

# UN MODELO PARA EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES A GRANDES DISTANCIAS

AUTORES: RAFAEL PÉREZ PARRADO  
ISIDRO SALAS GARCÍA  
JESÚS DOLE CHÁVEZ

Centro de Automatización, Instituto de Meteorología. E-mail: parrado@met.inf.cu

## INTRODUCCIÓN.

En los últimos tiempos el peligro de la contaminación del aire por la acción antropogénica involucra no solo la región cercana que rodea a la fuente contaminadora, sino también a territorios alejados de la misma, principalmente la que se induce a otros estados (Belov 1990, Eliassen 1983). Por este motivo se ha prestado gran atención al desarrollo de modelos de intercambio de contaminantes para gran escala, por medio de los cuales es posible analizar y pronosticar el traslado de contaminantes que puedan perjudicar las personas, el medio ambiente y de manera específica las cosechas (GTTM 1993, Draxler and Hess 1997, 1998).

La base de todos los modelos descansa en el sistema de ecuaciones de intercambio y difusión, que incluyen los procesos de introducción de los contaminantes en la atmósfera, las transformaciones químicas y la deposición de las diferentes sustancias (remoción seca y húmeda). Esto es en forma de general ya que existen particularidades y variantes de los diferentes modelos, en cuanto a la solución matemática se refiere, pero que generalmente están entre los tres siguientes tipos (Staniforth A., and J. Côté 1991)

- a) Modelos en el sistema en coordenadas de Euler (modelo Euleriano)
- b) Modelos Estadísticos
- c) Modelos Lagrangianos de trayectorias.

En el presente trabajo se presenta un modelo Lagrangiano de trayectorias, que permite seguir la distribución de cualquier sustancia en la atmósfera (Pérez Parrado, García y D'Estefano, 2001). En calidad de ejemplo se realiza el cálculo de la concentración de Cs 137 en la atmósfera a bajos niveles, dentro de la capa de mezclamiento, simulando un accidente en una planta nuclear imaginaria.

## Materiales y métodos

El modelo de Trayectorias de partículas

Las ecuaciones iniciales para el cálculo de la trayectoria en la atmósfera son las siguientes:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= u(x, y, z, t) \\ \frac{dy}{dt} &= v(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $x, y$  - son las coordenadas de la sustancia en cualquier momento de tiempo  $t$

$u, v$  - son las componentes de la velocidad del viento

Integrando (1) desde el momento  $t-\Delta t$  hasta el momento  $t$ , obtenemos las ecuaciones que nos permiten determinar las coordenadas de la sustancia en la atmósfera, es decir:

$$\begin{aligned} x_t &= x_{t-\Delta t} + \int_{t-\Delta t}^t u(x, y, z, t) dt \\ y_t &= y_{t-\Delta t} + \int_{t-\Delta t}^t v(x, y, z, t) dt \end{aligned} \quad (2)$$

Donde  $x_t, y_t$  - coordenadas de la partícula en el momento de tiempo  $t$  siguiente

$x_{t-\Delta t}, y_{t-\Delta t}$  - coordenadas de la partícula en el momento anterior de tiempo

$\Delta t$  - paso de tiempo

El cálculo de los valores de las componentes  $u$  y  $v$  en los puntos que se van obteniendo a lo largo de la trayectoria se calculan interpolando, ya que en una trayectoria Lagrangiana las coordenadas de los puntos de la trayectoria no coinciden con los puntos de la rejilla de análisis y pronóstico, para eso empleamos la interpolación polinomial.

$$\begin{aligned}
 u(x_i, y_i) &= u_a + (u_d - u_a)\Delta'x + (u_b - u_a)\Delta'y + (-u_d + u_a - u_b + u_c)\Delta'x\Delta'y \\
 v(x_i, y_i) &= v_a + (v_d - v_a)\Delta'x + (v_b - v_a)\Delta'y + (-v_d + v_a - v_b + v_c)\Delta'x\Delta'y
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

Donde  $\Delta'x$ ,  $\Delta'y$  diferencias entre las coordenadas de la partícula y las coordenadas de los puntos de rejilla del cuadrado dentro del cual está la misma.

