambiental y análisis de riesgos.

En función de que se disponga de buena información del sitio, una razonable caracterización de las fuentes y un sólido modelo meteorológico, el margen de error se puede reducir.

En este caso, incluso se dispuso de información horaria sobre la emisión de cada una de las 7 chimeneas.

La figura 1 presenta la comparación entre los resultados de monitoreo de NOx en un punto del barrio, y los resultados del modelo. Las mediciones fueron integradas en períodos de 1 hora, compatibles con la regulación y con el mínimo tiempo de integración representable con el modelo Gaussiano. Como únicamente se representaron las emisiones de la planta industrial, a los resultados de modelación se les sumó un fondo, medido y establecido en un nivel constante de  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Se observa un patrón de 18 picos, cada uno asociado a un evento de viento. La intensidad de un pico depende de las condiciones atmosféricas del momento, y el grado de actividad de la planta, medido este último en términos de cantidad de máquinas operando y potencia de trabajo de cada una de ellas. A su vez, la duración del pico guarda relación con la persistencia

de los vientos que van desde la planta hacia el barrio. Se observan picos de una hora de duración, hasta eventos de 6 horas de permanencia.

Los resultados del modelo se corresponden con los picos observados en las mediciones. Es importante remarcar que esta correspondencia se aprecia tanto en la posición temporal y extensión de los picos, como en su amplitud. Obviamente, el registro de las mediciones muestra otros picos que obedecen a otras fuentes o eventos particulares, que no son atribuibles a la planta industrial estudiada.

En algunos casos puntuales se aprecian desviaciones cualitativas entre las predicciones del modelo y el registro del monitoreo: aparecen como picos espurios y se deben al cambio significativo de la dirección del viento desde una posición de persistencia a otra, por lo cual el promedio horario no es representativo de las direcciones reales. Esto es una limitación de la metodología aplicada.

En definitiva, los resultados numéricos permiten disponer de una buena representación del efecto de las emisiones industriales sobre la zona de receptores críticos (pobladores del barrio), a partir de la cual se puede evaluar el impacto en salud (excluido aquí por no ser objetivo del presente trabajo).

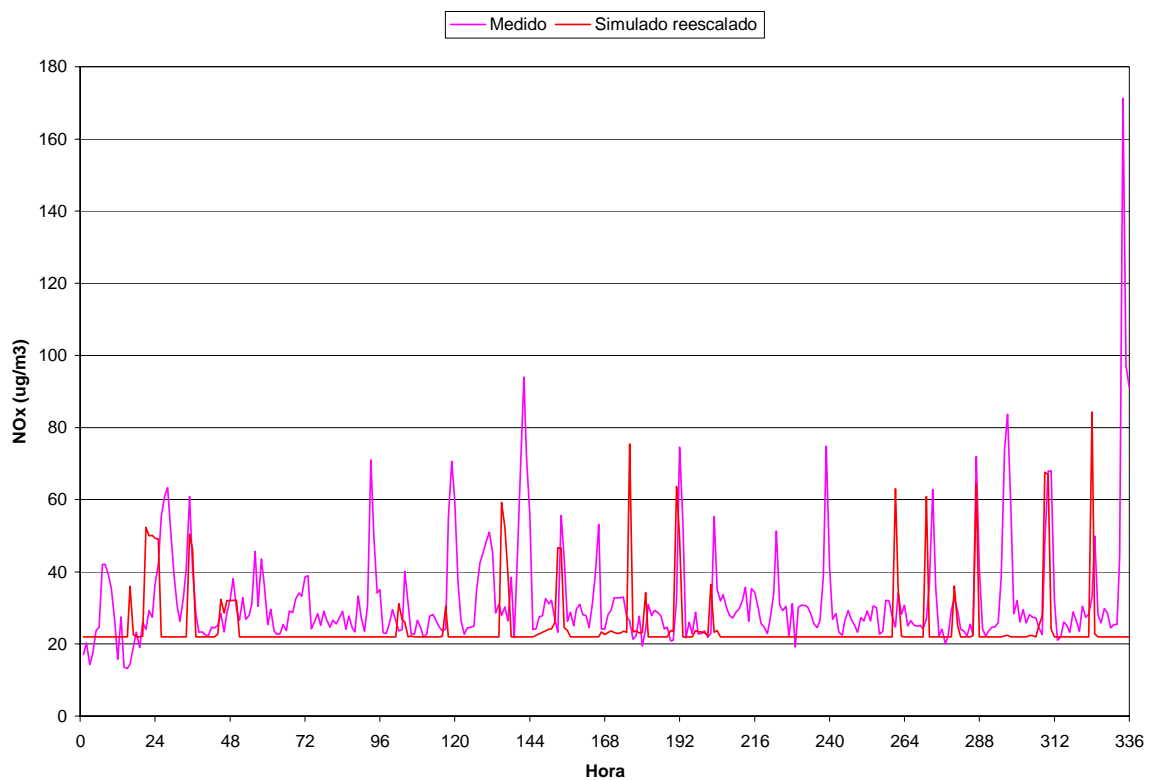


Figura 1 – Resultados de modelación en el punto de monitoreo de NOx.

### 3 PROYECCIONES DE CALIDAD DE AIRE EN UN GRAN CENTRO URBANO

#### 3.1 Problema y objetivo

Ya se mencionó que los niveles de concentración de gases contaminantes han sido correlacionados con impactos en la salud. Según el caso, estos impactos van desde irritaciones leves hasta enfermedades terminales. Entonces, tanto por la generación de enfermedades como muertes prematuras, la polución atmosférica en grandes centros urbanos es un flagelo que produce pérdidas millonarias año a año.

