

## **Remoción húmeda por lluvias en Casablanca.**

Lourdes Álvarez Escudero, Israel Borrajero Montejo, Rosendo Álvarez Morales

Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología.

Apartado Postal 17032. CP 11700. Habana 17. Ciudad Habana. Cuba.

FAX: (537) 33 80 10 e-mail: [lulu@met.inf.cu](mailto:lulu@met.inf.cu)

### **RESUMEN.**

Se calcula el promedio y la probabilidad de lluvia diaria a partir de la serie de acumulados diarios de precipitación en la estación meteorológica de Casablanca para el periodo 1909 – 2000. Se ajustaron funciones de suma de armónicos a las marchas de promedio y probabilidad de lluvia. A partir de la formulación para el cálculo de la remoción húmeda propuesta por otros autores e introduciendo los valores estimados, se calculó el número de días que se necesita para que una concentración de contaminantes decrezca a una fracción dada de su concentración original suponiendo que solo se emite el día para el que se realiza el cálculo. Se obtuvo una marcada diferencia de días entre la estación lluviosa y la poco lluviosa, así como diferencia para distintas fracciones de concentración, como es el caso de épocas del año donde se necesitan 12 días para alcanzar una fracción de 0,1 de la emisión original. También se calculó la cantidad de veces que se acumula la emisión original, si una fuente contaminante emite todos los días y si emite 5 días y no emite 2. Aquí se obtuvieron comportamientos bastante similares aunque el número de veces que se acumuló la concentración para el caso de dos días de descanso fue un poco menor. Se recomienda hacer un estudio conjunto del efecto de la precipitación

junto al viento sobre la acumulación de contaminantes para dar una potencialidad más completa del fenómeno.

**Palabras claves:** remoción húmeda.

## **INTRODUCCION**

El proceso de remoción de las materias contaminantes que son expulsadas a la atmósfera determinan el tiempo de residencia de dichos materiales en la atmósfera y por lo mismo las distancias a las que serán transportados, por lo que el estudio de este proceso es fundamental si se desea pronosticar y estudiar la difusión de estas sustancias en la atmósfera, especialmente en los modelos de mediana y largas distancias.

La remoción puede clasificarse en húmeda (la asociada con la lluvia y otros hidrometeoros, la niebla y el rocío) y la seca (provocada por sedimentación o transporte turbulento). Mientras la remoción seca es un proceso más o menos continuo y que se presenta directamente sobre la superficie, la húmeda tiene un carácter intermitente y su mecanismo puede actuar sobre toda la troposfera. A su vez la remoción húmeda por lluvia se divide en dos modos de lavado fundamentales, los que ocurren dentro de la nube "rain out" que agrupan varios procesos como son: partículas que forman núcleos de condensación, asimilación de partículas por gotas de nube por movimientos brownianos y partículas transferidas a las gotas de nube por gradiente de vapor de agua y los que ocurren bajo la nube "wash out".

Existen muchos estudios realizados sobre la remoción húmeda, desde estudios que involucran parámetros medios relativos a la lluvia (Junge et al., 1957; Junge 1960) hasta tratamientos de cadenas de Markov a estadísticas de tiempo con o sin lluvia a partir de datos de registradores automáticos de lluvia e intensidad de lluvia cada dos horas (Rhode et al., 1972) o estudios más pormenorizados mediante el radar (Jylhä, 2000). En Cuba los trabajos sobre esta temática están fundamentalmente dirigidos a la determinación de remoción por mediciones de las concentraciones de elementos contaminantes en la lluvia (López, 1984; Azcuy et al., 1989).

El objetivo de este trabajo es la aplicación de parámetros medios y probabilísticos de lluvia de la estación Casablanca a una forma simplificada del cálculo de la razón de remoción planteada por Junge et al. (1957) para determinar desde un punto de vista climático cuantos días a partir de una emisión expulsada a la atmósfera son necesarios para que el contaminante sea decrementado a una razón pequeña de la cantidad original, esto suponiendo que solo se emite un día, que se emite todos los días la misma cantidad o que se emite unos días y otros no, para dar una descripción de la marcha anual de potencialidad de remoción húmeda por lluvia para la estación en estudio.

## MATERIALES Y METODOS

Para el cálculo del promedio de lluvia diario y de la probabilidad diaria de días con lluvia (se considera día con lluvia para acumulados mayores o iguales que 0.1 mm) se utilizó la serie de acumulados diarios de lluvia de la estación Casablanca en La Habana, Cuba en el periodo 1909 – 2000 (92 años) (ver figura 1 y 2).

