



## CAPITULO 4

# TRAZAS ATMOSFÉRICAS Y SU MODELACIÓN

*Laura Gallardo Klenner*

<i>Introducción</i>	<i>91</i>
<i>Trazas atmosféricas</i>	<i>92</i>
<i>Dióxidos de azufre</i>	<i>95</i>
<i>Dióxido de nitrógeno</i>	<i>96</i>
<i>Ozono</i>	<i>97</i>
<i>Monóxido de carbono</i>	<i>98</i>
<i>Aerosoles (PM10 y PM2.5)</i>	<i>99</i>
<i>Modelación de trazas atmosféricas</i>	<i>100</i>
<i>Formalismo de los modelos de dispersión</i>	<i>101</i>
<i>Tipos de modelos</i>	<i>101</i>
<i>Selección y evaluación de modelos</i>	<i>105</i>
<i>Modelación y gestión</i>	<i>109</i>
<i>Santiago y la macrozona central de Chile</i>	<i>111</i>
<i>Resumen y perspectivas</i>	<i>115</i>
<i>Referencias Bibliográficas</i>	<i>119</i>

- *Laura Gallardo Klenner*  
*Dr. Meteorología Química, U. de Estocolmo*  
*Profesor adjunto, Universidad de Chile*  
*Centro de Modelamiento Matemático CMM*  
*Realiza cursos en*  
*Modelación de polución en el aire*  
*Dispersión atmosférica*  
*y Modelos de transporte químico*

## TRAZAS ATMOSFÉRICAS Y SU MODELACIÓN

### INTRODUCCIÓN

Históricamente, hasta mediados del siglo XX, la atmósfera terrestre era vista a menudo como un fluido inerte cuyo movimiento resultaba en el transporte y mezcla de humedad, calor y momentum (Cicerone, 1999). Además, el movimiento de este fluido (viento) era visto como una agente con una capacidad casi ilimitada de limpiar el aire de nuestras ciudades y centros industriales. Hacia la década de 1970, este cuadro cambió ante la evidencia de la existencia y permanencia de la contaminación fotoquímica gatillada por la presencia de trazas atmosféricas como los hidrocarburos, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno derivados, principalmente, de la quema de combustibles fósiles (Crutzen, 1995). También contribuyó a cambiar nuestra visión la constatación de los efectos derivados del transporte de sustancias acidificantes como los óxidos de azufre y de nitrógeno sobre cientos y miles de kilómetros (Rodhe, 1999), ligando regiones consideradas inconexas. La brusca sorpresa del llamado “agujero de ozono” terminó de mostrarnos el alcance global que nuestras actividades podían tener (Solomon, 1999). En suma, en menos de 30 años y a un ritmo acelerado, nuestra visión del sistema atmosférico ha debido modificarse, ampliarse y profundizarse, requiriendo un nuevo paradigma científico que trasciende lo disciplinario y que aborda preguntas como *“¿Es la química atmosférica*

*amplificador o atenuador del cambio climático?, ¿Cómo se conecta lo regional (calidad del aire) y lo global (cambio climático)?" (IGAC, 2003).*

Hoy en día las ciencias atmosféricas constituyen disciplinas centrales para evaluar y ponderar el cómo de un desarrollo sustentable, desde la escala urbana hasta la escala global. No ajenos a esto, en Chile, las ciencias atmosféricas han experimentado un notable desarrollo desde mediados de la década de 1990, destacándose la simulación numérica del tiempo como en la simulación de procesos de dispersión y transformación de trazas atmosféricas. Aquí describiremos someramente estos desarrollos y aplicaciones así como las bases teóricas sobre las que se sustentan. También abordaremos la cuestión de cómo se usan los modelos de atmosféricos en el contexto de la gestión ambiental. Por último, discutiremos algunas perspectivas de desarrollo futuro, la calidad de vida de las personas, los ecosistemas en general y en el sistema climático en su conjunto (IPCC, 2001).

## 1. TRAZAS ATMOSFÉRICAS

Nuestra habilidad de medir trazas atmosféricas ha experimentado un desarrollo vertiginoso que hace posible cuantificar abundancias inferiores a 1 molécula por cada  $10^{12}$  moléculas de aire con instrumentos in situ o remotos en condiciones semiautomáticas (Tyndall et al, 2003). Algunas de estas trazas y sus abundancias atmosféricas se indican en la Tabla 1. La palabra atmósfera se origina en los vocablos griegos “*atmos*” que significa vapor y “*sphaira*” que corresponde a esfera. Es decir, la palabra atmósfera se refiere al envoltorio, mayoritariamente gaseoso, que rodea a nuestro planeta. Este envoltorio tiene un espesor de no más de 1.5% de los aproximadamente 6300 km del radio la tierra. Nuestra atmósfera tiene una masa de alrededor de  $5 \times 10^{21}$  g y está constituida principalmente por nitrógeno molecular ( $N_2$ ) y oxígeno molecular ( $O_2$ ) en proporciones de, respectivamente, 76% y 23% de la masa. El resto está formado por argón (Ar), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y otras especies en variados estados de agregación que por sus ínfimas cantidades se

denominan trazas atmosféricas. Son estas trazas atmosféricas, incluyendo al relativamente abundante  $\text{CO}_2$ , las que definen las propiedades químicas y radiativas de nuestra atmósfera y las que interconectan los sistemas bióticos y abióticos estableciendo las condiciones para la vida. Es esta la fracción de la composición de la atmósfera que se ha visto enorme y rápidamente alterada por las actividades humanas en los últimos dos siglos teniendo consecuencias sobre la calidad de vida de las personas, los ecosistemas en general y en el sistema climático en su conjunto (IPCC, 2001).

Nuestra habilidad de medir trazas atmosféricas ha experimentado un desarrollo vertiginoso que hace posible cuantificar abundancias inferiores a 1 molécula por cada  $10^{12}$  moléculas de aire con instrumentos in situ o remotos en condiciones semiautomáticas (Tyndall et al, 2003). Algunas de estas trazas y sus abundancias atmosféricas se indican en la Tabla 1.

La Figura 1 muestra escalas de tiempo y espacio características para distintas trazas atmosféricas. En general, las trazas cuyas concentraciones varían en el tiempo y el espacio tienen vidas medias cortas; por el contrario aquellas de vidas medias largas se mezclan homogéneamente en toda la atmósfera. Así, las concentraciones de oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ) que tiene un tiempo de recambio de varios miles de años varían muy poco de lugar en lugar mientras que las de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) que tiene un tiempo de recambio de unos pocos días varían mucho de lugar en lugar.

Esta miríada de trazas atmosféricas que hoy conocemos actúan e interactúan en un sinnúmero de procesos: desde la formación de nuevas partículas sobre las cuales condensa el agua y se forman las nubes hasta la irritación de las vías respiratorias humanas o la clorosis de especies vegetales. Desde la actividad bacteriana en suelos que gatilla su desnitrificación y la emisión de óxidos de nitrógeno hasta la deposición de nutrientes en el mar y las floraciones de algas. Para ejemplificar estos intrincados procesos, a continuación describiremos someramente algunos procesos químicos y físicos relevantes para un subconjunto de trazas

típicamente llamados “contaminantes criterio”. Dicha denominación nace del manejo ambiental de ciudades contaminadas basado en la identificación de un conjunto de trazas cuyos efectos sobre la salud humana han sido profusamente constatados bajo criterios epidemiológicos y que, por cierto, sustentan, entre otras, la legislación ambiental chilena vigente (Nor\_1215, 2000). Para más detalles, se sugiere consultar Seinfeld y Pandis (1998), Brasseur et al (1999), Jacobson (2002).

