

Calidad del aire en ciudades intermedias

S. E. Puliafito, D. Allende

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires,
Medrano 951, (C1179AAQ) Buenos Aires, Argentina
Investigador del CONICET

e-mail: epuliafito@frm.utn.edu.ar

Recibido el 15 de diciembre de 2005; aceptado, en versión revisada, el 10 de julio de 2007

Resumen

Como en otras regiones del mundo, las ciudades hacen frente a un proceso creciente de urbanización, con su correspondiente congestión del tránsito, aumento en la contaminación atmosférica, y pérdida del espacio verde o agrícola. Inclusive desde el punto de vista de un posible cambio global climático, la quema de combustibles fósiles, la producción energética, la industria y el transporte, continúan siendo los principales emisores de carbono y otros contaminantes que afectan la calidad del aire. En este artículo se revisa el rol de la ciudad como principal emisor de gases de efecto invernadero y otros contaminantes que afectan la calidad del aire. Para ello se presentará primeramente un detalle del procedimiento metodológico para la confección de un buen inventario, en segundo lugar un balance de las emisiones principales y tercero un cálculo de la calidad del aire tomando como área de estudio las regiones metropolitanas del Gran Mendoza y Bahía Blanca. En particular se han elegido estas dos ciudades por poseer un programa de monitoreo de contaminantes, lo que permite una efectiva evaluación del inventario de emisiones y su impacto sobre la calidad del aire.

PALABRAS CLAVES: EMISIONES DE EFECTO INVERNADERO, CALIDAD DEL AIRE, MODELOS DE DISPERSIÓN, CENTROS URBANOS.

Abstract

Like in many other regions in the world, cities face an increasing urbanization process, with traffic congestion, increasing air pollution and loss of green and productive areas. Moreover, from a possible climate change point of view, the emissions from the energy production, the industry and the transport are still the main carbon emitters and other pollutants which affect the air quality. This paper reviews the roll of cities as main GHG emitters and other contaminants, which affect the air quality. Therefore three main sections are prepared, a first one shows a review of the methodology to prepare an inventory, a second section shows emissions calculation, and the third section presents the calculation of the corresponding air quality. We will present as case studies the Metropolitan area of Mendoza and Bahía Blanca. This two cites have been selected due to their existing monitoring program of main pollutant, which allows an effective evaluation of the emission inventory and its impact on the air quality.

KEYWORDS: EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES, AIR QUALITY, DISPERSION MODELS, URBAN CENTRES.

Introducción

La evaluación de la contaminación atmosférica urbana así como de las emisiones de efecto invernadero se basa en la preparación de buenos inventarios de fuentes. Dependiendo de la resolución temporal y geográfica deseada en tales inventarios, se pueden realizar dos tipos de cálculos complementarios: el método de arriba hacia abajo (top-down) y el método de abajo hacia arriba (bottom-up). En cualquiera de los métodos se necesita buena información sobre fuentes de emisión, de consumo de energía y datos meteorológicos. Los inventarios de emisión se pueden preparar según el tipo de fuente: así, por ejemplo, para las grandes industrias, se realiza a través de declaraciones juradas y cuestionarios sobre emisiones y consumos de energía, lo que se puede comprobar con mediciones "in-situ" en chimeneas. En cambio a los consumidores pequeños de energía se los trata como fuentes de área cuya emisión se calcula usando factores medios de emisión y consumo anual de combustible. Las fuentes móviles (vehículos privados, transporte de pasajeros y carga) se calculan por medio de factores de emisión que dependen del consumo de combustible total o a partir de los kilómetros anuales recorridos por el parque automotor total.

En este artículo se presenta en la primera parte, un resumen metodológico aplicado particularmente para las zonas urbanas, en una segunda parte presentamos una evaluación de las emisiones en dos centros urbanos, las ciudades de Mendoza y Bahía Blanca. Finalmente en la tercera parte mostraremos el impacto sobre la calidad del aire de estas emisiones, calculando las concentraciones ambientales a partir de la paliación de modelos de dispersión para ambas ciudades. Dividiremos, entonces, nuestro análisis en los siguientes aspectos:

Descripción de la metodología utilizada.
Evaluación de las fuentes industriales y residenciales
Determinación de la emisión total de los gases de efecto invernadero.
Aplicación de modelos de dispersión para simular la actual situación de la calidad del aire en la zona bajo estudio.
Una comparación del modelo con mediciones de calidad del aire.

Metodología usada

Determinación de las emisiones de contaminantes

Aspectos generales

Presentaremos a continuación una descripción de la metodología usada para la estimación de la emisión de contaminantes y gases de efecto invernadero.

Una explicación detallada de este método se puede encontrar en Puliafito et al (1999, 2000, 2003, 2005), y las agencias ambientales internacionales tales como EEA (la Agencia Ambiental Europea), USEPA (AP-42), o el Panel Internacional para el Cambio Climático. Estos métodos permiten el cálculo de la emisión de contaminantes tales como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos volátiles no metánicos (NMVOC), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), amoníaco (NH₃), óxidos de azufre (SO_x), material particulado (PM10), hidrocarburos poliaromáticos (PAH), metales pesados tales como plomo (Pb), cromo (Cr), níquel (Ni), y otros.

Los factores de emisión y los inventarios de emisión han sido herramientas fundamentales para la administración y control de la calidad del aire. Las estimaciones de las emisiones son importantes para establecer las estrategias de control de emisión, establecer los programas de permiso, realizar la evaluación de impacto ambiental, y determinar estrategias apropiadas de mitigación. Cuando no se cuenta con mediciones realizadas sobre las propias fuentes de emisión, se usan factores de emisión promedios basados en la actividad de la fuente. Un factor de emisión es un valor representativo que procura relacionar la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a esa emisión. Estos factores se expresan generalmente como el peso del contaminante emitido dividido por la unidad de peso, volumen, distancia, o duración de la actividad que emite el agente contaminador (e. g., kilogramos de NO_x por toneladas de petróleo quemado). En la mayoría de los casos, estos factores son simplemente promedios de todos los datos que se encuentran disponibles y que tienen una calidad aceptable, y se asumen como representativos de los promedios a largo plazo para todas las instalaciones similares. Este factor puede ser obtenido, por ejemplo de los inventarios de la agencias de protección del medio ambiente, como por ejemplo en EUA el Manual AP42 de la EPA o en Europa el Manual CORINAIR.

La forma general para la estimación de la emisión a través de factores de emisión es:

$$E = A \times F \times (1 - C / 100) \quad (1)$$

donde,

E emisión total de contaminantes: g de contaminantes por unidad de tiempo,

A tasa de actividad, por ejemplo, kg anuales de combustible consumido,

F factor de emisión, (por ejemplo g de contaminantes emitidos por kg de combustible anual utilizado),

C eficiencia promedio de reducción de contaminantes en dispositivos de control, en %.

La tasa de actividad A puede expresarse también como la producción anual de la industria, por ejemplo, toneladas de cemento anuales; entonces el factor de emisión F se expresará como g de contaminantes emitidos por tonelada de producto producido. La selección de uno u otro caso dependerá del objetivo de estudio o de los datos disponibles. Cuando se realiza el inventario de una empresa, existen dos tipos de emisiones típicas, una la producida por el consumo de combustible, por ejemplo, en calderas, hornos, etc. Y la otra, la típicamente asociada a la producción propiamente dicha. Los factores de emisión tratan de captar ambos casos. Por ejemplo para estimar la emisión anual de NO_x en una central eléctrica térmica, se pueden realizar dos cálculos:

Primero, estimar el consumo de combustible anual (Tn/año) y después multiplicar por el factor de emisión apropiado (g de NO_x /Tn del combustible usado).

Alternativamente, se mide la emisión de NO_x en chimenea durante una hora, y después se multiplica esta tasa de emisión por la cantidad de horas operacionales de la central eléctrica (hs/año).

Este segundo caso da una mejor valoración de la emisión total, sin embargo, como se dijo más arriba, esta información de detalle no está siempre disponible para todas las fuentes. La metodología llega a ser más específica según sea el tipo de fuentes: de punto, línea o área.

Fuentes de punto: también llamadas fuentes fijas; las emisiones se concentran en una chimenea, y su localización geográfica se determina exactamente. Es posible establecer los parámetros físicos de las fuentes, tal como la altura y el diámetro de la chimenea, la temperatura de salida, la velocidad de escape, y el volumen de gases o las partículas emitidas por unidad de tiempo, expresada normalmente como g/s.

Fuentes de área: son normalmente más pequeñas y difusas; se caracterizan a partir de un factor de emisión por unidad de área como g/(s.m²).

Fuentes lineales: Estas fuentes se utilizan para describir las emisiones de los vehículos en autopistas y rutas rurales con un flujo constante de vehículos, los factores de emisión se expresan en g/km.

Cálculo de las emisiones de fuentes móviles

Para calcular las emisiones de fuentes móviles, y dependiendo de la información disponible se usan factores específicos de emisión para cada tipo de vehículo según sea su uso, tamaño, combustible, edad, peso, tecnología, etc. Por ejemplo se puede consultar el grupo 7, CORINAIR, (2003). Aquí también se puede utilizar alguno de los dos métodos descriptos previamente para estimar las emisiones de fuentes móviles, uno basado en el combustible

total consumido y el otro basado en la distancia anual recorrida por vehículo. Los vehículos diesel típicos emiten PM10, CO, NO_x y HC.

De acuerdo con el primer método, las estimaciones totales de la emisión se pueden calcular usando la ecuación simple:

$$E_i = \sum_j (C_j \times F_{ij}) \quad (2)$$

donde,

E_i emisión de contaminantes i [g de contaminantes por unidad de tiempo],

C_j consumo de combustible del vehículo de la categoría j [kg de combustible por unidad de tiempo],

F_{ij} factor de emisión específico para consumo de combustible, para el contaminante i del vehículo de la categoría j [g/kg comb].

