



## **MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DE PUEBLA**

### **MATHEMATICAL MODELATION OF AIR QUALITY IN THE METROPOLITAN ZONE OF PUEBLA**

Pérez Palma Adolfo

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Química.

#### **RESUMEN**

El Modelo de Caja Individual (tipo Euleriano) está basado en la conservación de masa dentro de la caja, que representa el volumen de aire sobre cuatro Estaciones de Monitoreo en la ciudad de Puebla. La modelación de la concentración de cada contaminante se realizó de enero a julio del 2007 con niveles indeseables de ozono y partículas suspendidas.

Palabras Clave: Calidad del Aire, Contaminantes, Modelo Matemático.

#### **ABSTRACT**

The Individual Box Model (Euler's type) is based in the mass conservation of each pollutant contained inside of a box. Represented by four monitoring meteorological stations located in the City of Puebla. This mathematical model was carried out in 2007 from January to July, with undesirable results of ozone and suspended particles in air.

Key words: Air Quality, Pollutants, Mathematical Model.

#### **INTRODUCCIÓN**

Se les denomina contaminantes criterio a sustancias que fueron objeto de evaluaciones toxicológicas (Corbitt, 2003) publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos con el objetivo de establecer los Límites Máximos Permisibles (LMP) en los que la salud de seres vivos no corre riesgo (Tabla 1). Actualmente el término contaminantes criterio ha sido adoptado en todos los países y se refiere a: Bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), Bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), Material Particulado (PM10), Monóxido de carbono (CO) y Ozono (O<sub>3</sub>).



Tabla 1. Límites máximos permitidos para los contaminantes criterio

| Contaminante    | Límite Máximo Permitido |                         |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|
|                 | 24h                     | anual                   |
| O <sub>3</sub>  | 0.11 ppm                | 235 µg/m <sup>3</sup>   |
| NO <sub>2</sub> | 0.21 ppm                | 100 µg/m <sup>3</sup>   |
| SO <sub>2</sub> | 0.13 ppm                | 80 µg/m <sup>3</sup>    |
| CO              | 0.011 ppm               | 10000 µg/m <sup>3</sup> |
| PM10            | 150 µg/m <sup>3</sup>   | 50 µg/m <sup>3</sup>    |

(Secretaría de Salud,1997)

La Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA) del Estado de Puebla es un sistema de equipos especializados de monitoreo atmosférico, que identifican los contaminantes criterio en forma cualitativa y cuantitativa, así como parámetros meteorológicos en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (ZMVP), los cuales serán base para aplicarlos en la ecuación del Modelo de Caja para cada zona de las Estaciones de Monitoreo y cada Contaminante Criterio con el propósito de obtener cuantitativamente datos que nos ayuden a realizar una evaluación de la calidad del aire en cada zona específica donde se aplica este modelo matemático. Estas cuatro estaciones de monitoreo se localizan en el norte (Hermanos Serdán), sur (Agua Santa), noreste (Tecnológico) y centro (Ninfas) de la zona metropolitana de la ciudad de Puebla, puntos importantes para nuestro estudio por la aglomeración de la población y la actividad laboral e industrial en esta ciudad (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de las Estaciones de Monitoreo Ambiental en la Ciudad de Puebla

## MATERIALES Y MÉTODOS

La base de datos utilizada en este trabajo son los que obtiene diariamente la REMA (red Estatal de monitoreo atmosférico) realizando un promedio de cada uno de los contaminantes criterio para su análisis en el modelo matemático que se propone (Modelo de Caja) de enero a julio del 2007, además de las variables meteorológicas como la dirección del viento  $u$  y la altura de mezclado  $H$ .

Todos los modelos de concentración de contaminantes, incluyendo el modelo de caja, son sencillos balances de materiales, De Nevers (1997). La ecuación general del balance (ecuación 1) se aplica a un conjunto especificado de fronteras y se puede escribir como sigue:

$$[\text{Velocidad de acumulación}] = [\text{gastos de entrada}] - [\text{gastos de salida}]$$



+ [Velocidad de creación] [velocidad de destrucción] Ecuación (1)

Para aplicar el modelo de caja se consideran y especifican las siguientes condiciones:

El área de estudio es un rectángulo con dimensiones W (ancho = 500 m) y L (largo = 500 m), y con uno de sus lados paralelos a la dirección del viento.