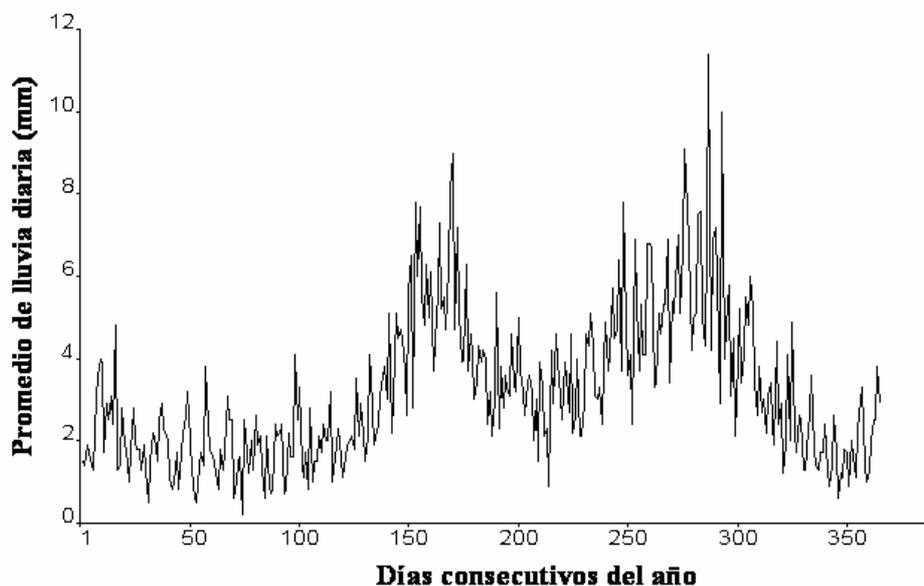


Figura 1. Marcha anual del promedio de lluvia diaria (en mm) para la estación Casablanca calculado para el periodo 1909 – 2000.

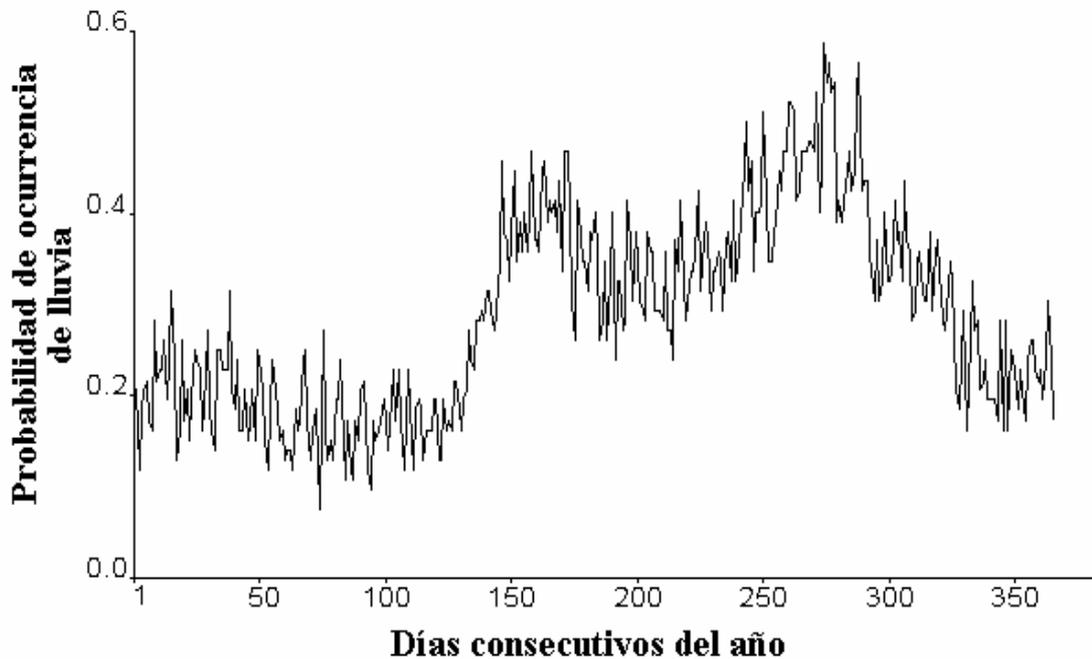


Figura 2. Marcha anual de la probabilidad de lluvia diaria para la estación Casablanca calculado para el periodo 1909 – 2000.

