



Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación  
Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente  
Vol. 4, pp. 01.41-02.52, 2016. Impreso en la Argentina.  
ISBN 978-987-29873-0-5

## DISEÑO DE UNA RED DE MONITOREO PARA METALES EN EL GRAN MENDOZA BASADO EN UN INVENTARIO DE EMISIONES Y MODELADO DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA EN ALTA RESOLUCIÓN

M.F. Ruggeri<sup>1</sup>, D. Allende<sup>2</sup>, E. Puliafito<sup>3</sup>, R. Pascual Flores<sup>4</sup>, T. Bolaño-Ortiz<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: m.florencia.ruggeri@gmail.com  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT)

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

**RESUMEN:** Este trabajo presenta la aplicación del sistema de modelado WRF/CALMET/CALPUFF para evaluar la dispersión de metales (Cu, Pb y Zn) en el Gran Mendoza, con el fin de determinar los niveles atmosféricos de estas sustancias y diseñar una red de monitoreo. Se confeccionó un inventario de emisiones de alta resolución, en un área de 90 km x 90 km con grilla de 1km de lado, como escenario de base para la estimación de los niveles de concentración en el centro urbano y alrededores utilizando el sistema de modelado citado.

Los datos presentados en este estudio proporcionan un panorama general de las concentraciones de los metales seleccionados en el Gran Mendoza. Como una validación preliminar, se compararon los niveles simulados con valores medidos en otras regiones con contextos espaciales similares y se encontró coherencia en los valores obtenidos, lo que sugiere un correcto comportamiento del modelo. Finalmente, utilizando como base los mapas de concentraciones obtenidos, se fijaron puntos de monitoreo que permitirán: evaluar la escala a la cual el sistema físico es caracterizado por una red de valores medidos; captar el gradiente de concentraciones, como así también los puntos de riesgo en lo que se refiere a exposición humana. Por último, se espera que las mediciones a realizarse en los sitios seleccionados sirvan de retroalimentación para mejorar tanto el inventario de emisiones como el desempeño del modelo.

**Palabras clave:** Inventario de emisiones, modelo de dispersión, Metales, Red de monitoreo, Gran Mendoza.

### INTRODUCCION

La mayoría de los metales son necesarios para la vida en pequeñas cantidades, ya que ayudan a desempeñar funciones vitales de los organismos (Bost et al., 2016; Rashad and Shalaby, 2007). Sin embargo, en concentraciones mayores pueden resultar tóxicos, y las actividades antropogénicas producen emisiones de estas sustancias que colaboran a aumentar los niveles en los ecosistemas. Es por tal motivo que actualmente hay una tendencia mundial en generar información precisa sobre las emisiones de metales a la atmósfera y otros compartimientos ambientales para la evaluación de las perturbaciones de los ciclos geoquímicos de los metales en el medio ambiente y los efectos ambientales y sobre la salud causados por estas perturbaciones.

<sup>1</sup> Becaria Doctoral CONICET

<sup>2</sup> Becario Postdoctoral UTN - FRM

<sup>3</sup> Investigador Independiente CONICET

<sup>4</sup> Becaria Doctoral ANPCyT

<sup>5</sup> Becario Doctoral CONICET

Históricamente, la herramienta más utilizada para relevar la situación respecto a los niveles atmosféricos de metales ha sido el muestreo y análisis del aire ambiente mediante diferentes técnicas (Font et al., 2015; Norouzi et al., 2015; Rueda-Holgado et al., 2014). Estos procedimientos, si bien aportan información fundamental, poseen ciertas limitaciones como baja resolución tanto espacial como temporal y altos costos de ejecución. Por otro lado, existen aspectos relacionados con la representatividad de las mediciones que se deben tener en cuenta para asegurar la validez de los datos obtenidos (Duyzer et al., 2015).

En este contexto, el uso de modelos de dispersión basado en un inventario de emisiones se presenta como una opción para obtener un panorama espacial y temporal de mayor cobertura. Además, estos modelos permiten establecer una relación entre las actividades antrópicas que producen las emisiones y los niveles de los contaminantes en el ambiente, como así también la posibilidad de predecir niveles esperados en asociación con distintos escenarios.

Este estudio presenta un inventario de emisiones detallado de metales para el área del Gran Mendoza, realizado con el fin de evaluar su impacto en la calidad del aire regional. Los metales seleccionados fueron Cobre (Cu); Zinc (Zn) y Plomo (Pb), debido a que son emitidos por actividades características de la zona de estudio y pueden considerarse como trazadores antropogénicos (Cereceda-balic et al., 2012). Los datos calculados se organizaron bajo un entorno SIG (Sistema de Información Geográfica) en un dominio espacial de 90x90 km<sup>2</sup> centrado en el Oasis Norte de la Provincia. Se tuvieron en cuenta fuentes emisoras tanto intencionales como no intencionales, agrupando las emisiones en celdas de 1 km × 1 km. Con base en este inventario, se precedió a realizar una simulación de la dispersión atmosférica utilizando el sistema de modelado WRF/CALMET/CALPUFF, particularmente apropiado para estimar concentraciones atmosféricas en entornos complejos. Finalmente, a partir de los mapas de concentraciones generados, que permiten evaluar la magnitud y localización de las emisiones, como así también la dispersión en alta resolución, se seleccionó un grupo de puntos donde se realizará el monitoreo, con el objetivo de evaluar la escala a la cual el sistema físico es caracterizado por una red de valores medidos y posibilita captar el gradiente de concentraciones, junto con los puntos de riesgo en lo que se refiere a exposición humana. En un futuro, estas mediciones serán utilizadas retroalimentación para mejorar tanto el inventario de emisiones como el desempeño del modelo.