En este ejemplo, se evalúa el caso de la ciudad de Buenos Aires. Con 13 millones de habitantes y más de 1 millón de vehículos circulando cada día en la ciudad capital, se trata de una mega ciudad con niveles de contaminación atmosférica crecientes y, para algunos compuestos, preocupantes<sup>5</sup>.

Para estos casos, los estudios técnicos pueden servir para apoyar a establecer las políticas correctas de gestión ambiental. En este sentido, se debe cuantificar a priori cual es el impacto de las eventuales medidas mitigatorias que se plantean.

Dentro de este contexto, la US Environmental Protection Agency y el National Renewable Energy Laboratory llevaron adelante una serie de estudios en distintas ciudades del mundo, tendientes a determinar los co-beneficios en la reducción de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes locales (CL). Basados en una metodología en común<sup>6</sup>, las investigaciones buscan finalmente evaluar económicamente el impacto en de los cambios propuestos, siguiendo el siguiente esquema conceptual<sup>7</sup>:

- Planteo de medidas de mitigación de emisiones de GEI,
- Cuantificación de la línea de base (emisiones y calidad de aire),
- Cuantificación de emisiones (GEI+CL) al implementar las medidas,
- Modelación de calidad de aire urbana (CL) frente a las nuevas emisiones y en el tiempo,
- Cambios en la exposición de la población a los CL
- Cambios en el impacto en la salud: morbilidad y mortalidad
- Cuantificación económica por co-beneficios en la salud
- Factibilidad económica del proyecto (medidas)

#### 3.2 Metodología y modelos

Una vez cumplimentada la etapa de evaluación de medidas y sus correspondientes emisiones de GEI y CL<sup>7</sup>, se utilizó un modelo matemático para cuantificar los cambios a futuro en la calidad de aire de la ciudad.

Se optó por un esquema de modelo de segundo orden de tipo Gaussiano. Como la principal fuente de contaminación atmosférica en Buenos Aires es el tránsito, se realizó un tratamiento especial para el caso de las fuentes móviles, y se simuló la red completa de tránsito. Debido a la compleja distribución y forma de las calles y avenidas, se aplicó una discretización de la red de tránsito que representa cada elemento discreto con la siguiente generalización de la

expresión (3):

$$c(\mathbf{r}) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{(z - h_e)^2}{2\sigma_z^2} - \frac{(z + h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] \exp\left[-\frac{k(x - x_0)}{u}\right] \quad (4)$$

$k$  : coeficiente de reacción

la cual permite simular efectos de reacción de primer orden como<sup>5,8,9,10</sup>:

- Deposición húmeda, debida al lavado por lluvia
- Deposición seca, debida a la sedimentación del material particulado por efecto gravitatorio
- Transformación de NO<sub>x</sub> por conversión química viento abajo del centro urbano

En la presente aplicación, el modelo computacional tiene un tamaño de 67 km en la dirección W-E por 56 km en la dirección N-S, aplicándose un paso de discretización homogéneo de 250 m en cada dirección horizontal (60K nodos por capa vertical). En el centro de cada celda se computan las concentraciones de los contaminantes de interés.

Para simular las fuentes móviles se utilizó una interfase con un modelo de determinación de factores de emisión<sup>7</sup>, y otra con un sistema de información geográfico para proveer la representación geométrica de la red de tránsito. La discretización de las fuentes móviles se realiza en forma independiente a la de cálculo de concentraciones. Además, se distinguieron dos tipos de fuentes, por razones de disponibilidad y representatividad de los datos existentes:

- La red principal de tránsito, compuesta por las avenidas, autopistas y calles de mayor tránsito: son 2150 km de vías de circulación representadas con 870 tramos lineales. Para cada uno se requiere conocer la densidad de tránsito y la caracterización de la flota.
- La red secundaria de tránsito, compuesta por la circulación interna en barrios y zonas de menor flujo vehicular: se representó a través de un granulado grueso de 164 sectores considerados fuentes difusas.

Las fuentes difusas se simulan como zonas de emisión uniforme, que a su vez se discretizan horizontalmente de modo de poder aplicar la expresión (3) en pequeñas áreas. Nótese que en esta aplicación, el modelo SofIA contempla simultáneamente la simulación de fuentes lineales (arterias de tránsito), areales (tránsito difuso, emisiones residenciales y comerciales) y puntuales (18 chimeneas de las centrales térmicas de la zona de estudio).

Aunque el modelo Gaussiano es normalmente de bajo costo computacional, debido a la enorme cantidad de fuentes presentes en este problema el tiempo de CPU es elevado. Ahora bien, a los efectos del cálculo del impacto en la salud para enfermedades crónicas y agudas, se deben computar los promedios anuales y máximos horarios de concentración de los



contaminantes bajo estudio. Ello implica que se deben cuantificar los campos de concentración, al menos, durante las 8760 horas que componen un año completo. De este modo, el problema se vuelve inmanejable desde el punto de vista del costo computacional, considerando el uso de PC para las evaluaciones.

Lo referido en el párrafo anterior, que muestra que aún este tipo de modelos presentan límites de aplicación, llevó en este caso a reformular la estrategia de cálculo. Se consideró previamente el conjunto de situaciones atmosféricas durante un año (provenientes de los datos meteorológicos tomados en estaciones aeroportuarias de la zona), y se definió un conjunto de situaciones repetitivas, simulándose únicamente éstas para evitar repeticiones.