En la figura 1, se muestra la situación meteorológica el día 31 de Octubre del 2000, para la superficie de 850 hPa, y en la figura 2, la trayectoria de una partícula por este nivel para 48 horas.

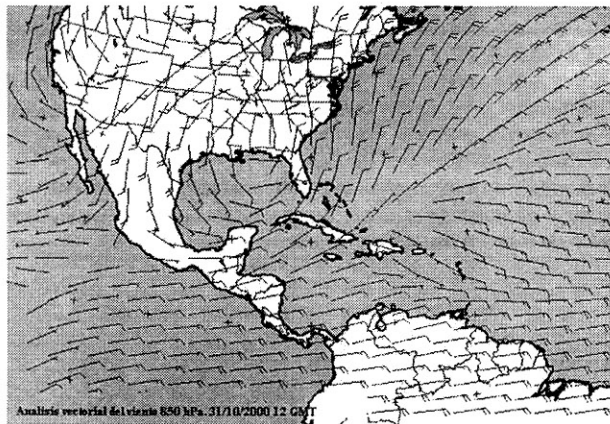


Figura 1. Análisis Vectorial del viento en el nivel de 850 hPa.

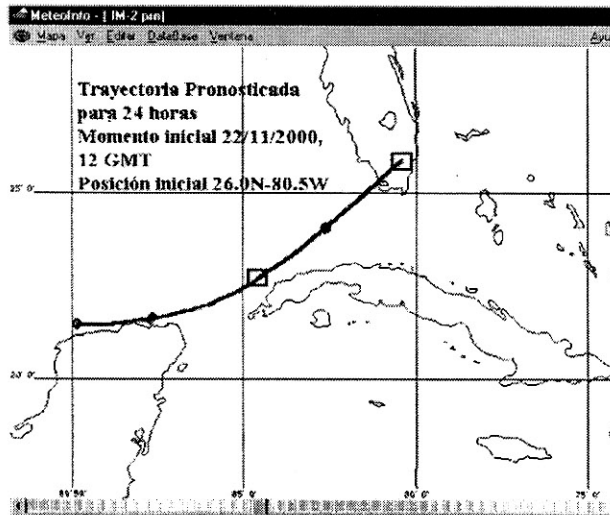


Figura 2. Trayectoria correspondiente al mapa análisis de la figura 1.

En las figuras 2 y 3 se muestran trayectorias calculadas por el modelo Cubano y por el modelo Norteamericano HYSPLIT (NOAA AIR RESOURCES LABORATORY), para el mismo periodo, pero con distintas fuente de análisis. Los resultados son similares y demuestran la exactitud de los cálculos.

NOAA Air Resources Laboratory  
 This product was produced by an Internet user on the NOAA Air Resources Laboratory's web site. See the disclaimer for further information. (http://www.arl.noaa.gov/research/disclaimer.html)

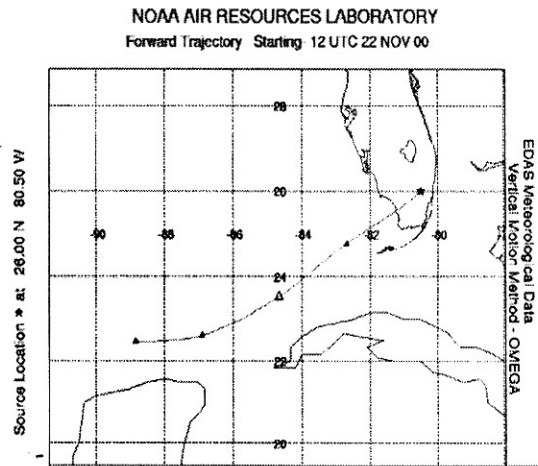


Figura 3 Trayectoria calculada por el modelo HYSPLIT de (NOAA AIR RESOURCES LABORATORY),.