A estas distribuciones se le ajustaron curvas del tipo:

$$Y = C_0 + \sum_{i=1}^n C_1(i) \sin \left[ \frac{2\pi}{365} iX \right] + \sum_{i=1}^n C_2(i) \cos \left[ \frac{2\pi}{365} iX \right] \quad (1)$$

donde “x” es el día consecutivo del año y “y” es el promedio o la probabilidad de lluvia diaria según corresponda para suavizar las fluctuaciones de las series. Para lograr que todos los años fueran de 365 días se eliminó el 29 de febrero en los años bisiestos y la lluvia caída ese día se sumaba a la del día 28.

El cálculo de la remoción húmeda por lluvias se hizo basado en la formulación propuesta por Junge et al. (1957) con algunas adaptaciones. Dada una nube de sección transversal de  $1\text{m}^2$ , la altura equivalente “h” de la nube que emitirá lluvia para que el contaminante sea removido será:

$$h = \frac{R}{L}$$

donde R es el acumulado diario de lluvia en metros y L es la cantidad de agua líquida contenida en la nube en  $\text{g}/\text{m}^3$ .

La fracción de la altura de la tropopausa (H), de la cual el contaminante será removido por la lluvia vendrá dada por:

$$a = \frac{h}{H} = \frac{R}{LH}$$

Para acercarnos más a la realidad debemos incorporar a la fórmula un factor de eficiencia por condensación  $\varepsilon$  que siempre será menor o igual que 1 y que depende de la naturaleza del compuesto, entonces se tiene:

$$a = \frac{R\varepsilon}{LH} \quad (2)$$

La fórmula (2) será la que se usará para calcular el lavado atmosférico por “rain out” y se diferencia de la propuesta por Junge et al. (1957) en que se usará el promedio diario de lluvia de la estación Casablanca y no el promedio en un área y que como la lluvia no se considera resultado de eventos independientes no se realizarán aproximaciones a la forma exponencial.

El lavado por “wash out” “b” estará dado por la relación entre la altura de la base de la nube  $h_{bn}$  y la altura de la tropopausa (que dará el espacio que debe ser lavado), multiplicado por la probabilidad de ocurrencia de lluvia para el día en análisis “p”, es decir:

$$b = \frac{h_{bn}}{H} p \quad (3)$$

Esto también tiene diferencias con respecto a lo planteado por Junge et al. (1957) ya que el utiliza en lugar de la probabilidad la fracción del número de días promedio que llueve en el mes sobre el número total de días del mes que asume 31.

La cantidad total de contaminantes removidos será entonces:

$$c = a + b$$

y la cantidad de contaminantes remanentes en la atmósfera será “1 – c”.

A partir de los valores ajustados de acumulado promedio y probabilidad de ocurrencia diaria de lluvia, se calcularon los lavados por “rain out” y “wash out” según las fórmulas (2) y (3) y se obtuvo para cada día del año el número de días que se tardaría una emisión dada en disminuir hasta una fracción dada de su valor inicial y además se calculó el número de veces que se acumularía la concentración inicial, si todos los días se emitiera la misma cantidad de contaminantes a la atmósfera y si

se emitiera 5 días continuamente y no se emitiera dos, simulando una semana con 5 días de trabajo de una fuente contaminante y dos de descanso.

Se elaboraron programas de computación para la realización de los cálculos necesarios.

## **RESULTADOS Y DISCUSION**

Los resultados obtenidos tienen en cuenta sólo el efecto de la remoción húmeda de los contaminantes por lluvia, este no es el único proceso que interviene en la remoción, pero debido al carácter de la precipitación, este es el más importante en la mayoría de los casos, además de ser el de mayor variabilidad.

Estudios hechos en Cuba (Martínez et al., 1999) establecen que la altura máxima de la tropopausa oscila entre 16 y 17 kms. en verano y en invierno y la altura de la base de la nube nunca es menor de 1.2 kms. El contenido de agua líquida se determina en alrededor de  $1\text{g/m}^3$  para las nubes en general, pero para nubes grandes (de 7 a 12 kms.) se reportan valores de aproximadamente  $1.45\text{g/m}^3$ .

