

## Aspectos termodinámicos de la meteorología y su influencia en la dispersión de los contaminantes atmosféricos

L. Montes de Oca, V. Tricio<sup>a</sup>, A. Pierre<sup>b</sup>, O. Cuesta<sup>c</sup>, E. Sanchez<sup>b</sup>, R. Rodríguez<sup>b</sup>

Departamento de Física, Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa, Cuba; lmontes@ismm.edu.cu†.

a) Departamento de Física, Universidad de Burgos, Burgos, España; vtricio@ubu.es

b) Departamento de Física, Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa, Cuba. apierre@ismm.edu.cu

b) Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. Osvaldo.cuesta@insmet.cu

†autor para la correspondencia

Recibido el 1/02/09. Aprobado en versión final el 12/06/2010.

**Sumario.** La atmósfera es el medio donde se liberan contaminantes, el transporte y la dispersión de esta descarga depende en gran medida de parámetros meteorológicos. Por lo que para realizar actividades relativas a la planificación de la calidad del aire es imprescindible comprender la meteorología de la contaminación del aire y su influencia en la dispersión de las sustancias contaminantes. Para conocer el destino de dichas sustancias es preciso conocer procesos atmosféricos tales como el movimiento del aire y el flujo de calor. En el presente trabajo, partiendo de los núcleos teóricos fundamentales impartidos en la disciplina Física General, se exponen los principales aspectos termodinámicos que están presentes en estos procesos, así como su implicación en los fenómenos de contaminación atmosférica. Lo que permitirá una integración de la dimensión ambiental en el sistema educativo dirigido a la adquisición de conocimientos, al desarrollo de capacidades y a la formación de valores éticos que favorezcan un comportamiento social y profesional coherente con el concepto de desarrollo sostenible.

**Abstract.** The atmosphere is the mean where pollutants are delivered, the transportation and dispersion of this discharge depends of meteorological parameters. Thus, it is important to know meteorology of air pollution and its influences to do relative activities to the quality planning of air. For knowing the destination of these substances, it is necessary to know atmospheric processes, such as the air movement and heat flow. In this work, we will use the fundamental theoretical nucleus imparted in the discipline General Physics, the main thermodynamic aspects that are present in these processes are exposed, as well as their implication in the air pollution phenomena. That will allow an integration of the environmental dimension in the educational system oriented to the acquisition of knowledge, to the development of capacities and the formation of ethical value that favor a coherent social and professional behavior with the concept of sustainable development.

**Palabras clave.** Teaching methods in Physics education 01.40.gb, Air pollution meteorology 92.60.Sz, Thermodynamics, 05.70.-a

### 1 Introducción

La contaminación atmosférica ha crecido alarmantemente en los últimos decenios, como consecuencia del verti-

do al aire de cada vez más abundantes cantidades de humos, gases tóxicos y productos químicos.

Los modelos de dispersión atmosférica son una herramienta de gran valor para el control de la calidad

del aire, ya que en su formulación se incorporan los conocimientos más recientes sobre dinámica atmosférica para modelar, con cierto grado de confianza, los patrones de dispersión, transformación química y remoción de los contaminantes.

Para comprender mejor el problema de la contaminación atmosférica, es necesario comenzar indagando sobre lo que es la atmósfera y continuar con un análisis de las condiciones que se presentan favorables o no a la dispersión de los contaminantes, o sea la estabilidad atmosférica.

En las carreras del perfil de Ciencias Técnicas que forman profesionales de acciones contaminadoras directa de la atmósfera, es necesaria una conciencia de conservación del medioambiente. En correspondencia con el rol de la universidad cubana actual, expresado mediante el propósito de integrar la dimensión ambiental en el sistema educativo dirigido a la adquisición de conocimientos, al desarrollo de capacidades y a la formación de valores éticos que favorezcan un comportamiento social y profesional coherente con el concepto de desarrollo sostenible.<sup>1</sup>

En este contexto la Física General no puede dedicarse, en exclusivo, al desarrollo de la capacidad de interpretar los fenómenos que ocurren en la naturaleza, sino que a su vez deberá propiciar la posibilidad de conocer a fondo los procesos físicos de estos fenómenos y las variantes de modelación y regulación de los mismos. Lo que posibilite la formación de un profesional dotado de conocimientos, habilidades y valores que les permita ejercer su profesión de manera racional y en completa armonía con el entorno que le rodea.

Para garantizar tal propósito pretendemos enfocar la componente ambiental en la enseñanza de la disciplina Física General, para las carreras de Ciencias Técnicas, en los aspectos termodinámicos que subyacen en el estudio de los procesos meteorológicos que influyen en la dispersión de los contaminantes en la atmósfera.