Tabla 1. Composición de la atmósfera terrestre. ppm=10<sup>-6</sup>; ppb=10<sup>-9</sup>; ppt=10<sup>-12</sup>. (Adaptado de Brasseur et al, 1999)

Constituyente atmosférico	Fórmula química	Razón de mezcla en volumen de aire seco
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	78.084%
Oxígeno	O <sub>2</sub>	20.948%
Argón	Ar	0.934%
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	360 ppm
Neón	Ne	18.18 ppm
Helio	He	5.24 ppm
Metano	CH <sub>4</sub>	1.7 ppm
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0.55 ppm
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	310 ppb
Monóxido de carbono	CO	50-200 ppb
Ozono (Tropósfera)	O <sub>3</sub>	10-500 ppb
Ozono (Estratósfera)		0.5-10 ppm
Hidrocarburos no metánicos		5-20 ppb
Halocarbonos		3.8 ppb
Óxidos de nitrógeno	NO <sub>y</sub>	10 ppt-1 ppm
Amonio	NH <sub>3</sub>	10 ppt-1ppb
Nitrato particulado	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10 ppt-10 ppb
Amoniáco particulado	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	10 ppt-1ppb
Hidroxilo	OH	0.1 ppt- 10 ppt
Peróxilo	HO <sub>2</sub>	0.1 ppt- 10 ppt
Peróxido de hidrógeno	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.1 ppb- 10 ppb
Formaldehido	CH <sub>2</sub> O	0.1-1 ppb
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	10 ppt-1 ppb
Dimetil sulfuro	CH <sub>3</sub> SCH <sub>3</sub>	10-100 ppt
Carbonildisulfuro	CS <sub>2</sub>	1-300 ppt
Carbonil sulfuro	OCS	500 ppt
Ácido sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	5-500 ppt
Sulfato particulado	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	10 ppt-10 ppb

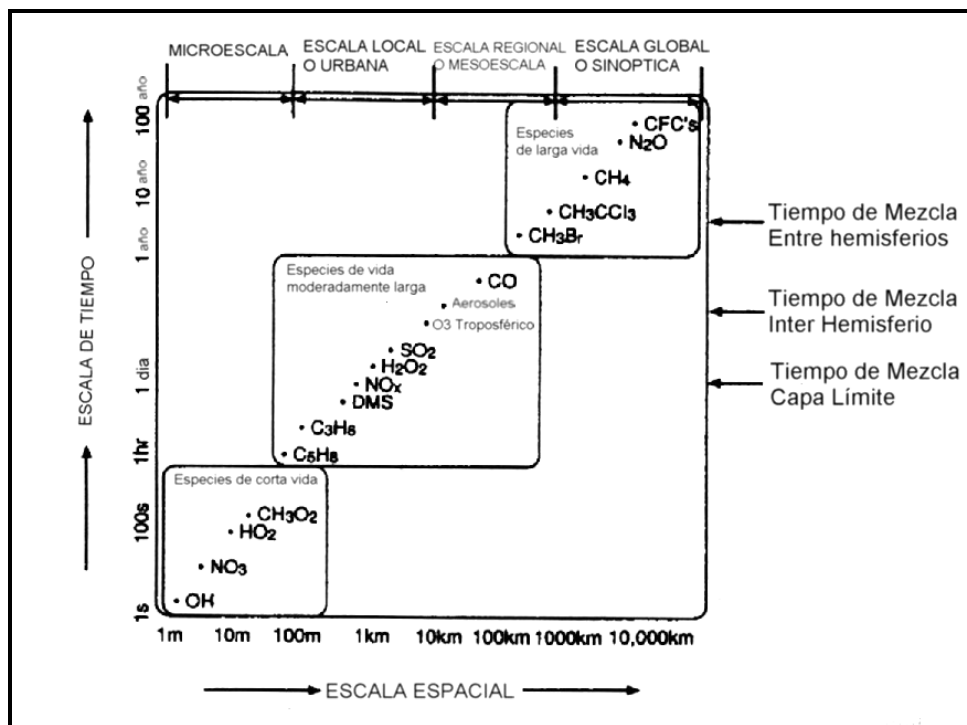


Figura 1. Variabilidad espacial y temporal de los constituyentes atmosféricos (Adaptado de Brasseur et al, 1999).

### 1.1 DIÓXIDO DE AZUFRE ( $\text{SO}_2$ )

El  $\text{SO}_2$  es emitido directamente a la atmósfera o producido a través de la oxidación de otros compuestos de azufre, por ejemplo, ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), dimetilsulfuro (DMS), etc. Este es oxidado a ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), lo que constituye un sumidero químico del  $\text{SO}_2$ .

La oxidación del  $\text{SO}_2$  ocurre en fase gaseosa a través del radical hidroxilo (OH) y en la fase acuosa, principalmente, a través de ozono y agua oxigenada ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). La oxidación en fase acuosa del  $\text{SO}_2$ , en presencia de nubes o niebla, es más efectiva que la oxidación en fase gaseosa. Esta oxidación resulta en ácido sulfúrico y aerosoles sulfato. El material particulado generado de esta manera sirve como núcleos de condensación de nubes y también es capaz de reflejar luz solar incidente. Estos efectos meteorológicos, junto a los efectos nocivos sobre la salud humana y de corrosión sobre los materiales, han llevado a los países a

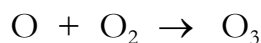
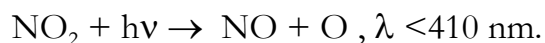
destinar recursos para su estudio y a cambios tecnológicos para disminuir sus emisiones.

El ácido sulfúrico y los aerosoles sulfato son eventualmente removidos de la atmósfera a través de procesos de deposición seca y húmeda. Es decir, a través de la captación directa por parte de las superficies y de la lluvia. Estos procesos de deposición constituyen una fuente de sulfato e iones hidrógeno para los ecosistemas sobre los que son depuestos. En el caso de suelos, esto puede dar lugar a problemas de acidificación. Dependiendo de las condiciones atmosféricas, el SO<sub>2</sub> es removido por deposición seca, con tasas de deposición del orden de unos pocos centímetros por segundo. Su tiempo de recambio troposférico se estima a nivel global en el orden de algunos días. Por lo tanto, su dispersión puede ocurrir a escalas local y regional.

## 1.2 DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO<sub>2</sub>)

Casi todos los óxidos de nitrógeno emitidos en centros urbanos se producen por la oxidación del nitrógeno atmosférico presente en las combustiones abiertas a altas temperaturas. El óxido inicial es monóxido de nitrógeno (NO) que rápidamente se oxida a dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Otras fuentes de óxidos de nitrógeno son las descargas eléctricas, la quema de biomasa, procesos bacterianos en suelos, etc..

Análogamente al SO<sub>2</sub>, el NO<sub>2</sub> es oxidado principalmente en fase gaseosa a través de OH a ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). Este también da lugar a aerosoles y núcleos de condensación. Sin embargo, el principal rol de los óxidos de nitrógeno es su carácter de precursor de ozono (O<sub>3</sub>). En la tropósfera el O<sub>3</sub> se produce a partir de la fotólisis del NO<sub>2</sub>:



El NO<sub>2</sub> es químicamente reactivo y tiene efectos nocivos sobre la salud de las personas. Además, en altas concentraciones, como las

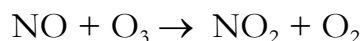


observadas en centros urbanos, provoca un color rojizo característico de las atmósferas contaminadas por actividades industriales. Al igual que el  $\text{SO}_2$ , el  $\text{NO}_2$  es un precursor de sustancias ácidas, cuya deposición ulterior sobre los ecosistemas puede acarrear problemas de acidificación. Análogamente al  $\text{SO}_2$ , dependiendo de las condiciones atmosféricas, el  $\text{NO}_2$  es removido por deposición seca, con tasas del orden de unos pocos milímetros por segundo. Su tiempo de recambio troposférico se estima, a nivel global, como del orden de algunos días. Por lo tanto, al igual que  $\text{SO}_2$  su dispersión puede ocurrir a escalas local y regional.

### 1.3 OZONO ( $\text{O}_3$ )

A diferencia de los compuestos antes señalados, el ozono no es emitido directamente por ninguna fuente, sino que se forma a partir de precursores en la atmósfera. Se produce durante el proceso de oxidación de monóxido de carbono, metano y otros hidrocarburos en la presencia de luz y de suficiente óxido nítrico ( $\text{NO}$ ). En ausencia de  $\text{NO}$ , las cadenas de oxidación dan lugar a la destrucción de ozono. En las urbes y viento abajo de ellas, dadas las altas concentraciones de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, se da lugar, en general, a la formación de ozono y otros compuestos oxidantes. Esto es lo que se conoce como “*smog*” fotoquímico.