El segundo se basa en el siguiente esquema de cálculo:

$$E_{ijk} = N_j \times L_{jk} \times F_{ijk} \quad (3)$$

donde,

$E_{i,j,k}$ emisión del contaminante i [g/año], producido por vehículos de la clase j en caminos de jerarquía k ,

N_j número de vehículos [veh.] de la clase j ,

$L_{j,k}$ kilómetros anuales recorridos [km/(veh. año)] por vehículos de la clase j en caminos de jerarquía k ,

$F_{i,j,k}$ factor de emisión promedio [g/km], para el contaminante i , del vehículo clase j , circulando en caminos de jerarquía k ,

i contaminantes como CO, PM10, NO_x y otros,

j tipo o clase de vehículo según sea su tamaño, uso, combustible, etc.,

k tipo o jerarquía de calles y avenidas: primarias, secundarias, urbanas, rural, autopistas.

Debe notarse, que los factores de emisión se especifican para cada tipo de contaminante considerado, tipo de vehículo, tamaño, tecnología y combustible. Por otra parte el mismo vehículo emitirá diferentemente dependiendo del tipo de camino, de velocidad media y de su temperatura de trabajo. Para las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 entre otros), el IPCC (IPCC, 1996) sugiere el método basado en el combustible consumido.

Cálculo de las emisiones de fuentes industriales

La evaluación de las emisiones a la atmósfera de fuentes puntuales se basa en el consumo total del combustible y en la producción anual de la actividad, según se expresó en la Ecuación (1):

$$E_i = \sum_j A_j \times \left(\sum_k F_{ij} \times C_{ki} \right) \quad (4)$$

donde,

E_i emisión del contaminante i [g /año],
 A_j tasa de actividad anual j o consumo anual de combustible [Tn / año],
 F_{ij} factor de emisión específico para el contaminante i , y combustible j [g/kg de producción o g/kg de combustible],
 C_{ki} eficiencia tecnológica en el control de las emisiones a la atmósfera.

Cálculo de las emisiones de fuentes de área

Se tratan como fuentes de área aquellas fuentes puntuales de emisiones reducidas, muy numerosas y con una distribución geográfica amplia, cuyo tratamiento individual sería muy trabajoso, como por ejemplo, las emisiones residenciales, los vehículos circulando por calles terciarias, etc. También se incluyen entre las fuentes de área aquellas que emiten superficialmente, por ejemplo, la erosión del viento sobre pilas de material, lagunas de hidrocarburos, etc. Al igual que las otras fuentes se puede calcular la emisión total usando un factor de emisión promedio por área:

$$E_{ij} = \sum_j (S_j \times F_{ij}) \quad (5)$$

donde,

E_{ij} emisión de contaminantes i para el área tipo j [g de contaminantes por unidad de tiempo],
 S_j superficie de la actividad j [m² afectados por unidad de tiempo],
 F_{ij} factor de emisión específico del contaminante i para la actividad j [g/(s.m²)].

Cálculo de las concentraciones ambientales

La evaluación del impacto de las emisiones se realiza a través del uso de modelos de dispersión atmosférica, por ejemplo: ISC3, AERMOD, CALPUFF que calculan las concentraciones ambientales a partir del inventario de emisiones e información meteorológica como temperatura, viento y estabilidad atmosférica. Estos programas fueron diseñados

especialmente para las fuentes industriales múltiples, pero también permiten su uso en fuentes de línea o de área.

Modelos de dispersión para fuentes puntuales

Los modelos de dispersión para las fuentes puntuales industriales necesitan del ingreso de los datos preparados en el inventario: las tasas de emisiones, las dimensiones de la chimenea, la temperatura, flujo y velocidad de escape de las mismas chimeneas, y su posición geográfica específica. El programa de dispersión calcula los valores de concentraciones para cada celda (o receptor) de una grilla del área bajo estudio. La concentración ambiental en un receptor situado a una distancia (x, y, z) de una fuente fija se calcula generalmente usando un pluma gaussiana bidimensional. La concentración C (g/m³) para las coordenadas (x, y, z) es:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{u \pi \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (6)$$

donde,

Q (g/s) tasa de emisión de la fuente,
 x dirección del viento,
 H (m) altura eficaz de la chimenea,
 y distancia transversal a la dirección del viento en el plano horizontal,
 z altura del receptor sobre la tierra,
 u (m/s) velocidad del viento,
 σ_z (m) y σ_y (m) coeficientes de dispersión lateral y vertical respectivamente.

Estos coeficientes están tabulados y dependen de la clase de la estabilidad y de la distancia a la fuente x (Turner, 1970). Esta ecuación y los modelos de dispersión están suficientemente tratados en libros de textos y publicaciones. Sin embargo sólo haremos unas pequeñas consideraciones. Debe notarse que los modelos gaussianos representan una aproximación estadística, ya que la pluma varía en forma aleatoria instantáneamente de acuerdo a la dirección del viento. Sin embargo los valores medios horarios se aproximan a la función descrita en (6). Otro elemento importante es que el modelo gaussiano simple, Ecuación (6), no considera la combinación química entre los contaminantes, es decir, los gases y partículas se consideran inertes, y la validez del modelo a una distancia a sotavento no debe exceder los 25 kilómetros; estos modelos no consideran los aspectos microdinámicos locales en el receptor, por ejemplo debido a la influencia de los árboles, edificios, etc. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, los cálculos representan adecuadamente las concentraciones ambientales para promedios horarios, diarios, mensuales y anuales; y se usan

especialmente para determinar si el impacto de las emisiones de una fuente o conjunto de fuentes, esto es, las concentraciones ambientales calculadas, superan las normas de calidad del aire establecidas para los receptores seleccionados.

Cálculo detallado para las fuentes móviles

La emisión total E_i para cada contaminante i se calcula, en forma más detallada, según la Ecuación (3) como:

$$E_i = \sum_k L_k \times \left(\sum_j F(m_i, k, v_j) \times N_{j,k} \right) \quad (7)$$

donde,
 $F(m_i, k, v_j)$ factor de emisión es expresado como la masa de contaminante m_i
 v unidad de longitud y es una función de la velocidad y del tipo de vehículo j , y del contaminante k ;
 $N_{j,k}$ flujo de tráfico es expresado para cada segmento de calle k y tipo de vehículo j .
 k tipo de vehículo depende del combustible utilizado (GNC, gasoil, nafta) y de su uso (carga, particular, pasajeros).

Tres variables principales necesitan ser estimadas entonces, el flujo promedio en cada segmento y tipo de vehículo, la velocidad promedio y el factor de emisión específico. En un sistema de información geográfico (SIG), los segmentos de tipo línea en la base de datos representan una calle. En cada uno de esos registros se almacena la longitud y ancho de la calle, la cantidad de vehículos, la velocidad media, etc. Las calles son caracterizadas de acuerdo con tres jerarquías: a) primarias, incluyen los accesos principales a la ciudad y rutas inter-departamentales, b) secundarias o intra-departamentales, c) terciarias

o residenciales. Las jerarquías se eligen de acuerdo a su intensidad de tráfico, variaciones horarias y uso dominante.

La principal fuente de incertidumbre de este cálculo, está dada por el desconocimiento de la distribución real del número de vehículos en cada segmento. Aunque se utilizan conteos de tráfico y una encuesta origen-destino para calibrar los datos, es necesario usar un modelo de tránsito para asignar específicamente un flujo N y velocidad v apropiados a cada segmento. Para especificar N y v se usa distintos tipos de información, como la densidad de población de la ciudad y las localización de zonas comerciales, industriales, universidades y actividades de gobierno, las que producen centros de atracción del tráfico vehicular. Los conteos vehiculares y la correspondiente velocidad promedio del segmento muestran una cierta proporcionalidad como función de la distancia a los centros de atracción y a la jerarquía de la calle. Estas dos variables, la distancia y la jerarquía, se usan para computar el flujo vehicular y la velocidad en cada segmento, de acuerdo a los siguientes cálculos:

$$\begin{aligned} v(s, j, k) &= V_0(j, k) \exp((1-d)/A) \\ N(s, j, k) &= N_0(j, k) \exp((d-1)/B) + N_1 \end{aligned} \quad (8)$$

donde,
 $v(s, j, k)$ (km/h) velocidad en el segmento s de jerarquía k , y vehículos de la clase j ;
 $N(i, j, k)$ número de vehículos k , que circulan por día por el segmento s de jerarquía k ,
 d distancia normalizada al área central ($d=1$ en el área central, $d=0$ en los límites del área bajo estudio),
 A y B coeficientes que se calibran con el conteo de tránsito.

La Tabla 1 muestra los datos usados para el Gran Mendoza.

Tabla 1. Coeficientes para el flujo vehicular y la velocidad de cada jerarquía.

Variable	Jerarquía					
	Primaria			Secundaria		Terciaria
k	110	120	130	210	220	310
V₀	60	40	40	30	25	20
A	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1
N₀	40000	40000	27000	25000	20000	12000
N₁	2500	1000	500	300	300	300
B	0,36	0,3	0,3	0,27	0,17	0,25

Fuente: Elaboración propia.

Una vez preparado el inventario de todos los segmentos de calles, se procede a correr el programa de dispersión, aplicando los algoritmos de línea o área extendida. Esto es conveniente para las avenidas y accesos principales correspondientes a las jerarquías primarias o secundarias. Pero para las calles residenciales de la tercera categoría, es preferible tratarlas como fuentes de área, como se explicará en la sección siguiente.

Cálculo de las concentraciones de contaminantes para fuentes de área

Cuando se desea estimar la contaminación en un centro urbano, uno se enfrenta a menudo con el problema de calcular el efecto acumulativo de numerosas fuentes pequeñas (áreas residenciales, pequeñas empresas, emisiones de vehículos, etc.), que se distribuyen sobre un área grande. En tales casos la tasa de emisión se expresa como un flujo medio de contaminantes por unidad de área (g/m².s).