## 2 Características de la atmósfera

La atmósfera rodea nuestro planeta rotando con alrededor de su eje imaginario y también alrededor del sol. Como lo señala la Tabla 1, la misma está compuesta por aproximadamente 78 por ciento de nitrógeno, 21 por ciento de oxígeno y uno por ciento de argón; también existen gases traza como el dióxido de carbono, el neón y el helio.

La temperatura varía también con la altitud y ésta permite dividir la atmósfera en capas, que se denominan: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera.

La capa más importante en el estudio de los fenómenos de dispersión es la troposfera, porque esa zona contiene el aire que respiramos y en ella también se producen los fenómenos meteorológicos que determinan el clima y los patrones de dispersión de los contaminantes.

Se caracteriza porque la temperatura desciende con la altura aproximadamente 1°C cada 100 metros, hasta un

nivel en que el gradiente de temperatura negativo cambia, denominándose dicho nivel tropopausa. Sobre este nivel la temperatura comienza a ascender (estratosfera).

| Sustancia            | Concentración (ppm) <sup>1</sup> |
|----------------------|----------------------------------|
| Nitrógeno            | 780.900                          |
| Oxígeno              | 209.400                          |
| Argón                | 9.300                            |
| Dióxido de Carbono   | 315                              |
| Neón                 | 18                               |
| Helio                | 5.2                              |
| Metano               | 2.3                              |
| Criptón              | 0.5                              |
| Hidrógeno            | 0.5                              |
| Xenón                | 0.08                             |
| Dióxido de nitrógeno | 0.02                             |
| Ozono                | 0.01-0.04                        |

<sup>1</sup> Ver referencia [1].

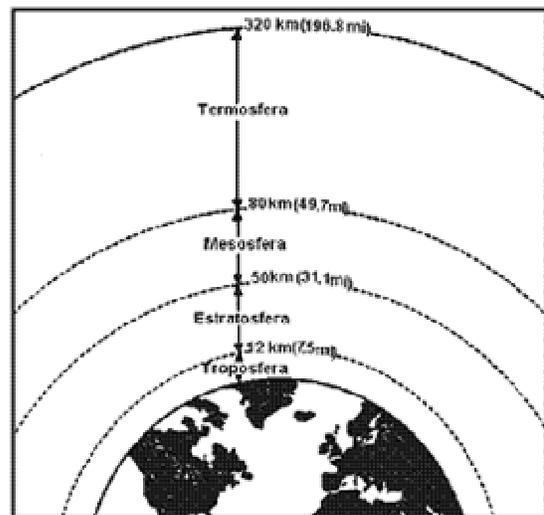


Figura 1. Las cuatro capas atmosféricas. (ver referencia [3])

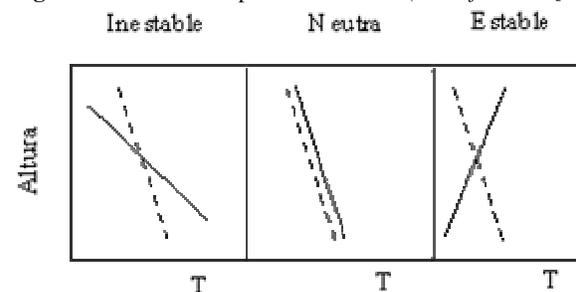


Figura 2. Relación de la estabilidad atmosférica con las tasas de cambio ambiental y adiabática seca (— tasa de cambio ambiental, --- tasa de cambio adiabática seca)

Pero la atmósfera no es una masa de gases en reposo, sino una capa gaseosa fluida y turbulenta que se mueve en el espacio y en el tiempo con intensidad variable, donde son liberados los contaminantes, el transporte y la dispersión de estas descargas depende en gran medida de

parámetros meteorológicos.

Para realizar actividades relativas a la planificación de la calidad del aire es imprescindible comprender la meteorología de la contaminación del aire y su influencia en la dispersión de las sustancias contaminantes. Los planificadores emplean este conocimiento para ayudar a localizar las estaciones de monitoreo de la contaminación del aire y para desarrollar planes de implementación orientados al cumplimiento de los estándares de la calidad del aire en exteriores.

