

## **MODELO DE CALIDAD DE AIRE URBANA EN ALTA RESOLUCIÓN PARA EL GRAN LA PLATA**

D. Allende<sup>1</sup>, F. Ruggeri<sup>2</sup>, E. Puliafito<sup>3</sup>, Y. Sanchez<sup>4</sup>, A. Porta<sup>5</sup>

Grupo de Estudios de la Atmósfera y el Ambiente (GEAA)  
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza  
Rodríguez 273 Ciudad Mendoza CP (M5502AJE)  
Tel. 0261-5244691 e-mail: david.allende@frm.utn.edu.ar  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Centro de Investigaciones del Medio Ambiente (CIMA) – Facultad de Ciencias Exactas, UNLP

*Recibido 12/08/16, aceptado 10/10/16*

**RESUMEN:** Este trabajo presenta la aplicación del sistema de modelado WRF/CALMET/CALPUFF para evaluar la calidad del aire en el Gran La Plata. Por medio de la utilización de información públicamente disponible se confeccionó un inventario de emisiones de material particulado como escenario de base, para la posterior estimación de los niveles de concentración en el centro urbano y alrededores. Los resultados de la simulación se compararon con mediciones de calidad de aire en varios sitios de monitoreo. El tráfico vehicular y la actividad industrial son las principales actividades que generan emisiones de partículas. Un análisis de los resultados evidencia la adecuada representación de la variabilidad de las concentraciones medidas con el mencionado sistema de modelado, encontrando al 86% de las simulaciones en un factor de 2 de las observaciones promediadas en 24 horas. Finalmente, los resultados resaltan el potencial del uso de inventarios de emisiones en alta resolución para fuentes vehiculares.

**Palabras clave:** calidad de aire urbana, modelado de emisiones, Gran La Plata, campaña de monitoreo, material particulado.

### **INTRODUCCION**

La calidad del aire es un problema ambiental que en la actualidad representa un gran riesgo para la salud en varias ciudades de América Latina (Bell et al., 2011; Hidalgo and Huizenga, 2013). En los últimos años, y debido a la necesidad de contar con una evaluación más detallada de la contaminación atmosférica en escala local y urbana, ha resultado de interés simular campos meteorológicos y de calidad de aire en alta resolución (Allende, 2011; Borge et al., 2014; Coelho et al., 2014). A pesar de las numerosas aplicaciones de simulación numérica con modelos del tipo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) en diversos centros urbanos (ver por ejemplo, Amorim et al., 2013; Kwak et al., 2015), su característica de alta resolución limita su aplicación en áreas grandes o en simulaciones de periodos de tiempo largos. En tal sentido, los modelos Gaussianos constituyen una elección natural para la dispersión de contaminantes en escala urbana, de forma consistente con un propósito regulatorio, en particular en el modelado de dispersión de procesos de corto alcance (hasta decenas de kilómetros desde la fuente de emisión), sobre áreas de complejidad variable y en diferentes condiciones atmosféricas (Allende, 2011; Allende et al., 2012; Puliafito et al., 2011; Puliafito et al., 2011).

<sup>1</sup> Becario Postdoctoral UTN-FRM

<sup>2</sup> Becaria Doctoral CONICET

<sup>3</sup> Investigador Independiente CONICET

<sup>4</sup> Investigador Asistente CONICET

<sup>5</sup> Investigador Independiente CIC PBA

Más allá del desarrollo de los modelos de calidad de aire, un inventario de emisiones apropiado es todavía una variable de fundamental importancia para la precisión global de las estimaciones de calidad de aire, especialmente en escala local. En el caso de las emisiones vehiculares, que son frecuentemente la principal fuente de contaminantes en ciudades, solamente una representación de escala fina permite estimar de manera precisa hot-spots y ambientes altamente contaminados (Puliafito et al., 2014; Quaassdorff et al., 2016; Timmermans et al., 2013).

El conglomerado metropolitano alrededor de la ciudad de La Plata, que incluye las áreas urbanas del partido de La Plata y los partidos Berisso y Ensenada, posee 787 297 habitantes y una gran actividad comercial, industrial y administrativa. Cianni et al., (2009); Colman Lerner et al., (2013); Massolo et al., (2002); Ratto et al., (2012); Rehwagen et al., (2005); Wichmann et al., (2009) entre muchos otros, caracterizaron ambientalmente el área de forma sistemática, haciendo hincapié en el impacto del Polo Petroquímico, los efectos en la salud y correlaciones entre concentraciones de diversos contaminantes. Este trabajo propone la simulación de calidad de aire urbana en el Gran La Plata en alta resolución, basado en un inventario de emisiones de microescala, de manera de complementar la información de monitoreo que caracteriza el área. En tal sentido se estimó la dispersión de material particulado (MP) con tamaño aerodinámico menor a 10  $\mu\text{m}$  y menor a 2.5  $\mu\text{m}$  (MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub> respectivamente) por medio del sistema de modelado WRF/CALMET/CALPUFF. Las salidas del modelo se compararon con mediciones locales en diferentes puntos del centro urbano.

## MÉTODOS

### *Sistema de modelado*

La estimación de la dispersión de MP se realizó con el sistema WRF/CALMET/CALPUFF. CALPUFF es un modelo de dispersión por soplos o “puffs”, multicapa, de estado no estacionario y multicomponente, que puede simular los efectos de condiciones meteorológicas variables en el transporte, transformación y remoción de contaminantes. CALPUFF utiliza la formulación del sople Gaussiano para calcular la concentración de un contaminante en un lugar determinado a sotavento, y la deposición en determinadas ubicaciones específicas (receptores) a nivel respirable (1.5 m de altura). CALPUFF realiza sus cálculos tomando en cuenta la geografía del terreno así como el tipo de uso de suelo sobre el cual se hace la modelación. Los algoritmos detallados para los diferentes procesos físicos involucrados en la dispersión y transporte de contaminantes y otros detalles sobre aplicaciones del modelo pueden encontrarse en Scire et al., (2000); U.S. EPA, (2008). Se eligió para este estudio la versión 6.42 de CALPUFF (última aprobada por la EPA) debido a la capacidad superior del mismo para estimar dispersión en ambiente complejos.

El modelo meteorológico CALMET consiste en un módulo de diagnóstico de campos de vientos y módulos micro-meteorológicos para la capa límite sobre tierra y sobre agua. El módulo de diagnóstico utiliza una aproximación de dos pasos ajustando primero un campo de vientos de prueba inicial influenciado por efectos del terreno. Este campo de pruebas es originado por simulaciones en alta resolución utilizando el modelo de pronóstico de escala regional Weather Research and Forecasting (WRF). El segundo paso consiste en un procedimiento de análisis objetivo para la introducción de datos observacionales para la generación del campo de vientos final.