Una posible solución es dividir el sector urbano en fuentes rectangulares. La concentración ambiente se puede calcular usando el modelo de dispersión gaussiana estándar aplicado para las fuentes de área. Si un área tiene la dimensión D_y transversal al viento y dimensión D_x según la dirección del viento, la concentración viento abajo se puede calcular para un área infinitesimal $dx' dy$, aplicando la ecuación de dispersión gaussiana para fuentes fijas, modificada de la siguiente forma:

$$C(x, y, z) = \frac{q}{\pi \times u} \int_0^{D_x} \frac{1}{\sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \left[\int_{-D_y/2}^{D_y/2} \exp\left(\frac{-y'^2}{2\sigma_y^2}\right) dy' \right] dx, \\ = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{q}{u} \int_0^{D_x} \frac{1}{\sigma_z} \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \times \text{erf}\left(\frac{D_y}{2\sigma_y \sqrt{2}}\right) dx \quad (9)$$

donde,

q tasa de emisión de la fuente por unidad de área en g/(m².s),

σ_y y σ_z (m) coeficientes de dispersión lateral (y) y vertical (z);

u velocidad del viento (m/s) a lo largo del eje x.

erf función de error, y es una medida del área bajo la función de distribución gaussiana. Por ejemplo, el modelo de la EPA ISC3, utiliza un algoritmo similar a la Ecuación (9), inclusive para fuentes de área con diversas formas rectangulares, pero el tiempo de cálculo es muy grande comparado con el tiempo de procesamiento de las fuentes puntuales.

Para reducir el tiempo de cálculo se propone el siguiente algoritmo. La contribución de una celda particular a una grilla de dimensiones $my' \times nx$ se

puede calcular aplicando las ecuaciones antedichas para una grilla rectangular básica con una tasa normalizado de emisión de 1 mg/(m².s). Usando un conjunto de datos meteorológicos, se pueden calcular diversos promedios temporales para esta grilla básica unitaria, por ejemplo promedios cada hora, diarios, mensuales o anuales o valores máximos. La concentración ambiente de la ciudad entera, de dimensión ($Lx' Ly$), será la convolución o superposición del patrón de la emisión de la celda en

$$C(x, y, 0) = \int_0^{Lx} \int_0^{Ly} E(\lambda, \tau) \times P(x - \lambda, y - \tau) d\lambda d\tau \quad (10)$$

donde,

λ y τ distancias máximas de los efectos considerados por la celda básica en la dirección x e y respectivamente.

Normalmente la dispersión de las emisiones de un área está concentrada alrededor de la celda emisora, por lo que si se toman λ y τ unas 15 á 20 veces el tamaño de la celda unitaria se habrá cubierto suficientemente el efecto de cada celda.

La ventaja de un plantear una solución para una grilla de emisiones, como el propuesto en (10), es que, para una condición meteorológica dada, cada celda contribuirá de la misma manera a las celdas vecinas pero escalada por la emisión de cada celda emisora. Este método de cómputo es más eficiente y su tiempo de cálculo es varias veces menor que los algoritmos usados estándares para cualquier forma de área.

Resultados

Con el fin de mostrar la aplicación de los métodos arriba planteados mostraremos los balances de consumo de energía y emisiones para dos ciudades intermedias de Argentina: el área Metropolitana del Gran Mendoza y el Polo Petroquímico de la ciudad de Bahía Blanca. En el primero enfatizaremos las emisiones urbanas y vehiculares; y en el segundo caso describiremos las emisiones industriales de ese importante polo industrial.

La ciudad de Mendoza

La ciudad de Mendoza (33°S, 68°W, s. l. de 750 m. a. N.) es la principal ciudad del oeste de la Argentina y capital de la Provincia de Mendoza. Su característica más distintiva lo constituye su clima árido en la mayoría de su territorio (con unos 250.000 km²) con precipitaciones menores a 220 mm anuales. La totalidad de la población de Mendoza vive distribuida en tres oasis artificiales (oasis norte, oasis central y oasis sur) irrigados por sus cinco ríos principales, todos con flujos medios anuales menores a 50m³/h. El 70% de la población de Mendoza está situado en el Oasis Norte con alrededor de 900.000 habitantes. Está

formado por seis municipios: Ciudad de Mendoza (o departamento Capital), Las Heras, Guaymallén, Godoy Cruz, Luján y Maipú y tiene una extensión urbana aproximada de 370 kilómetros cuadrados y una densidad demográfica media urbana de 2800 hab/km². La Provincia de Mendoza participa con el 4,5 % del PBI nacional, mientras que el área metropolitana alcanza los 2,5 %.

Las emisiones de carbono y contaminantes principales que afectan la calidad del aire provienen de cinco sectores: la producción energética, la industria, la agricultura, los sectores del servicio, residenciales y el transporte. Las principales actividades de estos sectores son: a) producción energética e industria, entre ellos una refinería de petróleo; una industria petroquímica; una empresa de ferroaleaciones, una central termo-eléctrica y una industria de producción de cemento; b) sector agrícola: Mendoza tiene una

actividad agrícola importante orientada a la producción vinos, aceite de olivas, frutas en fresco y verduras; c) sector de servicio: comercio, educación e institucionales; d) residencial: este sector ha tenido una gran expansión geográfica en la última década; e) transporte de mercancías y de pasajeros.

Consumo sectorial del Gran Mendoza

Sector industrial y energético

Las Tablas 2 y 3 muestran el consumo de energía por sector y tipo de combustibles respectivamente. Dos sectores se presentan como consumidores principales: el de la energía, que incluye la producción y transformación energética y el sector del transporte. El sector rural consume principalmente electricidad o gas-oil para bombear el agua subterránea y para el transporte de carga.

Tabla 2. Consumo neto de energía secundaria por sector en Tera Joules.

Sector	1980	1990	2000
Producción de energía	15133	17540	17385
Residencial	5022	6970	9676
Rural	1293	1198	1307
Industrial	8812	8320	6051
Transporte	12978	12838	14143
Servicios	982	1569	2527
Total	44219	48435	51089

Fuente: Lavanderi et al, 2000; Argentina, 1999.

Tabla 3. Consumo neto de energía por tipo de combustible en Tera Joules.

Combustible	1980	1990	2000
Gas natural	3418	1968	2400
Otras fuentes primarias	264	523	1391
Gas distribuido	2912	13446	21342
Gas licuado	1617	1476	1557
Gas de refinería	2575	4006	5088
Nafta C	3034	2144	2021
Nafta E	3082	2945	2522
Kerosene	740	563	279
Jet Fuel	1001	370	72
Gas Oil	7716	8425	8651
Diesel Oil	2534	456	0
Fuel Oil	11892	7016	2781
Carbón residual	6285	5864	2265
Electricidad	4671	5976	7571
Otros productos	1116	659	352
Total	52935	56219	59013

Fuente: Lavanderi et al, 2000; Argentina, 1999.

En el sector industrial, las actividades vitivinícolas son consumidoras bajas de energía, en cambio el consumo es mayor en las industrias de ferroatomías, cemento y petroquímica. La Tabla 4 muestra el consumo de combustible del sector de la producción de energía. Como puede verse, en la última década el gas natural participa con el 68% del combustible utilizado.

Sector residencial

La Tabla 5 muestra el consumo de energía del sector residencial por tipo de combustible. Una vez más el gas natural se presenta como el combustible principal para la calefacción y cocina domésticos. Un alto porcentaje de usuarios de gas distribuido y electricidad se encuentran en el área central de la ciudad y en menor cantidad en el distrito norteño de Las Heras. Esto también muestra un estándar de

vida más alto en el área metropolitana central y meridional (Capital, Godoy Cruz y Luján) y menor en la parte norte del Gran Mendoza en el departamento de Las Heras.

Sector transporte

El segundo emisor en Mendoza es el sector del transporte. Sobre 800.000 viajes en 1986 y 1.400.000 en 1998, el transporte público cubría el 53% de la demanda en 1986 y 37% en 1998, lo que evidencia un aumento importante en el uso de vehículos privados, aumentando la tasa de motorización. La demanda diaria de viajes usando los vehículos particulares alcanza el 39% (245.000) para el año 1986, sube al 41% (580.000) en 1998. El uso del vehículo creció en forma significativa alcanzando más de 200.000 vehículos matriculados para el área del gran Mendoza. En la Tabla 6 se

Tabla 4. Producción de energía por combustible.

Combustible	1980		1990		2000	
	TJ	%	TJ	%	TJ	%
Petróleo	10.784	71,3	6.814	38,8	2.793	16,1
Gas natural	2.377	15,7	8.090	46,1	11.761	67,7
Electricidad	877	5,8	1.237	7,1	1.811	10,4
Carbón	1.094	7,2	1.400	8,0	1.021	5,9
Total	15.133	100	17.540	100	17.385	100

Fuente: Lavanderi et al, 2000; Argentina, 1999.

Tabla 5. Consumo de energía del sector residencial.

Combustible	1980		1990		2000	
	TJ	%	TJ	%	TJ	%
Líquidos	646	12,9	475	6,8	264	2,7
Gas natural	3.553	70,7	5.344	76,7	7.799	80,6
Electricidad	820	16,3	1.150	16,5	1.614	16,7
Carbón	3	0,1	1	0,0	0	0,0
Total	5.022	100	6.970	100	9.676	100

Fuente: Lavanderi et al, 2000; Argentina, 1999.

Tabla 6. Indicadores de uso de energía en el transporte.

Uso de energía	1980	1990	2000
Consumo neto total (TJ)	44219	48435	51089
Intensidad energética (kJ por unidad de PBI)	15252	17673	12117
Transporte privado per cápita (MJ/cap)	9649	7581	7208
Transporte público per cápita (MJ/cap)	1888	1483	1410
Transporte privado por pasajero transportado y km recorrido (J/km/pas)		2,4	0,9
Transporte público por pasajero transportado y km recorrido (J/km/pas)		0,1	0,2

Fuente: elaboración propia.

resumen los resultados a través de una serie de indicadores referidos al uso de energía en el transporte. Varios problemas importantes se asocian al uso de los vehículos particulares: a) la alta demanda de espacio que se necesita para circular y estacionar en el área central; b) la alta cantidad de accidentes y el aumento en la tasa de mortalidad por accidentes; c) el aumento de la contaminación por gases y partículas suspendidas.