### 3 Termodinámica y estabilidad atmosférica

Los fenómenos de contaminación atmosférica ocurren en su mayoría en la parte más baja de la atmósfera llamada Capa Límite Planetaria, por sus siglas en inglés PBL, la cual es algunas veces llamada la capa de fricción, ésta se define como la región en la cual la atmósfera experimenta los efectos de la superficie a través de intercambio de momento, calor y humedad.<sup>2</sup>

La dispersión atmosférica de un contaminante depende en primer lugar, de las condiciones meteorológicas y, después de los parámetros y condiciones en que se produce la emisión en la fuente, o sea de la velocidad y temperatura de los gases, la masa y peso molecular de los diferentes compuestos.<sup>3</sup>

Una de las características más importante de la atmósfera, en los procesos de dispersión de los contaminantes, es su estabilidad. Esto es su tendencia a resistir el movimiento vertical, o suprimir la turbulencia existente.<sup>4</sup>

Para determinar la estabilidad atmosférica, se utilizan variables de estados básicas como la presión atmosférica ( $P$ ), la temperatura ( $T$ ), además de la densidad ( $\rho$ ). Estando estas variables estrechamente relacionadas unas con otras a través de la ecuación de estado, la ecuación de la hidrostática, la primera ley de la termodinámica y otras relaciones termodinámicas.<sup>5</sup>

- La presión atmosférica puede considerarse como el peso horizontal de la atmósfera por unidad de área horizontal. La unidad meteorológica convencional es el milibar (mb) el cual es equivalente a 100 Pa (pascales).

- Para la temperatura se usa una definición basada en la Teoría Cinética de los gases de acuerdo a la cual la temperatura directamente proporcional a la energía cinética media de las moléculas. Representando así la temperatura absoluta del aire el grado de calentura de la parcela de aire, relativo a un cero absoluto. La temperatura absoluta es expresada en Kelvin (K).

- La densidad del aire se define como la masa de sustancia por unidad de volumen, esta magnitud varía con la presión y la temperatura. Además el aire es una mezcla de aire seco y vapor de agua, variando su densidad con la tasa de vapor de agua o humedad específica. La unidad recomendada por el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el kilogramo por metro cúbico, con una densidad típica para el aire seco de  $1.29 \text{ kg/m}^3$  a la presión estándar a nivel del mar y a  $273.3 \text{ K}$  de temperatura.

Cuando un pequeño volumen de aire se desplaza hacia arriba dentro de la atmósfera, encontrará una presión menor y experimentará una expansión a una temperatura menor. Usualmente, la expansión es lo suficientemente rápida como para que se pueda suponer que ésta ocurre sin ninguna transferencia de calor entre dicho volumen de aire y la atmósfera que lo rodea.<sup>4</sup>

Si se considera la atmósfera como una columna estacionaria de aire en un campo gravitacional y se aproxima el aire a un gas ideal seco. La presión para una altura cualquiera  $z$ , se da por el peso de la columna de aire superior, la cual se expresa por la ecuación de la hidrostática.

$$dP = -\rho g dz \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $P$  es la presión atmosférica y  $z$  es la altura.

El signo menos resulta del convenio que la altura es positiva cuando se mide hacia arriba y la presión disminuye en esta dirección.

La primera ley de la Termodinámica, que es esencialmente un planteamiento de la conservación de la energía, para un sistema cerrado que contenga un gas ideal en proceso de experimentar un cambio de estado cuasiestático, se escribe como:

$$dQ = dU + dW \quad (2)$$

De ella se pueden derivar diferentes expresiones. Aquí trabajaremos sólo con una que envuelva los cambios de presión y temperatura como sigue, ver referencias [5] y [6].

$$dQ = c_p dT - \frac{dP}{\rho} \quad (3)$$

De la cual se observa que la adición de calor a una parcela de aire debe cambiar su temperatura y/o presión.

Para un proceso adiabático  $dQ = 0$ , por lo tanto la ecuación anterior se convierte en

$$c_p dT = \frac{dP}{\rho} \quad (4)$$

Al sustituir la ecuación 1 en la ecuación 4 y reagrupar se obtiene

$$\left( -\frac{dT}{dz} \right)_{adiab} = \frac{g}{c_p} \quad (5)$$

El valor numérico de esta tasa de cambio adiabática dependerá del sistema de unidades empleado. En el SI,  $c_p$  equivale a  $1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  a la temperatura ambiente, y  $g$  es  $9.8 \text{ m/s}^2$ . Con base a estos datos se determina que para el aire seco

$$\Gamma = \left( \frac{dT}{dz} \right) = -0.0098 \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}} \quad (6)$$

La posibilidad de que exista una buena dispersión de los contaminantes en la atmósfera, está estrechamente relacionado con que haya mucho mezclado térmico, lo que depende en primer lugar del gradiente vertical de la temperatura y la turbulencia mecánica debido a la acción cortante del viento. Esto se puede determinar comparando el gradiente actual de temperatura (tasa de cambio ambiental) y con la tasa de cambio adiabática seca. En la

figura 2, se muestran varias posibles tasas de cambio ambientales junto con la tasa cambio adiabática seca,  $\Gamma$ , y su relación con las clases de estabildades de la atmósfera.