Weather Research and Forecasting model (WRF) es un modelo meteorológico no-hidrostático que resuelve en una escala regional las ecuaciones dinámicas primitivas considerando la conservación de los flujos escalares y de masa a partir de condiciones iniciales y de contorno obtenidas de modelos de circulación global. Para ello cuenta con varias estructuras dinámicas y numerosas parametrizaciones físicas que permiten representar distintos procesos, permitiendo aplicarlo en diferentes escalas que van desde las decenas hasta los miles de kilómetros. De todas las opciones dinámicas, la versión en coordenadas de masa denominada Advanced Research WRF (ARW, versión 3.5.1); (Skamarock et al., 2008) es la utilizada para este estudio. Detalles sobre el modelo y publicaciones relevantes pueden encontrarse en <http://ruc.fsl.noaa.gov/wrf/WG11/>. En este caso, se definieron 3 dominios anidados con 50 niveles verticales para realizar el downscaling de las propiedades físicas de la atmósfera. Un dominio mayor (d01), resolución de 27 km, 1620 km N/S x 1620 km E/W, un dominio anidado (d02), resolución de 9 km, 549 km N/S x 549 km E/W) y un dominio menor (d03), de resolución 3 km, 237 km N/S, 246 km E/W. Todos los dominios se inicializaron utilizando datos de análisis de un modelo global, en el caso particular del Sistema propuesto, se usaron datos del NCEP-GFS (National Center for Environmental Prediction-Global Forecasting System) que cubren 0.5° x 0.5° de latitud y longitud

en períodos de 6 horas. Asimismo, el dominio exterior utiliza también estos datos como condiciones de contorno. Las condiciones de contorno de los dominios anidados están suministradas por la meteorología calculada en el dominio mayor. Las parametrizaciones físicas y dinámicas del modelado con WRF han sido adaptadas y evaluadas para este caso específico de estudio, de manera de obtener simulaciones de campos meteorológicos realistas, con las técnicas presentadas en Mulena et al., (2016); Puliafito et al., (2015).

#### *Dominio de modelado*

Para considerar la dispersión de los contaminantes desde todas las fuentes simuladas, el modelo meteorológico CALMET debe cubrir todas las fuentes y receptores relevantes. El dominio de modelado adoptado para el estudio de la dispersión de MP abarca un área de 35 x 35 km<sup>2</sup> centrado en 34.9S y 58.0°W, abarcando las áreas urbanas de La Plata, Berisso y Ensenada (ver Figura 1). Se utilizó una resolución de grilla de 500 m para esta aplicación. Las especificaciones de la grilla de modelado de CALMET se detallan en la Tabla 1. Se utilizaron 8 niveles verticales para simular la atmósfera hasta una altura de 4000 metros sobre el nivel del suelo. Los puntos de mitad de celda elegidos fueron 10, 25, 50, 125, 250, 500, 1000 y 2000 metros sobre el nivel del suelo de manera de obtener mayor resolución cerca de la superficie terrestre y capturar adecuadamente las variaciones de los gradientes en la capa límite.

Parámetro de la grilla		Valores seleccionados para la simulación con CALMET
Proyección del mapa		UTM
Zona UTM		21 S
Datum		WGS-84
Número de celdas grilladas (nx,ny)		70, 70
Esquina SW (x,y)	Este (km)	392.700
	Norte (km)	6120.000
Espaciado de grilla (m)		500

*Tabla 1. Proyección del mapa y parámetros horizontales de la grilla de modelado.*

#### *Inventario de emisiones*

Para el inventario en el área de estudio se consideraron tanto fuentes puntuales, como de área y de línea de material particulado (MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub>). El cálculo de las emisiones se hizo de acuerdo a la ecuación (1):

$$E_i = \sum_{i,j,k} (FE_{i,j,k} \times A_{j,k}) \quad (1)$$

Donde  $E_i$  es la emisión total para la especie  $i$ ,  $FE_{i,j,k}$  es el factor de emisión para la especie  $i$ , fuente  $j$  y combustible  $k$  y  $A_{j,k}$  es el nivel de actividad para la fuente  $j$ .

Las emisiones de área se distribuyen espacialmente en la grilla de modelado por medio de coeficientes representativos para cada fuente (por ejemplo, tipo de uso de suelo, densidad de población, etc.), utilizando herramientas GIS y basándose en la ecuación (2):

$$E_{i,x} = E_i \times (\text{valor})_x / (\text{valor})_{\text{tot}} \quad (2)$$

Donde  $E_{i,x}$  es el valor de emisión en la celda  $x$ ,  $E_i$  es la emisión en toda la grilla,  $(\text{valor})_x$  el coeficiente espacial en la grilla  $x$  y  $(\text{valor})_{\text{tot}}$  es el valor del coeficiente atribuido a toda la grilla. Finalmente la desagregación temporal de las emisiones se realizó de acuerdo a (3):

$$E_{h,i,x} = E_{i,x} \times M_i \times D_i \times H_i \quad (3)$$

Siendo  $E_{h,i,x}$  la emisión horaria de la especie  $i$  en la celda  $x$ ,  $E_{i,x}$  es el valor de emisión en la celda  $x$  para la especie  $i$  y  $M_i$ ,  $D_i$  y  $H_i$  son los coeficientes de distribución mensual, diario y horario respectivamente.

Las fuentes de emisión se clasificaron en 10 categorías, siguiendo los criterios establecidos en European Environment Agency; (2013).

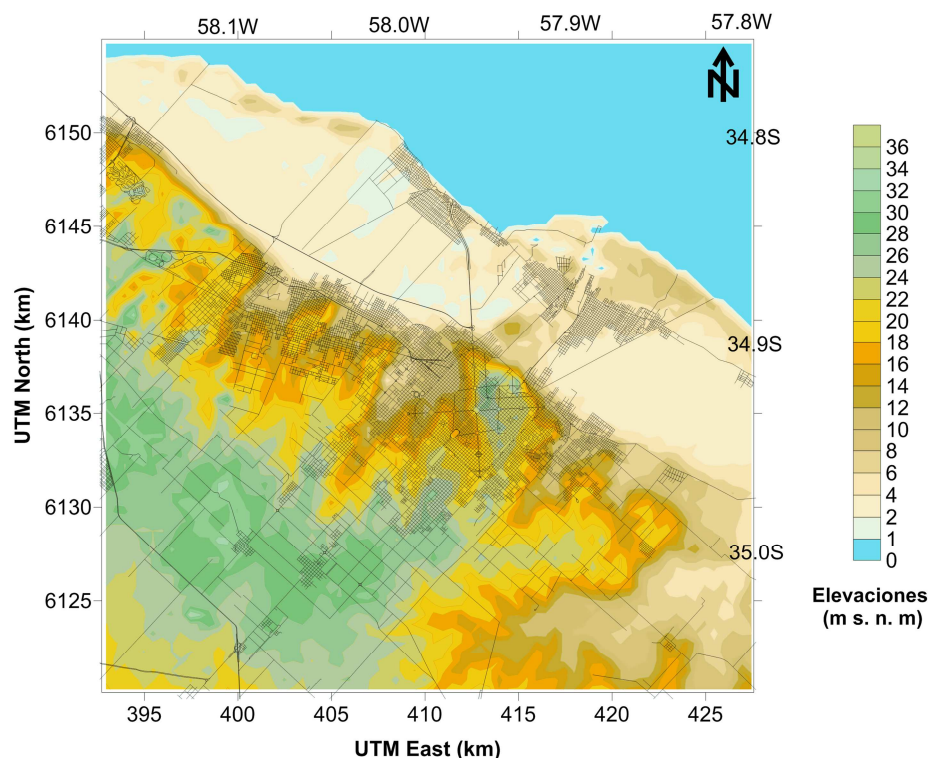


Figura 1. Dominio de modelado de CALMET/CALPUFF. Se detallan además las elevaciones del terreno y las principales autopistas y calles.