### Descripción del modelo de transporte

La ecuación de transporte de sustancias se presenta de la siguiente forma:

$$\frac{dC}{dt} = Q - RC \quad (7)$$

Donde  $R = R_s + R_w + R_i + R_r$  son los procesos de remoción como se había dicho

### Procesos de Remoción

En esta expresión R es un coeficiente de corrección que toma en cuenta los procesos de remoción de acuerdo al contaminante que se este modelando, así

$R_r$  describe el proceso de transformación radioactiva

$$R_r \left( \frac{x}{u} \right) = e^{-\lambda x / u} = e^{-\lambda t} \quad (8)$$

en que

x..... distancia a favor del viento (en la trayectoria)

u..... rapidez del viento

t..... tiempo

$\lambda$ ..... constante de desintegración radioactiva= $0.693/T_r$

$T_r$ ..... periodo de semidesintegración

se supone que todo el material comienza a desintegrarse a la hora de la emisión.

Algunos parámetros característicos para isótopos radioactivos de interés se dan en la tabla siguiente

**Tabla 1** Parámetros característicos para algunos isótopos radioactivos de interés. Fuente (Eliassen y Saltbones, 1983)

ISOTOPO	$T_r$	$\lambda(s^{-1})$	W	$V_d(m/s)$
$K_r^{85}$	10.57 años	$0.219 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-3}$
$I^{131}$	8.1 días	$0.990 \cdot 10^{-6}$		$1 \cdot 10^{-3}$
$X_e^{133}$	2.3 días	$0.151 \cdot 10^{-5}$		
$X_e^{135}$	15 minutos	$0.212 \cdot 10^{-4}$		
$C_s^{137}$	27 años	$0.785 \cdot 10^{-9}$	$2.4 \cdot 10^5$	$0.9 \cdot 10^{-3}$ tierra $0.4 \cdot 10^{-4}$ agua

$R_i$  representa el proceso de transformación química.

$$R_i = L \prod_{i=1}^N C_{ii}^{m_i} \quad (9)$$

L es la constante de intensidad de reacción

$m_i$  es el orden de la reacción con relación al contaminante

En el modelo se utilizan para la descripción de la transformación de  $SO_2 \rightarrow SO_4$  los siguientes valores

$R_i$   $0.00017 s^{-1}$  para los meses de Noviembre-Diciembre

$R_i$   $0.00033 s^{-1}$  para los meses de Junio-Octubre

$R_w$  representa el proceso de remoción húmeda

$$R_w = W P/H = 1.6 \cdot 10^{-4} P^{0.8} \quad (10)$$

Donde : W es la razón de barrido por lluvia (adimensional)

P es la intensidad de precipitación (mm/s)

H altura de la capa de mezclamiento (m)

$R_s$  Representa el proceso de remoción seca, la corrección se efectúa en términos de la velocidad de deposición  $V_d$ , es decir  $K_s = V_d/H$

$V_d$  Velocidad de deposición para el elemento en cuestión (m/s)

H Altura de la capa de mezclamiento

Esquema de cálculo

La expresión

se integra en el tiempo de la siguiente forma, aplicando el siguiente esquema en diferencias finita

$$\frac{Dc}{dt} = Rc + Q_i$$

$$c(t+\Delta t) = c(t-\Delta t) + 2(Q_i - Rc) \Delta t \quad (11)$$

y es la que utilizaremos en los cálculos numéricos para este modelo.

Para la remoción utilizaremos la expresión

$$\frac{dc}{dt} = -Rc \quad (12)$$

Y en diferencias queda,

$$c(t+\Delta t) = c(t) - Rc \Delta t$$

que puede ser expresada como:

$$c(t+\Delta t) = c(t)e^{-R\Delta t} \quad (13)$$

Siendo la  $c(t)$  inicial igual a:

$$c_i = (1-a-b) Q_0 / H \quad (14)$$

Como se ve esta ecuación de transporte es de uso general para todo tipo de contaminantes.