Antes de presentar los resultados, resulta interesante mostrar el grado de ajuste que se puede obtener en este tipo de aplicaciones. La figura 2 presenta la comparación entre valores de  $\text{NO}_x$  calculados con el modelo SofIA y resultados de monitoreos de campo en la ciudad de Buenos Aires. También se han otros datos de monitoreos urbanos e industriales. Para este contaminante se aprecia un muy buen acuerdo, pero una leve tendencia a la sobreestimación.

Por su parte, la figura 3 muestra el caso del material particulado inhalable ( $\text{PM}_{10}$ ). Para este contaminante se debió realizar previamente un proceso de calibración del modelo, debido a que las tasas de resuspensión de polvo por efecto del tránsito no han sido definidas para Buenos Aires. Entre los datos de la figura 3 se incluyen los del proceso de calibración, y los de validación del modelo, en este caso para promedios de 1 semana y 1 mes. El ajuste es nuevamente aceptable, aunque se observa mayor dispersión respecto del caso de  $\text{NO}_x$ .

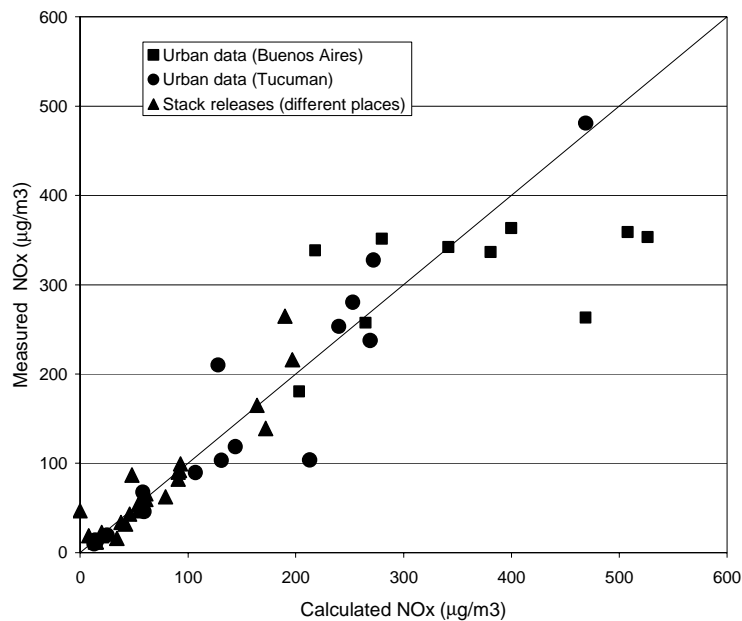


Figura 2 – Validación del modelo SofIA para  $\text{NO}_x$ .

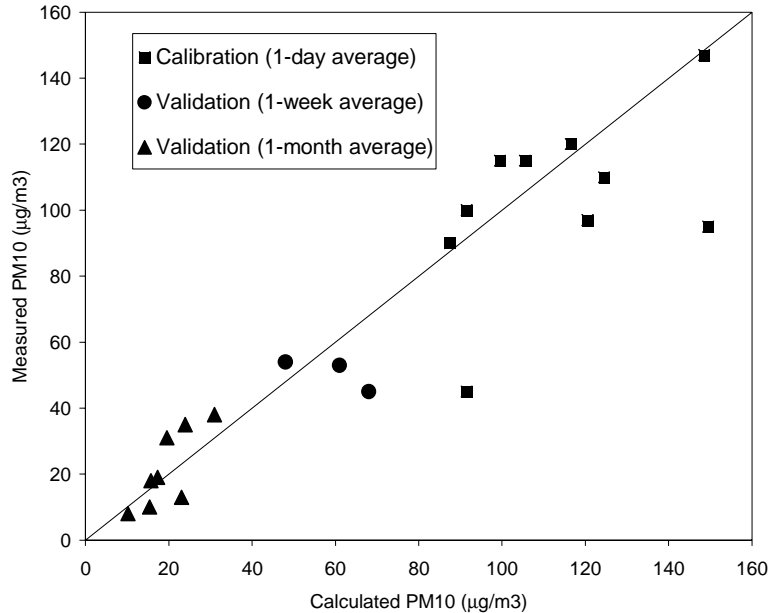


Figura 3 – Calibración y validación del modelo SofIA para PM<sub>10</sub>.

### 3.3 Resultados

Se mostrarán aquí los resultados de modelación asociados a efectos crónicos en la salud por inhalación de óxidos de nitrógeno.

La figura 4 presenta el campo promedio anual de concentración de NO<sub>x</sub> a nivel de respiración en todo el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), para el escenario de base y el año 2000 (inicio del estudio). Se observa que buena parte de la ciudad capital (BA) presenta un impacto significativamente mayor a la zona del Gran Buenos Aires (GBA). Lo mismo ocurre sobre las trazas de las principales autopistas de acceso a BA. Dentro de BA, la zona céntrica es la más impactada, con amplias zonas superando el nivel guía propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Una de las ventajas de la aplicación del modelo Gaussiano conjuntamente con la discriminación de fuentes, es que permite determinar el impacto relativo de cada una de ellas. La figura 5, por ejemplo, muestra la contribución de las fuentes puntuales, lineales y areales al campo total mostrado en la figura 4. Se observa, por ejemplo, la poca influencia de las emisiones de las chimeneas del sector eléctrico, y las zonas donde las emisiones difusas son importantes. Para el caso de la red principal de tránsito (fuentes lineales), se aprecia un impacto importante únicamente en las inmediaciones de cada corredor vial.