### Sector Energía

En esta categoría se agrupan las emisiones de plantas de combustión (> 50 MWth) para la generación de electricidad a partir de combustibles gaseosos o líquidos. En tal sentido, la Central Térmica Ensenada de Barragán funciona con dos equipos generadores del tipo turbinas de gas a ciclo abierto de una potencia neta de 2 x 275 MW, empleando como combustible gas natural o gas oil, y una turbina de vapor de aproximadamente de 319 MW, con dos equipos completos recuperadores de calor para su cierre de ciclo, con refrigeración por circuito abierto de agua de río. La central Dique es una planta de generación térmica alimentada a base de gas y diésel que posee cuatro unidades de 17 MW, que suman una capacidad instalada de 68 MW.

Las fuentes se trataron como puntuales y se utilizaron datos de uso de combustible (desagregados por tipo) (CAMMESA, 2014) y factores de emisión de European Environment Agency, (2013). Las variaciones horarias de las emisiones correspondientes al Sector Energético se tomaron de los partes postoperativos generados por CAMMESA.

### Sector Industria Manufacturera

La región cuenta con establecimientos de gran tamaño pertenecientes a empresas líderes de escala transnacional (como YPF) y establecimientos pertenecientes a casi la totalidad de las divisiones de la industria manufacturera, siendo las ramas más importantes según la cantidad de establecimientos son la “alimenticia” (30%) y la “fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipo” (28%), seguidas por las industrias de “papel, ediciones e impresiones” (12%) y por la “fabricación de productos químicos y derivados del petróleo” (11%). El Polo Petroquímico Ensenada basa su actividad

en el procesamiento de crudo y está integrado por 27 plantas industriales divididas en tres grupos: una parte de lubricantes, una de destilería y la última de refinería, que es la más importante de Argentina, pudiendo llegar a procesar 38.000 m<sup>3</sup> por día de crudo. Las plantas producen compuestos aromáticos (benceno, tolueno, xilenos), alifáticos (pentano, hexano, heptano), anhídrido maleico y coque de petróleo, entre otros.

Para las facilidades industriales grandes se utilizó la información de producción del Instituto Petroquímico Argentino, (2014) para determinar el nivel de actividad y factores de emisión de European Environment Agency, (2013). Para establecimientos industriales menores, se estimó el consumo energético de acuerdo a los tipos de combustibles determinados por el Ministerio de Energía para el sector Industrial, usando eficiencias energéticas para plantas de proceso características tomadas de Saygin et al., (2009). Las emisiones se ubicaron espacialmente de acuerdo a las coordenadas geográficas de cada unidad industrial y no se incluyó variabilidad temporal.

### *Sector Navegación*

El Puerto La Plata se encuentra ubicado frente a la vía navegable troncal del Río de la Plata, por la que se canaliza la mayor parte del tráfico comercial de la Argentina. El puerto cuenta con una longitud aproximada de 4.800 m. de muelles, de los cuales 2.500 m. son utilizados por empresas privadas y 1.300 m. que se encuentran operables para el uso público. Se encuentra además dentro del complejo portuario el puerto privado Ingeniero Rocca de la firma SIDERAR. La operativa que caracteriza a este puerto está definida por el manipuleo de hidrocarburos y sus derivados, y también importantes movimientos de carbón y productos siderúrgicos.

Las emisiones se estimaron para 4 tipos de barcos (ver Tabla 2), de acuerdo a las ecuaciones descritas en la guía de la European Environment Agency, (2013), (Tier 2). La estimación se hizo utilizando datos de arribo, calculando el consumo de combustible para cada tipo de motor y los respectivos factores de emisión. La desagregación espacial se hizo en las zonas de muelles, considerando la probabilidad de movimiento en estas áreas, de acuerdo al tipo de embarcación y tipo de muelle. Las emisiones calculadas se distribuyeron en valores horarios constantes.

<b>Tipo</b>	<b>Número de buques anuales</b>	<b>Consumo de combustible maniobra (Gg/año)</b>	<b>Consumo combustible en puerto (Gg/año)</b>	<b>Energía (GJ/año)</b>
Carga a granel líquida	100	823	411	53
Carga a granel seca	100	1319	660	86
Carga general	401	1706	853	111
Remolcadores	400	1153	577	75

*Tabla 2. Detalle de la actividad portuaria en el puerto de La Plata ([www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com)). El consumo de combustible se estimó de acuerdo a IPCC, (2006).*

### *Sector Transporte carretero: Modelo de emisiones vehiculares*

Las localidades de La Plata, Berisso y Ensenada poseen un parque automotor que representa casi el 7% del total de la Provincia de Buenos Aires, con un promedio de 2.7 vehículos por habitante. Para la estimación y distribución en alta resolución de las emisiones de todo el transporte carretero se utilizó un enfoque metodológico del tipo top-down detallado en Puliafito et al., (2015). En tal sentido, se utilizaron herramientas SIG asociadas con la siguiente información: a) Datos puntuales: Mapas de localidades y censo de Tránsito Diario Medio Anual TDMA y venta de combustible por localidades; b) Datos de área o polígonos: población, densidad poblacional y otros indicadores económico – sociales; c) Datos lineales: Mapas de calles y rutas clasificados en accesos, rutas troncales, rutas nacionales, rutas provinciales, primarias, secundarias y terciarias y d) Datos satelitales: Imagen satelital Earth at night (NOAA-NGDC, 2010).