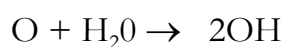
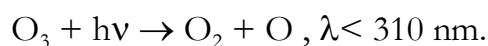
Como ya se indicó, el  $\text{O}_3$  es producido a partir de la fotólisis del  $\text{NO}_2$ . Por otro lado, es consumido en el proceso de oxidación del óxido nítrico ( $\text{NO}$ ) a  $\text{NO}_2$ :



En ausencia de otros agentes oxidantes de  $\text{NO}$  y en presencia de luz, se establece un equilibrio fotoquímico entre la producción y destrucción de ozono. Sin embargo, en la presencia de otros agentes oxidantes provenientes de la oxidación de hidrocarburos, este balance es roto teniéndose una producción neta de ozono (“*smog*” fotoquímico). Lo

que sucede es que los otros agentes oxidantes son capaces de oxidar el NO al NO<sub>2</sub> sin consumir ozono y esto resulta en un incremento neto de las concentraciones de ozono.

El ozono es destruido a través de fotólisis, dando lugar a la formación del radical hidroxilo (OH) que es el agente oxidativo de la atmósfera por excelencia:



y también a través de su consumo en procesos de oxidación. Otro sumidero del ozono es su deposición a las superficies. Este proceso reduce el tiempo de recambio del ozono a unas pocas horas o días en la capa límite. En capas superiores de la atmósfera, su tiempo de recambio es del orden de varias semanas.

Dada su reactividad química, el ozono en grandes concentraciones, como las observadas en centros urbanos, resulta ser un agente nocivo para la salud humana y corrosivo de materiales y vegetales.

## 1.4 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El CO presente en la atmósfera proviene de la oxidación de metano (CH<sub>4</sub>) y otros alcanos, de compuestos orgánicos emitidos por la vegetación y de la combustión incompleta de combustibles fósiles y de biomasa.

Los mecanismos de remoción de CO son principalmente químicos. Al igual que en el caso del metano, el principal mecanismo de pérdida de CO atmosférico es su reacción con el radical hidroxilo (OH). El tiempo de recambio del CO en la tropósfera se estima en algunos meses. Por lo tanto, su dispersión tiene un alcance hemisférico.

### 1.5 AEROSOLES (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>)

El material particulado suspendido en el aire (aerosoles), que se mide a través de filtros e impactadores, es una mezcla de sustancias, típicamente en varios estados de agregación o fases. Los aerosoles, dependiendo de sus características físicas (tamaño) y químicas (toxicidad) pueden ser dañinos para la salud de las personas. Por ello han sido objeto de estudio y de la aplicación de normativas tendientes a controlar sus emisiones en muchas partes del mundo. Las normativas originalmente fueron desarrolladas sobre la base de la medición de la concentración del total de material particulado suspendido en el aire (PTS), es decir, sin distinción por tamaños. Hoy por hoy se consideran, en atención a sus efectos sobre la salud, especialmente aquellas partículas susceptibles de ingresar al sistema respiratorio, proponiéndose normativas para el material particulado respirable (diámetros aerodinámicos inferiores a 10  $\mu\text{m}$ , PM<sub>10</sub>) y el material particulado completamente respirable (diámetros aerodinámicos inferiores a 2.5  $\mu\text{m}$ , PM<sub>2.5</sub>).

Los aerosoles son, en gran medida, responsables de la formación de nubes. En efecto, la condensación del vapor de agua en la atmósfera (nubes) es facilitada por la presencia de solutos o aerosoles. Así, probablemente, sin aerosoles nuestra atmósfera no sería capaz de formar nubes y el vapor de agua sólo se manifestaría como rocío. Los aerosoles cumplen, además, roles trascendentes en cuanto al balance energético del sistema climático. Indirectamente determinan varias de las propiedades radiativas de las nubes que ayudan a formar y éstas, a su vez, juegan un rol central en el balance radiativo del planeta. Directamente, dependiendo de su composición química y tamaño, son capaces de reflejar o absorber luz solar. Así, el material particulado rico en sulfato es capaz de reflejar luz solar dando lugar a un efecto de enfriamiento y aquel material particulado rico en carbono elemental (hollín) puede absorber luz solar dando lugar a un efecto de calentamiento. También proveen superficies adecuadas para la deposición de moléculas y iones y para la ocurrencia de reacciones químicas o para la catálisis de las mismas.

Los aerosoles troposféricos tienen diversas fuentes. Hay aerosoles emitidos directamente, por ejemplo, desde chimeneas industriales, volcanes o polvo levantado por el viento. También hay aerosoles derivados de transformaciones físicas y químicas (conversión de gas a partícula) que ocurren en la atmósfera. Los mecanismos de remoción de aerosoles son la coagulación, la precipitación y la sedimentación. Por lo tanto, el material particulado, dependiendo del tamaño, puede dispersarse a escalas local o regional. Incluso hay evidencia bien documentada de transporte intercontinental.

## 2. MODELACIÓN DE TRAZAS ATMOSFÉRICAS

El método científico busca y ordena nuevo conocimiento (ciencia) a través de la formulación de hipótesis que son sistemáticamente puestas a prueba a través de experimentos. Las hipótesis son los “modelos” que describen, no necesariamente en la forma de código computacional, lo que creemos del funcionamiento de un cierto sistema. La descripción la hacemos a través de parámetros cuantificables o medibles cuya variación e interrelación debiera explicar o reproducir lo que observamos. Nuestros experimentos o pruebas evalúan la plausibilidad de nuestras hipótesis según vamos cambiando los parámetros y las interrelaciones que conforman nuestro modelo. Desde el punto de vista de la dispersión de contaminantes nos interesa saber, entre otras cosas, cómo cambia en el tiempo y el espacio la concentración o la razón de mezcla de una traza. Esto es descrito por la llamada ecuación de continuidad (modelo conceptual) que expresa el balance entre las variaciones de la concentración de una traza y el efecto de flujos de transporte, fuentes y sumideros (Lavoisier, 1789).

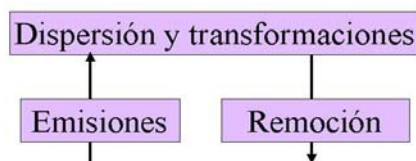
## 2.1 FORMALISMO DE LOS MODELOS DE DISPERSIÓN

La concentración de una traza en un punto cambia por convergencia o divergencia de vientos, porque la masa es advectada hacia o desde ese punto (horizontal o verticalmente), por la presencia de flujos turbulentos (covariación de fluctuaciones de concentración y viento), por fuentes y por sumideros locales (e.g., transformaciones físicas y químicas, emisiones, remoción por lluvia, etc.). Es esta la ecuación que los modelos de dispersión resuelven. Esto se ilustra en la Figura 2.

Cualquier modelo de dispersión, esto es, cualquier implementación computacional capaz de resolver sistemas de ecuaciones (una para cada traza) como las descritas, contendrá o se comunicará con varios otros modelos y bases de datos (Figura 3). Normalmente, habrá un módulo químico que represente los procesos de transformación química y de fase, por ejemplo, formación de aerosoles. También habrá un módulo meteorológico que entregue campos de vientos, temperatura, humedad, etc., necesarios para resolver la ecuación de continuidad de cada traza. Un tercer módulo principal es aquel que resuelve los aspectos relativos a los múltiples y complejos procesos de transporte (advección, convección, turbulencia, etc.). Por supuesto, todos estos módulos estarán conectados con bases de datos, por ejemplo, el inventario de emisiones. El conjunto de estos módulos se conecta luego con el proceso de gestión y apoyo a la toma de decisiones.

## 2.2 TIPOS DE MODELOS

Los modelos de dispersión son herramientas computacionales que resuelven la ecuación de continuidad antes descrita con diversos métodos y aproximaciones (e.g., Jacobson, 1999; Brasseur et al, 1999; Seinfeld y Pandis, 1998). A continuación se describen resumidamente algunos tipos de modelos de dispersión atmosférica.



$$\frac{\partial c}{\partial t} = -c \nabla \cdot \mathbf{v} - \mathbf{v} \cdot \nabla c - \nabla \cdot (\langle c' \mathbf{v}' \rangle) + Q - S; \quad \text{CB, CI}$$

donde:

$c$ : concentración [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\mathbf{v}$ : vector velocidad (viento) [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$\nabla$ : indica la variación respecto del espacio (tres direcciones independientes)

$\partial c / \partial t$ : variación local en el tiempo de la concentración promedio de una traza

$-\mathbf{v} \cdot \nabla c$ : advección de masa por efecto del viento promedio

$\nabla \cdot (\langle c' \mathbf{v}' \rangle)$ : divergencia del flujo turbulento de la traza ( $\langle \rangle$  denota promedio y  $'$  fluctuaciones en torno al promedio)

$Q, S$ : fuentes y sumideros (promediadas)

CB, CI: Condiciones de borde e iniciales

Figura 2. La ecuación de continuidad que resuelven los modelos. El panel superior muestra los principales procesos que son representados en los modelos. El panel inferior ilustra el equivalente del panel superior pero según el formalismo matemático empleado, vale decir, una ecuación diferencial para cada traza atmosférica que se quiere evaluar.