## MÉTODOS

### *Área de estudio: Dominio de modelado*

Para considerar la dispersión de los contaminantes desde todas las fuentes simuladas, el área de estudio debe cubrir todas las fuentes y receptores relevantes. El dominio de modelado adoptado para el desarrollo del modelo de dispersión de metales abarca un área de 90 x 90 km<sup>2</sup> centrado en el Oasis Norte de Mendoza, el más extenso de la Provincia y uno de los más importantes del país. Posee una especialización agrícola, donde prevalece el cultivo de vid, combinado con la horticultura y frutales, especialmente hacia el este. El área urbana, denominada “Gran Mendoza”, ocupa 16.700 km<sup>2</sup>, extendiéndose de forma casi regular hacia el Noreste, Este y Sur, mientras que las estribaciones de la Cordillera, impiden el crecimiento en las direcciones Norte y Oeste. Se trata de la cuarta aglomeración del país con 1.230.000 habitantes, siendo la más importante fuera de la Pampa Húmeda. Se ubica en una zona árida a semiárida, de precipitaciones bajas (120-400 mm anuales), principalmente en meses de verano. La cercanía a la Cordillera de Los Andes tiene una fuerte influencia en la meteorología y en la calidad de aire locales, debido a la circulación típica valle-montaña de variación diaria. La velocidad del viento media anual es alrededor de 2,6 m/s con un 26% de calmas. Las direcciones predominantes son S, S-SW, E-SE y E. El área presenta baja humedad relativa (50%), baja incidencia de niebla y pocos días cubiertos (65-75 días /año) (Puliafíto et al., 2013).

El dominio cubre la totalidad de los departamentos de Capital (CP), Godoy Cruz (GC), Guaymallén (GY), Maipú (MP), Junín (JN), San Martín (SM) y Rivadavia (RI), parte de Luján de Cuyo (LU), Lavalle (LV), Las Heras (LH) y Santa Rosa (SR) (*Figura 1*).

### *Inventario de emisiones*

Para el inventario en el área de estudio se consideraron tanto fuentes puntuales, como de área y de línea de los metales seleccionados. El cálculo de las emisiones se hizo de acuerdo a la ecuación (1):

$$E_i = \sum_{i,j}^n (FE_{i,j} \times A_j) \quad (1)$$

Donde  $E_i$  es la emisión total de las  $n$ ésimas fuentes que emiten la especie  $i$ ,  $FE_{i,j}$  es el factor de emisión para la especie  $i$ , fuente  $j$  y  $A_j$  es el nivel de actividad para la fuente  $j$ .

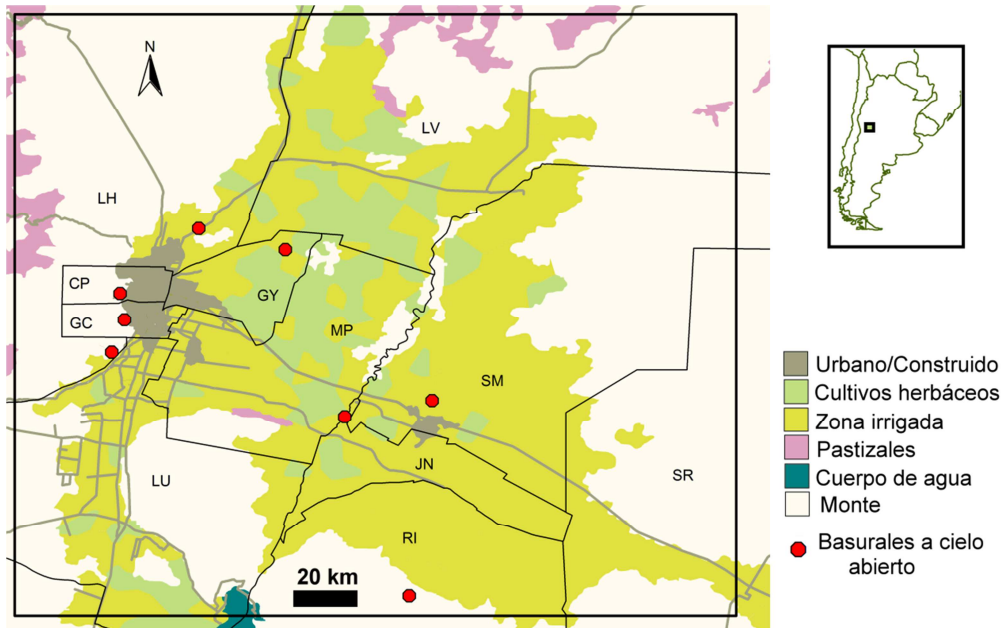


Figura 1. Área de estudio con categorización de uso de suelo y ubicación de basurales a cielo abierto

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).

### 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, en el dominio considerado se encuentra la Central Térmica Luján de Cuyo, que es un conjunto de cinco plantas con un total de 540MW de potencia instalada y 150 tn/h de producción de vapor, empleando como combustible gas natural, gas oil o fuel oil.

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).

Combustible	Consumo anual	Energía producida [GJ/año]	Factor de emisión [kg/GJ]			Emisión [kg/año]		
			Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
Gas Natural	7.3E08 [m <sup>3</sup> ]	2.8E07	1.5E-09	7.6E-11	1.5E-09	4.3E-02	2.2E-03	4.3E-02
Gas oil	1.1E04 [Tn]	4.6E05	4.1E-06	2.7E-06	1.8E-06	1.9	1.2	0.8
Fuel oil	4.5E04 [Tn]	1.7E06	4.6E-06	5.3E-06	8.8E-05	8.9	9.9	163.5
<b>TOTAL</b>						<b>9.8</b>	<b>10.3</b>	<b>150.5</b>

Tabla 1. Emisiones de metales por generación de energía

#### Refinación de petróleo

La Refinería Luján de Cuyo es una de las tres plantas perteneciente a la empresa nacional YPF, siendo la de mayor conversión del país. Cuenta con una capacidad de refinación de 105500 barriles de crudo de petróleo por día, y un Índice de Complejidad Solomon de 10.8. Se elaboran prácticamente todos los productos que la empresa comercializa en el país: gasoil, gasoil minero, gasoil agro, JP1, kerosene, nafta súper, nafta virgen, propano, propileno y butano, entre otros.