Para el año 2012, se evaluaron los campos promedios anuales de concentración de NO<sub>x</sub> para el escenario de base y un escenario que contempla la implementación de medidas de mitigación integradas. En ambos casos, se consideraron idénticas condiciones meteorológicas

que en el año 2000 (de modo de quitar la influencia de estas variables del análisis comparativo). La evolución del número de vehículos del parque automotor (según tipo, combustible, envejecimiento, incorporación de 0 km, etc.) como así también el cambio en las emisiones del resto de las fuentes, se sustentó en proyecciones macroeconómicas y de evolución tecnológica<sup>7</sup>. Las medidas de mitigación consideradas incluyen una mayor penetración del GNC en el parque existente y un reordenamiento de tránsito tendiente a lograr mayor fluidez y velocidades promedio de circulación en lugares estratégicos, entre otras.

La figura 6 muestra los resultados. Como se espera, existe una reducción del nivel de  $\text{NO}_x$ , el cual implica que sería menor el número de personas afectadas. La cuantificación de las diferencias dentro del contexto de la salud de la población, tiene que ver con la reducción efectiva de concentraciones, mostrada en la figura 7. Casi toda la ciudad de BA muestra una reducción de al menos  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la cual se incrementa a más de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el área céntrica. En el GBA, aquellas zonas cercanas a autopistas y rutas disminuyen sus promedios entre 5 y  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y en el resto de los distritos menos de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . No se observaron incrementos de concentraciones en comparación con el escenario de base.

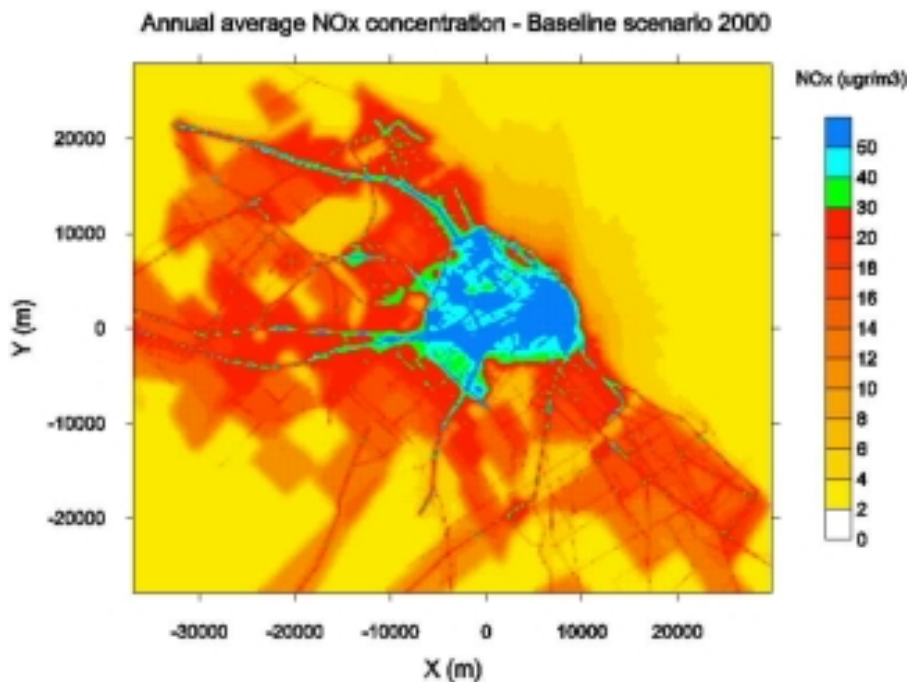


Figura 4 – Campo promedio anual de concentración de  $\text{NO}_x$ .  
Las zonas azules indican niveles de  $\text{NO}_x$  excediendo los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