En primer lugar se redefinieron las áreas urbanas utilizando el mapa de luces nocturnas en combinación con los datos poblacionales por distrito en una grilla de 2.5 km de resolución. Se asoció el consumo de combustible (motonaftas, gas-oil o GNC) en cada distrito, de forma proporcional a la densidad poblacional de cada centro urbano distribuyéndolo a partir de la convolución entre la información por grilla y una función filtro bi-gaussiana. Luego se determinó la actividad (VKT: vehículo km transportados) en cada celda de la grilla clasificando los segmentos en cada celda en jerarquías: accesos troncales, calles primarias y caminos secundarios. Los vehículos diarios en cada segmento se determinan entonces dividiendo el VKT por la longitud de cada segmento. Este valor permite la comparación de estos resultados con las estadísticas de TDMA existentes (ver Tabla 3). Finalmente, las emisiones grilladas para cada contaminante se estiman en función del consumo de combustible y un factor de emisión promedio para cada combustible quemado, sumando la contribución de todos los segmentos en cada grilla. La desagregación temporal de las emisiones se hizo con los mismo coeficientes que se usaron para la Ciudad de Buenos Aires en Allende et al., (2010).

Variable	Unidad	Nafta	Gasoil	GNC	Total
Proporción vehículos	%	33.0	35.5	31.5	100
VKT diario	vehículo km (miles)	848	922	789	2559
Eficiencia	km/l o km/m <sup>3</sup> *	11	9	14	-
Consumo diario	TJ	2.45	3.70	1.96	8.11

Tabla 3. Tasas de actividad vehicular para el área de estudio. (\*) Unidades para GNC.

#### Sector Combustión en pequeña escala

En esta categoría se incluye el consumo de combustible doméstico para calentamiento y cocinar, incluyendo chimeneas, estufas y calderas; y el consumo en el sector productivo terciario incluyendo el sector comercial. El cálculo de las emisiones se basa en estadísticas del Ministerio de Energía que detalla el consumo de diferentes tipos de combustibles en el sector residencial y comercial (Tabla 4) y factores de emisión de European Environment Agency, (2013).

La desagregación espacial se hizo con mapas de uso de suelo y nivel de urbanización definido por la densidad de población. La desagregación temporal se hizo por medio de coeficientes dependientes de la estación de año y hora del día establecidos para el área de estudio de acuerdo a la metodología establecida en Allende et al.,(2010).

	Consumo de energía en el sector residencial (GJ)	Consumo de energía en el sector comercial y público (GJ)
Leña	91.821	45.910
Gas Distribuido por Redes	8.492.233	1.351.320
Gas Licuado	1.262.585	210.431
Diesel Oil + Gas Oil	-	98.599
Fuel Oil	-	49.299
Carbón de Leña	120.570	80.380

Tabla 4. Consumo de energía anual estimado para el Gran La Plata en base al Balance Energético Nacional 2014.

#### Sector Aviación

El aeropuerto de La Plata se encuentra a 7 km al sureste del centro de la ciudad de La Plata, centrándose en la actividad de distintas dependencias provinciales, escuelas de vuelo, charter, particulares y turismo. De acuerdo con la International Civil Aviation Organization (ICAO), los ciclos de despegue y aterrizaje incluyen todas las actividades cerca del aeropuerto por debajo de los 914 m (3000 pies). En tal sentido, se utilizaron las estadísticas del Organismo Regulador del Sistema Nacional de Aeropuertos (ORSNA, 2016) para contabilizar el número de vuelos anuales. Los factores

de emisión durante los ciclos de despegue y aterrizaje se tomaron de la European Environment Agency, (2013), considerando los combustibles detallados en las estadísticas de Ministerio de Energía y Minería. Se utilizaron las coordenadas del aeropuerto y herramientas SIG para localizar espacialmente las emisiones y el perfil temporal de las emisiones se desarrolló a partir de datos históricos del movimiento aeroportuario.

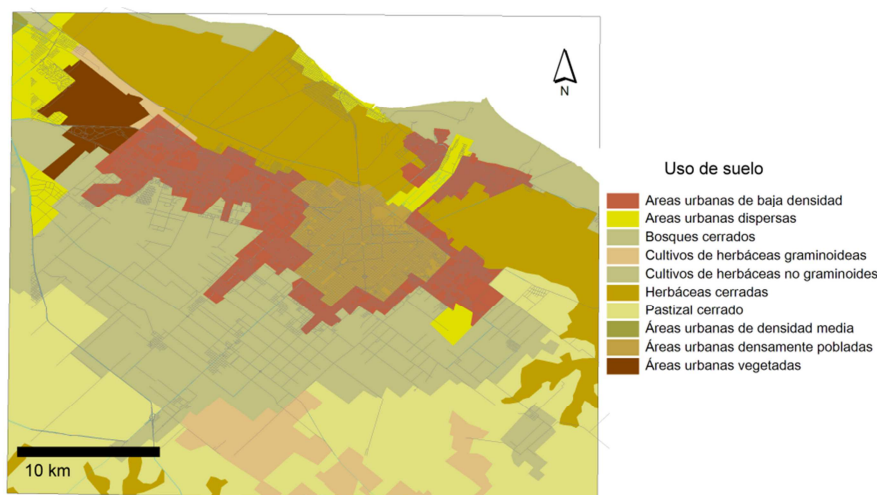
### *Sector Agricultura*

La ciudad de La Plata, posee una zona hortícola inserta en su periurbano que abastece no sólo a su urbe, sino que se convierte en la región más importante de dicho cinturón bonaerense y una de las más relevantes de la provincia de Buenos Aires. Esto lo demuestran los datos arrojados por el último Censo Hortiflorícola de Buenos Aires, según el cual se concentran en La Plata el 49,2% de las explotaciones del Cinturón Verde y el 25% de la provincia, que arrojan una producción anual promedio de 75.000 toneladas.

Las operaciones en campos agrícolas generan producción de polvo debido a las tareas de labranza, preparación de suelos, sembrado, aplicación de pesticidas y fertilizantes, cosecha y procesos post cosecha. Para la estimación de las emisiones anuales se utilizó el mapa de usos y cobertura de suelos del INTA (Cruzate et al., 2007) que divide al área de estudio en 10 categorías (ver Figura 2). Se seleccionaron las clases “Cultivos de herbáceas gramíneas” y “Cultivos de herbáceas no gramíneas” como representativas de las zonas cultivadas. Con un factor de emisión representativo para las emisiones totales de partículas de (European Environment Agency, 2013) y las hectáreas totales cultivadas estimadas con SIG como nivel de actividad se estimaron las emisiones de acuerdo a la ecuación (1). El perfil temporal de las emisiones se adaptó del trabajo de Arslan and Aybek, (2012) para el hemisferio sur.

### *Sector Transporte ferroviario*

Si bien actualmente se encuentra suspendido por obras en la electrificación de la línea en el tramo comprendido entre Berazategui y La Plata, el ramal Constitución- La Plata posee un servicio normal de pasajeros de 19 estaciones entre la Ciudad de Buenos Aires y La Plata, utilizando la red de Ferrocarril Roca. Las emisiones se estimaron utilizando como nivel de actividad el consumo de combustible para todas las formaciones, tomado del Ministerio de Energía y factores de emisión característicos de *European Environment Agency*, (2013). Las emisiones se asignaron homogéneamente a la red ferroviaria y se distribuyeron diariamente entre las 5:30 y las 24 horas.