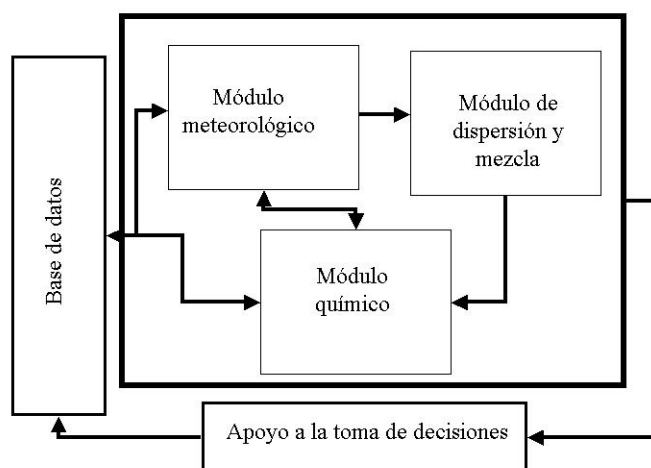


Figura 3. Aquí se muestra cómo se conectan los diversos módulos que conforman un modelo de dispersión y cómo esta herramienta se integra al complejo proceso de la toma de decisiones.

a) *MODELOS GAUSSIANOS*

Los modelos “gaussianos” son modelos de uso común en problemas de dispersión de fuentes puntuales como chimeneas industriales. Básicamente suponen que el penacho de un efluente presenta una distribución normal o de Gauss (gaussiana) de las concentraciones en torno al eje de simetría definido por la dirección del viento. Cabe hacer notar que estos modelos son aptos para estimar efectos locales y que su grado de precisión y acierto es, en general, decreciente en tanto se aplican en localidades de relieve complejo y caracterizados por circulaciones atmosféricas complejas.

b) *MODELOS URBANOS Y REGIONALES*

Los modelos de escala urbana y regional están, a menudo, orientados a ser herramientas de gestión de calidad del aire. Los problemas de escala urbana y regional son complejos pues hay que considerar los efectos de múltiples fuentes, contaminantes primarios y secundarios, los procesos de deposición y meteorología local y regional. Eso requiere entonces de la integración de modelos y bases de datos.

Los aspectos meteorológicos son tratados a través de modelos meteorológicos de diagnóstico o de pronóstico. En los primeros se estiman campos de viento a partir de datos meteorológicos (de superficie y altura) recopilados de estaciones de monitoreo utilizando métodos que buscan una interpolación y extrapolación óptima de las observaciones.

En los segundos, se calculan los parámetros meteorológicos a partir de las ecuaciones que describen las relaciones físicas fundamentales del movimiento y la energía del aire. El desarrollo actual de los esfuerzos de modelación de procesos atmosféricos tiende a integrar ambos tipos de modelos a través de las técnicas conocidas como asimilación de datos (e.g., Bennett, 2002).

Un problema común de los centros urbanos es la acumulación de precursores de oxidantes, por ejemplo ozono, y de material particulado. Existe una amplia gama de modelos fotoquímicos comparables en cuanto a sus capacidades de reproducir observaciones (Tilmes et al, 2002). Estos modelos pueden considerarse equivalentes, siendo la mayor diferencia entre ellos, la manera en que agrupan los hidrocarburos. Uno de los mecanismos es el "*Carbon Bond Mechanism*" (CBM IV, Geary et al, 1988) que agrupa los hidrocarburos en familias de acuerdo a su estructura y el tipo de enlaces. Otros mecanismos, ordenan los grupos de hidrocarburos según su reactividad o potencial de formar ozono (e.g., Simpson et al, 1995). A estos modelos se les agrega hoy la representación de los procesos responsables de la formación de aerosoles secundarios (Heizenberg et al, 2003).

### c) *MODELOS GLOBALES*

Los modelos globales resuelven la ecuación de continuidad para toda la atmósfera. Estos modelos, al igual que los modelos locales y regionales, han ido creciendo en complejidad en la medida que más variables y trazas con tiempos de recambio más cortos han sido incorporadas en ellos y el desarrollo de computadores más rápidos lo ha hecho factible (e.g., Granier et al, 2003). Problemas como la dispersión de clorofluorcarbones (CFC o "freones") y su subsecuente impacto sobre la capa de ozono estratosférico, el aumento de gases que alteran el balance radiativo del planeta ("gases de invernadero"), el aumento de las concentraciones de ozono cerca de la superficie, la presencia y formación de aerosoles, etc., son ejemplos de problemas globales que han recibido mucha atención por parte de científicos, políticos y la comunidad en general.

Un aspecto que concentra hoy la atención de científicos es cómo integrar estos modelos de manera de proveer una visión sistémica. Esto es lo que se conoce como modelación del sistema planetario y que se expresa en varios programas de investigación y de formación. Por



ejemplo, los programas científicos abocados al cambio global, esto es, el IGBP (*International Geosphere Biosphere Programme*) dedicado al estudio de ciclos biogeoquímicos, junto al IHDP (*International Human Dimension Programme*) orientado a entender la dimensión humana del cambio global, el WCRP (*World Climate Research Programme*) que estudia los aspectos físicos del clima y DIVERSITAS (*International Programme on Biodiversity Science*), que se aboca a los problemas de biodiversidad, han conformado el “*Earth System Science Partnership*” (ESSP) para poder proveer una visión sistémica y facilitar la colaboración entre las distintas disciplinas y sus interacciones con la gestión.

## 2.3 SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE MODELOS

Durante las últimas décadas, una variada gama de modelos de pronóstico del tiempo atmosférico y de dispersión de trazas químicas en la atmósfera han sido desarrollados (e.g., Granier et al, 2003). Esto ha conllevado la inclusión en los modelos de complejos procesos e interacciones. Sin embargo, la prueba verdadera de los modelos no es su grado de complejidad y sofisticación, ni la inclusión exhaustiva de fenómenos en sus representaciones, sino que en su habilidad de reproducir las observaciones y de aportar información relevante para sustentar la toma de decisiones.

La elección de un modelo para abordar el problema de calidad de aire, ya sea para diagnóstico o pronóstico, merece un análisis detallado que debe integrar variados aspectos. Entre otros, es necesario identificar:

- el tipo de contaminante y sus características (reactividad, solubilidad, etc.)
- la resolución espacial y temporal de interés (kilómetros cuadrados, metros cuadrados, horas, días, años, etc.).
- las características del terreno (plano, complejo, etc.) y la meteorología del lugar (incluyendo aspectos sinópticos y locales).
- los recursos computacionales y humanos disponibles.

- la información química, meteorológica, etc. y los datos de validación disponibles.

Los tres primeros aspectos definen el alcance espacial y temporal del problema de dispersión considerado y, por ende, las características del tipo de modelo que puede ser aplicado. Así por ejemplo, la dispersión desde una fuente puntual (chimenea) de una sustancia poco reactiva, al menos en la escala de tiempo de horas, en un terreno plano con vientos medianamente intensos puede ser tratada con un modelo gaussiano para condiciones estacionarias si el objetivo es estimar, en primera aproximación, las concentraciones máximas posibles cerca de la superficie en las inmediaciones de la fuente. En tanto, si el objetivo es estimar la formación de aerosoles a partir de una fuente puntual habrá que considerar explícitamente los procesos físicos y químicos y de remoción y, entonces, habrá que buscar un modelo más complejo que represente tales procesos y ciertamente los datos y observaciones pertinentes.

Los aspectos relativos a los insumos disponibles ponen las restricciones prácticas en cuanto a los modelos a elegir. Por un lado están los recursos humanos y económicos disponibles y, por otro, los datos y la información requerida para hacer funcionar el modelo elegido y validar sus resultados. A mayor cantidad de recursos e información se podrá, normalmente, optar a herramientas más complejas.

Todo lo anterior está, no obstante, supeditado a los objetivos definidos desde un principio. Puede no tener sentido aplicar una batería de herramientas costosas y complejas si lo que se busca es una estimación gruesa. Debe existir un equilibrio entre los aspectos arriba señalados y la precisión que se quiere alcanzar al resolver el problema propuesto. Dicho balance es no trivial y requiere, en general, de personal con entrenamiento avanzado en química, física, meteorología y computación y que interactúen estrechamente con los encargados de la gestión.