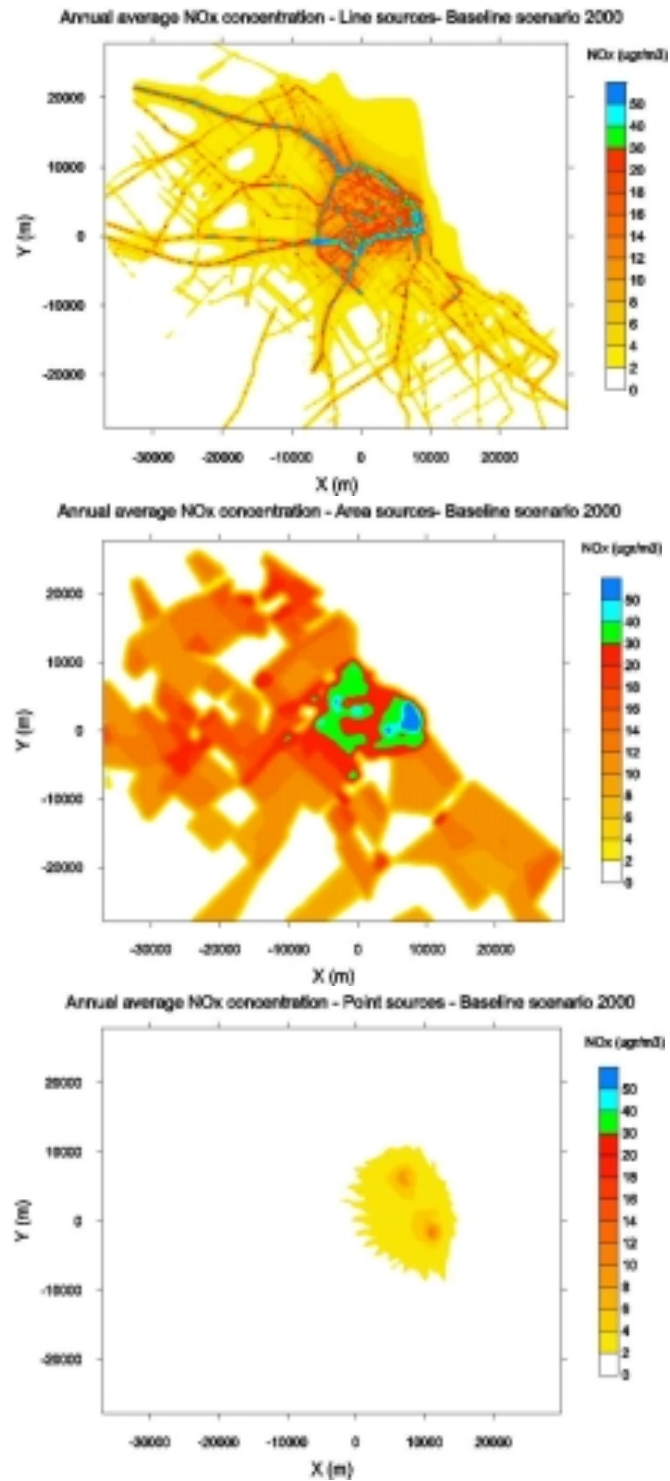


Figura 5 – Contribución al campo promedio anual de concentración de NO<sub>x</sub> por fuente: Lineal (arriba), areal (centro) y puntual (abajo).

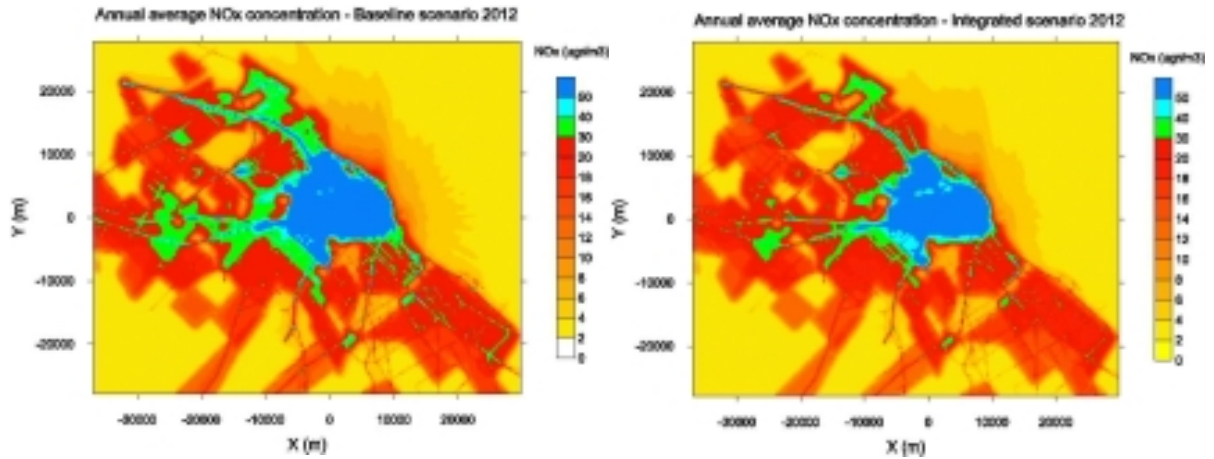


Figura 6 – Resultados del modelo para el promedio anual de NO<sub>x</sub> en 2012. Escenario base (izquierda) y de medidas de mitigación (derecha).

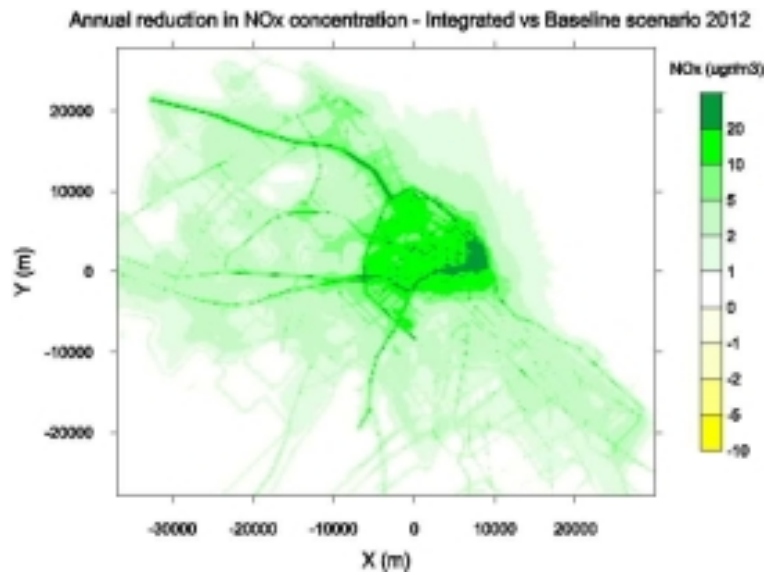


Figura 7 – Reducción del promedio anual de NO<sub>x</sub> en 2012.

Los resultados anteriores se refieren básicamente a los aspectos físicos ambientales de calidad de aire. Para cuantificar impactos en la salud, se realiza un proceso de correlación con la distribución de población, por ejemplo la mostrada en la figura 8. Se trata de la distribución poblacional de exposición a niveles de material particulado, es decir, el nivel de riesgo en la salud, cuantificado como el producto de la concentración y el nivel de exposición. En el caso particular de Buenos Aires, alrededor de 650,000 personas viven en ambientes cuyos promedios anuales de concentración de  $PM_{10}$  supera el nivel guía recomendado por la OMS. Se trata del 5% de la población.