El incremento en el uso de vehículos particulares ha favorecido las preferencias de vivir en distritos residenciales lejos del área comercial central. Lo que paralelamente ha generado la instalación de grandes centros comerciales y supermercados en las nuevas áreas residenciales, provocando una urbanización irregular. El servicio público de transporte de pasajeros funciona a través de un número reducido de compañías privadas con una concesión del Estado provincial. Esta concesión se renueva normalmente cada 10 años. El transporte público contó en 1994 con 920 unidades con más de 4 años de antigüedad. El transporte público sufrió desde entonces un continuo decrecimiento en la calidad del servicio. Este deterioro fue producido por una disminución de la demanda del transporte público y una falta de adaptación a las nuevas necesidades.

Las consecuencias han sido la pérdida de la calidad del servicio, el aumento de la contaminación debido al envejecimiento del autobús, llegando hoy a más de 10 años de antigüedad. Recién a comienzos del año 2006 se concretó la nueva licitación del sistema de transporte con la renovación de al menos la tercera parte de las unidades. El sistema público se basa 95% en los autobuses diesel mientras que solamente un bajo porcentaje lo conforman los trolebuses eléctricos. Estos trolebuses eléctricos son

operados directamente por una compañía estatal. En los años pasados el gobierno ha incrementado el recorrido de las líneas de trolebuses de 22 a 45 kilómetros e incrementado las unidades en servicio. Desde el punto de vista del consumo de energía, se aprecia en la Tabla 6 que un pasajero usando un transporte privado consume aproximadamente 1 J por km recorrido, mientras que un pasajero usando el sistema público consume sólo 0,2 J. Aún para un sistema de transporte basado en combustible diesel, éste consume 5 veces menos que el auto particular. En vistas de la actual tendencia de crecimiento del parque automotor privado, y la extensión de la ciudad, éste indicador va a empeorarse, lo que significa un aumento del consumo de energía per cápita para el sector transporte. En cuanto a las emisiones de carbono, éstas no aumentarán en la misma proporción, sobre todo por la incorporación de nueva tecnología. El uso de gas natural tiene menores emisiones de CO₂, CO e hidrocarburos pero mayores emisiones de metano.

Emisiones sectoriales de Mendoza

En esta sección describiremos las principales tendencias en las emisiones de carbono para el área metropolitana de Mendoza. En la Tabla 7 puede verse que la producción energética y el transporte son los principales emisores, como así también que ambas emisiones han aumentado en el tiempo. El sector residencial forma un segundo grupo con la industria. Recordemos que la producción energética, el consumo de la industria y el sector residencial se basan principalmente en el gas natural. El transporte utiliza mayoritariamente combustibles líquidos y un porcentaje menor, gas natural.

Tabla 7. Emisiones de dióxido de carbono (miles de Tn).

Sector	1980	1990	2000
Energía	1.180	1.342	1.355
Residencial	299	404	576
Rural	95	88	96
Industrial	668	628	459
Transporte	973	953	1.061
Servicios	55	86	142
Total	3.270	3.500	3.689

Fuente: elaboración propia.

Las emisiones de CO son generadas por el proceso de la combustión incompleta y se relacionan de cerca con las emisiones del CO₂. Éstos son más evidentes en el sector de transporte y la industria pequeña. Los procesos industriales más grandes y la producción energética tienen un control mejor de las emisiones del CO (Tabla 8).

Las emisiones del óxido del nitrógeno se producen principalmente durante procesos de combustión de alta temperatura. Las aplicaciones de gas natural como combustible principal producen altas emisiones de NOx (Tabla 9) siendo la industria, el transporte y la producción energética los emisores principales. A pesar del aumento en el consumo de energía, la mejora en los procesos tecnológicos ha producido

una disminución en las emisiones de NOx. Solamente para el transporte las emisiones han crecido, pero como lo analizaremos desde el punto de vista de la calidad del aire, esto responde al aumento del número vehículos y al envejecimiento del parque automotor.

Las emisiones de metano se presentan en la Tabla 10. Las fuentes de estas emisiones son el sector de transporte, principalmente por el uso del gas natural y en segundo lugar se presentan las emisiones provenientes de los vertederos de residuos urbanos y los tratamientos de aguas residuales. Otro sector importante viene de las actividades de la agricultura y ganadería en las áreas rurales. Puesto que estas actividades no son actividades urbanas propiamente

Tabla 8. Emisiones de monóxido de carbono (enTn).

Sector	1980	1990	2000
Energía	235	267	269
Residencial	47	64	91
Rural	776	721	784
Industrial	3.868	3.633	2.656
Transporte	64.888	63.532	70.713
Servicios	15	24	39
Total ES	69.829	68.240	74.553

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Emisiones de óxidos del nitrógeno (Tn).

Sector	1980	1990	2000
Energía	3.117	3.546	3.581
Residencial	246	331	473
Rural	776	721	784
Industrial	12.336	11.585	8.471
Transporte	5.191	5.083	5.657
Servicios	48	74	124
Total	21.714	21.340	19.090

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Emisiones de metano (Tn).

Sector	1980	1990	2000
Energía	12	14	14
Residencial	6	8	12
Rural	14	13	14
Industrial	12	12	8
Transporte	1.947	1.906	2.121
Servicios	1	1	2
Total por Energía	1.992	1.954	2.172
Residuo + agua residual	9.642	13.013	18.579
Agricultura	1.024	951	1.035
En.+agr+residuos	12.659	15.918	21.786

Fuente: elaboración propia

dichas, el impacto de las emisiones del metano en el perímetro urbano se concentra especialmente en el agua residual. Si comparamos las emisiones de metano per capita de la ciudad con las emisiones del país, se distingue claramente que mientras las emisiones por el uso de la energía son las fuentes principales en la ciudad, desde el punto de vista nacional las emisiones de la agricultura y ganadería contribuyen con el casi 40% de las emisiones de metano.

Descripción del Polo Petroquímico de Bahía Blanca

La ciudad de Bahía Blanca (38° 44" de latitud sur y 62° 16" de longitud oeste), es una de las ciudades portuarias más importantes de la Argentina. La ciudad se presenta como cabecera del sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, con una producción de base agrícola-ganadera, consolidándose como centro urbano proveedor de bienes y servicios para la zona circundante. Es centro de importantes empresas agroindustriales y del sector petroquímico, dando lugar a un proceso de industrialización que, en estos últimos años, se ha convertido en el motor dinamizador de la economía de la ciudad. La población estimada es de 300.000 habitantes, lo que representa el 2,4% del total de la población de la Provincia de Buenos Aires, donde se concentra un tercio de la población de Argentina. El 48,1% son varones y el 51,9% mujeres.

El clima de la ciudad es templado, subhúmedo con temperaturas moderadas y alta variabilidad. En el área de influencia se va tornando seco en dirección al oeste. La temperatura media anual es de 15,1°C con variaciones entre 42°C y -11,8°C. Los meses de junio y julio son los más fríos con una media de 7,25 °C, siendo enero el más cálido con una media de 22,3°C, lo que corresponden a los mínimos y máximos de radiación solar. La precipitación media anual de 620 mm, medidos durante la última década. Los meses más lluviosos son: marzo, octubre, febrero y noviembre. Los vientos predominantes son del sector N-NNW en un 23% de los casos, lo que se

explica por la presencia semi permanente del anticiclón del Sur. La frecuencia de vientos de la dirección ESE (6%) se explica por la influencia de la circulación diaria mar-continente. Durante los meses de invierno se intensifica la frecuencia de vientos del sector N-NW (34%) por el desplazamiento del anticiclón del Atlántico, mientras que en los meses de verano se reduce a un 18%. Las frecuencias en las intensidades de viento muestran un 30% entre 12 y 19 km/h, 26% entre 6 y 11 km/h y un 20% entre 20 y 28 km/h. Las ráfagas de viento pueden alcanzar de 29 a 49 km/h el 8% del tiempo, mientras que velocidades superiores a 50 km/h sólo ocurren el 0,05% de los casos. Los vientos más débiles, entre 2 y 5 km/h ocurren el 9% de los casos, mientras que situaciones de calma (<1,4 km/h) se presentan sólo el 5%. Los vientos promedios son de 15 km/h, siendo los meses más ventosos febrero y diciembre (16,3 y 16,2 km/h respectivamente), mientras que abril, mayo y junio tienen las intensidades promedio más débiles (13,4 km/h). La clasificación climática de Köppen modificada por Thornthwaite lo define como clima moderado de transición entre semi-húmedo y seco moderado, con lluvias todo el año, veranos secos e inviernos fríos del norte de Patagonia. Algo ventoso todo el año.

La calidad del aire en la zona de Bahía Blanca y el Puerto de Ingeniero White se halla fuertemente influenciada por la actividad industrial del Polo Petroquímico. La Municipalidad de Bahía Blanca ha establecido un programa de monitoreo de calidad del aire denominado Plan Integral de Monitoreo del Polo Petroquímico y Área Portuaria del Distrito de Bahía Blanca (P.I.M.), estableciéndose un Comité Técnico Ejecutivo (CTE) encargado de controlar la calidad del aire del Polo. Para ello se ha realizado un inventario de emisiones del Polo basado en mediciones de chimeneas y declaraciones juradas. Por otra parte, se mide la calidad del aire con dos estaciones de monitoreo en forma continua y automática. Los principales contaminantes controlados son CO (monóxido de carbono), SO₂ (dióxido de azufre), NO_x (óxidos de nitrógeno), PM10

Tabla 11: Indicadores de eficiencia

Año	1980	1990	2000
Población (Hab.)	723.229	884.940	986.341
PBI ciudad (Mill U\$S)	4.474	4.285	6.368
Consumo de energía (1980-2000) TJ	44.219	48.435	51.089
Uso intensivo de energía (kJ por unidad de PBI)	11.832	13.121	9.267
Energía per cápita (TJ/Hab)	61.141	54.733	51.797
Emisiones de CO ₂ (Gg)	3.270	3.500	3.689
Intensidad de emisiones de CO ₂ (g/U\$S)	730.970	816.774	579.283
Emisiones per cápita de CO ₂ (Tn/Hab.)	5.286	4.493	4.087

Fuente: elaboración propia

(material particulado suspendido), NH₃ (amoníaco) y otros contaminantes específicos.