Producto de los procesos típicos de este tipo de industria (separación, conversión, tratamientos, blending, almacenamiento y manipulación, etc.) es que se producen emisiones fugitivas de metales a la atmósfera que deben ser tenidas en cuenta (European Environment Agency, 2013).

Producción diaria [barriles/día]	Producción anual [Tn/año]	Factor de emisión [kg/Tn crudo]			Emisión [kg/año]		
		Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
105500	4.4E06	5.1E-03	5.1E-03	5.1E-03	<b>22.6</b>	<b>22.6</b>	<b>22.6</b>

Tabla 2. Emisiones de metales por refinación de crudo de petróleo

#### Producción de cemento

La producción de cemento puede representar una fuente no intencional de emisión de metales, debido a que el horno utiliza, además de gas y coque, residuos peligrosos como combustible, siendo este proceso la única forma de disposición de este tipo de desecho que existe en la provincia. En el área de estudio existe una planta de elaboración de cemento situada al noroeste del centro urbano, que produce 736000 Tn/año. Los factores de emisión fueron tomados de (U.S. Environmental Protection Agency, 1995)

Producción anual [Tn/año]	Factor de emisión [kg/Tn cemento]			Emisión [kg/año]		
	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
736000	3.6E-04	2.6E-03	2.7E-04	<b>264.9</b>	<b>1913.6</b>	<b>198.7</b>

Tabla 3. Emisiones de metales por producción de cemento

#### Producción de vidrio

Tradicionalmente, algunos compuestos de plomo han sido usados como aditivos en la producción de vidrio debido a las propiedades que imparten a las piezas obtenidas: brillo, altos índices de refracción, temperaturas económicas de fundido, etc. (U.S. Environmental Protection Agency, 1997).

En el área de estudio se encuentra emplazada una planta de elaboración de envases de vidrio de gran volumen de producción (600 millones de envases, lo que equivale a 420000 Tn/año de vidrio) que abastece casi en su totalidad a la industria vitivinícola provincial. Si bien los compuestos de plomo no suelen ser agregados en la producción de vidrio para envases de uso alimenticio, en la fabricación de los mismos se introduce en el horno una alta proporción de vidrio a reciclar que contiene estas sustancias, por lo que se considera una fuente de emisión de Plomo a la atmósfera (European Environment Agency, 2013).

Producción anual [Tn/año]	Factor de emisión Pb [kg/Tn vidrio]	Emisión Pb [kg/año]
420000	2.9E-03	<b>1218.0</b>

Tabla 4. Emisiones de plomo por producción de vidrio

### *Producción de baterías de Plomo-Ácido*

Según datos presentados por la Agencia Ambiental de Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency, 1997) la producción de baterías de plomo-ácido es una de las principales fuentes de emisión de plomo a nivel mundial, debido a las grandes cantidades de compuestos de plomo que emplea y los altos volúmenes de fabricación.

En el Gran Mendoza se emplaza un establecimiento productor de este tipo de baterías, ubicado en el departamento de Las Heras, que produce 42000 baterías/año, a partir de óxido de plomo que es obtenido previamente en la misma planta. Teniendo en cuenta esta información se calcularon las emisiones de plomo a la atmósfera según el factor de emisión recomendado por (U.S. Environmental Protection Agency, 1997).

Producción anual [baterías/año]	Factor de emisión Pb [kg/batería]	Emisión Pb [kg/año]
42000	7.5E-03	<b>315.0</b>

*Tabla 5. Emisiones de plomo por producción de baterías plomo-ácido*

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

Si bien en muchas regiones las emisiones de metales debido a fuentes puntuales, como centrales térmicas o plantas industriales, representan la mayor contribución a los niveles atmosféricos registrados, en los centros urbanos de alta densidad poblacional el tráfico por carreteras suele ser la mayor fuente emisora de estas sustancias. La liberación a la atmósfera se produce al nivel del suelo principalmente debido al desgaste de los frenos, neumáticos, otros componentes mecánicos, pavimento de la carretera, resuspensión de polvo y también debido a las emisiones de escape (Johansson et al., 2009).

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:

1. Datos puntuales: Mapas de localidades y censo de Tránsito Diario Medio Anual (TDMA) y venta de combustible por localidades.
2. Datos de área o polígonos: población, densidad poblacional y otros indicadores económico - sociales
3. Datos lineales: Mapas de calles y rutas clasificados en accesos, rutas troncales, rutas nacionales, rutas provinciales, primarias, secundarias y terciarias.
4. 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 (naftas, 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. Finalmente, las emisiones grilladas para cada contaminante se estiman en función de los VKT para cada celda y un factor de emisión para cada metal (Johansson et al., 2009), sumando la contribución de todos los segmentos en cada grilla.

Distancia recorrida [vehículos.km/año]	Factor de emisión [kg/vehículos.km]			Emisión [kg/año]		
	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
5.01E09	4.1E-08	5.4E-07	2.6E-07	<b>210.0</b>	<b>2700.0</b>	<b>1300.0</b>

*Tabla 6. Emisiones de metales por transporte carretero.*

### Residuos

La disposición y tratamiento de residuos es una fuente de metales cuando significa procesos de combustión. En esta categoría se incluyen la incineración de residuos patológicos y quema abierta de residuos sólidos municipales.