*Figura 2. Uso de suelo para el dominio definido en el Gran La Plata.*

### *Sector Emisiones off-road*

Estas emisiones corresponden a la maquinaria utilizada en las actividades agrícolas, mayormente tractores y cosechadoras. El consumo de energía anual se estimó utilizando la intensidad energética

por hectárea cultivada de Pelletier et al., (2011). Bases de datos de poderes caloríficos de diversos combustibles, mayormente diésel oil y gas oil se tomaron del Ministerio de Energía, y factores de emisión característicos se obtuvieron de European Environment Agency, (2013). Las emisiones se desagregaron espacialmente de manera homogénea entre las celdas con tipo de uso de suelo cultivado (ver Figura 2). La desagregación temporal se realizó con los mismos coeficientes usados en la actividad agrícola.

#### *Sector Desechos*

La disposición y tratamiento de residuos es una fuente de MP cuando significa procesos de combustión. En esta categoría se incluyen la incineración de residuos peligrosos, cremación y quema abierta de residuos sólidos municipales. En el caso de la incineración de cadáveres, las emisiones de partículas dependen del tipo de cámara, combustible y del proceso de cremación. El nivel de actividad se determinó considerando la tasa de mortalidad para la zona de estudio y un porcentaje del 30% de cremaciones del total de las personas fallecidas. Factores de emisión típicos de *European Environment Agency*, (2013) se utilizaron considerando un proceso de combustión estándar. Dado que la demanda de estos servicios funerarios se realiza en la localidad de Berazategui, se ubicaron dos fuentes puntuales de emisiones directamente en los sitios de crematorios, ubicados hacia el oeste del dominio de modelado.

La incineración de residuos patológicos en el Gran La Plata se realiza por medio de un operador que realiza la recolección y el tratamiento en una planta habilitada. Se usaron las estadísticas del Ministerio de Salud para determinar la generación de residuos de origen clínico, considerando el número de camas hospitalarias en el Gran La Plata, una ocupación del 75% y una generación promedio de 1 kg /día-cama. Para la determinación de los factores de emisión, se consideró que la planta de tratamiento cuenta con equipos de control de emisiones.

El informe GIRSU elaborado por el Observatorio Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos (<http://www.ambiente.gob.ar/observatoriorsu/index.html>) presenta datos de composición física de los RSU como así también la generación de los mismos por municipio de la Provincia y la distribución en los distintos vertederos oficiales. La generación promedio en el área es de 0.92 kg RSU/habitante/día, pero solamente un 64% llega a sitios controlados, mientras que el resto se destina a vertederos clandestinos no controlados (27%) o a la quema abierta (8.4%), sin el uso de equipos adecuados ni control alguno sobre las emisiones (Martínez et al., 2010). Las emisiones por quema de RSU se distribuyeron en la zona urbana dispersa. La desagregación temporal de estas emisiones se hizo considerando que este tipo de quema abierta se produce en horas nocturnas.

#### *Sector Fuentes naturales*

Las emisiones procedentes de la erosión de polvo en áreas no urbanizadas pueden ser calculadas de acuerdo con las sugerencias de la EPA (OAQPS, 1977) mediante la ecuación empírica (4):

$$E=A \times I \times K \times L \times C \times V \quad (4)$$

donde E es la tasa o factor de emisión de polvo por la erosión del viento [Tn ha / año]; I es un índice erosionabilidad para diferentes tipos de suelo [Tn ha / año], A es la relación en peso de partículas menores de 10 micras de diámetro al total de las partículas del suelo erosionables; K es un factor de rugosidad de la superficie (adimensional), por lo general 1 para superficies lisas y 0,5 o menos para superficies rugosas; C es un factor climático (adimensional); L es el factor campo viento desprotegida; V es el factor de cobertura vegetal. Las áreas clasificadas como Pastizales y zonas cubiertas de Herbáceas se consideraron como posibles zonas erosionables (ver Figura 2), en las que las emisiones se distribuyeron homogéneamente. Las emisiones por erosión en áreas naturales solamente ocurren cuando la velocidad de viento supera el umbral de 6 m/s, por lo que no son constantes, sino que dependen de la velocidad de viento.

## **RESULTADOS**

### *Inventario de emisiones*



Las emisiones totales para el área en estudio son de 107.6 tn anuales para MP<sub>10</sub> y 86.3 tn anuales para MP<sub>2.5</sub>, detallados por categoría en la Tabla 5. La contribución de todas las fuentes se muestra en la Figura 3. Las emisiones industriales y el transporte carretero son los mayores contribuyentes a las emisiones de MP en el área, siendo los sectores de transporte ferroviario, generación de energía y navegación también importantes emisores en el área.

Sector	Emisiones MP <sub>10</sub> (Tn/año)	Emisiones MP <sub>2.5</sub> (Tn/año)
Transporte carretero	31.84	22.17
Industria	31.83	31.80
Transporte ferroviario	9.78	9.30
Agricultura	9.38	0.56
Energía	8.81	8.81
Navegación	8.25	8.25
Desechos	3.17	2.78
Fuentes naturales	2.26	0.34
Emisiones off-road	1.40	1.40
Aviación	0.82	0.82
Combustión en pequeña escala	0.058	0.057

Tabla 5. Emisiones de Material Particulado en el Gran La Plata discriminado en categorías.

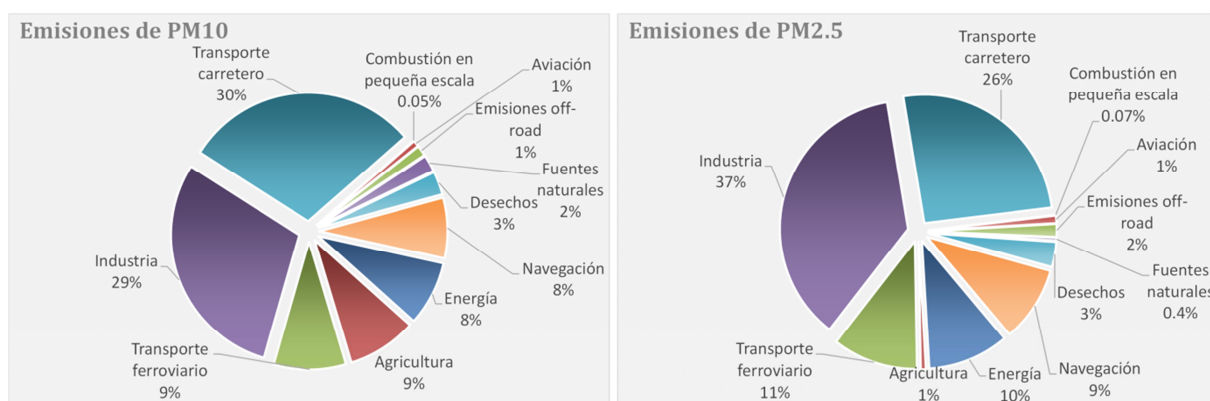


Figura 3. Fuentes de material particulado y su contribución a las emisiones totales para el Gran La Plata.

