

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE DIFUSION VERTICAL Y  
DE LA ALTURA DE MEZCLA POR APLICACION DE UN MODELO -  
DE CAJA CERRADA.

por

LUIS S. QUINDOS, J.SOTO, E.VILLAR

Departamento de Fisica Fundamental

Facultad de Ciencias. Universidad de Santander

Recibido el 28 de octubre de 1978.

SUMMARY.- Is studied the diary variation of the vertical stability of low atmospheric layers during a typical anticyclonic period by means of the measure of the radon concentration near the ground. Determinations of the gas concentration was made by virtue of the air filtration and the posterior measurement through gamma spectrometry of the their descends activity in the filter. We have compared experimental and theoretical results, which have got through a "closed box" model. Reasonable results for the vertical diffusion coefficient and the equivalent mixtry height have been found.

INTRODUCCION.-

El coeficiente de difusión vertical de materia  $K_z$  presenta unas importantes variaciones diarias asociadas con la variación a lo largo del día de la estabilidad vertical en las capas bajas de la atmósfera. La concentración de radón cerca del suelo presenta también una variación diaria como consecuencia de estos distintos valores que toma el coeficiente de difusión vertical. Por lo tanto el conocimiento de la variación diaria de la concentración debe permitir conocer el valor que toma  $K_z$ , alternativamente, el valor de algún parámetro característico de la estabilidad. Para relacionar estas magnitudes algunos autores (1) resuelven la ecuación de difusión dependiente del tiempo una vez fijada la constancia con la altura del coeficiente de difusión. Sin embargo, en vez de realizar la suposición, difícilmente real, de que  $K_z$  sea independiente de la altura, es posible explicar las concentraciones de radón medidas cerca del suelo por intermedio de un modelo de caja cerrada cuyas características básicas están indicadas por el ciclo diario de la estabilidad vertical. Por este motivo hemos realizado un conjunto de medidas de la concentración de gas radiactivo en las proximidades del suelo y, una vez expuestas las características del modelo de la caja, relacionado los resultados encontrados con los que se deducen del modelo.

METODO EXPERIMENTAL.-

Para determinar la concentración de radón en el aire (2) hemos usado la técnica de filtración al nivel del suelo. Los tiempos de filtración han sido de 120 minutos. El cálculo de la actividad de las muestras se ha hecho utilizando una cadena de espectrometría gamma cuyas partes fundamentales son un cristal de centelleo de  $NaI(Tl)$  y un analizador multicanal. Para calcular la actividad del radón en el aire hemos realizado un único recuento de 15 minutos bajo el triple pico del  $Po-218$  y del  $Pb-214$  son iguales. Por sustitución numérica en las ecuaciones de densitegración encontradas se obtiene que el error cometido con esta suposición es pequeño aun

que exista un desequilibrio importante en el aire entre los dos elementos. El error total calculado correspondiente a cada concentración de radón medida varía entre el 12 y el 20% y es mayor cuanto más pequeña es la actividad.

El estudio experimental de la variación de la concentración de radón a lo largo del día se ha llevado a cabo mediante dos series de medidas. La primera serie corresponde a la variación diurna y ha sido realizada durante el mes de mayo de 1976 con cuatro medidas diarias. Los valores medios encontrados, junto con los de las medidas nocturnas, vienen dados en la tabla I en la que cada medida ha sido caracterizada por la hora a mitad del periodo de filtración. Los errores asignados son los errores cuadráticos medios. Se observa una disminución a lo largo del periodo diurno de la concentración de radón, disminución que es mayor durante la mañana y va decreciendo posteriormente. Los valores más altos del error cuadrático medio corresponden a la primera hora de la mañana y los más bajos a las medidas realizadas a las 14 horas lo que se interpreta teniendo en cuenta que la acumulación de radón durante la noche tiene variaciones considerables y por lo tanto también las tienen la concentración a primeras horas de la mañana mientras que las condiciones de difusión al medio día se mantienen más homogéneas.

La segunda serie de medidas corresponde a la variación de la concentración durante el periodo nocturno y ha sido hecha durante el mes de agosto del mismo año. En la tabla I se observa para estos valores un aumento casi lineal de la concentración de radón cerca del suelo correspondiente a la acumulación causada por la estabilidad de las capas bajas de la atmósfera. El error cuadrático medio aumenta también a lo largo de la noche indicando una mayor variabilidad de las condiciones atmosféricas en las horas más próximas a la mañana.