Una vez elegido un modelo, previo a su aplicación, se debe recopilar información de diversa índole requerida para su funcionamiento y evaluación. Dicha información comprende entre otros datos:

- meteorológicos (campos de vientos, temperatura, humedad, estabilidad, etc.)
- de concentraciones atmosféricas y flujos de deposición observados
- de emisiones (fuentes puntuales, areales, volumétricas, etc.)
- tasas de deposición o parámetros equivalentes condiciones iniciales y de borde

La información recopilada debe ser puesta en formatos compatibles con el de la herramienta de modelación. Esta actividad contempla, a veces, la manufacturación de complejas bases de datos. Esta etapa es tal vez, una de las etapas más demandantes en cuanto a recursos y tiempo: considérese por ejemplo la construcción de inventarios de emisiones urbanas o de redes de monitoreo urbanas y regionales. A partir de ella se definen escenarios y condiciones para las corridas del modelo, por ejemplo, la resolución espacial y temporal adecuada al problema que se quiere abordar y a los datos disponibles para ello. A veces, en el caso de problemas complejos, durante esta etapa, se debe llegar a la redefinición de objetivos o, al menos, a ajustes en cuanto a la precisión esperada de los resultados. El análisis de los datos de entrada y sus correspondientes márgenes de error es pertinente a ello.

La etapa siguiente es, de algún modo, la más sencilla de todas y corresponde a la mera ejecución de los programas computacionales que componen el modelo. Sin embargo, esto supone un trabajo técnico previo relativo a la implementación computacional de los programas. Además, la ejecución de programas bajo las distintas etapas definidas en el paso anterior debe ser seguida de la etapa más exigente en cuanto a competencia de los recursos humanos, la etapa de interpretación de resultados y validación.

La etapa de interpretación y validación de resultados requiere de análisis que, dependiendo del problema abordado y de la herramienta de modelación utilizada, puede resultar muy compleja y exigente en recursos. En general, se procede primero a revisar cuán razonables parecen los resultados. Luego, si no se han encontrado errores evidentes de cálculo o

procedimiento se procede a “validar” el modelo y sus resultados. Cuando se habla de validar o verificar o probar o calibrar modelos numéricos de sistemas naturales, se realizan tres tipos principales de ejercicios (e.g., Granier et al, 2003; Brasseur et al, 1999):

- A. Comparación sistemática entre resultados de modelos y observaciones (¿Qué representa el modelo?, ¿qué representan las observaciones?, ¿qué es esperable encontrar?, ¿qué se encuentra?)
- B. Estudios de sensibilidad respecto de los parámetros de entrada (¿Cómo cambian los resultados si se cambian en las emisiones en X%?, ¿es lineal la respuesta?, ¿qué ocurre si se consideran más detalles topográficos?, etc.).
- C. Intercomparación de modelos (¿Se obtienen resultados similares?, ¿qué hace diferir los resultados?, etc.).

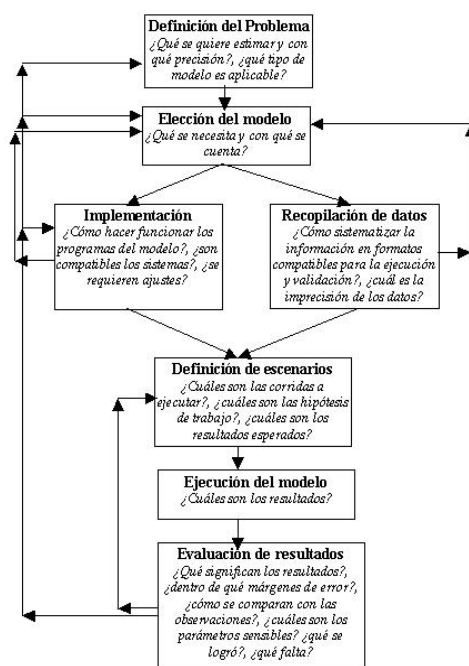


Figura 4. Esquema de las etapas de selección, implementación, ejecución y evaluación de la aplicación de una herramienta de modelación.

Cada una de las etapas antes reseñadas (Figura 4) puede ser repetida en varias ocasiones hasta alcanzar un resultado óptimo, es decir, consistente con las observaciones dentro del margen de error de las mismas y el error ponderado de las estimaciones del modelo.

## 2.4 MODELACIÓN Y GESTIÓN

En 1950 había sólo tres urbes en el mundo con poblaciones que superaban los 10 millones de habitantes. Hoy son más de 10 y se prevé que la concentración de la población en las grandes ciudades seguirá creciendo. Además, la mayor parte de la población del mundo vive hoy en ciudades y sigue concentrándose en urbes. A estas ciudades se asocian problemas ambientales severos, entre otros la calidad del aire pues junto a la población confluyen industrias, transporte público y privado, consumo energético doméstico e industrial y otras actividades que dan lugar a grandes emisiones de contaminantes. La contaminación del aire que afecta a estas urbes y sus alrededores, en sus múltiples escalas de tiempo y espacio, está determinada por una serie de intrincados factores, entre otros, comportamiento humano a escalas individual y social. De modo que constituye uno de los tópicos más complejos que científicos, técnicos, gestores y gente en general deba enfrentar.

Las grandes aglomeraciones urbanas, denominadas “megaciudades” y sus impactos sobre la calidad de vida de las personas han suscitado gran interés científico y político a través de los años, ver Figura 5. La necesidad de abordar estos problemas con un enfoque sistémico se ha visto reflejado en el desarrollo de proyectos multidisciplinarios como el implementado en Ciudad de México (e.g., Molina & Molina, 2001, 2002) y que se presenta esquemáticamente en la Figura 6.