En este caso se utilizará como altura de la tropopausa 10 kms debido a que es el valor más frecuente encontrado y como base de la nube se supondrá 2 kms por las mismas razones. Para el factor de eficiencia por condensación se asumirá la unidad debido a que es un dato poco estudiado para los contaminantes en la atmósfera cubana; en este caso debe tenerse en cuenta que valores más pequeños traerán intervalos de remoción más largos, aunque de forma general de la marcha no debe cambiar.

Es importante resaltar que esta formulación se aplica bajo la suposición de mezclamiento continuo en la troposfera, que se sustenta en que los movimientos convectivos homogeneizan las concentraciones de contaminantes en la atmósfera, condición esta que se cumple generalmente en la atmósfera tropical.

Los valores de acumulado promedio y probabilidad diaria de lluvia estimados de las series de datos climatológicos fueron ajustados a una serie de armónicos de Fourier

de 7 términos ( $n=7$ ), según la fórmula (1), lo cual permite suavizar las fluctuaciones y al mismo tiempo obtener una marcha periódica con periodo de un año.

En la figura 3 se observa la marcha anual del número de días en que una concentración determinada de contaminantes presentes en la atmósfera quedaría reducida a 0.5 y a 0.1 de su valor inicial. El número de días representado es aquel para el cual la concentración ya es menor que la fracción seleccionada, de ahí que sean valores enteros. Aquí puede notarse la dependencia inversa y no lineal de estas marchas con la del acumulado promedio y probabilidad diaria de lluvia. También se aprecia que en las etapas de mayor intensidad y probabilidad de lluvia, la diferencia entre el número de días para alcanzar las fracciones 0.5 y 0.1 es mucho más pequeña que en las etapas de poca lluvia (1 – 3 días para mucha lluvia y 4 – 13 días para la etapa de poca lluvia). Esto resulta de importancia en contaminantes cuyo efecto se manifiesta aún en muy bajas concentraciones.

La figura 4 muestra la marcha de las concentraciones acumuladas de algún contaminante relativo a una cantidad diaria emitida del mismo, para el caso que esta se emita todos los días, o se emita durante 5 días a la semana. Para los periodos de menos lluvia la concentración acumulada puede ser de hasta 6 veces la dosis diaria y hasta 5 en el caso de 5 días de emisión a la semana; mientras que en los periodos de mayor intensidad de lluvia, la concentración acumulada es casi igual a la emitida diariamente, con un poco menos la emitida 5 días a la semana.