#### Concentraciones de material particulado

Las salidas del modelo CALPUFF se procesaron para sumar las contribuciones de todas las fuentes para ambos compuestos modelados. La

Figura 4 y Figura 5 muestran la distribución espacial de las concentraciones en el dominio de modelado propuesto considerando todas las fuentes detalladas en el inventario. En este escenario, las mayores concentraciones se observaron en sitios muy cercanos a las fuentes, principalmente cerca del Polo Petroquímico y autopistas principales.

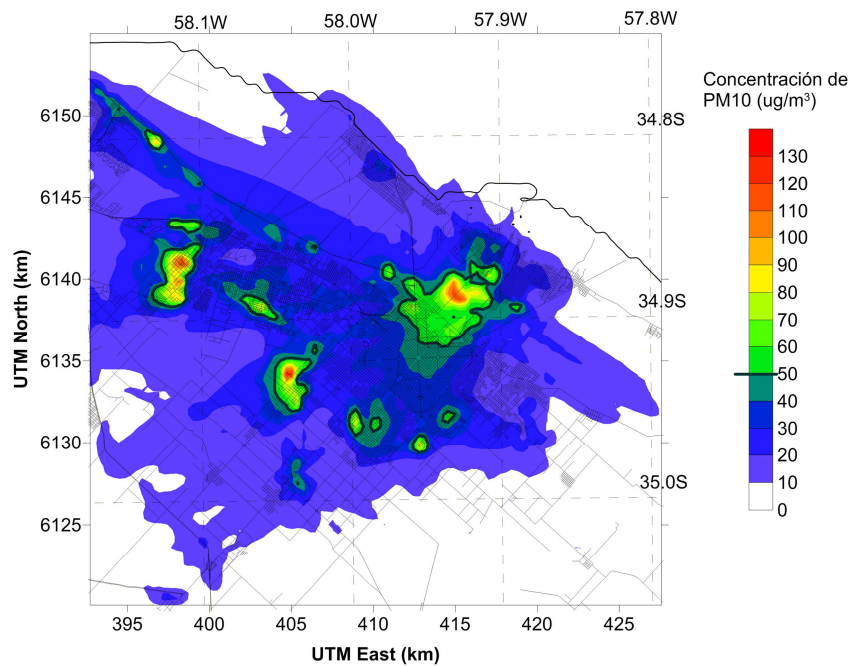


Figura 4. Concentraciones de  $PM_{10}$  (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) simuladas para el Gran La Plata, en promedios de 24 horas. El valor de la norma de calidad de aire de la OMS para promedios de 24 horas es de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

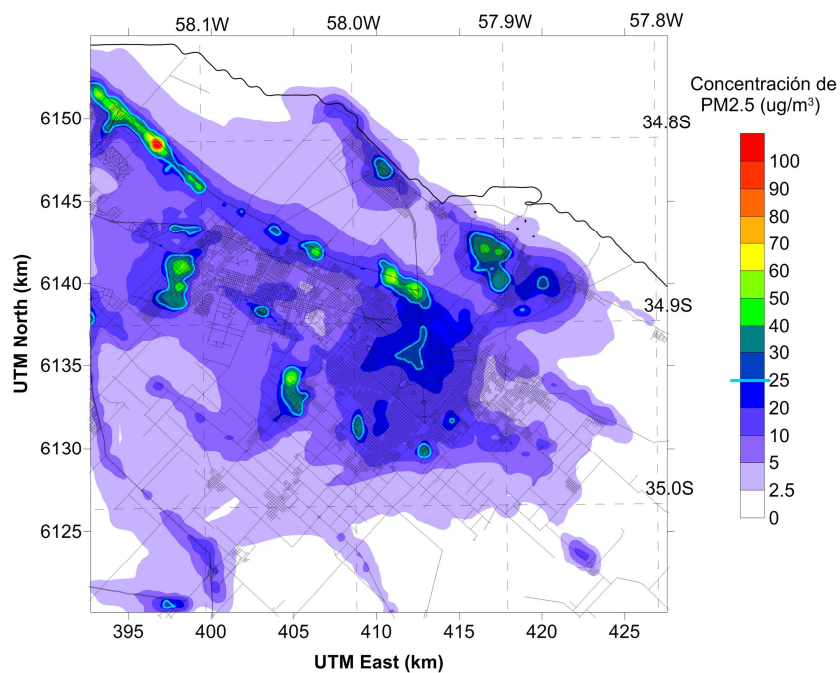


Figura 5. Promedios de 24 horas de  $PM_{2.5}$  simulados con CALPUFF para el Gran La Plata (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Se indica también el valor de la norma de calidad de aire de la OMS de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$

#### Monitoreo de calidad de aire en La Plata

Las muestras de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  fueron recolectadas en zonas industriales, residenciales y urbanas usando un muestreador de bajo volumen MiniVol TAS (Airmetrics). La tasa de flujo volumétrico fue de  $5 \text{ L min}^{-1}$  y se utilizaron filtros de politetrafluoroetileno (PTFE) y de fibra de vidrio como medio colector. El contenido de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  en cada muestra se determinó por gravimetría.

## Validación del sistema de modelado

Las mediciones se comparan con las simulaciones en varios sitios de la ciudad, tal como muestra la Figura 6.

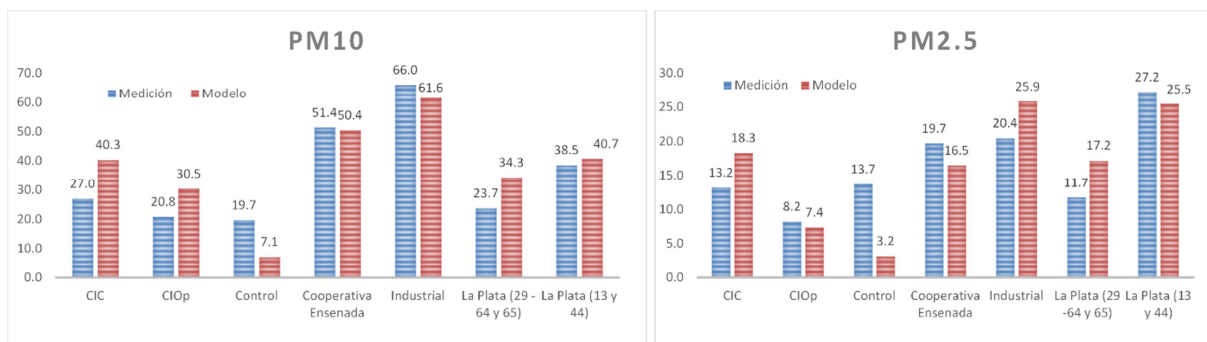


Figura 6. Concentraciones simuladas y medidas en varios puntos discretos del Gran La Plata (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Con el objeto de evaluar la calidad y confiabilidad de las predicciones hechas por el modelo, se compararon las concentraciones simuladas con los datos de monitoreo y se utilizaron medidas estadísticas de desempeño, que tienen en cuenta las desviaciones. Estas medidas de diferencia representan una estimación cuantitativa del tamaño de las desviaciones entre los valores observados y predichos. En el caso de la evaluación del desempeño para modelos de calidad de aire (Chang and Hanna, 2004; Seigneur et al., 2000; Taylor, 2001), se sugieren algunas de las medidas presentadas en la Tabla 6.