En su conjunto la variación experimental de la concentración de radón presenta un máximo a últimas horas de la noche o primeras horas de la mañana y un mínimo durante la tarde. Esta es una variación típica

ca (3), (4) aunque desde luego no puede considerarse representativa de todo el periodo anual. Sin embargo, al ser los datos correspondientes a unas condiciones meteorológicas notablemente homogéneas, es posible una mejor definición estadística en el estudio de esta situación típica en la que las condiciones de estabilidad presentan unas variaciones máximas. Para estudiar estas condiciones de estabilidad y los valores que toma el coeficiente de difusión vertical hemos partido del modelo de la caja cerrada.

MODELO DE LA CAJA.-

La relación existente entre la estabilidad atmosférica y la concentración de radón ha sido estudiada según el clásico modelo de la caja ya utilizada por otros autores (5), (6). El modelo consiste en considerar la atmósfera como una caja de altura  $h$  en la que se supone que el radón está bien mezclado, no existe escape de radón en el nivel superior y que la influencia de la advección en la concentración es despreciable. Al mismo tiempo supondremos que no existe desintegración radioactiva del elemento trazador.

Con estas condiciones es sencillo relacionar la altura  $h$  de la caja con la concentración de radón en ella. Si  $C_1$  es la concentración en un cierto instante inicial y  $C_2$  es la concentración en un tiempo posterior en cualquier punto de la caja y si la altura de esta se mantiene constante durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , se tendrá

$$hC_2 = hC_1 + \phi_0 \Delta t \quad |1|$$

ya que el aumento de la concentración de radón en la caja es debido únicamente a la emanación de gas radiactivo desde el suelo  $\phi_0$ .

Si la altura de la caja varía es necesario considerar dos nuevos casos según que esta aumente o disminuya. De estos dos casos el más interesante es el primero en el que la altura varía entre  $t_1$  y  $t_2$  desde  $h_1$  a  $h_2$ . Si  $C_3$  es la concentración en  $t_1$  por encima de  $h_1$  y hasta  $h_2$  puede ponerse

$$hC_2 = h_1 C_1 + (h_2 - h_1) C_3 + \phi_0 \Delta t \quad |2|$$

A partir de estas dos expresiones se puede relacionar la altura de la caja con los valores de dos concentraciones de radón separadas por un intervalo de tiempo. Si se conoce la función de la concentración del radón cuando  $\Delta t$  es pequeño pueden extraerse conclusiones sobre el valor de la altura de la caja. Cuando  $\Delta t$  es mayor, es necesario conocer la funcionalidad de la concentración dentro del intervalo. Sin embargo, teniendo en cuenta el margen de validez de las hipótesis previas del modelo, es posible suponer en algunas condiciones una dependencia lineal de la concentración con el tiempo, lo que permite obtener una expresión sencilla del coeficiente de difusión medio en la capa cercana al suelo en función de aquella.

SIGNIFICADO DE LA ALTURA DE MEZCLA.-

La altura de la caja calculada presenta un significado distinto según las condiciones experimentales a que se haga corresponder. Podemos encontrar este significado basándonos en un esquema del ciclo diario de la estabilidad vertical de la baja atmósfera.

Al comienzo de la mañana se destruye la capa estable desarrollada durante la noche. Se forma en

tonces una capa de turbulencia importante llamada capa de mezcla que existe hasta una altura mayor que la de la capa estable. En este caso la altura que puede obtenerse mediante el modelo de la caja tiene un significado físico real ya que es igual a la altura de la capa de mezcla que se desarrolla cerca del suelo desde este hasta, generalmente, la inversión de temperatura permanente que existe en altura (7). Si la altura de esta capa de mezcla se calcula despreciando el término  $C_3$  se obtiene un valor menor que el real con un error mayor cuanto más grande es el término despreciado. Este error debe ser, sin embargo, pequeño ya que  $C_3$  lo es con respecto a  $C_1$  al ser menor el valor del coeficiente de difusión en la zona próxima al suelo que por encima de ella. Para poder aplicar la expresión |2| es necesario tener en cuenta además que si bien en la situación final al radón está bien mezclado no lo está en la situación inicial y por otra parte que tanto la advección como la fuga de radón por el nivel superior de la capa pueden no ser despreciables. Estos dos últimos efectos tienden a disminuir la concentración para lo que si no se tienen en cuenta la altura de la capa de mezcla calculada tendrá un valor mayor que el real.