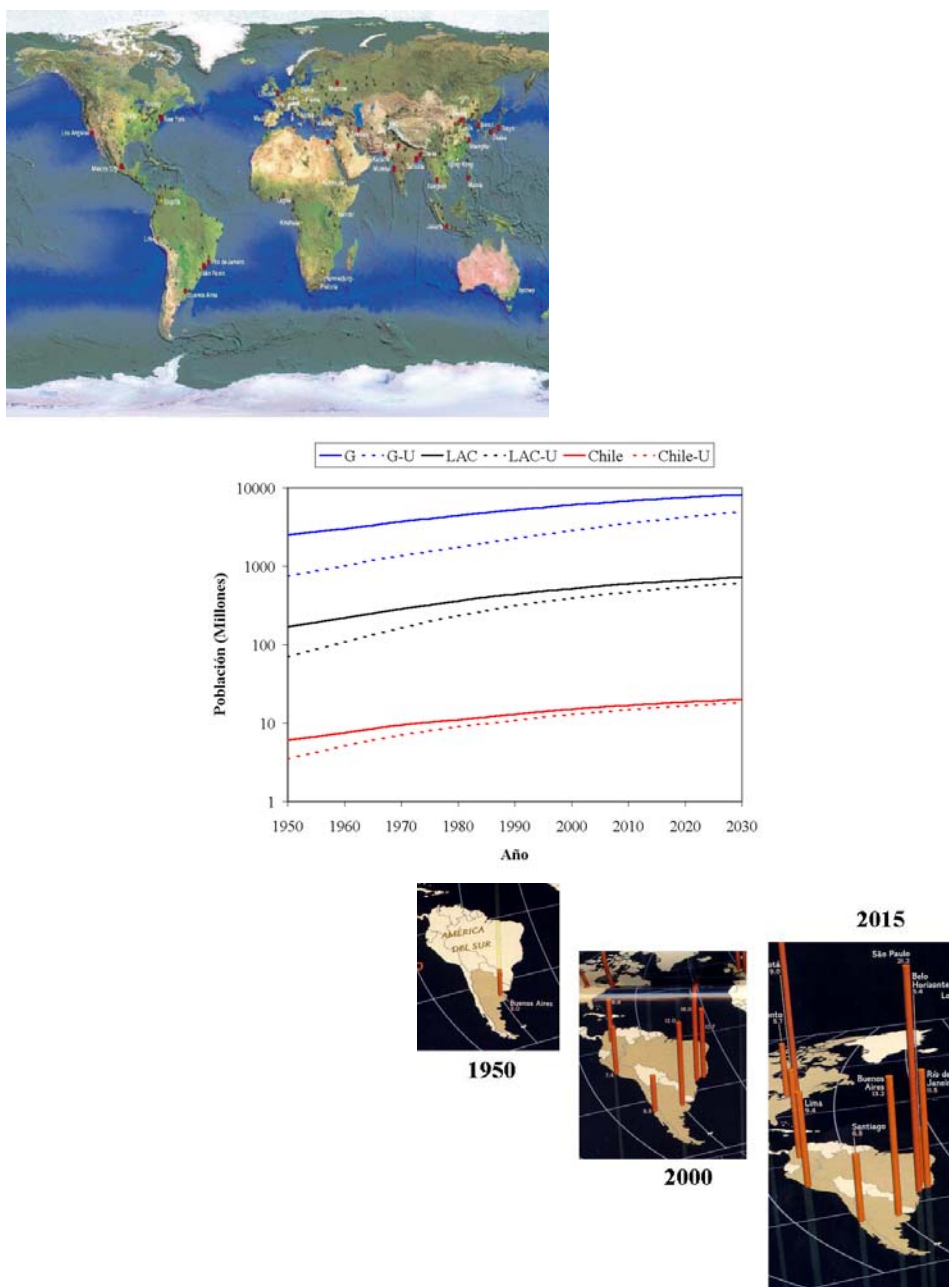


Figura 5. Megaciudades. El panel superior izquierdo muestra la distribución actual de urbes que superan los 10 millones de habitantes. El panel superior derecho muestra el crecimiento de la población del mundo (G), de América Latina y el Caribe (LAC) y de Chile tanto total como urbana. Por último, el panel inferior muestra la evolución demográfica de las ciudades en el continente sudamericano. Fuente: División de Población, Naciones Unidas. <http://www.un.org/esa/population/unpop.htm>

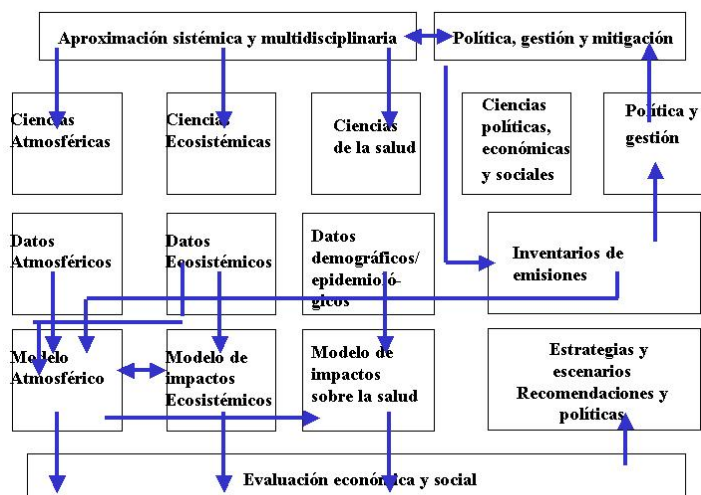


Figura 6. Esquema de integración de aspectos y herramientas para la gestión de problemas de contaminación atmosférica urbana y regional. Adaptado de Molina, L., y Molina, M., (Editors) 2002.

### 3. SANTIAGO Y LA MACROZONA CENTRAL DE CHILE

En las décadas de 1980 y 1990, varias iniciativas, mayoritariamente desarrolladas en las universidades, abordaron varios aspectos de la dispersión de contaminantes en Santiago. Se hicieron esfuerzos para describir los patrones meteorológicos que controlan la dispersión de contaminantes en la zona (Ulriksen, 1993; Rutllant and Garreaud, 1995).

También se realizaron unos cuantos intentos para implementar modelos que describieran la dispersión de sustancias cuasi-inertes como el monóxido de carbono (Ulriksen et al., 1992). Desde mediados de los años 1990, las autoridades ambientales como la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y el Servicio Metropolitano de Salud del Ambiente (SESMA), destinaron significativos recursos al establecimiento de inventarios de emisiones, redes de monitoreo meteorológico y de calidad del aire. La calidad del aire ha sido monitoreada regularmente desde entonces en ocho puntos en Santiago y desde 1997 se opera, a través del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), una red de

una veintena de estaciones meteorológicas en la cuenca de Santiago. También se confeccionó un completo inventario de emisiones para la Región Metropolitana (e.g., Cap III).

La información disponible sobre emisiones, meteorología y calidad del aire ha hecho posible la implementación y aplicación de modelos de dispersión atmosférica a escala urbana y regional en la macrozona central de Chile. La Tabla 2 muestra algunas de estas actividades.

Un ejemplo de estas actividades se ilustra en la Figura 7. En el panel superior azufre oxidado medidos y simulados para la estación de Parque O'Higgins en Santiago entre el 15 de Junio y el 15 de Julio de 1999. Es interesante notar el aumento de las concentraciones que se observa y simula en conexión con la ocurrencia de una baja costera en los primeros días de Julio. Los paneles inferiores muestran la comparación entre la evolución de valores observados y simulados de parámetros meteorológicos en la estación meteorológica de Santo Domingo en la costa de Chile central en el mismo período.



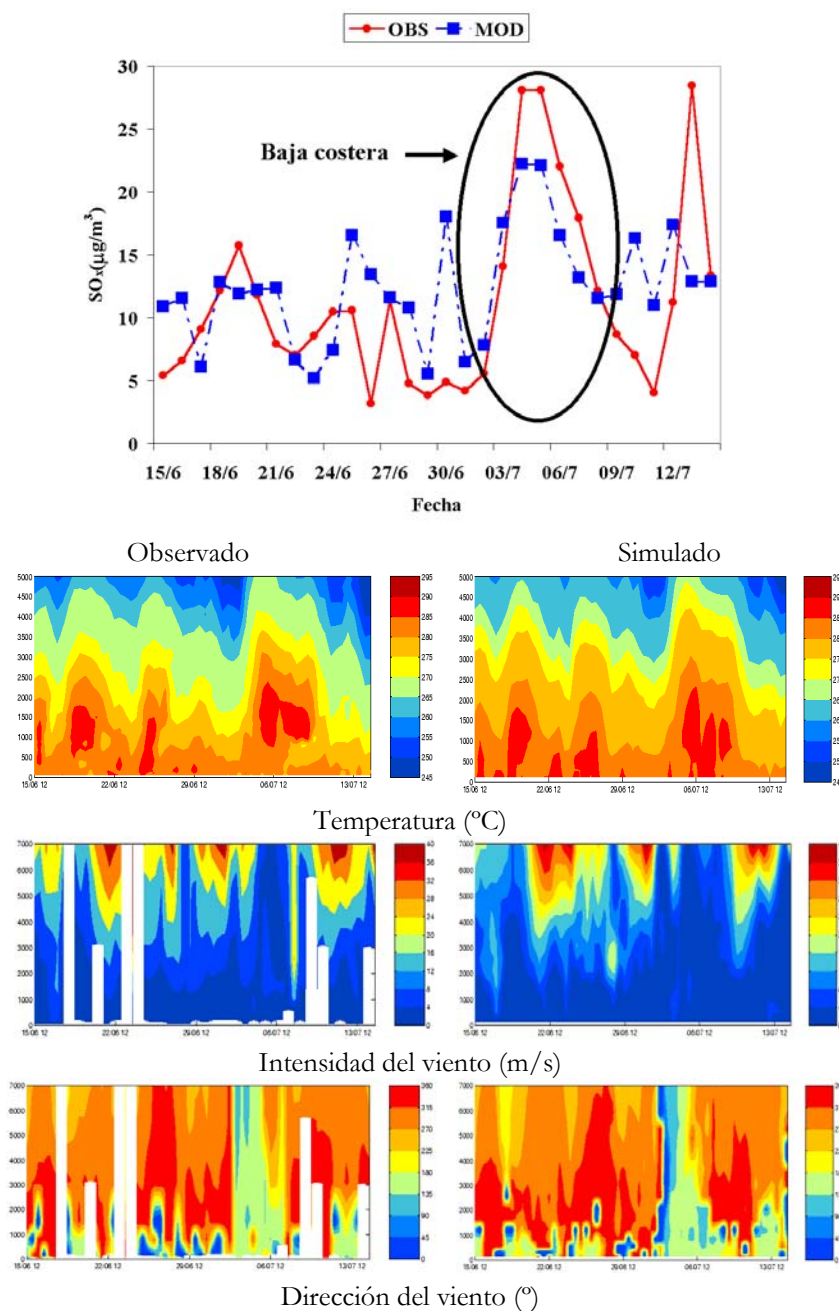


Figura 7.2. Azufre oxidado ( $\text{SO}_x = \text{SO}_2 + \text{S} + \text{SO}_4 + \text{S}$ ) panel superior y Azufre oxidado medidos y simulados para la estación de Parque O'Higgins en Santiago entre el 15 de Junio y el 15 de Julio de 1999. Adaptado de (Gallardo et al, 2002)

Tabla 2. Modelación atmosférica a escalas urbana y regional para Chile central desde 1997.