Las principales actividades del Polo Petroquímico de Bahía Blanca que impactan la calidad del aire provienen de las siguientes empresas: a) *Termoeléctrica* es una central térmica de generación de electricidad de 320 MW diseñada originalmente para uso con carbón, pero actualmente funciona con gas natural y en los meses de invierno con diesel-oil y otros combustibles líquidos; b) *Petrobras* es una refinería de petróleo que produce principalmente combustibles líquidos y asfaltos; c) *Cargill* es una planta concentradora de cereales, con tres procesos que producen aceite vegetal, malta y otros productos derivados; d) *Profertil*, es una empresa que produce amoníaco y fertilizantes; e) *PBBPolisur* es el principal productor en Argentina de etileno y polietileno; f) *Mega* es el principal proveedor de etano a la planta de etileno de PBBPolisur. En PBBPolisur se producen numerosos productos para el uso en las industrias química, manufacturera y agrícola; entre ellos fertilizantes, solventes, lubricantes, aceites y detergentes. g) *Indupa*, es una empresa subsidiaria de *Solvay*, que produce soda cáustica, monocloruro de vinilo y policloruro de vinilo.

Inventario de emisiones de Bahía Blanca

Emisiones industriales

El total de contaminantes gaseosos emitidos por las fuentes fijas industriales es de 15.000 toneladas anuales, siendo en 18% de hidrocarburos, 15% de monóxido de carbono, 5% de material particulado, 29% de óxidos de nitrógeno, 19% de ácidos sulfúrico y 14% de otros contaminantes. La Tabla 12 presenta un balance de emisiones típicas en toneladas anuales distribuidas en las principales empresas del Polo. La Tabla 13 presenta el balance de emisiones de material particulado generado por el movimiento de cereal en las plantas del Consorcio de Gestión del Puerto: Cargill, Terminal Bahía Blanca, Moreno y la UTE. Según un informe estadístico del Consorcio de Gestión del Puerto obtenemos el siguiente movimiento de cereal para el año 2001. Para el cálculo de las emisiones de material particulado se utilizó un factor de emisión obtenido de diferentes Declaraciones Juradas de Efluentes Gaseosos y datos internacionales de emisión. Este factor contempla la emisión durante la descarga o carga de cereal y el traslado hasta un lugar de almacenaje. Las Empresas que operan en el Puerto de Bahía Blanca realizan esta operación

Tabla 12. Emisiones de contaminantes (en Tn. anuales).

Empresa / Emisión por	CO	NO _x	SO ₂	PM10
PROFERTIL	4.05	783.12	2.04	238.82
MEGA	1.17	166.22	2.73	0.05
PETROBRAS	237.50	1148.04	3427.00	168.50
PBB		1749.67		
TERMoeLECTRICA		1777.29	0.05	19.94
CARGILL	41.66	31,5	0.05	2.70
INDUPA Solvay	17.97	0.51	0.01	50.08
INDUPA VCM	306.50	2.47	0.03	
Total	608.85	5627.32	3431.90	480.09
Porcentual	5.83%	53.85%	32.84%	4.59%

Fuente: (CTE, 2005)

Tabla 13. Emisión de material particulado por movimiento de cereal (Tn /año).

Empresa	Tránsito en Puerto tn/año	Factor de emisión g/tn	Tránsito en Planta tn/año	Factor de emisión g/tn	Total tn/año
TOEPFER	1621738	72			117
TBB	1786706	72			129
Cargill	1347558	72	206756	36	104
Moreno	761836	72			55
Total material particulado emitido por año					405

Fuente: (CTE, 2005)

dos veces ya que reciben el cereal, lo almacenan en silos, se acondiciona y luego es despachado por barco. En el caso particular de las oleaginosas, el factor de emisión no se duplica ya que el cereal solamente es descargado una vez. El factor de emisión usado es 36 g de MPT por Tn de cereal recibida o despachada. Por lo tanto se puede estimar la emisión de cada contaminante para cada empresa.

Fuentes de área

Las emisiones residenciales y de pequeñas industrias (Tabla 14) se calcularon sobre la base del gas distribuido por red, consumido en la ciudad, que incluyen pequeñas industrias, hornos de panaderías, sistemas de calefacción de grandes establecimientos, etc. El consumo asciende a 135.000.000 m³ en el año y representan 970 toneladas de contaminantes. Los hidrocarburos y el monóxido de carbono suman más de dos tercios del total de esta emisión.

Emisiones del sector transporte

Los datos de Bahía Blanca para esta sección han sido tomados del informe del CTE, (2003 a). El Parque Automotor de la ciudad de Bahía Blanca está compuesto por 56.500 unidades menores y 15.026 unidades mayores (camiones, ómnibus, etc.). La antigüedad media del parque automotor es de 5 años. Respecto al combustible empleado en los automóviles el 79,5% es Nafta, el 8,2% es Gas Oil y 12,3% GNC. El combustible de los vehículos mayores

es en el 100% de los casos Gas Oil. El inventario de las emisiones fue realizado según dos criterios, cuyos resultados no evidenciaron diferencias estadísticamente significativas: a) usando factores de emisión por combustible consumido y b) usando factores de emisión por kilómetro recorrido. El consumo de los distintos combustibles en Bahía Blanca durante el año 2001 fue de 43.981.000 litros de Nafta en sus distintos tipos, 35.285.000 litros de Gas Oil (no contemplando tránsito pesado fuera del tejido urbano) y 15.400.000 Nm³ de GNC.

Para la evaluación de las emisiones del transporte aéreo y conforme a las directrices del International Panel Climatic Change (IPCC), se tomaron los aterrizajes y despegues como una unidad denominada Landing Take-Off (LTO), la cual considera todas las actividades en las proximidades del aeropuerto que ocurren a una altura inferior a los 900 m (se incluye ascenso, descenso y rodaje). En la siguiente tabla se indican las toneladas de los diferentes contaminantes generados por el transporte aéreo durante el año 2001. Para el transporte ferroviario se consideraron los arribos, partidas y maniobras de operación dentro del radio urbano de la ciudad.

Para la navegación se considera la entrada y salida de puerto de todos los buques, incluida la flota pesquera y los remolcadores. El cálculo se basa en el consumo de combustible para la navegación entorno al puerto. En la siguiente tabla se resumen

Tabla 14. Emisiones de fuentes de área de Bahía Blanca.

Contaminante	CO	NO ₂	SO ₂	HC	PM10	CO ₂
Factores de Emisión	2500 mg/Kg	1324 mg/m ³	0.56 mg/m ³	0.5 %	107.31 mg/m ³	1920000 mg/m ³
Toneladas / año	240.98	202.50	0.0756	511.65	14.49	259200

Fuente: (CTE, 2005)

Tabla 15. Emisiones del transporte en tn anuales.

Contaminante	CO	NO _x	SO ₂	HC
T. Aéreo	97	17	2.4	68
T. Ferroviario	60	176	10.5	12.7
Navegación	143	454	44	32
T. Terrestre	16809	2472	180	1920
Total	17108	3119	236	2032

Fuente: (CTE, 2003)

las emisiones de los diferentes contaminantes generados a lo largo del año 2001.

El total de las emisiones de contaminantes generados por las fuentes móviles es de 22400 toneladas al año, de las cuales el 95 % corresponde a vehículos automotores. La incidencia del transporte aéreo y ferroviario es del 1% en ambos casos, representando el 3 % restante las emisiones de la navegación. Las dos terceras partes de las emisiones contaminantes generadas por las fuentes móviles corresponden al monóxido de carbono, seguido por los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, en los que se incluyen compuestos perjudiciales para la salud (benceno, tolueno, xilenos, etc.)

Comparación de las emisiones

El total de las emisiones fijas, móviles y domésticas de los contaminantes principales (CO, NO_x, SO₂ y HC) representa 38370 Ton/año, de las cuales las emisiones domésticas representan un bajo porcentaje respecto al total, debido a los reducidos consumos relativos y al uso mayoritario de gas natural.

Las fuentes fijas industriales consumen mayor cantidad de combustible que las móviles, sin embargo la adopción de nuevas tecnologías y el uso mayoritario de gas natural resultan en procesos de combustión más eficientes, con lo cual los niveles de contaminación son menores que los de las fuentes móviles. Por otro lado, las fuentes de emisiones fijas se encuentran a niveles elevados (20 – 140 m) respecto al suelo, favoreciendo de esta manera la dispersión de los contaminantes. En cambio, las móviles emiten a nivel del suelo y en áreas con algún grado de confinamiento dificultando de esta manera la dispersión de los contaminantes.

Si bien el CO₂ no es un contaminante de la atmósfera (está presente en un 0,03% en la atmósfera limpia), es uno de los gases invernadero responsable del calentamiento global de la Tierra. La emisión global de dióxido de carbono es de 4.700.000 toneladas anuales. Las fuentes fijas industriales y la central termoeléctrica son las mayores contribuyentes (89%) de este compuesto debido a la alta demanda de energía. Las toneladas anuales de contaminantes emitidos resultaron en valores de concentración de aire ambiente aceptable. Recordemos que los

contaminantes básicos medidos (CO, SO₂, NO_x) están muy por debajo de las Normas de Calidad de Aire de la legislación vigente, excepto para el material particulado suspendido PM10 que en ciertas ocasiones superó dicha norma.