Durante el día la altura de la capa de mezcla no continúa aumentando ya que su crecimiento durante la mañana la hace alcanzar la capa de inversión en altura estable frente al ciclo diario. En estas condiciones debido a la importante turbulencia en las capas bajas de la atmósfera el radón está bien mezclado. Sin embargo, los intercambios verticales a nivel de la capa de inversión en altura, existentes durante el día, junto con la posible presencia de un transporte horizontal de aire invalidan el modelo de la caja

Durante la noche, como consecuencia del enfriamiento del suelo por radiación, se crea cerca de este una capa estable con un gradiente vertical de temperatura menor que el que corresponde a una atmósfera adiabática. En este caso no es posible hablar de una capa de mezcla real ya que la presencia de la capa estable impide al radón difundirse, existiendo un fuerte gradiente vertical de concentración y resultando por lo tanto que el radón no está bien mezclado. Sin embargo, las otras dos condiciones del modelo de la caja se cumplen, ya que el bajo valor del coeficiente de difusión hace que el escape de radón por el nivel superior de la caja sea despreciable y por otra parte la ausencia de advección horizontal es característica a esas horas. Es interesante por lo tanto solucionar el problema de la falta de mezcla dentro de la capa estable. Para ello puede definirse una altura de capa de mezcla equivalente como aquella que tendría la capa estable si la mezcla fuera homogénea, conteniendo la misma cantidad total de radón, esta altura equivalente es la que efectivamente se calcula aplicando el modelo de la caja y consistentemente a la altura de la capa de mezcla durante el día no tiene un significado físico real. Sin embargo mediante ella es posible calcular la capacidad de difusión en la capa estable.

CALCULO DE LA ALTURA DE MEZCLA Y DEL COEFICIENTE DE DIFUSION DURANTE LA NOCHE.-

Para calcular la altura de mezcla durante la noche hemos aplicado el modelo de la caja suponiendo un valor un valor constante para la altura de esta, es decir, mediante la expresión |1|. Sustituyendo  $C_1$  y  $C_2$  por los valores medios de la concentración medidos a primera y última hora de noche resulta un valor de 130 m. Sin embargo, este cálculo no tiene en cuenta que las concentraciones expresadas en la relación |2| son los valores medios en la capa esta-

ble mientras que las concentraciones medidas lo son al nivel del suelo y, debido al fuerte gradiente de concentración, distintos de las anteriores. Para poder calcular correctamente la altura de mezcla  $h$  debemos por tanto relacionar primeramente ambas. Para ello hemos supuesto que dentro de la caja el coeficiente de difusión vertical toma un valor  $K$  que es independiente tanto de la altura como del tiempo. Debido a la importante estabilidad vertical el coeficiente de difusión tomará un valor pequeño y consiguientemente existirá un fuerte gradiente de concentración de manera que el valor en la parte superior de la caja es muy pequeño comparado con el valor cerca del suelo. Esta característica nos permite suponer nulo el flujo de radón en la parte superior de la caja lo cual es la condición necesaria para la resolución de la ecuación de difusión columnar. Por lo tanto en estas condiciones la concentración a cualquier altura se expresa:

$$C(z) = C_0 \exp(-\sqrt{\lambda/K} z) \quad [3]$$

con lo que resulta ser función de la concentración  $C_0$ , para  $z=0$ , y de  $K$ . Si  $\bar{C}$  es el valor medio de la concentración introducida en el modelo de caja debe cumplirse, independientemente de la distribución de radón dentro de esta,

$$\int_0^h C(z) dz = \bar{C} h \quad [4]$$

Sustituyendo la expresión [3] en [4] y suponiendo nulo el término que da la concentración en el nivel superior de la caja resulta

$$\bar{C} = \frac{C_0}{h} \sqrt{\frac{K}{\lambda}} \quad [5]$$

que es la expresión que relaciona el valor medio de la concentración dentro de la caja con el valor al nivel del suelo. Con ella la expresión [1] puede ponerse

$$K = \lambda \left[ \frac{\phi_0 \Delta t}{C_0(t_2) - C_0(t_1)} \right]^2 \quad [6]$$

con lo que es posible calcular, a partir del modelo utilizado, el valor medio del coeficiente de difusión vertical, en la capa estable mediante los valores de dos concentraciones medidas al nivel del suelo separadas por un intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Empleando un intervalo de 9 horas el resultado obtenido para  $K$  con los valores medios de la tabla I ha sido  $3,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sg}$  resultado aceptable y semejante al encontrado por otros autores (8) en condiciones similares de sensibilidad nocturna.