La turbulencia atmosférica produce el mezclado completo y total de los contaminantes hasta la altura de mezclado H.

Esta turbulencia es bastante fuerte en la dirección contra el viento.

El viento sopla en la dirección x con velocidad u. Esta velocidad es constante e independiente del tiempo.

La concentración del contaminante en el aire que entra a la ciudad (en  $x=0$ ) es constante e igual a b.

El índice de emisiones del contaminante del aire de la ciudad es Q (normalmente expresado en g/s). Se puede convertir uno en el otro por medio de  $Q = qA$ , en donde A es el área de la ciudad, la cual es igual a W multiplicada por L, en este caso. Este índice de emisiones es constante y no cambia con el tiempo.

El contaminante en cuestión tiene una duración suficiente en la atmósfera como para que la velocidad de destrucción de la ecuación del modelo de caja sea cero.

Deduciendo la ecuación del balance de materia (ecuación 2) con las condiciones anteriores:

No hay acumulación

$0 = [\text{todos los gastos de entrada}] [\text{todos los gastos de salida}]$  ecuación (2)

Se tienen dos gastos de entrada:

El gasto de entrada del contaminante hacia adentro de la cara contra el viento de la ciudad es

Gasto de entrada =  $uWHb$  ecuación (3)

Los primeros tres símbolos (ecuación 3) constituyen el volumen de aire que cruza la frontera contra el viento del sistema por unidad de tiempo; se puede verificar que  $uWH$  tiene dimensiones de volumen/tiempo. Multiplicándolo por una concentración (masa/volumen), se obtiene un gasto másico (masa/tiempo).



El segundo gasto de entrada (ecuación 4) es el del contaminante emitido por la ciudad hacia el interior por la frontera, o cara, inferior del sistema,

$$\text{Gasto de entrada} = Q = q WL \quad (4)$$

Dado que  $Q = qA$ , en donde  $A$  es el área de la ciudad, la cual es igual a  $W$  multiplicada por  $L$ .

Según las hipótesis precedentes, la concentración en el volumen de estudio completo (Figura 2) es constante e igual a  $c$ . La única manera en la que el contaminante sale del sistema es por el flujo hacia fuera a través de la cara en la dirección del viento. El gasto de salida se expresa por:

$$\text{Gasto de salida} = u WHc \quad \text{ecuación (5)}$$

Sustituyendo lo anterior en ecuación 1:

$$[\text{Velocidad de acumulación}] = [\text{gastos de entrada}] - [\text{gastos de salida}] + [\text{Velocidad de creación}] - [\text{velocidad de destrucción}]$$

$$0 = (u WHb + q WL) - u WHc \quad \text{ecuación (6)}$$

Se despeja  $c$  y se encuentra la ecuación del modelo de caja

$$c = b + qL / uH \quad \text{ecuación (7)}$$

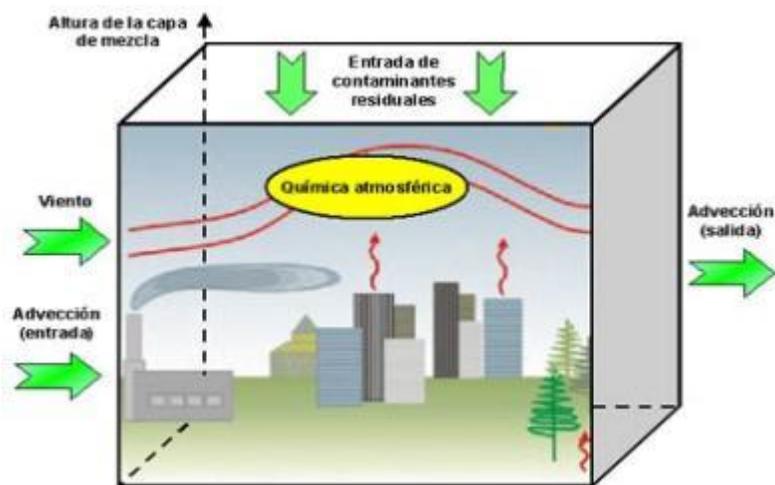


Figura 2. Volumen a estudiar del modelo de caja

Donde:

$c$  es la concentración sobre cada estación de monitoreo.



b es la concentración del contaminante que entra a la ciudad medido por la REMA.

q es el índice de emisión por unidad de área tomando el valor de las emisiones totales de cada contaminante criterio sobre 24 h y multiplicándolo por el área a tratar.