Estadístico	MP <sub>10</sub>	MP <sub>2.5</sub>
MBE: Desviación media	-2.5	0.1
RMSE: Error medio cuadrático	9.0	5.5
FB: Sesgo fraccional	-0.1	0.0
R: índice de correlación lineal	0.86	0.72
FAR2: Fracción de predicciones en un factor de 2 de observaciones	0.86	0.86

Tabla 6. Evaluación del desempeño del modelo para las simulaciones de dispersión de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

El análisis de los resultados comparativos permite concluir que el modelo ajusta bien a la realidad, considerando un nivel de actividad variable para las fuentes indicadas en la sección de inventario. Existe una ligera sobreestimación de las concentraciones para MP<sub>10</sub>, mientras que las concentraciones de MP<sub>2.5</sub> son levemente subestimadas. Puede notarse que existe todavía variabilidad en los valores medidos que no está reflejada en el modelo, debido a características no incluidas en el modelo de dispersión como la variabilidad intrínseca del movimiento vehicular en esquinas y calles específicas, o emisiones particulares durante la actividad industrial. Asimismo, es posible que existan fuentes no contempladas en el inventario, como sucede en el sitio "Control" en donde las simulaciones subestiman evidentemente las concentraciones (ver Figura 6). La influencia de la zona industrial parece estar adecuadamente reflejada en el modelo, al igual que la influencia de las emisiones vehiculares en el resto de las áreas urbanas.

## CONCLUSIONES

En este estudio se han estimado las emisiones de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub> en el área del Gran La Plata y su impacto en la calidad de aire utilizando el sistema de modelado WRF/CALMET/CALPUFF. Los resultados muestran que el tráfico vehicular es el principal productor de MP, siendo esto relevante en protocolos de acción tendientes a regular y reducir las emisiones de escapes. Asimismo, las fuentes industriales son también origen de gran cantidad de emisiones de MP, pero su impacto es mucho más

dependiente de las condiciones meteorológicas y la distancia a las zonas urbanas, siendo en general su impacto relevante muy cerca de las fuentes.

Los mapas de concentración se construyeron utilizando las salidas del modelo de dispersión CALPUFF y se organizaron en un ambiente GIS. Los cálculos muestran altas concentraciones de  $MP_{10}$  en el área urbana muy cercana al Polo Petroquímico (hasta 3-4 km), pero también en zonas periféricas de la zona urbana debido a la incineración de residuos sólidos urbanos. Asimismo, el tráfico vehicular, particularmente en las cercanías de la Autopista Buen Aires –La Plata es responsable de las concentraciones máximas en el área de estudio, especialmente cerca de intersecciones muy cargadas de vehículos, muy por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) que fija para promedios de 24 horas un valor de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $MP_{10}$  y  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $MP_{2.5}$ .

Respecto al desempeño del sistema de modelado, si bien las concentraciones simuladas no son exactamente las medidas, es posible ver que los valores medios son correctamente simulados y la distribución espacial de las concentraciones siguen generalmente los patrones establecidos en las mediciones. Las comparaciones mostradas validan el inventario de emisiones realizado en el área del Gran La Plata.

## REFERENCIAS

- Allende, D.G., 2011. Sistema de Modelado Ambiental Multimodo y Multiescala. Universidad Nacional de Cuyo.
- Allende, D.G., Cremades, P.G., Puliafito, S.E., Fernandez, R.P., Perez Gunella, F., 2010. Estimación de un Factor de Riesgo de Exposición a la Contaminación Urbana para la población de la Ciudad de Buenos Aires. Av. en Energías Renov. y Medio Ambient. 14, 127–134.
- Allende, D.G., Puliafito, S.E., Fernandez, R.P., Castro, F.H., Cremades, P.G., 2012. Herramientas para la evaluación integral de la calidad de aire en Argentina: modelos de escala urbana y regional. Rev. Proyecciones- UTN-FRBA 10, 31–44.
- Amorim, J.H., Rodrigues, V., Tavares, R., Valente, J., Borrego, C., 2013. CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion. Sci. Total Environ. 461-462, 541–551.
- Arslan, S., Aybek, A., 2012. Particulate matter exposure in agriculture, in: Air Pollution - A Comprehensive Perspective. pp. 73–104.
- Bell, M.L., Cifuentes, L.A., Davis, D.L., Cushing, E., Gusman Telles, A., Gouveia, N., 2011. Environmental health indicators and a case study of air pollution in Latin American cities. Environ. Res. 111, 57–66.
- Borge, R., Lumbreras, J., Pérez, J., de la Paz, D., Vedrenne, M., de Andrés, J.M., Rodríguez, M.E., 2014. Emission inventories and modeling requirements for the development of air quality plans. Application to Madrid (Spain). Sci. Total Environ. 466-467, 809–819.
- CAMMESA, 2014. Informe anual 2014.
- Chang, J.C., Hanna, S.R., 2004. Air quality model performance evaluation. Meteorol. Atmos. Phys. 87, 167–196.
- Cianni, N., Müller, A., Lespade, P., Aguilar, M., Matamoros, N., Colman, E., Martín, M., Chiapperini, V., Bussi, L., Massolo, L., Wichmann, F., Porta, A., 2009. Calidad del aire y salud infantil en áreas urbanas e industriales de La Plata y Ensenada, Argentina, in: Quaranta, E.P. & N. (Ed.), Contaminación Atmosférica En Argentina. Contribuciones de La II Reunión Anual PROIMCA. San Nicolas, pp. 37–44.
- Coelho, M.C., Fontes, T., Bandeira, J.M., Pereira, S.R., Tchepel, O., Dias, D., Sá, E., Amorim, J.H., Borrego, C., 2014. Assessment of potential improvements on regional air quality modelling related with implementation of a detailed methodology for traffic emission estimation. Sci. Total Environ. 470-471, 127–137.
- Colman Lerner, J.E., Müller, A., Aguilar, M., Matamoros, N., Sánchez, E., Ditondo, J., Herbarth, O., Massolo, L., Wichmann G, Porta A., 2013. Contaminación del aire por compuestos orgánicos volátiles y material particulado en la plata y ensenada., in: Segundas Jornadas de Investigación Y Transferencia. Facultad de Ingeniería - UNLP, pp. 587–592.
- Cruzate, G., Gomez, L., Pizarro, M.J., Mercury, P., Banchemo, S., 2007. Mapas de suelos de la