#### Incineración de Residuos patológicos

La incineración de residuos patológicos en el Gran Mendoza se realiza por medio de un operador que realiza la recolección y el tratamiento en una planta habilitada. Según datos publicados por la propia empresa, se incineran anualmente 1170 toneladas de este tipo de desecho, lo que genera emisiones de plomo y cobre hacia la atmósfera (European Environment Agency, 2013).

Residuos Patológicos incinerados [Tn/año]	Factor de emisión [kg/Tn residuos incinerados]		Emisión [kg/año]	
	Pb	Cu	Pb	Cu
1.2E03	6.2E-02	9.8E-02	72.5	114.7

Tabla 7. Emisiones de metales por incineración de residuos patológicos.

#### Quema abierta de Residuos Sólidos Urbanos

La quema abierta de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es una práctica que posiblemente sea una de las fuentes más significativas de contaminación atmosférica en países en desarrollo y que sigue utilizándose en el manejo de los RSU en la región del Gran Mendoza, donde la generación promedio es de 1.18 kg RSU/habitante.día según informes oficiales locales. De acuerdo con el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2006), en América del Sur en promedio un 54% llega a sitios de disposición controlados, mientras que el resto se destina a vertederos clandestinos no controlados, de los cuales no se tiene ninguna información, por lo que no han sido tenidos en cuenta en este análisis. De los residuos que llegan a estos sitios controlados, hay una porción compuesta por papel; cartón; vidrio y metales, que es separada por trabajadores informales para su reúso. De lo que resta, una parte es quemada con el objeto de reducir volumen y evitar fuentes de infección, en un porcentaje del 60% (IPCC, 2006). La quema se realiza de forma abierta, sin el uso de equipos adecuados ni control alguno sobre las emisiones. A partir de esta información, se calculó que se queman 354.7 Tn RSU/día.

RSU quemados [Tn/año]	Factor de emisión [kg/Tn RSU quemado]			Emisión [kg/año]		
	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
1.29E05	1.0E-01	9.3E-05	9.0E-04	13462.7	12.0	116.5

Tabla 8. Emisiones de metales por quema abierta de residuos sólidos urbanos.

#### Sistema de modelado WRF/CALMET/CALPUFF

El sistema de modelado utilizado fue CALPUFF, el cual está conformado por un modelo de diagnóstico meteorológico en tres dimensiones denominado CALMET y un modelo de transporte; dispersión; deposición y transformación química llamado CALPUFF.

CALMET es un modelo meteorológico que produce campos de vientos y temperaturas horarios en un dominio de modelado grillado en tres dimensiones, necesario para correr CALPUFF. Asimismo, asocia a éste campos en dos dimensiones variables, como altura de capa de mezcla; características superficiales y propiedades de dispersión.

CALPUFF es un modelo de dispersión por soplos o “puffs”, multicapa, de estado no estacionario y multicomponente, que puede simular los efectos de las variables condiciones meteorológicas en el transporte; transformación y remoción de contaminantes. CALPUFF utiliza la formulación del soplo 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). Este modelo divide a la región de estudio en una serie de celdas y simula el transporte, dispersión y transformación de los gases y/o partículas emitidos a medida que se mueven de una celda a otra por acción de la meteorología local. 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.

El Sistema de Modelado contiene también el módulo CALPOST, un paquete de post-procesamiento de la información generada en las simulaciones para la obtención de concentraciones y/o deposición de contaminantes en cada receptor.

Algoritmos detallados para los diferentes procesos físicos involucrados en la dispersión y transporte de contaminantes y detalles sobre aplicaciones del modelo pueden encontrarse en bibliografía (Harnett et al., 2008; Scire et al., 2000b).

El dominio de modelado se organizó en una grilla de 90x90 km<sup>2</sup> con resolución de 1 km. Las características del terreno fueron incorporadas usando datos de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), disponibles en una resolución de 3 segundos de arco (aproximadamente 90 m). Los datos SRTM fueron procesados sobre el dominio de interés para obtener elevaciones de terreno con resolución de 500 m. Para las características de uso y cobertura de suelo se emplearon Mapas de Vegetación del Global Land Cover 2000 Project (GLC 2000) para Sudamérica, con resolución de 1 km y datos generados por el Departamento de Geografía de la Universidad de Maryland (UMD Global Land Cover Classification) (Hansen et al., 1998).

El módulo CALMET requiere como entradas campos meteorológicos en superficie y altura. Debido a que no hay fuentes de datos meteorológicos permanentes con la resolución deseada, de 1 hora tanto de superficie como de altura, que sean representativos del área y por periodos largos de tiempo en la vecindad del sitio de estudio, se generaron datos con un modelo meteorológico de pronóstico para inicializar CALMET con campos como “aproximación inicial”. Se utilizó para ello el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para obtener campos 3D cubriendo el dominio y el período de modelado (Scire et al., 2000a). El procedimiento utilizado implica la utilización de salidas del modelo regional WRF como estimación inicial para CALMET. Para ello, se utilizó un preprocesador off-line llamado CALWRF (versión 1.4), que inicializa CALMET sustituyendo los valores horarios requeridos de parámetros de la capa límite planetaria (Planetary Boundary layer - PBL) y capa superficial de la atmósfera requeridos por aquellos derivados de WRF. Asimismo, esta opción permitió las capturas de algunas características del flujo que no pueden ser simuladas con la sola inclusión de datos observacionales, debido a la baja densidad de estaciones de superficie y altura. Una evaluación con trazadores ha indicado que los campos horarios de un modelo de mesoescala mejoran el desempeño de los modelos de dispersión en escalas regionales (U.S Environmental Protection Agency (EPA), 1995).