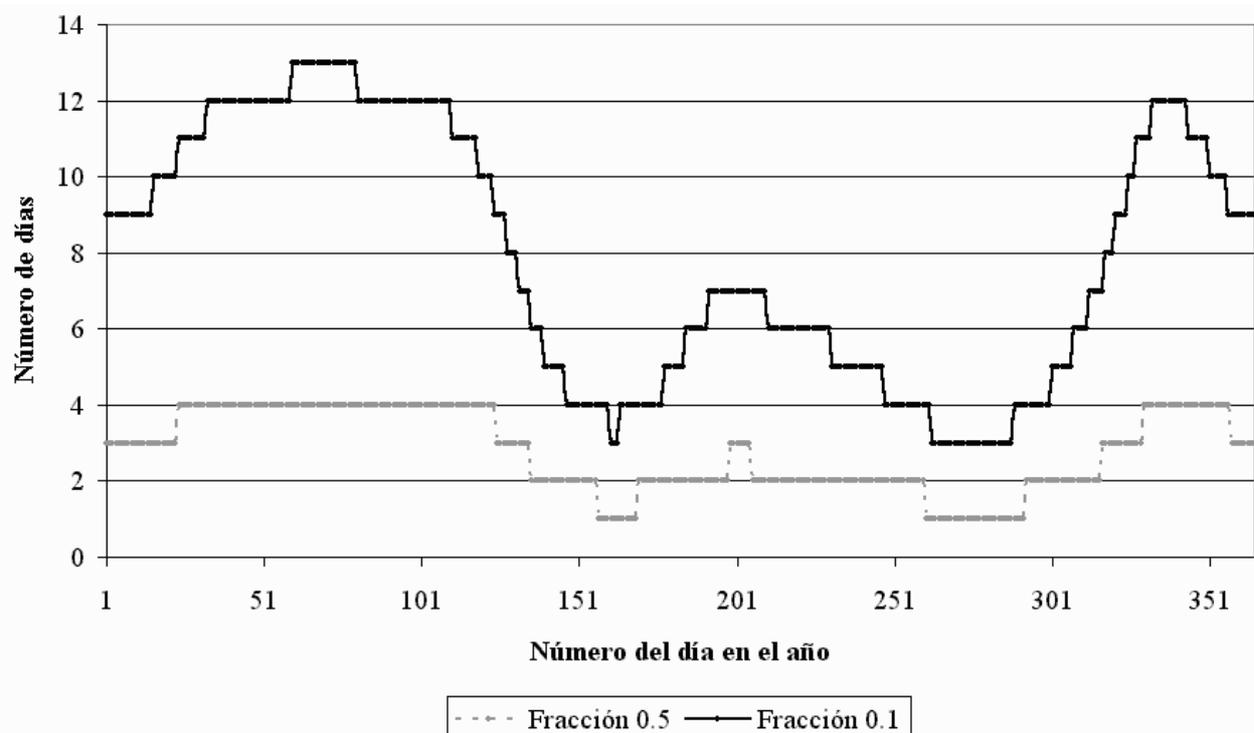


Figura 3. Marcha anual del número de días en que una concentración determinada de contaminantes quedaría reducida a una fracción de su valor original para la estación Casablanca.

La marcha de concentración de contaminantes emitidos 5 días a la semana presenta oscilaciones que varían entre un 10 y un 30 % de su valor medio.

Los valores de los primeros días del año no están bien representados en la figura 4, pues no se han tenido en cuenta los valores acumulados de los últimos días del año anterior.