- República Argentina.
- European Environment Agency, 2013. EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook.
- Hidalgo, D., Huizenga, C., 2013. Implementation of sustainable urban transport in Latin America. *Res. Transp. Econ.* 40, 66–77.
- Instituto Petroquímico Argentino, 2014. Información Estadística de la Industria Petroquímica y Química de la Argentina.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama, Kanagawa JAPAN.
- Kwak, K.H., Baik, J.J., Ryu, Y.H., Lee, S.H., 2015. Urban air quality simulation in a high-rise building area using a CFD model coupled with mesoscale meteorological and chemistry-transport models. *Atmos. Environ.* 100, 167–177.
- Martínez, E., Daza, D., Tello E., P., Soulier F., M., Terraza, H., 2010. Regional Evaluation on Urban Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean: 2010 Report.
- Massolo, L., Muller, A., Tueros, M., Rehwagen, M., Franck, U., Ronco, A., Herbarth, O., 2002. Assessment of mutagenicity and toxicity of different-size fractions of air particulates from La Plata, Argentina, and Leipzig, Germany. *Environ. Toxicol.* 17, 219–231.
- Mulena, G.C., Allende, D.G., Puliafito, S.E., Lakkis, S.G., Cremades, P.G., Ulke, A.G., 2016. Examining the influence of meteorological simulations forced by different initial and boundary conditions in volcanic ash dispersion modelling. *Atmos. Res.* -.
- NOAA-NGDC, 2010. Version 4 DMSP-OLS Nighttime Lights Time Series [WWW Document]. URL <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/downloadV4composites.html>
- OAQPS, 1977. Guideline for development of control strategies in areas with fugitive dust problems. EPA-405/2- 77-029.
- ORSNA, 2016. Movimiento operacional de los aeropuertos del Sistema Nacional [WWW Document]. Inf. y Estadísticas. URL [http://www.orsna.gov.ar/estadisticas/Estad%C3%ADstica\\_2014.pdf](http://www.orsna.gov.ar/estadisticas/Estad%C3%ADstica_2014.pdf) (accessed 1.7.16).
- Pelletier, N., Audsley, E., Brodt, S., Garnett, T., Henriksson, P., Kendall, A., Kramer, K.J., Murphy, D., Nemecek, T., Troell, M., 2011. Energy Intensity of Agriculture and Food Systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 36, 223–246.
- Puliafito, Salvador Enrique, Castro, Fernando Horacio, Allende, D.G., 2011. Air quality impact of PM10 emission in urban centres. *Int. J. Environ. Pollut.* 46, 127–143.
- Puliafito, S.E., Allende, D., Pinto, S., Castesana, P., 2015. High resolution inventory of GHG emissions of the road transport sector in Argentina. *Atmos. Environ.* 101, 303–311.
- Puliafito, S.E., Allende, D.G., Mulena, C.G., Cremades, P., Lakkis, S.G., 2015. Evaluation of the WRF Model Configuration for Zonda Wind Events in a Complex Terrain. *Atmos. Res.* 166, 24–32.
- Puliafito, S.E., Castro, F.H., Allende, D.G., 2011. Air-quality impact of PM10 emission in urban centres S. Enrique Puliafito \*, Fernando Castro and David Allende. *Int. J. Environ. Pollut.* 46, 127–143.
- Puliafito, S.E., Castro, F.H., Allende, D.G., Castesana, P., 2014. Mitigation of road transport carbon emissions in Argentina. *Int. J. Environ. Pollut.* 56, 129–152.
- Quaassdorff, C., Borge, R., Pérez, J., Lumbreras, J., de la Paz, D., de Andrés, J.M., 2016. Microscale traffic simulation and emission estimation in a heavily trafficked roundabout in Madrid (Spain). *Sci. Total Environ.* 566–567, 416–427.
- Ratto, G., Maronna, R., Repossi, P., Videla, F., Nico, A., Reyna Almandos, J., 2012. Analysis of Winds Affecting Air Pollutant Transport at La Plata, Argentina. *Atmos. Clim. Sci.* 02, 60–75.
- Rehwagen, M., Muller, A., Massolo, L., Herbarth, O., Ronco, A., 2005. Polycyclic aromatic hydrocarbons associated with particles in ambient air from urban and industrial areas. *Sci. Total Environ.* 348, 199–210.
- Saygin, D., Patel, M., Tam, C., Gielen, D., 2009. Chemical and Petrochemical sector. Potential of best practice technology and other measures for improving energy efficiency, IEA Information Paper, OECD/IEA, September.
- Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J., 2000. A User ' s Guide for the CALPUFF Dispersion Model, Control.
- Seigneur, C., Pun, B., Pai, P., Louis, J.F., Solomon, P., Emery, C., Morris, R., Zahniser, M., Worsnop, D., Koutrakis, P., White, W., Tombach, I., 2000. Guidance for the performance evaluation of

- three-dimensional air quality modeling systems for particulate matter and visibility. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 50, 588–99.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Gill, D.O., Barker, D.M., Wang, W., Powers, J.G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Mesoscale Microscale Meteorol. Div. Natl. Cent. Atmos. Res.
- Taylor, K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.* 106, 7183–7192.
- Timmermans, R.M.A., Denier van der Gon, H.A.C., Kuenen, J.J.P., Segers, A.J., Honor??, C., Perrussel, O., Builtjes, P.J.H., Schaap, M., 2013. Quantification of the urban air pollution increment and its dependency on the use of down-scaled and bottom-up city emission inventories. *Urban Clim.* 6, 44–62.
- U.S. EPA, 2008. Technical Issues Related to use of the CALPUFF Modeling System for Near-field Applications. Research Triangle Park, NC 27711.
- Wichmann, F.A., Müller, A., Busi, L.E., Cianni, N., Massolo, L., Schlink, U., Porta, A., Sly, P.D., 2009. Increased asthma and respiratory symptoms in children exposed to petrochemical pollution. *J. Allergy Clin. Immunol.* 123, 632–638.

## ABSTRACT

This work presents the application of the WRF/CALMET/CALPUFF modeling system in the evaluation of air quality in Greater La Plata urban agglomeration. Using information publicly available a particulate matter emission inventory was made as a base scenario for the estimation of particle concentration in the urban center and its surroundings. Simulation results were compared with observations in several monitoring sites. The modeling system represents well the concentration variability and about 86% of the modeled values are in a factor of 2 of the observed 24 hs averages. Results highlight the potential of detailed traffic exhaust emissions estimates-

**Keywords:** urban air quality, emission modeling, Greater La Plata, monitoring campaign, particulate matter.