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las rosas de vientos obtenidas en las simulaciones meteorológicas, resumiendo los vientos horarios en diferentes momentos del día. La longitud de cada uno de los pétalos indica la frecuencia total de vientos desde la dirección indicada, mientras que las porciones de las barbas de diferente ancho están asociadas a las categorías de velocidad de viento. Los periodos de calma no se incluyen en estos diagramas debido a que no están asociados a ninguna dirección de viento y se indican en porcentaje.

El modelo fue elegido para este estudio debido a la capacidad superior del mismo para estimar dispersión en ambientes complejos, como lo es la zona del Gran Mendoza. La Guía sobre Modelos de Calidad de Aire de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Harnett et al., 2008) recomienda el uso de CALPUFF sobre otros modelos regulatorios para aplicaciones donde el terreno contiene variaciones en el relieve y donde la cobertura del suelo no es uniforme, tal como ocurre en este caso. CALPUFF está recomendado para simular los efectos de la dispersión de contaminantes típicamente entre 50 y 200 km, aunque posee algoritmos que se aplican a mucho menores distancias. Además, CALPUFF puede, a diferencia de los modelos Gaussianos como ISCS3, procesar condiciones de calma, evitando estimaciones de concentraciones muy altas poco realistas (U.S. EPA, 1998).

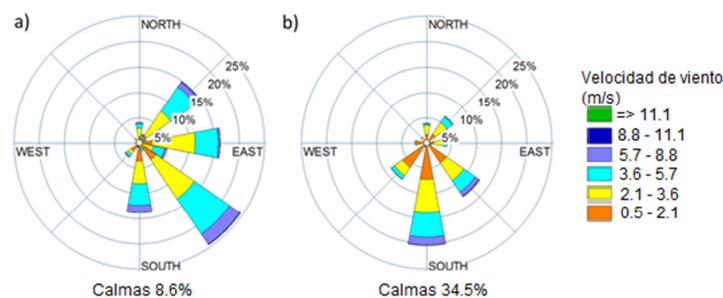


Figura 2. Rosa de los vientos para el área de estudio en el periodo de modelado. a) Día b) Noche

### Especies modeladas – Emisiones

Como se mencionó anteriormente, las especies modeladas fueron Pb, Cu y Zn. Debido a que estas especies no forman parte de la librería con la que cuenta CALPUFF por defecto, se incluyeron como material particulado (MP), ya que por las características fisicoquímicas de los metales y sus fuentes de emisión siempre son liberados a la atmósfera asociados a otras partículas y formando el MP (Chang et al., 2000; Johansson et al., 2009; Pollard et al., 2015). Teniendo en cuenta esta información, los metales fueron modelados como MP de tres diámetros aerodinámicos diferentes: PM10 (10 µm o menos); PM2.5 (2.5 µm o menos) y PM1 (1 µm o menos). Para cada fuente emisora se tuvo en cuenta una distribución de tamaños característica (U.S Environmental Protection Agency, 1995) en la que se dividió la emisión total de cada metal estimada en el inventario.

## RESULTADOS

### Inventario de emisiones

La Tabla 9 muestra las emisiones totales de metales para el área en estudio. La contribución de todas las fuentes se muestra en la Figura 3.

Fuente de emisión	Emisiones (kg/año)		
	Pb	Cu	Zn
Energía	9.8	10.3	150.5
Refinación de petróleo	22.6	22.6	22.6
Producción de cemento	264.9	1913.6	198.7
Producción de vidrio	1218.0	0.0	0.0
Producción de baterías plomo-ácido	315.0	0.0	0.0
Transporte carretero	210.0	2700.0	1300.0
Incineración de residuos patológicos	72.5	114.7	0.0
Quema abierta de RSU	13462.7	12.0	116.5
<b>TOTAL</b>	<b>15575.5</b>	<b>4773.2</b>	<b>1788.3</b>
<b>TOTAL (Tn/año)</b>	<b>15.6</b>	<b>4.8</b>	<b>1.8</b>

Tabla 9. Emisiones totales de metales para el área de estudio.