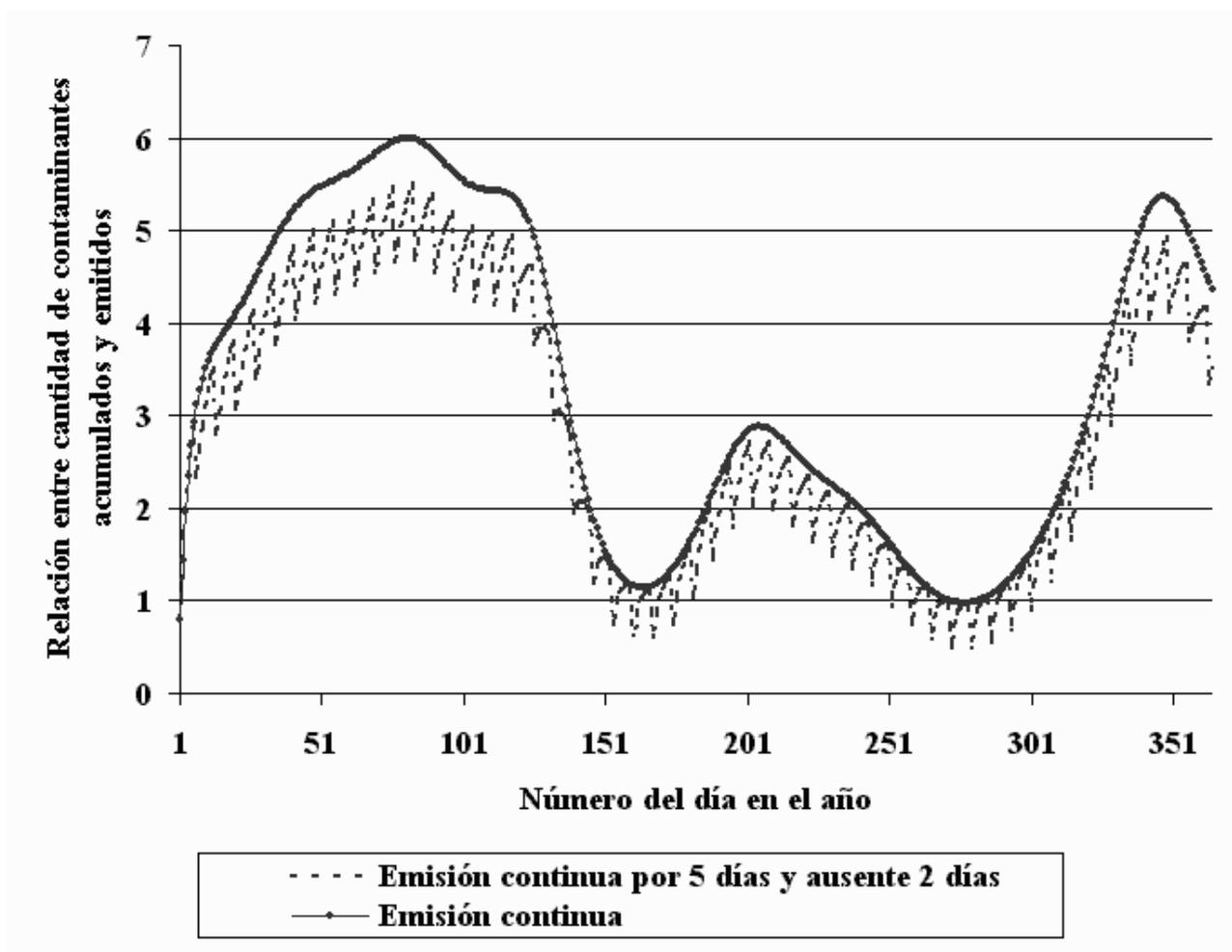


Figura 4. Marcha anual de la relación entre concentración acumulada y emitida para un contaminante en la estación Casablanca.

Los cálculos realizados de los procesos fundamentales de la remoción por lluvias representados por las ecuaciones (2) y (3) arrojaron que el “rain out” es aproximadamente un orden de magnitud superior al del “wash out”. Esto es válido si se sostiene la suposición del mezclamiento continuo. Para un contaminante que se mantenga concentrado en las capas bajas de la atmósfera esta relación debe ser diferente.

El cálculo del “wash out” se ha hecho bajo la suposición de que cualquier acumulado de lluvia diaria mayor o igual que 0.1 mm es suficiente para arrastrar todos los contaminantes en la capa subnubosa. Esto puede no cumplirse exactamente para todo tipo de contaminante y debe tenerse en cuenta en lugares como en Cuba donde la moda de la precipitación diaria oscila entre 0.1 y 1 mm (Álvarez et al., 2002).

## **CONCLUSIONES**

1. La remoción de contaminantes por lluvias en la estación meteorológica de Casablanca puede calcularse a partir de los acumulados promedios y la probabilidad diaria de precipitación en dicha estación.
2. El número de días en que un contaminante demora en reducir su concentración en la atmósfera al 0.1 de su valor original, atendiendo al mecanismo de la remoción por lluvias, oscila entre 4 y 13 días en dependencia de la estación del año.
3. Para emisiones regulares se puede llegar a tener acumulados en la atmósfera que van desde 6 veces hasta una vez la cantidad emitida diariamente en dependencia de la estación del año.
4. El comportamiento para emisiones intermitentes de contaminantes a la atmósfera es muy parecido al de emisión continua, aunque presenta oscilaciones que reflejan el periodo de intermitencia y su valor medio es inferior al de las emisiones continuas.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda hacer un estudio conjunto de la remoción por lluvias y el efecto del viento sobre el transporte de contaminantes para determinar climatológicamente potencialidades de afectación más reales.

## **BIBLIOGRAFIA**

Álvarez, L.; Álvarez, R.; Borrajero, I. (2002) Caracterización de las precipitaciones en la estación meteorológica de Casablanca y su tendencia. *Revista Cubana de Meteorología*. 9, no. 2, 61 – 70.

Azcuy, G.; Cuesta, O. (1989) El PH, el sulfato de amonio y su relación en las lluvias ácidas de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*. 2, no. 1, 69 – 73.

Junge, Chr. E.; Gustafson, P. E. (1957) On distribution of sea salt over the United States and its removal by precipitation. *Tellus*. 9, 164 – 173.

Junge Chr. E. (1960) Sulphur in the atmosphere. *J. Geophys. Res.* 65, 227 – 237.

Jylhä, K. (2000) The scavenging of air pollutants by precipitation, and its estimation with the aid of weather radar. Report No. 50, Department of Meteorology, University of Helsinki, 60 pp.

López, C. (1984) Factores meteorológicos de la contaminación regional del aire en Cuba. Tesis para la obtención del grado de Dr. en Ciencias Físico – Matemáticas. IDICT, Instituto de Meteorología, CITMA, 108 pp.

Martínez, D.; Gori, E. G. (1999) Rain drop size distributions in convective clouds over Cuba. *Atmospheric Research*. 52, 221 – 239.

Rhode, H.; Grandell, J. (1972) On the removal time of aerosol particles from the atmosphere by precipitation scavenging. *Tellus*. 24, 442 – 454.