Para el caso del transporte de dióxido de azufre y de aerosoles de sulfato a partir de emisiones de fuentes puntuales o áreas fuentes, se mantienen los criterios de Eliassen (1978) considerando el volumen de mezclamiento constante durante la trayectoria.

En las tablas 2 y 3 se muestran las emisiones y deposiciones para los distintos modelos, en los periodos de pronóstico para un caso hipotético (RSMC).

Características del modelo

Trayectorias

Trayectorias múltiples simultáneas

Cálculos hacia atrás o adelante en el tiempo

Isobárico, altura variable

Cálculo de trayectorias utilizando datos de archivo o pronosticados

Transporte

**Modelo Lagrangiano**

Orientado a la fuente

Concentración máxima a lo largo de la trayectoria

Concentración uniforme entre la superficie y la altura de la capa mezclada

Salida del modelo: Resultados gráficos o ficheros.

Tabla 2 CONCENTRACION (BqS/m<sup>3</sup>)

Tiempo	País	USA	Canadá	Australia	Cuba
24 horas		2.9 e-09	3.3 e-09	6.3 e-10	2.3 e-09
48		1.2 e-09	1.2 e-09	4.7 e-10	1.1 e-09
72		2.5 e-10	5.1e-10	1.1e-11	1.0 e-10

Tabla 3 DEPOSICION (Bq/m<sup>2</sup>)

Tiempo	País	USA	Canadá	Australia	Cuba
24 horas		4. e-12	4.3 e-12	2.9 e-12	4.4 e-12
48		4. e-12	4.6 e-12	13. e-12	5.5 e-12
72		5.2 e-12	4.6e-12	13.e-12	7.5 e-12

**Resultados experimentales del modelo**

Prueba realizada el 22 de Mayo del 2001.

Accidente Nuclear simulado

Elemento Cs-137

Emisión durante 6 horas

Intensidad 0.166 unidades/hora (unidad=Becquerel)

Velocidad de deposición húmeda y seca 0.1 cm/s

Liberación total 1.0 Becquerel

La concentración en los modelos Norteamericano, Canadiense y Australiano se calculó entre la superficie y los 500 m de altura.

En el modelo cubano la concentración se calcula entre la superficie y la altura de la capa de mezclamiento

Tabla 4. Listado con los valores horarios de concentración y deposición durante 48 horas

Tiempo	Concentración Bs/m <sup>3</sup>	Deposición B/m <sup>2</sup>	Altura (hPa)
1	.166E-10	.166E-13	833.31
6	.985E-10	.248E-12	835.77
12	.112E-09	.310E-11	838.09
18	.109E-09	.377E-11	839.70
24	.107E-09	.443E-11	841.74
30	.104E-09	.507E-11	841.86
36	.101E-09	.568E-11	841.62
42	.987E-10	.628E-11	841.34
48	.962E-10	.686E-11	840.69

Como se puede ver los resultados de los modelos son similares y las diferencias están dentro del rango admisible para este tipo de modelo. En la figura 5 se presenta un experimento realizado para mostrar la nube de exposición del contaminante para un periodo de 48 horas suponiendo que el escape de Cesio se hubiera producido en Cuba.

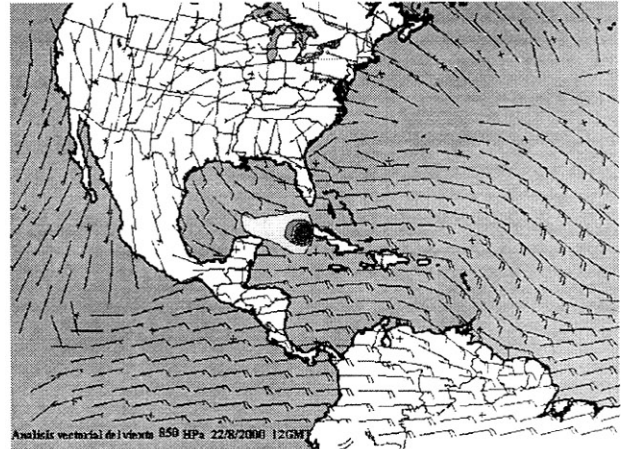


Figura 5. Nube de distribución del contaminante para 48 Horas.