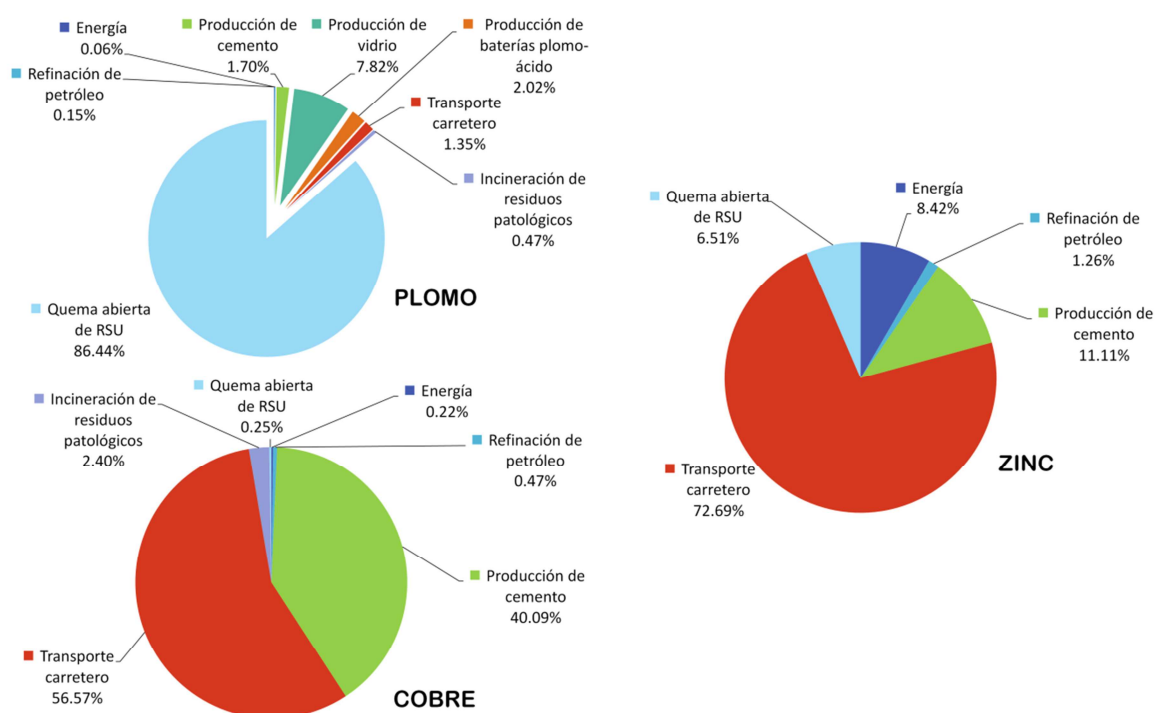


Figura 3. Fuentes de metales y su contribución a las emisiones totales para el Gran Mendoza.



### Concentraciones simuladas de metales en el área de estudio

Las salidas del modelo CALPUFF se procesaron para sumar las contribuciones de todas las fuentes para los tres compuestos modelados. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra 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 de basurales a cielo abierto y autopistas principales.

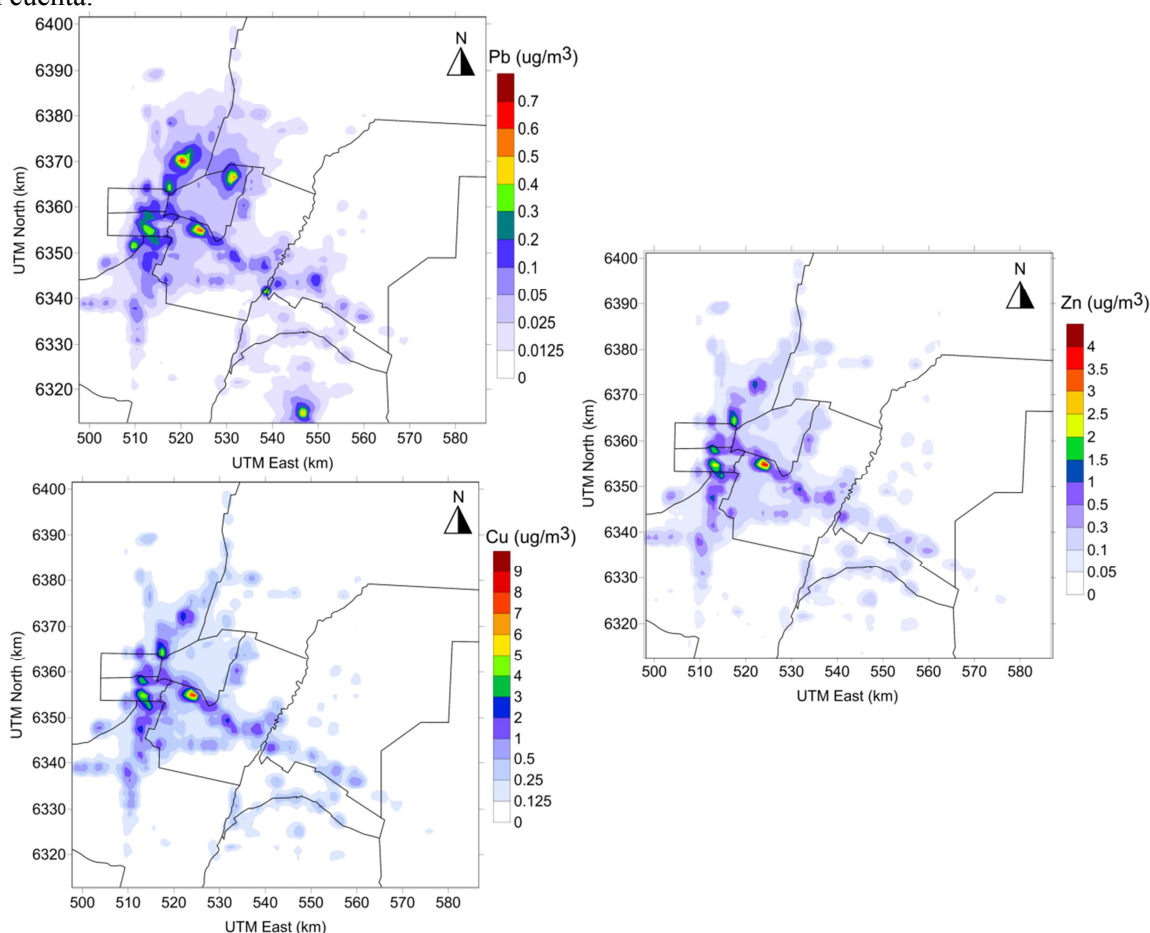
## CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Los mapas de concentraciones generados por el modelo CALPUFF (*Figura 4*) muestran un fuerte gradiente horizontal, donde las máximas concentraciones se dan en torno a las fuentes de emisión.

Las concentraciones modeladas muestran concordancia con las emisiones (*Figura 3*) y el uso de suelo (*Figura 1*).

Puede notarse que para el Cu y el Zn, que son liberados a la atmósfera principalmente a causa del tráfico vehicular, la dispersión presenta los mayores niveles en las áreas urbanas, reflejando el patrón del uso de suelo.