#### CALCULO DE LA ALTURA DE MEZCLA.-

El aumento de la altura de la capa de mezcla que tiene lugar a primeras horas de la mañana puede ser calculado mediante la expresión [2]. Para la aplicación de esta fórmula hemos supuesto nula la concentración de radón por encima de la primitiva capa estable existente. Esto implica que obtenemos únicamente un límite inferior del valor de  $h$ . Por otra parte supondremos que el aumento de la altura de mezcla se produce entre la primera y la segunda medidas del día entre las que la variación de la concentra-

ción es máxima. Por fin es necesario tener en cuenta de la misma manera que en el caso anterior, que durante la primera medida permanece la estratificación nocturna de las concentraciones. Sustituyendo en [2] la misma expresión que anteriormente se obtiene, con las implicaciones indicadas,

$$h_2 = \frac{\phi_0 \Delta t + C_1 \sqrt{\frac{K}{\lambda}}}{C_2} \quad [7]$$

siendo  $C_1$  y  $C_2$  las concentraciones de radón durante la primera y la segunda medidas del día. Se observa en la expresión anterior que la altura de mezcla final no depende de la altura inicial aunque si del coeficiente de difusión durante la noche, supuesto este igual al existente durante la primera medida de la mañana. A partir de los valores medios experimentales hemos calculado  $h_2$  empleando el valor de  $K$  obtenido antes, encontrando una altura final de la capa de mezcla de 850 m, ligeramente menor que la que cabía esperar en la época del año en que se han realizado las medidas. Las posibles causas de esta discrepancia deben residir en la aproximación de que la concentración de radón por encima de la capa estable es nula y al hecho de que el valor de  $K$  sustituido en [7] corresponde a las medidas nocturnas realizadas en época distinta y con unas condiciones de difusión también distintas.

Como ha sido expuesto anteriormente el modelo de la caja pierde su validez para explicar las características de la estabilidad vertical después de la mañana. Este hecho puede ser puesto de manifiesto comparando los resultados obtenidos mediante el modelo con los deducidos basándonos en los datos experimentales mediante un sencillo modelo de dos capas en el que se ha hecho la aproximación correcta durante las horas del día, de que el coeficiente de difusión toma un valor mucho mayor en la capa próxima al suelo que en la capa superior. Comparando de esta manera los dos resultados se encuentra que el valor de la altura de mezcla obtenido mediante el modelo de la caja es un orden de magnitud menor que el que se obtiene mediante el modelo de dos capas. Este resultado negativo confirma la existencia de importantes intercambios verticales en el nivel superior de la capa de mezcla durante el día y consecuentemente la certeza de que la concentración de radón cerca del suelo durante esas horas es más bien función (8) de la masa de aire sobre el lugar de medida que de la difusión vertical.

TABLA I

9 h	$(5,3 \pm 4,4) \cdot 10^{-14}$ cur/l.	21 h	$(7,4 \pm 3,4) \cdot 10^{-14}$ cur/l.
12 h	$3,1 \pm 2,5$	24 h	$11 \pm 6$
15 h	$2,4 \pm 1,5$	3 h	$17,5 \pm 9,6$
18 h	$2,1 \pm 1,5$	5 h	$22 \pm 12$

BIBLIOGRAFIA.-

- (1).- Bakulin. Influence of diurnal changes in the coefficient of turbulence in exchange on the concentration of Rn, Th, Ac and their decay products in the atmosphere. Izv. Atoms and Ocean-Phys 3, 2, 181-88 (1967).
- (2).- Soto. Contribución al estudio de la difusión de materia en las capas bajas de la atmósfera cerca de la discontinuidad tierra-mar utilizando trazadores radiactivos naturales. Tesis Doctoral. Santander. 1978.
- (3).- Malakhov et al. Diurnal variations of radon and thoron decay product concentrations in the surface layer of the atmosphere and their washout by precipitations. Tellus XVII, 2, 643, (1966).
- (4).- Cros. Daily variation in the concentration of Aitken nuclei in Brazaville Atmos Environ 10, 527-30 (1976).
- (5).- Cautenet. Manitering de la stabilite verticale in site urban a l'aide d'un indicateur radiactif. These de doctorat Toulouse (1974).
- (6).- Fontan et al. Surveillance de la stabilite verticale dans un site urban,. Pollution atmospherique, 71, 231 (1976).
- (7).- Guedalia et al. Aircraft measurements of Rn-222 Aitken nuclei and small ions up to 6 Km J. Applied Meteorol, 11, 2, 357-65 (1972).
- (8).- Ntsila. Surveillance de stabilite verticale de l'atmosphère a l'aide du radon et du sodar. Doctorat de 3<sup>eme</sup> cycle. Toulouse (1977).