L es el largo del área a estudiar (500 m).

u es la velocidad del viento promedio medido por la REMA.

H es la altura de mezclado (300 m).

El área en donde se aplica el modelo matemático es la superficie que se encuentra arriba de cada Estación de Monitoreo de la Ciudad de Puebla de 500 m de largo por 500 m de ancho y a una altura de mezclado de 300 m.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al graficar los datos obtenidos por la ecuación del modelo de caja, podemos observar la concentración de los contaminantes analizados que se encuentran sobre cada estación de monitoreo, mostrando los siguientes resultados:

CO. este contaminante se encuentra en mayor medida en la zona de Agua Santa (Figura 3) manteniéndose a lo largo del horario de trabajo con un promedio de  $64.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , dadas las características de alto flujo vehicular en esta zona, tanto de particulares como de transporte público, pero no rebasa el parámetro de la norma que es de  $10000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anual (Figura 3).

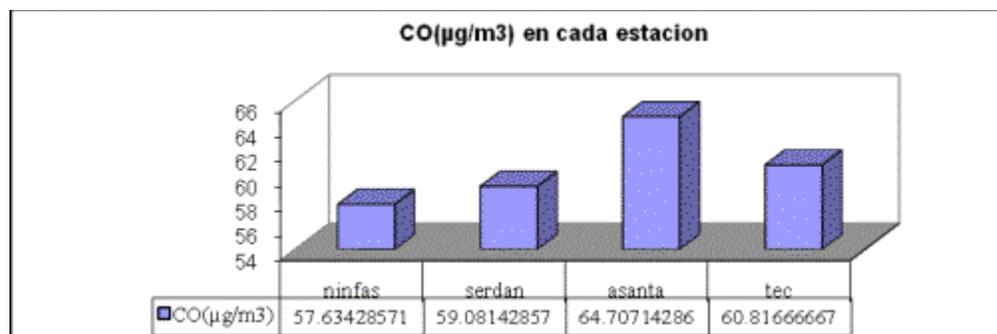


Figura 3. Resultados de CO de la ecuación del modelo de caja

NO<sub>2</sub>. Las estaciones con un nivel más elevado son Agua Santa y Ninfas con  $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente, debido al inicio de los procesos de combustión del flujo



vehicular y actividades comerciales e industriales que se desarrollan en la ciudad, principalmente en la zona centro y sur, respectivamente. Además, en el periodo de muestreo fue poca de invierno-primavera que no favorece la dispersión de este contaminante. Sin embargo no rebasa el parámetro de la norma que es de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anual (Figura 4)

O<sub>3</sub>. En Agua Santa se observa una mayor concentración de O<sub>3</sub> seguida de las estaciones Ninfas y Tec con una concentración de 6.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Las emisiones de las empresas y los vehículos aunado a la radiación solar generan que se rebasen los límites máximos permitidos en años anteriores (de 2001 a 2005, excepto el 2004), y aunque disminuyó, nuevamente presenta un aumento considerable. En nuestro estudio no rebasó el valor de la norma que es de 235  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anual (Figura 4).

PM<sub>10</sub>. La principal es la estación Serdán con 3.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  seguida del Tecnológico, Agua Santa y Ninfas. En años anteriores ha rebasado la norma, sólo en poca de lluvia es cuando disminuye, debido a que el lavado atmosférico y la condiciones de humedad relativa inducen a un abatimiento de las concentraciones hasta en un 50%, y aumentan en el invierno y primavera, poca en la que está centrada nuestro estudio (Figura 4).