Asimismo, el Pb, cuya fuente principal de emisión es la quema abierta de RSU, muestra las mayores concentraciones en la periferia de los sitios donde se realiza esta actividad, aunque puede observarse la influencia del tráfico. Este metal es el único, de los tenidos en cuenta en este trabajo, que es considerado “contaminante criterio” por la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA), y fija un valor máximo de exposición de  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un promedio de 3 meses. Como puede observarse en la *Figura 4*, este valor no sería superado en ningún punto del dominio geográfico tenido en cuenta.



*Figura 4. Promedios de 30 días de concentraciones de metales simuladas con CALPUFF para el Gran Mendoza (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).*

La *Tabla 10* presenta valores medidos en otras regiones de las sustancias simuladas, con el fin de comparar el orden de magnitud de las concentraciones calculadas por la modelación llevada a cabo. Como puede observarse, los valores simulados son coherentes con aquellos medidos en contextos similares.

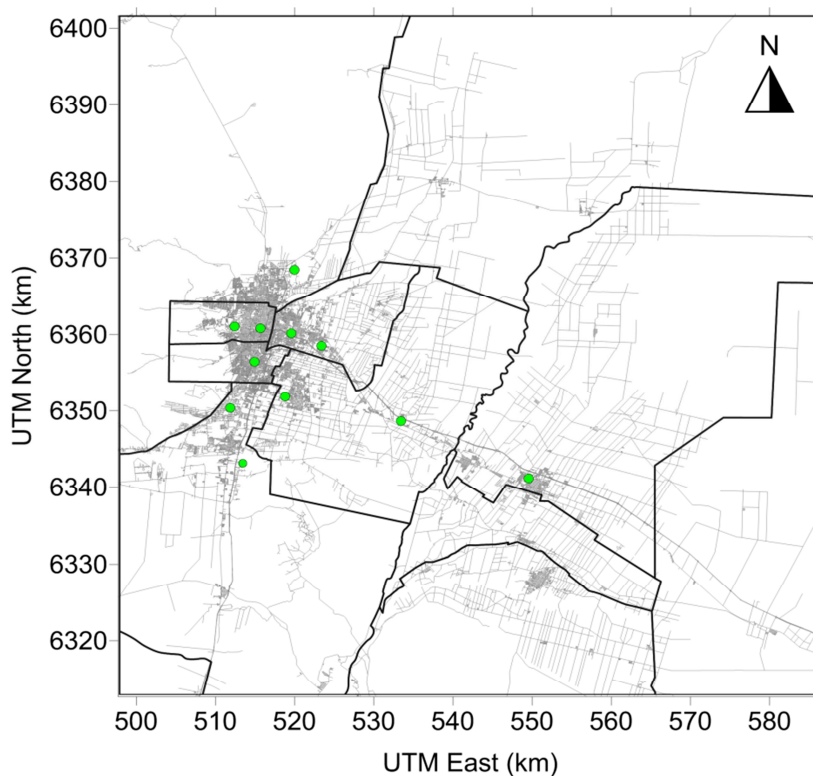
Lugar	Niveles (ug/m <sup>3</sup> )			Zona	Referencia
	Pb	Cu	Zn		
Gran Mendoza	0 - 0.7 (simulados)	0 - 9.0 (simulados)	0 - 4.0 (simulados)		Este estudio
Maracaibo (Venezuela)	0.41 - 1.13		0.03 - 0.05	urbana	(Machado et al., 2008)
Oporto (Portugal)	0.03 - 0.96	0.02 - 0.38	0.04 - 2.2	urbana	(Vasconcelos and Tavares, 1998)
Caracas (Venezuela)	0.7 - 2.4	0.009 - 0.053	0.005 - 0.068	urbana	(Ramirez et al., 1994)
Córdoba (Argentina)	0.18	0.03		urbana	(Sbarato et al., 1997)
Christchurch (Nueva Zelanda)	0.03 - 1.3	0.003 - 0.09	0.01 - 0.9	urbana pequeña	(Kim and Fergusson, 1994)

*Tabla 10. Concentraciones medidas de metales en otras regiones*

Los trabajos tomados como referencia en la *Tabla 10*, no dan mayores detalles de cómo han sido seleccionados los puntos en donde se han realizado las mediciones, por lo que la representatividad de los valores máximos y mínimos es limitada.

En base a esto, y según se mencionó anteriormente, uno de los objetivos de este trabajo fue generar un mapa de concentraciones que sirva de guía a la hora de diseñar el monitoreo de metales en el área del Gran Mendoza, ya que tener una idea de la magnitud y localización de las emisiones, como así también de la dispersión en alta resolución, permite evaluar la escala a la cual el sistema físico es caracterizado por una red de valores medidos y posibilita captar el gradiente de concentraciones, junto con los puntos de riesgo en lo que se refiere a exposición humana.

La *Figura 5* muestra entonces los puntos seleccionados para el muestreo en base a lo expuesto anteriormente.