Si se consideran las partículas respirables, capaces de penetrar en el volumen pulmonar ( $PM_{2,5}$ ), entonces la situación es distinta, estimándose que más del 80% de la población está sujeta a niveles que superan el estándar de la US EPA (ver figura 8).

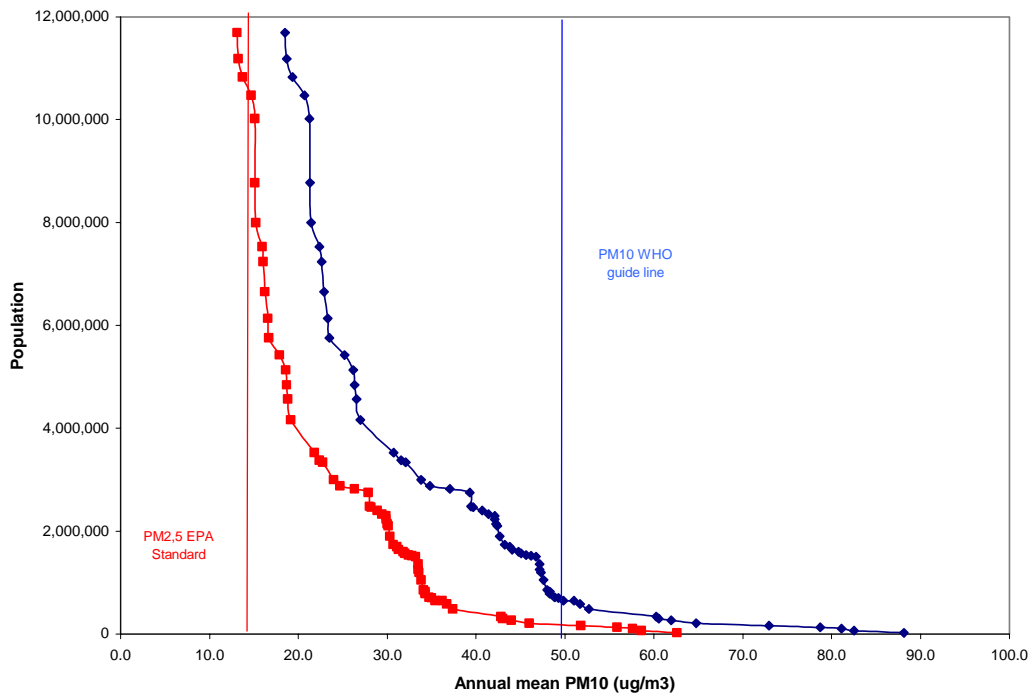


Figura 8 – Exposición de la población de BA a material particulado, año 2000.

## 4 ASENTAMIENTO POBLACIONAL JUNTO A UN POLO PETROQUÍMICO

### 4.1 Problema y objetivo

El Polo Petroquímico de Dock Sud es una zona industrial ubicada al sur del encuentro del río Riachuelo y el Río de la Plata, sobre el límite con la ciudad de Buenos Aires. Entre las industrias principales se cuentan una refinería, una central térmica, empresas de producción de sustancias químicas, y cuenta con un parque de tanques de almacenamiento que supera las 1,000 unidades, con contenidos de combustibles y algunas sustancias peligrosas<sup>11</sup>. Además, cuenta con un puerto para movimiento de buques tanque que transportan las sustancias manejadas en la zona.

Las actividades portuarias e industriales de Dock Sud producen diariamente la liberación de distintos tipos de gases contaminantes, desde residuos de combustión de combustibles fósiles hasta erogación de compuestos orgánicos volátiles. Debido a esto, la calidad del aire de la zona está deteriorada, a pesar de la proximidad del Río de la Plata con su gran potencial de ventilación.

En el epicentro del Polo, está ubicado un emplazamiento poblacional conocido como Villa Inflamable. La población de este lugar es bastante estable, con poco movimiento hacia otros lugares en su fracción de niños, razón por la cual los mismos respiran durante prácticamente la totalidad del tiempo la atmósfera de la zona. Esta exposición se sospecha que puede estar causando un impacto en la salud de la población local, debido a lo cual se realizaron estudios de monitoreo de calidad de aire simultáneamente con la evaluación directa en unos 300 niños del grado de contaminación por compuestos como benceno, tolueno, xilenos, plomo y cromo.

Dentro de este proyecto, y con motivo de la evaluación de la calidad del aire en la zona, se realizaron campañas de monitoreo con equipos portátiles de cromatografía. Se determinó la concentración de compuestos orgánicos volátiles (VOC) como benceno, tolueno y p-xileno. Las mediciones se realizaron en forma instantánea y puntual, determinándose una grilla de puntos de inmisión.

Uno de los objetivos del estudio fue tener una primera aproximación sobre el origen de las liberaciones de estos compuestos. Se planteó, entonces, combinar los datos de las mediciones con el uso de la herramienta computacional que se presenta a continuación, de modo de determinar desde qué zonas podrían ocurrir las emisiones.

### 4.2 Metodología y modelos

Se planteó una metodología de problema inverso, la cual consistente en determinar el origen e intensidad de la fuente que da lugar a la concentración de contaminantes medida en un punto de inmisión. Para ello se aplicó un modelo de advección y dispersión de cúmulos de partículas dentro de un fluido, basado en la técnica de modelación estocástica Lagrangeana e implementado como un modelo de desplazamiento aleatorio (MDA). Las bases teóricas de este tipo de esquemas son conocidas, y para este modelo han sido presentadas anteriormente<sup>12</sup>.