SO<sub>2</sub>. Las estaciones Serdán y Tecnológico registraron una concentración de 1.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 1.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente seguidas de las Ninfas y Agua Santa. La zona norte de la Ciudad de Puebla es la de mayor concentración, ya que aquí se encuentra la mayor parte de las actividades industriales que utilizan combustibles líquidos con un alto contenido de azufre, como es el combustóleo. Sin embargo, no rebasan el límite máximo permitido de 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anual (Figura 4).

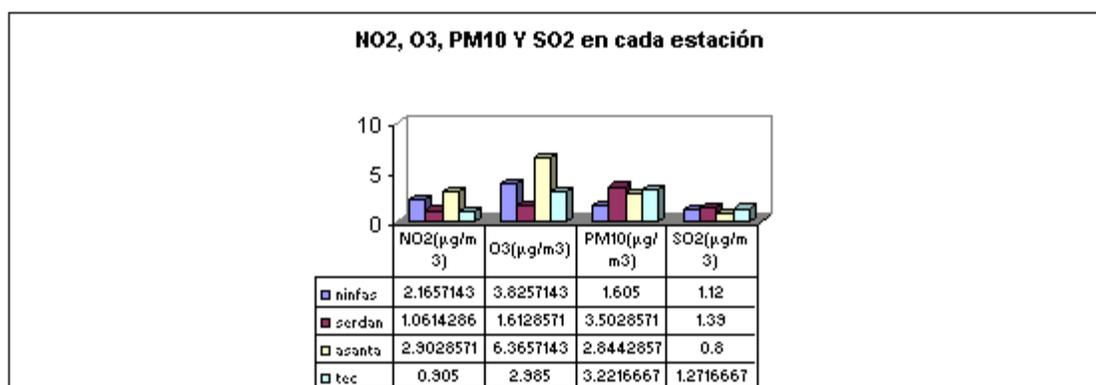


Figura 4. Resultados de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub> de la ecuación del modelo de caja

La ciudad de Puebla está favorecida por el fenómeno de dispersión atmosférica, en el cual las llanuras son propicias para que los vientos esparzan los contaminantes, mientras que el calor acelera las reacciones químicas ya que actúa como un catalizador, entonces la



contaminación no tiende a permanecer en la atmósfera, como sucede en la Ciudad de México. Con respecto a las partículas suspendidas no se pueden controlar los niveles provenientes de fuentes naturales como las emisiones del volcán Popocatepetl, pero sí se pueden detectar contingencias. Con respecto a los niveles de ozono es prioritario aplicar con eficacia las leyes ya existentes para el control de emisiones de este contaminante, además de apoyar e implementar proyectos de energía limpia tanto en macro industrias como en microindustrias así como preferir combustibles limpios y vehículos de alta eficiencia en la combustión para minimizar las emisiones que deterioran la calidad del aire en la ciudad de Puebla.

## **CONCLUSIONES**

Los datos obtenidos por medio del modelo matemático de caja, aunque tiene algunas limitantes, muestra que la calidad del aire en la ciudad de Puebla se encuentra dentro de los parámetros establecidos en la Norma Oficial Mexicana para los contaminantes criterio. Sin embargo, en algunas situaciones se detectaron niveles de ozono en la estación de Agua Santa, y de PM10, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> en las cuatro estaciones, lo que pone en peligro la estabilidad de la atmósfera, saturándola de contaminantes día a día. Estos eventos si se mantienen a largo plazo podrán causar daños permanentes al ecosistema, a la salud humana y a los inmuebles.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Corbitt Robert A. (2003) Manual de referencia de la Ingeniería Ambiental, Editorial Mc Graw Hill. Madrid.

De Nevers Noel. (1997) Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, Mc graw Hill, México.

Gobierno del Estado de Puebla, dirección electrónica: [www.puebla.gob.mx](http://www.puebla.gob.mx).

Instituto Nacional de Ecología (INE), dirección electrónica: [www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx).  
[www.sinaica.ine.gob.mx](http://www.sinaica.ine.gob.mx).

Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA), dirección electrónica: [www.rema.gob.mx](http://www.rema.gob.mx).  
Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología de Puebla (SEDUEP).

Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México,

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Puebla (SEMARNAT), dirección electrónica: [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx).

Secretaría de Salud del Estado de Puebla.