Problema abordado	Tipo de Modelo	Contactos y/o referencias
Pronóstico numérico del tiempo sobre el cono sur de América	Modelo de pronóstico numérico del tiempo para escala regional	jvergara@dgf.uchile.cl <a href="http://met.dgf.uchile.cl/~jvergara/chile.html">http://met.dgf.uchile.cl/~jvergara/chile.html</a>
Dispersión de monóxido de carbono y material particulado respirable de origen primario	Modelo de transporte a escala urbana para trazas inertes	Flores et al., 2000 <a href="http://www.conama.cl">http://www.conama.cl</a>
Diagnóstico y análisis sinóptico de bajas costeras en Chile y otras aplicaciones.	Modelo de pronóstico numérico del tiempo para escala regional (MM5).	Garreaud et al, 2001 (garreau@dgf.uchile.cl)
Dispersión regional de azufre oxidado y arsénico en Chile Central	Modelo de dispersión para escala regional para trazas químicas acoplado a las salidas de un modelo de pronóstico numérico del tiempo (HIRLAM-MATCH).	Olivares et al, 2002; Gallardo et al, 2002 (lgallard@dim.uchile.cl) Gidhagen et al, 2002. lars.gidhagen@smhi.se
Análisis de trayectorias en la cuenca de Santiago durante episodios de contaminación invernal	Modelo diagnóstico de campos de viento a partir de observaciones superficiales-	acabello@cenma.cl
Pronóstico numérico operacional del tiempo para Chile central	Modelo de pronóstico numérico del tiempo para escala regional (MM5).	ralcafuz@meteochoile.cl
Determinación de áreas de influencia de fuentes en la macrozona central de Chile	Modelo de trayectorias para campos interpolados cinemáticamente y forzados por topografía compleja.	CENMA, 2001a acabello@cenma.cl
Dispersión de oxidantes fotoquímicos en Santiago	Modelos de dispersión de mesoescala para trazas químicas acoplado a las salidas de un modelo de pronóstico numérico del tiempo (MM5) o a modelo de diagnóstico.	Rainer Schmidt (schmitzr@dgf.uchile.cl) Héctor Jorquera (jorquera@puc.cl)

Si bien la ciudad de Santiago no clasifica (todavía) como megaciudad pues su población no sobrepasa los 10 millones de habitantes, sí resulta recomendable y deseable tratar a la macrozona central de Chile como una aglomeración urbana bajo el marco de un enfoque sistémico. La macrozona central de Chile concentra más del 50% de la población del país, el 60% de la actividad productiva, destacándose

actividades intensas en agricultura y minería. Especialmente, en vista de las necesidades de planificación de largo aliento que exige el esperado y continuado crecimiento y desarrollo urbano y de infraestructura en Chile central, incluyendo carreteras interregionales e infraestructura ferroviaria. Cabe preguntarse si el manejo y estudio de la contaminación atmosférica que afecta a la cuenca de Santiago, como hemos visto amplio y profuso, sigue un patrón sistémico y coordinado que permita implementar las herramientas de diagnóstico y pronóstico para identificar medidas de mitigación, establecer estrategias y evaluar los diversos escenarios de desarrollo.

#### 4. RESUMEN Y PERSPECTIVAS

Evaluar la dispersión regional y local de los contaminantes es un tópico complejo que requiere de variados y simultáneos esfuerzos tales como el desarrollo de inventarios de emisiones, monitoreo meteorológico y de calidad del aire y modelación atmosférica. Estos esfuerzos se han venido realizando de modo creciente en Santiago y la macrozona central de Chile. También varias actividades se han iniciado en la Región de Coquimbo (Kathoff et al, 2002) y en la de la Araucanía (CENMA, 2001 b; S. Montecinos, comunicación personal), abordando problemas como la quema de leña, la expansión urbana y el cambio de uso de suelos. Se prevé que un manejo adecuado de los problemas de contaminación atmosférica y, en general, un manejo sustentable de nuestros recursos, requerirá de una actividad coordinadora en la que, entre otras cosas, las actividades de modelación y monitoreo se integren más estrechamente. Dicha actividad debiera ser parte de estrategias regionales amplias que, usando un enfoque sistémico y de largo aliento, pueda definir medidas eficientes de control y prevención. Entre los elementos a considerar en una estrategia como esta se cuenta la ampliación de ámbitos de acción, la incorporación de nuevas técnicas y, en definitiva, la adopción de un enfoque sistémico. Algunos ejemplos se indican a continuación.

##### *AMPLIACIÓN DE ÁMBITOS DE ACCIÓN.*

Hasta ahora el acento de los estudios y la gestión del recurso aire se ha puesto en los efectos agudos sobre la salud de las personas. Consecuentemente, las redes de monitoreo se han enfocado hacia la evaluación de la exposición humana en zonas urbanas o directamente viento abajo de megafuentes. También se ha priorizado la implementación de modelos a escala urbana y suburbana. Así también las medidas de gestión se han concentrado en eliminar la ocurrencia de episodios y sus efectos agudos sobre la población. Ahora se hace necesario complementar estos enfoques abordando temas hasta ahora descuidados como los efectos acumulativos y de largo aliento de la contaminación atmosférica sobre la población así como los efectos secundarios, esto es, sobre la vegetación, los recursos hídricos, etc.. Para ello será necesario ampliar las redes de monitoreo tanto en su cobertura espacial como temporal de modo de poder saltar desde la perspectiva meramente local a una perspectiva regional integrada. También será necesario abordar efectos secundarios e implementar redes epidemiológicas sensibles a los efectos de largo aliento. De la misma manera, los modelos deberán incorporar y optimizar módulos para abordar interacciones entre la atmósfera y los ecosistemas (e.g., emisiones biogénicas, deposición de sustancias acidificantes, etc.). También la gestión debe reorientarse a satisfacer las necesidades de planificación y prevención de mediano y largo plazo y no sólo a las medidas reactivas frente a problemas agudos. Más allá de los avances obtenidos en el manejo de los llamados episodios de contaminación subsisten los desafíos de conjugar de modo sustentable una enorme concentración de la población y la actividad económica e industrial en la macrozona central de Chile.

### *INCORPORACIÓN DE NUEVAS TÉCNICAS.*

Los avances en la investigación científica y el desarrollo de nuevas tecnologías imponen requerimientos de flexibilidad y adaptación a las herramientas de comprensión del sistema atmosférico y de su manejo. Uno de estos avances es la creciente incorporación de sistemas remotos de monitoreo, es decir, técnicas satelitales (Tyndall et al, 2003). Estas técnicas harán necesarios enormes esfuerzos de compatibilización y coordinación con las técnicas convencionales de monitoreo y modelación así como la necesidad de nuevas formas de manejo y almacenamiento de enormes cantidades de información. Para ello es crucial que científicos y tecnólogos chilenos participen de las múltiples instancias de colaboración científica internacionales y se facilite la implementación de centros de almacenamiento y control de datos. Otra técnica, estrechamente ligada a la anterior, que se hará necesaria para abordar los nuevos desafíos es la llamada modelación inversa (Kasibathla et al, 1999; Enting, 2002). Los problemas directos son aquellos en que, dados un conjunto de parámetros de entrada (causas) y un modelo, se determinan parámetros de salida (consecuencias). En los problemas inversos, en tanto, se buscan, probabilística o variacionalmente, las entradas óptimas (causas) a partir de un conjunto de salidas (consecuencias) y un modelo, tal que se minimice el error del modelo. Por ejemplo, las emisiones que mejor reproduzcan datos fotoquímicos en una ciudad o región (e.g., Elbern, 2000). Cuestión que, más allá de optimizar los resultados de un modelo particular, nos ayuda a mejor estimar los parámetros de entrada, por ejemplo, la variación diaria e interdiaria en un inventario cuyas estimaciones provienen de datos estacionales o anuales. O bien, aislar las fuentes de error en nuestro modelo (Validación).