Calidad del aire

El impacto de las emisiones urbanas se traduce en un deterioro de la calidad del aire, es decir en el aumento de las concentraciones ambientales de los contaminantes principales. Una forma de evaluar este impacto es a través de una red de monitoreo de contaminantes. Tanto la ciudad de Mendoza como la de Bahía Blanca han establecido programas y estaciones de monitoreo con el objeto de realizar un seguimiento de la evolución de los principales contaminantes que afectan la calidad del aire. Mostraremos brevemente algunos elementos salientes del monitoreo local y finalizaremos con la aplicación de modelos de dispersión para ambas ciudades.

Monitoreo en Mendoza

En la zona urbana de Mendoza, el Ministerio de Ambiente y Obras Públicas del Gobierno Provincial, a través de su Dirección de Saneamiento y Control Ambiental (DSCA) mide desde 1970 (para algunas estaciones) y desde 1990, para unas 15 estaciones, valores medios diarios de material particulado total (MPT) por el método de captura por filtro y reflectometría; óxidos de nitrógenos NO_x usando el método de la colorimetría de Griess y Saltzmann; una vez por semana valores de 24 horas de plomo por el método de colorimetría por ditizona; y dióxido de azufre SO₂ por el método de colorimetría de West y Gacke modificado por Pate. Por otra la Universidad de Mendoza tiene registros de negro de humo y PAH poliarómicos mediante reflectometría; ozono superficial (O₃) y óxido de nitrógenos (NO_x) por quimioluminiscencia, monóxido de carbono (CO) por técnica de infrarrojo correlación de gas filtrado, usando instrumentos automáticos, además de parámetros meteorológicos y radiación solar global (Puliafito et al, 2003; Gob. de Mendoza). La Tabla 17 presenta los valores medios anuales de concentraciones ambientales para los contaminantes principales.

Tabla 16. Comparación de emisiones de Bahía Blanca.

Tipo	Emisión tn/año	Porcentual
Móviles	22400	58 %
Fijas	15000	39 %
Domésticas	970	3 %

Fuente: (CTE, 2003)

La Figura 1 muestra una serie mensual con los valores medios de partículas suspendidas totales en el centro de la ciudad. Es interesante observar la disminución profunda de partículas después de 1991 como ocurre con los NO_x pero menos acentuada. Esta reducción se debe a un cambio del sistema de transporte público ocurrido durante 1991. Una distribución mejor del transporte público, junto a mejores ómnibus y mejor tecnología, contribuyó a mejorar la calidad del aire en el centro de la ciudad. Entre 1992 y 1996 el parque automotor privado fue aumentado con vehículos nuevos, parcialmente debido a un buen cambio de la paridad dólar-peso y parcialmente

debido a un incentivo oficial para cambiar los viejos a través del "plan canje". Ambas circunstancias contribuyeron al aumento y al reemplazo de una parte importante del parque automotor.

Resultados del monitoreo en Mendoza

Los principales resultados el monitoreo en Mendoza son:

a) **Material particulado:** Existen varios emisores importantes de material particulado, tanto en el norte de la ciudad como en el sur. Al norte se destacan

Tabla 17. Valores anuales medios de calidad del aire en Mendoza.

Año	PST μg/m ³	NO _x ppm	SO ₂ ppm	Pb μg/m ³	O ₃ ppm	CO ppm
1987	302,3	0,044	0,005	0,0029		
1988	331,3	0,046	0,004	0,0021		
1989	290,0	0,031	0,027	0,0021		
1990	225,5	0,047	0,008	0,0004		
1991	138,6	0,026	0,002	0,0003		
1992	84,1	0,020		0,0002		
1993	83,5	0,021		0,0003		
1994	72,0	0,028		0,0003		
1995	72,8	0,025		0,0003		
1996	54,9	0,034	0,002	0,0003	0,0251	
1997	66,8	0,040	0,004	0,0003	0,0224	
1998	77,2	0,033	0,003	0,0003	0,017	
1999		0,030			0,009	0,65
2000		0,052			0,020	0,41

Fuente: Puliafito et al, 2003; Gob. de Mendoza

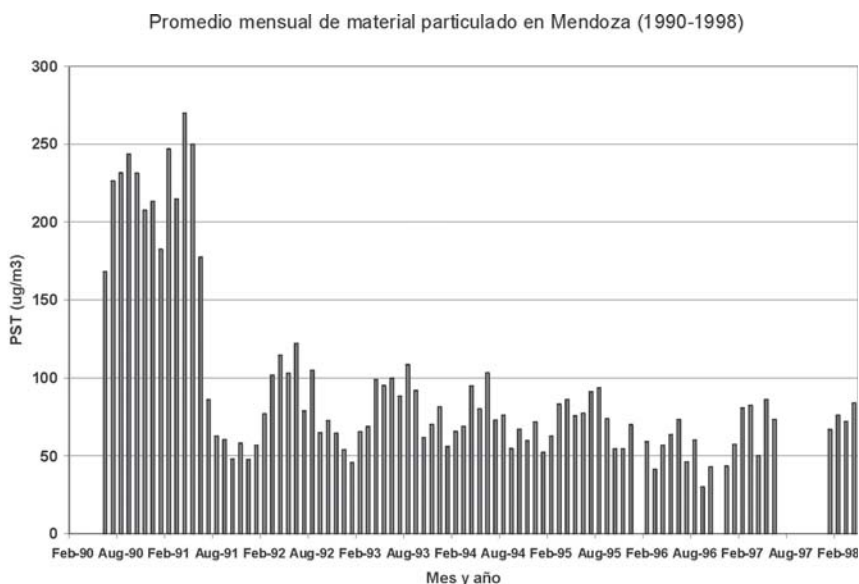


Figura 1. Material particulado en la ciudad de Mendoza.

claramente dos industrias cementeras que usan hornos de tipo rotativo con dispositivos de control de partículas (filtro de bolsas y precipitadores electrostáticos). La emisión máxima diaria puede superar los 100 mg/m³ cerca de las fuentes, en especial cuando los filtros no operan correctamente. En el área sur las empresas de aleaciones y de quemado de carbón son los principales emisores ya que no poseen ningún dispositivo de reducción de sus emisiones. Se estima que los niveles máximos horarios pueden alcanzar los 1500 mg/m³ y más de 200 mg/m³ para valores medios diarios cerca de las fuentes. En la zona residencial de Godoy Cruz, a diez kilómetros del parque industrial de Luján, los valores medios anuales de partículas pueden llegar a 30 a 40 mg/m³, en especial durante los meses de invierno. En general, para la zona central del Gran Mendoza, la influencia de las fuentes estacionarias no superan los estándares de calidad del aire. Las figuras 3 y 4 muestran los valores medios anuales y máximos mensuales respectivamente en la zona del parque industrial de Luján de Cuyo.

b) Dióxido de azufre: la fuente principal de SO₂ es la refinería, la que puede alcanzar valores máximos horarios de concentración ambiental de 100 µg/m³ en la zona urbana de Mendoza, y más de 400 µg/m³ en la zona de Luján. La mayor parte de estas emisiones son emitidas a través de la antorcha. Actualmente la refinería ha incorporado una planta de desulfuración Claus que permite la reducción de estas emisiones. En la zona urbana pueden alcanzarse valores máximos de 8 horas de aproximadamente 100 a 200 µg/m³, y valores medios anuales entre 20 y 40 µg/m³, dependiendo de su ubicación relativa. De acuerdo a los niveles de calidad de aire de Mendoza, sólo algunos sectores cercanos a la fuente pueden superar la norma.

c) Óxidos de nitrógeno: la central de energía eléctrica ubicada en Luján es el principal emisor de nitrógenos de las fuentes estacionarias, sin embargo éstas no exceden los estándares de calidad de aire. La norma diaria de nitrógenos de 0.1 ppm se superó tres veces durante las mediciones realizadas en la cercanía de la central eléctrica. Los valores medios diarios pueden alcanzar los 20 a 40 µg/m³. En las zonas urbanas los niveles de nitrógenos son producidos por las emisiones vehiculares.

d) Ozono y monóxido de carbono: De acuerdo a los valores medidos en los tres sitios, se superaron las normas de máximos horarios de 0,06 ppm de ozono. En el entorno de la central eléctrica éste alcanzó a casi el 90% de las horas medidas. La formación de ozono se produce a partir de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno presentes durante las horas de luz. La mayor fuente de producción son las fuentes móviles en la ciudad. El ozono allí producido se desplaza hacia el sur durante las horas de luz, y luego de noche vuelve a retornar hacia el norte. En presencia de cierto nivel de óxidos

de nitrógeno (NO) éste destruye el ozono. El balance medido es típico para distancias entre 10 a 20 km de las ciudades. Otra fuente de formación de ozono lo son sin dudas las numerosas fuentes de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno del Parque Industrial de Luján. Los valores de monóxido de carbono no superaron las normas horarias y en general estuvo por debajo de 1 ppm, alcanzando una vez el valor de 1,3 ppm.

Monitoreo en Bahía Blanca

La Municipalidad de Bahía Blanca, a través del Comité Científico Técnico (CTE) realiza controles regulares de la calidad del aire a través de dos estaciones de monitoreo continuo que cuentan con los siguientes equipos: a) Un analizador continuo de monóxido de carbono por la técnica de infrarrojo correlación de gas filtrado con una resolución de 0,02 ppb (para 30 s de integración); b) Un analizador continuo de dióxido de azufre por fluorescencia continua y una resolución de 1 ppb (a 60 s); c) monitor continuo de PM10 por el método de microbalanza oscilante, con un límite de detección de 0,01 µg; d) un analizador continuo de óxidos de nitrógeno por quimiluminiscencia y una resolución de 1 ppb (a 60 s); e) analizador continuo de amoníaco por quimiluminiscencia y una resolución de 1 ppb (a 60 s). Otras determinaciones como el monitoreo de VOC y BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) se realizan por medio de muestras y analizadas con cromatógrafo de gases PE-Photovac Voyager con un detector de fotoionización (PID) y columnas cromatográficas selectivas para los compuestos orgánicos volátiles (VOC). El límite de detección del cromatógrafo es de 0,01 ppm.