*Figura 5. Puntos seleccionados para medición de niveles atmosféricos de metales*

## REFERENCIAS

- Bost, M., Houdart, S., Oberli, M., Kalonji, E., Huneau, J.F., Margaritis, I., 2016. Dietary copper and human health: Current evidence and unresolved issues. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 35, 107–115.
- CAMMESA, 2014. Informe anual 2014.
- Cereceda-balic, F., Palomo-marín, M.R., Bernalte, E., Vidal, V., Christie, J., Fadic, X., Guevara, J.L., Miro, C., Gil, E.P., 2012. Impact of Santiago de Chile urban atmospheric pollution on anthropogenic trace elements enrichment in snow precipitation at Cerro Colorado, Central Andes. *Atmos. Environ.* 47, 51–57.
- Chang, M., Huang, C., Wu, H., Lin, J., Chang, S., 2000. Characteristics of heavy metals on particles with different sizes from municipal solid waste incineration. *J. Hazard. Mater.* 79, 229–239.
- Duyzer, J., van den Hout, D., Zandveld, P., van Ratingen, S., 2015. Representativeness of air quality monitoring networks. *Atmos. Environ.* 104, 88–101.
- European Environment Agency, 2013. EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook.
- Font, A., de Hoogh, K., Leal-Sanchez, M., Ashworth, D.C., Brown, R.J.C., Hansell, A.L., Fuller, G.W., 2015. Using metal ratios to detect emissions from municipal waste incinerators in ambient air pollution data. *Atmos. Environ.* 113, 177–186.
- Hansen, M., DeFries, R., Townshend, J.R.G., Sohlberg, R., 1998. UMD Global Land Cover Classification, 1 Kilometer, 1.0e. College Park, Maryland.
- Harnett, B., Hawes, T., Allen, T., 2008. Technical Issues Related to Use of the CALPUFF Modeling System for Near-field Applications. Research Triangle Park.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama, Kanagawa JAPAN.
- Johansson, C., Norman, M., Burman, L., 2009. Road traffic emission factors for heavy metals. *Atmos. Environ.* 43, 4681–4688.
- Kim, N.D., Fergusson, J.E., 1994. The concentrations, distribution and sources of cadmium, copper, lead and zinc in the atmosphere of an urban environment. *Sci. Total Environ.* 144, 179–189.
- Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdova, A., Linares, M., Giraldoth, D., Velásquez, H., 2008. Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 24, 171–182.
- NOAA-NGDC, 2010. Version 4 DMSP-OLS Nighttime Lights Time Series [WWW Document].
- Norouzi, S., Khademi, H., Faz Cano, A., Acosta, J. a., 2015. Using plane tree leaves for biomonitoring of dust borne heavy metals: A case study from Isfahan, Central Iran. *Ecol. Indic.* 57, 64–73.
- Pollard, A.S., Williamson, B.J., Taylor, M., Purvis, W.O., Goossens, M., Reis, S., Aminov, P., Udachin, V., Osborne, N.J., 2015. Integrating dispersion modelling and lichen sampling to assess harmful heavy metal pollution around the Karabash copper smelter, Russian Federation. *Atmos. Pollut. Res.* 6, 939–945.
- 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.
- Ramirez, a J., Fernandez, a J., Fraile, R., 1994. Lead, copper and zinc in atmospheric and fluvial particulates from the Caracas Valley, Venezuela. *Environ. Geochem. Health* 16(3/4), 129–136.
- Rashad, M., Shalaby, E. a., 2007. Dispersion and Deposition of Heavy Metals Around Two Municipal Solid Waste (MSW) Dumpsites, Alexandria, Egypt. *Am. J. Agric. Environ. Sci.* 2, 204–212.
- Rueda-Holgado, F., Palomo-Marín, M.R., Calvo-Blázquez, L., Cereceda-Balic, F., Pinilla-Gil, E., 2014. Fractionation of trace elements in total atmospheric deposition by filtering-bulk passive sampling. *Talanta* 125, 125–130
- Sbarato, V., Basan, R., Manzo, P., Ortega, J.E., Campos, M., Salort, M.R., 1997. Análisis y Caracterización del Material Particulado. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba.
- Scire, J.S., Robe, F.R., Fernau, M.E., Yamartino, R.J., 2000a. A User's Guide for the CALMET Meteorological Model.

- Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J., 2000b. A User ' s Guide for the CALPUFF Dispersion Model, Control.
- U.S Environmental Protection Agency, 1995. Appendix B.2 Generalized Particle Size Distributions. *Compil. Air Pollut. Emiss. Factors, Vol. I Station. Point Area Sources, AP-42 90*, 1–22.
- U.S Environmental Protection Agency (EPA), 1995. Testing of meteorological and dispersion models for use in regional air quality modeling. Concorde, MA.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1995. Portland Cement Manufacturing, AP-42, *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1997. Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Lead and Lead Compounds.
- U.S. EPA, 1998. A comparison of CALPUFF with ISC3. Research Triangle Park, NC 27711.
- Vasconcelos, M.T.S.D., Tavares, H.M.F., 1998. Atmospheric metal pollution (Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn) in Oporto city derived from results for low-volume aerosol samplers and for the moss *Sphagnum auriculatum* bioindicator. *Sci. Total Environ.* 212, 11–20.

## **ABSTRACT**

This article presents the application of modeling system WRF/CALMET/CALPUFF to evaluate the dispersion of metals (Cu, Pb and Zn) in the Great Mendoza, in order to determine atmospheric levels of these substances and to design a monitoring network. A high resolution emission inventory was created in an area of 90 km x 90 km, whit 1km grid, as baseline scenario for estimating the concentration levels in the city center and surroundings using the modeling system.

The data presented in this study provide an overview of the concentrations of selected metals in the Great Mendoza. As a preliminary validation, simulated levels were compared with measurements in other regions with similar spatial contexts and consistency in the values obtained is found, suggesting a correct behavior of the model. Finally, using the obtained maps concentrations, monitoring points were set in order to: evaluate the scale at which the physical system is characterized by a network of measured values; capture the concentration gradient, as well as the risk points in regard to human exposure. Finally, it is expected that measurements made at selected sites serve as feedback to improve both the emissions inventory and model performance.

**Keywords:** Emission inventory, dispersion model, metals, monitoring network, Great Mendoza.