Para que las herramientas (modelos, redes de monitoreo, inventarios, etc.) y el conocimiento científico resulten pertinentes a la toma de decisiones es necesario integrarlos a dicho proceso, poniendo especial énfasis en la coordinación y comunicación entre los diferentes

actores. En el caso de la gestión ambiental, dadas las características de los problemas ambientales que, a saber:

- son no lineales, multivariados y de predictibilidad incierta
- trascienden los límites clásicos de las disciplinas científicas
- están íntimamente asociados al comportamiento humano a escalas individual y social (política)
- condicionan nuestra supervivencia y calidad de vida

se requerirá de enfoques sistémicos, multivariados, multiescala, multidisciplinarios, multiinstitucionales. En el caso de Santiago y la macrozona central de Chile, los estudios atmosféricos y las medidas de gestión son de larga data, amplios y numerosos. No obstante, si bien se tienen muchas de las partes indicadas en la Figura 6, a menudo falta el nexo coordinador e integrador que permite, en definitiva, optimizar el uso de los recursos y ciertamente de las herramientas de modelación atmosférica, entre otras. Este es un desafío pendiente que urge abordar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bennett, A. F., 2002: *Inverse Modeling of the Ocean and Atmosphere*. Cambridge University Press, 234 pp. ISBN 0-521-81373-5
2. Brasseur, G. P. , a. B. Khattatov, and S. Walters, 1999: *Modeling, in Atmospheric Chemistry and Global Change*, edited by G. Brasseur, a. J. Orlando, and G.Tyndall, Oxford University Press, Oxford.
3. Brasseur et al (Eds.), 2002. "*The Changing Atmosphere: An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research*". Por aparecer en Noviembre de 2002 por Springer-Verlag (ISBN: 3-540-43050-4).
4. CENMA, 2001 a. *Diagnóstico integral de la contaminación atmosférica en la macrozona central de Chile. Informe final preparado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente*. Disponible en Avda. Larraín 9975, Santiago, Chile.
5. CENMA 2002, 2ª Fase Estudio de la Calidad de Aire en Regiones Urbano-Industriales de Chile. Informe final. También disponible en <http://www.conama.cl/portal/1255/article-28395.html>
6. Cicerone, R., 1999. *Atmospheric chemistry and the Earth System*. In *Modeling, in Atmospheric Chemistry and Global Change*, edited by G. Brasseur, a. J. Orlando, and G.Tyndall, Oxford University Press, Oxford.
7. Crutzen, P., 1995: *Ozone in the troposphere*. In "*Composition, chemistry and climate of the atmosphere*" (Ed. H. Singh.). Van Nostrand Reinold Publ., New York, 349-393.
8. Elbern, H., Schmidt H., O. Talagrand and A. Ebelb, 2000: *4D-variational data assimilation with an adjoint air quality model for emission analysis*", Environmental Modelling and Software, Volume 15, Issues 6-7, Pages 539-548
9. Enting I.: *Inverse Problems in Atmospheric Constituent Transport*. Cambridge University Press (ISBN: 0521812100)
10. Flores, V., Gidhagen, L., et al. 2000. "*Transporte Urbano y Medio Ambiente, Parte 4: Apoyo al Sistema de Información de la Calidad de Aire en Santiago*". Comisión Nacional del Medio Ambiente.
11. Gallardo, L., Olivares, G., Langner, J. and Aarhus, B., 2002: *Coastal lows and sulfur air pollution in Central Chile*. Atmos. Env. 36, 23, 3829-3841
12. Garreaud, R., Rutllant, J. and Fuenzalida, H., 2001. *Coastal lows in the subtropical West Coast of South America: mean structure and evolution*. Mon. Wea. Rev.130, 75-88.
13. Geary, M., Whitten, J., Killus, L., Ruscic, B. and Lalas, D.,1988: *A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling*. J. Geophys. Res., 94, 12925-129256.
14. Gidhagen, L. Kahelin, H., Schmidt-Thomé, P. and Johansson, C., 2002: *Anthropogenic and natural levels of arsenic in PM10 in Central and Northern Chile*. Atmos. Env.
15. Granier et al, 2003. Modeling. In "*The Changing Atmosphere: An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research*". Brasseur et al (Eds.). Springer-Verlag (ISBN: 3-540-43050-4).
16. Heitzenberg et al, 2003. *Tropospheric aerosols*. In "*The Changing Atmosphere: An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research*". Brasseur et al (Eds.). Springer-Verlag (ISBN: 3-540-43050-4).
17. IGAC, 2003. *Science Plan and Implementation Strategy IGAC II*. Disponible en <http://www.igac.unh.edu/>
18. IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The scientific basis*. Summary for policy makers. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
19. Jacobson, M. 1999: *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge University Press, Cambridge.
20. Kalthoff, N., Bischoff-Gauß, I., Fiebig-Wittmaack, M., Fiedler, F., Thürauf, J., Novoa, E., Pizarro, C., Castillo, R. Gallardo, L., Rondanelli, R., 2002: *Mesoscale Wind Regimes in*

Chile at 30 °S. J. Appl. Meteo., 953-970.

21. Kasibhatla, P., Heimann, M., Rayner, P., Mahowald, N., Prinn, R., and Hartley, D. (editors), 1999. *Inverse Methods in Global Biogeochemical Cycles*, AGU Geophysical Monograph Series, Vol. 114 (ISBN 0-87590-097-6)
22. Lavoisier, A., 1789. *Traité élémentaire de chimie, présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes*, 2 vols. Paris: Chez Cuchet, 1789.
23. Molina, L., and Molina, M., (Editors) 2002. *Air Quality in the Mexico Mega City: An Integrated Assessment*, Kluwer Academic Publishers.
24. Molina, L & Molina, M., 2001: Air pollution in megacities: Mexico City Case Study. In EUROTRACnewsletter, 23/2001, pp. 4-9.
25. Nor\_1215, 2000. *Revisión de las normas de calidad del aire contenidas en la Resolución 1215/78*. Expediente Público, Rol: NOR 01/2000. Comisión Nacional del Medio Ambiente.
26. Olivares, G., Gallardo, L., Langner, J. and Aarhus, B., 2002: *Regional dispersion of oxidized sulfur in Central Chile*. Atmos. Env. 36, 23, 3819-3828.
27. Rodhe, H. 1999. *Human impact on the atmospheric sulfur balance*. Tellus 51 A-B, 110-122
28. Rutlant, J. and Garreaud, R., 1995. "Meteorological Air Pollution Potential for Santiago, Chile: Towards an Objective Episode Forecasting". Environmental Monitoring and Assessment, 34, 223-244.
29. Seinfeld, J. y Pandis, S., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air pollution to climate change*, J. Wiley and Sons, Inc.
30. Simpson, D., 1995. *Biogenic emissions in Europe 2. Implications for ozone control strategies*. J. Geophys. Res., 100, 22891
31. Solomon, S., 1999. *Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history*. Rev. Geophys. 37, 275-316.
32. Tilmes, S., Brandt, J., Flatøy, F., Bergström, R., Flemming, J., Langner, J., Christensen, J.H., Frohn, L.M., Hov, Ø., Jacobsen, I., Reimer, E., Stern, R. And Zimmermann, J. 2002. *Comparison of Five Eulerian Air Pollution Forecasting Systems for the Summer of 1999 Using the German Ozone Monitoring Data*. J. Atmos. Chem. 42, 91-121.
33. Tyndall et al, 2003. Advances in laboratory and field measurements. In "The Changing Atmosphere: An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research". Brasseur et al (Eds.). Por aparecer en Noviembre de 2002 por Springer-Verlag (ISBN: 3-540-43050-4).
34. Ulriksen, P., Rosenbluth, B and Muñoz, R., 1992: *Caracterización de episodios de contaminación atmosférica en Santiago y su pronóstico mediante modelos estocásticos*. Informe final, proyecto FONDECYT 1192-91.
35. Ulriksen, P., 1993: *Factores meteorológicos de la contaminación atmosférica de Santiago*. In "Contaminación atmosférica de Santiago, estado actual y soluciones". Sandoval, H., Prendez, M. y Ulriksen, P. Editores. Editora e impresora Cabo de Hornos S.A.