Las principales ventajas de las soluciones obtenidas con un MDA sobre aquellas provenientes de las ecuaciones de advección-difusión son:

- No se sobrestima la dispersión para tiempos menores al tiempo Lagrangiano
- Son más precisas en la zona de campo cercano
- Son más precisas en flujos sobre terrenos (geometría) complicados

El MDA utilizado en este estudio resuelve la siguiente generalización de la ecuación de advección-difusión, para el caso de un conjunto de especies reactivas:

$$\frac{\partial C_n}{\partial t} + U_i \frac{\partial C_n}{\partial r_i} = \frac{\partial}{\partial r_i} \left( K_{ij} \frac{\partial C_n}{\partial r_j} \right) + \phi_{nm} \quad n, m = 1, N \quad (5)$$

donde  $C_n$  es la concentración de la  $n$ -ésima especie representada,  $t$  el tiempo,  $U_i$  la  $i$ -ésima componente del vector velocidad del flujo,  $r_i$  la  $i$ -ésima componente del vector posición,  $K_{ij}$  la difusividad de torbellino,  $\phi_{nm}$  un término de interacción entre las especies  $n$  y  $m$ , y  $N$  el número total de especies. El término especie aquí indica cierta propiedad distintiva de la partícula (gas, diámetro de sedimento o burbuja, tipo de huevo o larva, componente químico, nivel de temperatura, etc.).

El modelo computacional está planteado sobre una malla espacial tridimensional estructurada, de forma rectangular y con elementos horizontales rectangulares. La red espacial vertical puede ser irregular, y provenir tanto de una discretización en coordenadas cartesianas como coordenadas sigma. La discretización de las variables fluidodinámicas, necesarias para alimentar externamente el modelo, se realiza sobre una malla del tipo staggered<sup>12</sup>.

El modelo contempla submódulos para la cuantificación de los siguientes efectos sobre las partículas<sup>13,14,15</sup>:

- Advección
- Difusión
- Empuje propio (deposición o flotación)
- Reacción

Los detalles de implementación, condiciones de borde, restricciones de estabilidad numérica para el paso de tiempo, los métodos disponibles para recuperar un campo de concentraciones a partir de la distribución de partículas, como así también los ensayos de validación del modelo, fueron presentados anteriormente<sup>16</sup>.

### 4.3 Resultados

Durante la presente aplicación, el campo de velocidad de viento fue estimado a partir de los registros de una estación meteorológica de monitoreo continuo. Los parámetros de dispersión se calcularon en cada momento mediante un modelo<sup>13</sup> alimentado con los datos meteorológicos registrados.

El modelo fue utilizado en modo inverso, es decir, corriendo el campo de velocidades y las condiciones de dispersión hacia atrás en el tiempo. Si bien el proceso de difusión efectiva en



la atmósfera es termodinámicamente irreversible, no hay limitación en el uso del modelo computacional para la simulación en contra de la flecha del tiempo.

Aceptada esta metodología, en la figura 9 se muestran las trayectorias inversas de unos 10 puntos de inmisión medidos, indicando una amplia zona como de probable origen de los VOC liberados. En el análisis<sup>11</sup>, no reproducido aquí por razones de extensión del trabajo, se determinó un índice de recurrencia por zonas, que involucra los resultados del modelo, la intensidad de las concentraciones medidas y el uso industrial o portuario de cada zona.

Ahora bien, las trayectorias mostradas corresponden al camino más probable para una partícula fluida. Pero el origen de emisión podría no estar sobre esta trayectoria, si se tiene en cuenta el efecto de la dispersión atmosférica. Para ello, se realizaron ensayos para múltiples partículas y se determinó la zona de probable emisión, definida como aquella para la cual el 99% de las partículas caen en su interior. La figura 10 muestra un par de ejemplos, donde se indican la trayectoria inversa más probable (idem figura 9) y ambas envolventes conteniendo el 99% de las partículas. Como se espera, a medida que crece la distancia al punto de inmisión, aumenta el área de probable emisión.

En los casos en que se realizó un monitoreo continuo y se detectaron picos, su duración permitió restringir la zona de probable emisión, hasta prácticamente identificar la fuente, como sucede en el caso del área portuaria indicada en la figura 11.

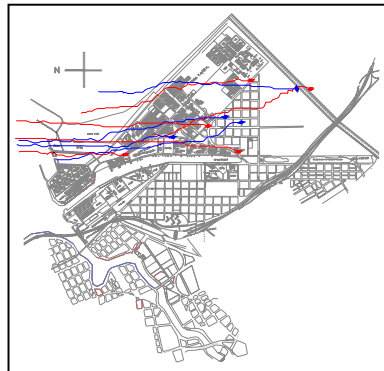


Figura 9 - Trayectorias inversas para distintos puntos de inmisión medidos.



Figura 10 – Trayectorias inversas y envolventes para dos puntos de inmisión.

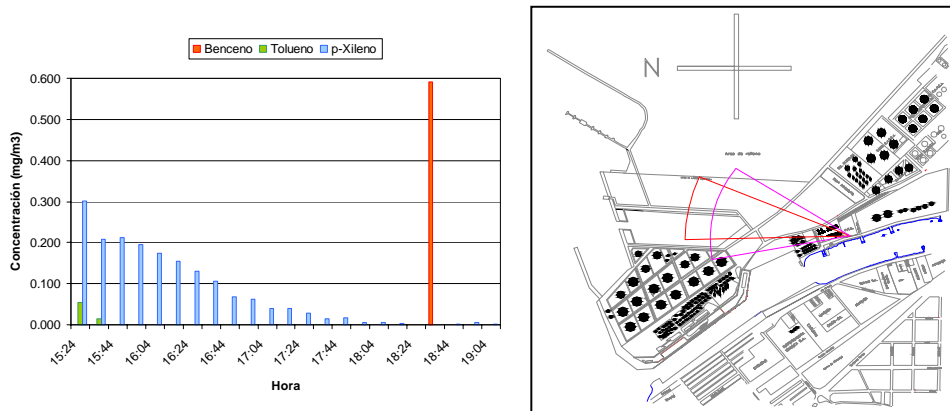


Figura 11 – Izq.: Concentración de VOC en monitoreo continuo. Der.: Área de probable emisión de Benceno. El área en rojo indica la zona definida por las condiciones medias de viento, mientras que el área en rosa incluye el efecto de la turbulencia.