En la figura 6 se muestra el sistema que se propone adoptar, para nuestra Institución y que como se ve lleva implícita la utilización de un grupo de modelos ya establecidos con los modelos de trayectorias y transporte de contaminantes.

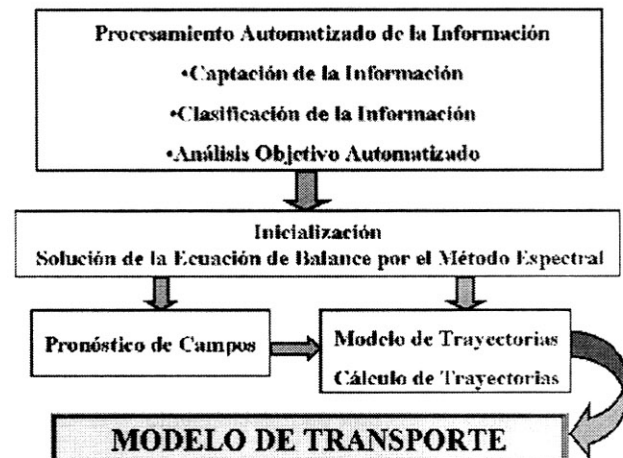


Figura 6. Diagrama que muestra el sistema de aviso propuesto.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos durante la realización de este trabajo muestran que el modelo de transporte de contaminantes aquí presentado es similar a otros actualmente en uso internacionalmente, además de una fácil implantación y utilización práctica.

Una de sus principales ventajas es que puede ejecutarse a partir de la existencia previa de un sistema de análisis y pronóstico de variables meteorológicas de campo totalmente diseñado en Cuba.

Hasta donde sabemos, el modelo numérico presentado en este informe es el primero de este tipo implementado en Cuba, y es un gran paso de avance en el propósito de establecer un sistema de aviso regional para Norte, Centro América y el Caribe, para el caso de accidentes nucleares y transporte de contaminantes químicos y biológicos.

## REFERENCIAS

- Belov P.N., 1990:** A Trajectory model for pollutant transport. *Meteorology and Hydrology*. Vol. 55, No.12, pp.67-74.
- Draxler, R.R., and G.D. Hess, 1997,** Description of the Hysplit 4 Modelling System. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-214 Dec. 24 p.
- Draxler R.R., and G.D. Hess, 1998,** An overview of the HYSPLIT\_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition, *Aust. Met. Mag.*, Vol. 47, pp. 295-308.
- Eliassen A., 1978:** The OECD study of long-range transport of pollutants: Long range transport modelling. *Atmos. Environ.*, No.12, pp.479-487.
- Eliassen A. and J. Saltbones, 1983,** modelling of long-range transport of Sulphure over Europe. *Atmospheric Environment*, vol.17, No.8.
- Global Tracer Transport Model 1993:** Outline of Operational Numerical Weather Prediction at Japan Meteorological Agency. pp. 69-71.
- NOAA AIR RESOURCES LABORATORY WEB SITE, 2000**
- Pérez Parrado R., O. García, y M. D'Estefano, 2001:** Modelo bidimensional para trayectorias de partículas en la atmósfera. X Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, Buenos Aires Argentina, Edición en CD.
- Regional Specialized Meteorological Center (RSMC) WMO, Example Products. WEB SITE, 2001**
- Staniforth A., and J. Côté 1991:** Semi-Lagrangian integration schemes for Atmospheric models- A Review. *Mon. Wea. Rev.*, Vol.119, pp.2206-2223.

## Palabras Clave:

Modelo de contaminantes, Modelo estadístico, Contaminación atmosférica.