Resultados del monitoreo en Bahía Blanca

Los principales resultados del monitoreo y su comparación a la norma vigente son los siguientes:

a) Monóxido de carbono: La Norma Provincial 5965 / Dec. 3395/96, establece valores límites de 35 ppm para 1 hora y 9 ppm para 8 horas. La presencia de monóxido de carbono (CO) en el período 1997 – 2005 no supera, en el área de Ing. White, en el 99% de los casos el valor promedio horario de 3 ppm, lo que representa el 8% del valor normado horario. En conclusión el CO se encuentra en el área de Ing. White muy por debajo de lo fijado por la reglamentación vigente.

b) Dióxido de azufre SO₂: La Norma Provincial 5965 / Dec. 3395/96, establece valores límites de 500 ppb para 1 hora y 140 ppb para 24 horas y 30 ppb para un año. En el período 1997 - 2005, los promedios horarios de dióxido de azufre (SO₂) en el área de Ing. White fue, en el 99% de los casos, inferior a 112 ppb, como promedio horario, representando un 20 % del valor normado. En 2005 se redujo a 29 ppb horarios. La comparación con los

valores obtenidos en el centro de la ciudad de Bahía Blanca muestra valores similares, no evidenciándose una tendencia. En conclusión el SO_2 se encuentra, en el área de Ing. White, muy por debajo de la Norma de Calidad de Aire de la legislación vigente.

c) Material particulado PM10: La Norma Provincial 5965 / Dec. 3395/96, establece valores límites de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 1 hora y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un año. La presencia de Material Particulado inferior a 10 micrones (PM10) en Ing. White en el período 1997 - 2005, fue evaluada estudiando 20988 datos horarios validados. En el 90% de los casos los promedios diarios no superan los $149 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a excepción del período Noviembre-Diciembre de 1998 donde se superó 11 veces la Norma de Calidad de Aire a consecuencia de los movimientos de suelo realizados en ese período con motivo del relleno generado en la zona de Cangrejales por las nuevas radicaciones industriales. En el año 2005 se registraron 7 valores entre 150 y $225 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De la comparación con la zona Centro de la ciudad de Bahía Blanca surge que los promedios horarios son superiores entre 12 y $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el Centro respecto de Ing. White, a excepción del mes de mayo de 1997. Dado el gran movimiento cerealero del Puerto, los valores de PM10 pueden superar los valores promedios diarios. Evidentemente, el PM10 es una de los parámetros más críticos de la zona portuaria.

d) Óxidos del nitrógeno NO_x : La Norma Provincial 5965 / Dec. 3395/96, establece valores límites de 200 ppb ($400 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para 1 hora y 53 ppb ($106 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para un año. En el período 1997 - 2005 los promedios horarios de óxidos de nitrógeno (NO_x) se obtuvieron en un 99 % debajo de 176 ppb, en el año 2005 se redujo a 118. En conclusión el NO_x se encuentra, en el área de Ing. White, por debajo de la Norma de Calidad de Aire a excepción de 3

oportunidades durante la campaña de monitoreo del año 1999 (Figura 2).

e) Amoníaco NH_3 : La Norma Provincial 5965 / Dec. 3395/96, establece valores límites de 2590 ppb para 8 horas. El período de monitoreo comprende desde mayo 1999 hasta julio de 2002, durante el cual se tomaron 12984 promedios horarios diarios. En ninguna oportunidad se superó el Nivel Guía de Calidad de Aire de la legislación vigente (decreto 3395 reglamentario de la ley provincial 5965). No se efectuaron análisis estadísticos comparativos con otras zonas de Bahía Blanca porque durante el período de monitoreo de amoníaco la estación de monitoreo estuvo siempre instalada en el área de Ing. White. Se determinó que el intervalo de concentraciones del valor base de amoníaco, previo al arranque de las plantas de la firma Profertil es de 1 ppb a 51 ppb, con valores promedios máximos horarios de hasta 78 ppb. Posteriormente a las maniobras de arranque de las citadas plantas, los valores temporales de los máximos promedios reglamentados se ubicaron, durante 2006 en alrededor de 15 ppb (173 veces por debajo del valor regulado). En el año 2005 el máximo detectado para una hora fue de 53 ppb. En conclusión el NH_3 se encuentra, en el área de Ing. White, muy por debajo de lo fijado por la legislación ambiental vigente.

f) Ozono O_3 : La Norma Provincial 5965 / Dec. 3395/96, establece valores límites de 120 ppb para 1 hora. El máximo medido fue de 80 ppb en el mes de enero.

g) VOC y BTEX: De acuerdo a los datos presentados se pueden observar promedios mensuales entre 0,02 ppm y 0,05 ppm vientos arriba de la refinería de petróleo y 0,19 a 0,50 ppm vientos abajo de la misma. Por tanto se observa una diferencia de un orden de magnitud entre ambas ubicaciones.

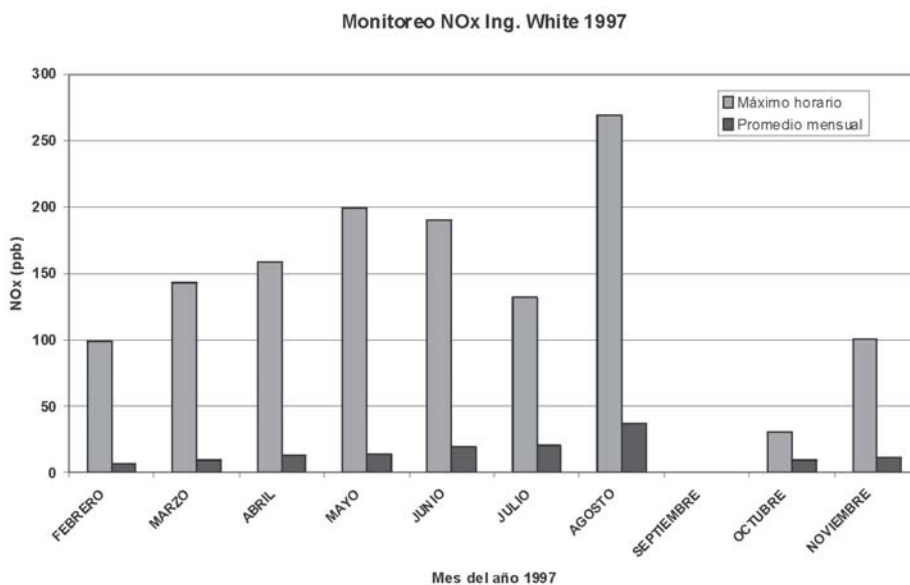


Figura 2. Promedios mensuales y máximos horarios de NO_x en Ing. White.

h) Cloruro de vinilo: el CTE ha realizado un total de 4080 mediciones alrededor de las plantas productivas de PVC y VCM de Solvay Indupa. Recordemos que en el mes de abril, no se realizaron mediciones por encontrarse el cromatógrafo fuera de servicio. Del total de éstas 4080 mediciones, el 86.8% (3553 determinaciones) resultaron menores al límite de detección del método analítico empleado (0.025 ppm), mientras que en su complemento, el 13.2% (527 mediciones) obtuvimos valores que oscilaron entre 0.025 y 7.755 ppm. Ciertas direcciones de viento, (ONO – O – OSO – SO) obligaron al CTE a realizar mediciones sobre las áreas pobladas de Ingeniero White, en donde se realizaron un total de 664 mediciones, que representan un 16.3 % sobre el total de los datos semestrales. De estos 664 análisis, solo 67 resultaron en valores mayores al límite de detección lo que representa un 1.6 % sobre el total de los datos generales. La simulación de las emisiones del Polo Industrial de Bahía Blanca permitió obtener una distribución geográfica de la dispersión de los contaminantes provenientes del Polo y detectar las situaciones de mayor riesgo. Los datos simulados se compararon con las mediciones obteniéndose una adecuada correlación. Los principales impactos son las emisiones de material particulado en la zona portuaria, los niveles altos horarios de óxidos de nitrógeno y zonas localizadas con altos valores de VOC especialmente en el entorno de la refinería.

Aplicación de los modelos de dispersión

A fin de correr un programa de dispersión, es importante localizar las fuentes de emisiones, preparado en el inventario, según su ubicación geográfica. De esta manera tendremos un catastro de emisiones de fuentes puntuales, de línea o de área, según se explicó en la primera sección metodológica. Con este nuevo conjunto geográficamente distribuido elaboramos un mapa o grilla de emisiones de la ciudad. La Figura 3 muestra un catastro o mapa de emisiones para la ciudad de Mendoza.

Usando la información meteorológica local pertinente se puede proceder a calcular las concentraciones ambientales usando algunos de los programas de dispersión disponibles. En el ejemplo de la Figura 3 se muestra las concentraciones de contaminantes para el Gran Mendoza, calculados como fuentes de área, según se detalla en la ecuación (10). Los cálculos de los modelos de dispersión se calibran usando los datos del monitoreo para varios puntos de la ciudad. En la Figura 5 muestra los resultados de las simulaciones de calidad del aire en el entorno del Polo Industrial de Bahía Blanca. En este caso se usó un modelo de fuentes puntuales múltiples.

Conclusiones

La calidad del aire en un área determinada está influenciada por muchos factores: la meteorología, la orografía local, las emisiones naturales y las emisiones antrópicas. Estas emisiones envían a la atmósfera agentes contaminantes como el monóxido de carbono, los óxidos de azufre y nitrógeno, los oxidantes fotoquímicos, los hidrocarburos, y el polvo. La fuente principal de la contaminación artificial viene típicamente de la industria y el transporte, otras menores provienen de la actividad comercial y de las zonas residenciales. Esto se ve agravado por el incremento de la población urbana, el aumento en el consumo per cápita, especialmente de energía y demanda del transporte. El impacto principal de la contaminación del aire urbano se manifiesta no sólo como una degradación de la calidad del aire, sino que también se vincula a otros aspectos ambientales como la acidificación del agua y de los suelos, la reducción de la capa de ozono, la degradación del patrimonio cultural e histórico, entre otras. De hecho, muchas de las emisiones de contaminantes urbanos son también gases que incrementan el efecto de invernadero, pudiendo afectar el clima globalmente. Por ello, teniendo en cuenta que el 47% de la población mundial vive en centros urbanos, una mejora en la calidad del aire contribuirá también a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta reducción producirá una mejora local casi inmediata del modo de vida urbano, y una estabilización de las concentraciones globales de carbono en la atmósfera a largo plazo.