A menudo también se utiliza para caracterizar la estabilidad de la atmósfera el gradiente de temperatura potencial. Para determinar este gradiente se parte de la relación entre los cambios relativos en la temperatura y la presión en una parcela que se mueve adiabáticamente dada por [4]:

$$\frac{dT}{T} = \left( \frac{R}{c_p} \right) \frac{dP}{P} \quad (7)$$

Integrándose la ecuación anterior se obtiene

$$T = T_0 \left( \frac{P}{P_0} \right)^k \quad (8)$$

Donde  $T_0$  es la temperatura correspondiente a la presión de referencia  $P_0$  y  $k = R/c_p \approx 0.286$ ,  $R$  es la constante específica del gas (para el aire seco  $R = 287.04 \text{ JK}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ ).

La temperatura potencial  $\theta$  es definida como la temperatura de una parcela de aire si se lleva por un proceso adiabático de su presión existente  $P$  a una presión de referencia a nivel del mar de 1 000 mb.

Usando la ecuación (8) podemos relacionar la temperatura potencial con la temperatura actual quedando:

$$\theta = T \left( \frac{P_0}{P} \right)^k = T \left( \frac{1000}{P} \right)^{0.286} \quad (9)$$

La temperatura potencial es una característica propia de la parcela de aire, invariante durante el movimiento adiabático de la misma. Entonces una parcela de aire puede ser identificada por su temperatura potencial. También en una capa adiabática de la atmósfera, la temperatura potencial debe permanecer constante con la altura. Esta capa comúnmente se nombra como la capa de mezcla.<sup>4</sup>

Usando la ecuación nueve, la temperatura potencial puede expresarse en términos del gradiente de la temperatura ambiental y la tasa de cambio adiabático seca<sup>3,4</sup> con una buena aproximación se obtiene:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta}{T} \left( \frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) \cong \frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \quad (10)$$

Esta aproximación es particularmente útil en la PBL, donde  $\theta$  y  $T$  se diferencian en menos del 10 %.<sup>5</sup>

En base al gradiente de temperatura actual en corres-

pondencia relativo a la tasa de cambio adiabática seca, la PBL puede ser caracterizada como sigue:

1. Superadiabática, cuando  $-\partial T / \partial z > \Gamma$
2. Adiabática, cuando  $-\partial T / \partial z = \Gamma$
3. Subadiabática, cuando  $-\partial T / \partial z < \Gamma$
4. Isotérmica, cuando  $-\partial T / \partial z = 0$
5. Inversión, cuando  $-\partial T / \partial z > 0$

Esta caracterización está relacionada a la estabilidad atmosférica.<sup>6</sup>

### 3 Conclusiones

1. El fenómeno de contaminación atmosférica constituye una herramienta idónea para la materialización de los principios de la formación ambiental de los estudiantes de las carreras de ciencias técnicas, para la disciplina de Física General.
2. La Termodinámica de los procesos atmosféricos juega un papel fundamental en los procesos de dispersión de los contaminantes, fundamentalmente en la determinación de la tasa de cambio adiabática y el gradiente de la temperatura potencial, para la determinación de la estabilidad atmosférica.
3. Los conocimientos físicos desarrollados desde la Termodinámica, en la disciplina de la Física Genral, aporta núcleos teórico-prácticos básicos que le permita entender los mecanismos de dispersión de los contaminantes, en la atmósfera.

### Referencias

1. Estrategia Ambiental del Ministerio de Educación Superior en Cuba.
2. Handbook of Air Pollution, PHS Publication AP-44 (PB190-247), (1968).
3. P. Zannetti. Air Pollution Modeling. Theories, Computational Methods and Available Software, edited by Van Nostrand Reinhold (1990).
4. Alejandro S. M. Monografía: Difusión de los contaminantes gaseosos en la atmósfera, Universidad Tecnológica Nacional (2000).
5. K. Wark y C. F. Warner. Contaminación del aire: Origen y control, editado por Editorial Limusa, S. A, (1994).
6. S. P. Aray. Air Pollution Meteorology and Dispersion, edited by Oxford University Press, (1999).