## 5 CONCLUSIONES

Se presentaron ejemplos del uso de distintas herramientas computacionales para la evaluación del nivel de contaminación atmosférica y su consecuente impacto en la salud de los receptores humanos. En cada caso se describieron los modelos matemáticos utilizados, y sus respectivas implementaciones computacionales.

En el caso de los modelos Gaussianos, se mostró que pueden representar muy aceptablemente las emisiones de fuentes puntuales como chimeneas y antorchas, y presentan un bajo costo computacional. El mismo tipo de modelo pero aplicado a grandes centros urbanos, muestra limitaciones de aplicabilidad por el excesivo tiempo de cómputo requerido.

Para problemas inversos, modelos del tipo Lagrangeano pueden ser una alternativa aceptable, aunque dependen fuertemente de datos de entrada básicos, como los campos fluidodinámicos.

Como conclusión, el trabajo mostró que las metodologías empleadas resultaron aptas para el nivel de precisión que se requiere, y que permiten cuantificar razonablemente impactos en la salud, a través de la evaluación de dosis.

## 6 RECONOCIMIENTOS

El autor desea agradecer a Japan International Cooperation Agency (JICA) por la posibilidad de utilizar los resultados de mediciones y modelación del estudio del polo petroquímico de Dock Sud, financiado por JICA.

Se reconoce a U.S. Environmental Protection Agency y National Renewable Energy Laboratory, quienes financiaron el estudio de calidad de aire en Buenos Aires, bajo contrato N° AAX-1-30430-01.

Otros casos de estudio presentados en este trabajo fueron realizados por el autor para JMB Ingeniería Ambiental S.A., siendo los respectivos clientes mantenidos en reserva para esta comunicación.

## 7 REFERENCIAS

- [1] [www.epa.gov](http://www.epa.gov)
- [2] A.C. Stern (ed.), *Air Pollution*, volume I, Academic Press, New York (1976).
- [3] S.R. Hanna, G.A. Briggs and R.P. Hosker, *Handbook of Atmospheric Diffusion*, DOE/TIC-11223, Dept. of Energy, 102 pp. (1982).
- [4] Tarela, P. A. and Perone, E. A., *A Cost-Effective Computational System for Linking Air Pollutant Emissions and Population Exposure in a Megacity: SOFIA Model*, Journal of Computational Methods in Science and Engineering (accepted for publication, 2004).
- [5] Tarela, P. A. and Perone, E. A., *Air Quality Modeling of the Buenos Aires Metropolitan Area*, Report prepared to Integrated Environmental Strategies Project, U.S. Environmental Protection Agency (EPA) and National Renewable Energy Lab. (NREL), USA (2002).
- [6] *Handbook on Preparing and Developing an IES Project*, Official US EPA Publication (several contributing authors, in preparation, 2004)
- [7] Gaioli, F.H., Tarela, P.A., Sörensson, A., Svensson, T. and Conte Grand, M., *Valuation of Human Health Effects and Environmental Benefits of Greenhouse Gases Mitigation and Local Air Pollution Abatement Options in the Buenos Aires Metropolitan Area*, Report developed under the International Co-controls Analysis Project of the National Renewable Energy Laboratory and the Integrated Environmental Strategies of the US Environmental Protection Agency (2002)
- [8] M. Jindal and D. Heinold, *Development of Particulate Scavenging Coefficients to Model Wet Deposition from Industrial Combustion Sources*, 84th Annual Meeting of AWMA, paper 91-95.7, Vancouver (1991)
- [9] H. Jorquera, *Air Quality at Santiago, Chile: a Box Modeling Approach-I, Carbon Monoxide, Nitrogen Oxides and Sulfur Dioxide*, Atmospheric Environment **36** (Nº2), pp. 315-330 (2002)
- [10] Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N., *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2nd. Edition, Wiley, New York (1998)
- [11] *Plan de Acción Estratégico (PAE) para la gestión ambiental sustentable de un área urbano-industrial a escala completa*, JMB para Japan International Cooperation Agency (2003)
- [12] Tarela, P.A., *Seguimiento de trazas de contaminación mediante la aplicación de un modelo Lagrangeano en modo inverso*, Mecánica Computacional Vol. XXII, Editado por M.B. Rosales, V.H. Cortínez y D.V. Bambill (2003)
- [13] Gardiner, C.W., *Handbook of stochastic methods for physics, chemistry and the natural sciences*, Springer-Verlag, Berlin (1983)
- [14] Swaford, B.L. and Guest, F.M., *Lagrangian statistical simulation of the turbulent motion of heavy particles*, Boundary Layer Meteorology, 54, pp. 147-166 (1991).
- [15] Rodean, H.C., *Stochastic Lagrangian models for turbulent diffusion*, American Meteorological Society, 45 Beacon St., Boston MA 02108 (1996)
- [16] Tarela, P.A., *Modelo Lagrangeano para el transporte de contaminantes y material particulado en flujos turbulentos*, Informe INA – LHA 201-04-03 (2003)