El presente estudio tiene un triple objetivo: primero uno metodológico, indicando los procedimientos necesarios para la realización de un buen inventario de emisiones junto a una descripción de los algoritmos de dispersión disponibles para calcular el impacto de estas emisiones en la calidad del aire. El segundo objetivo es mostrar, a través de dos ejemplos para las ciudades de Mendoza y Bahía Blanca, los esfuerzos notables ambientales que se realizan en estas ciudades a través de programas de monitoreo regular y control de la calidad del aire. El tercero, finalmente, es impulsar la realización de un Programa Nacional de Calidad del Aire, con el objeto de realizar un Atlas Ambiental de la República Argentina. En este sentido el autor ha propuesto a las autoridades de la Universidad Tecnológica Nacional la ejecución de un Proyecto Integrador para la Mitigación de la Calidad del Aire (PROIMCA) con la participación de varias Facultades Regionales a fin de impulsar este tipo de estudios a otros centros urbanos nacionales.

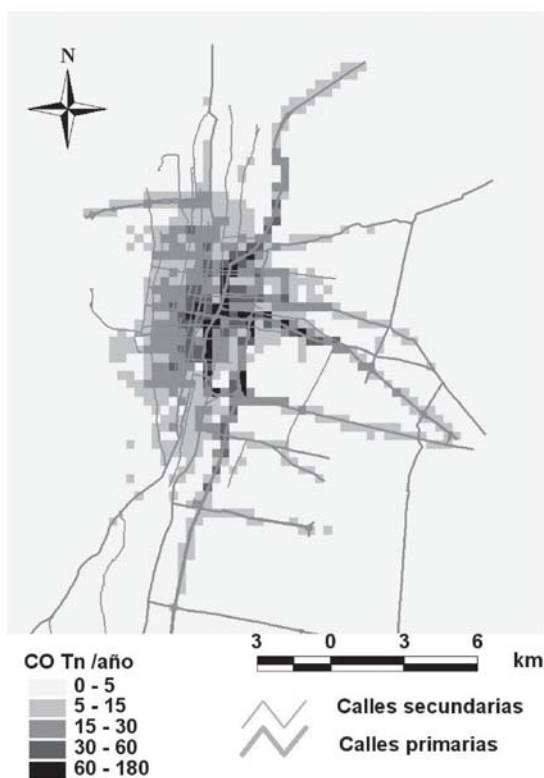


Figura 3. Distribución de emisiones en la ciudad de Mendoza.

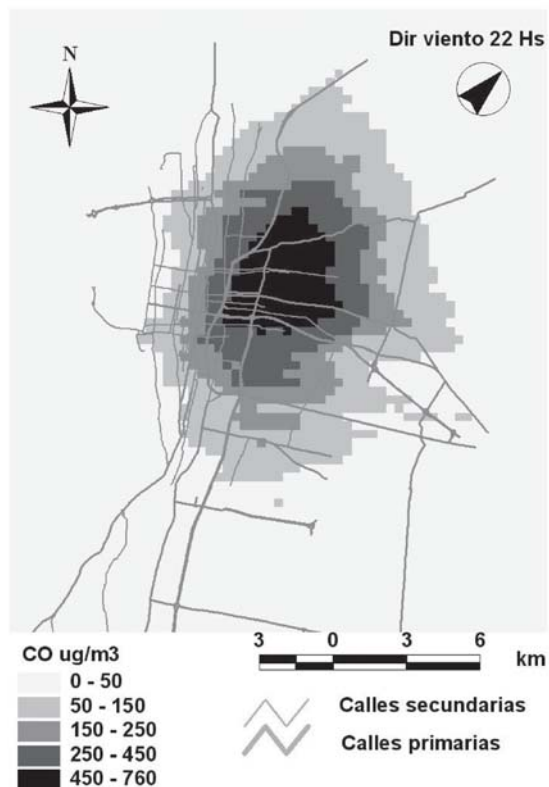


Figura 4. Cálculo de la calidad del aire en la ciudad de Mendoza.

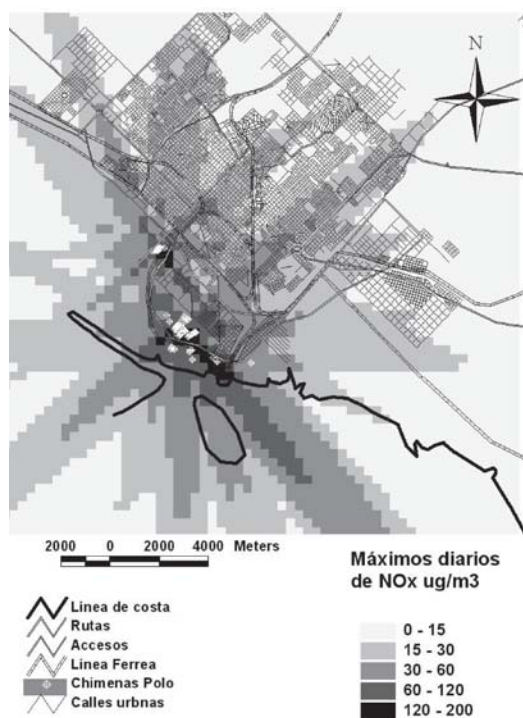


Figura 5. Simulación de máximos diarios de NO_x en el entorno del Polo Industrial en el puerto de Ing. White y ciudad Bahía Blanca.

Referencias

(Argentina, 1999). *Revision of the First National Communication Inventory. Secretariat for National Resources and Sustainable Development*. October 1999. Country Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change (IPCC).

CORINAIR (2003): *Atmospheric Emission Inventory Guidebook*, 3rd Edition, September 2003 Update, Mike Woodfield and Kristin Rypdal (Editors), EMEP, Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long Range Transmission of Air Pollutants in Europe, The Core Inventory of Air Emissions in Europe, European Environment Agency.

CTE (2002), *Calidad del Aire en Ing. White. Plan Integral de Monitoreo del Polo Petroquímico y Área Portuaria del Distrito de Bahía Blanca* (P.I.M.), Setiembre 2002.

CTE (2003 a), Meder R. ; López F.: *Inventario de Aportes Directos originados en el Polo Petroquímico. Plan Integral de Monitoreo del Polo Petroquímico y Área Portuaria del Distrito de Bahía Blanca* (P.I.M.) 2ra Auditoría Semestral, Julio de 2003.

CTE (2003 b), Pagani M.; Vaschetti G.; Culaciatti L.; *Monitoreo de Cuerpos Receptores: Atmósfera. Plan Integral de Monitoreo del Polo Petroquímico y Área Portuaria del Distrito de Bahía Blanca* (P.I.M.) 2ra Auditoría Semestral, Julio de 2003.

DEIE: Dirección de Estadísticas e Investigaciones Económicas. Gobierno de Mendoza. www.economia.mendoza.gov.ar/sitios/deie/informes/informes.html.

INDEC: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Argentina. www.indec.mecon.ar/.

LAVANDERI. R.; GARCÍA. C.; HEREDIA. S.; YAÑEZ. S. (2000) *Prospectiva a largo plazo de la demanda energética total y por fuente en la Provincia de Mendoza*. Informe al Consejo Federal de Inversiones (CFI) Noviembre 2000. Ministerio de Ambiente y Obras Públicas. Gobierno de Mendoza: www.ambiente.mendoza.gov.ar/

PULIAFITO, E.; PULIAFITO, C.; HERBARTH, O.; RICHTER, M.; QUERO, J. (2000): "Change from car to tram. A prognosis to expected effects on air pollution". in *Air Pollution VIII, Serie Advance in Air Pollution*- Vol. 8, pp 201-210, J. Longhurst, C. Brebbia, H. Power, (Eds.), Editorial Witt Press, Sothampton, Boston, Computational Mechanics Publications, 2000.

PULIAFITO, E.; GUEVARA, M.; PULIAFITO, C. (2001): "Modelling air pollution in an industrial area using GIS as an assessment tool". in *Air Pollution IX, Serie Advance in Air Pollution*- Vol. 9, pp 529-538, G. Latini, C. Brebbia (Eds.), Editorial Witt Press, Sothampton, Boston, Computational Mechanics Publications, 2001.

PULIAFITO, E.; GUEVARA M.; PULIAFITO C. (2003): *Environmental Pollution* 122, 105-117

PULIAFITO, E.; PULIAFITO C. (2005): "Monitoring and modelling air quality in Mendoza, Argentina". in *Regional and local aspects of air quality, Serie Advance in Air Pollution*. Vol. 12, p. 83-116, D. Elsom, J. Longhurst (Eds.), Editorial WIT Press, Southampton, Boston, Computational Mechanics Publications.

PULIAFITO, E.; CONTE GRAND, M.; CIVIT, B.; BOCHACA, F.; GAIOLI, F.; TARELA, P. (2005), "Mendoza and Buenos Aires" en Patricia Romero Lankao, Héctor López Villafranco, Angélica Rosas Huerta, et. al. (editores): *Can Cities Reduce Global Warming – Urban Development and the Carbon Cycle in Latin America*, México, IAI, UAM-X, IHDP, GCP. 2004, p. 39-63.

ROMERO, P.; PULIAFITO, E.; LEÓN. A.; CONTEGRAND, M. (2005): "Can cities reduce global warming? Urban development and carbon cycle in Latin America", *IHDP newsletter update 02/2005*, International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, p. 16-17, ISSN 1727-155x.