
Simulación numérica de la dispersión del yoduro de plata en la región oriental de Cuba

Numerical simulation of the dispersion of silver iodide in the eastern region of Cuba

Lic. Yandy G. Mayor | yandy.gonzalez@insmet.cu | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Dr. Israel Borrajero Montejo | israel.borrajero@insmet.cu | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Dr. Daniel Martínez Castro | daniel.martinez@insmet.cu | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Recibido: abril 22, 2014; aceptado: octubre 6, 2014.

Resumen

Se estudia la dispersión del yoduro de plata emitido por la Red de Generadores Terrestres instalada en la región oriental de Cuba. Se emplearon 29 casos de estudio correspondientes al período 2005-2008 con el propósito de contribuir a la valoración de su efectividad en el programa de incremento artificial de la lluvia en ese territorio. Se emplearon el modelo de pronóstico numérico Modelo de Mesoescala 5, en su versión 3, y el Sistema de Modelación Calmet-Calpuff combinados para simular la dispersión del yoduro de plata emitido por la red. Se analizaron las concentraciones del mismo superiores a 0.1 ng/m³ a 2 000 m y 6 500 m de altura sobre el nivel del mar con vistas a determinar la posibilidad de siembra en nubes convectivas con presencia de agua superenfriada. Se encontró que la efectividad de esta red está limitada porque el aerosol emitido no alcanza los 6 500 m de altura en las concentraciones requeridas para que se produzca la siembra dinámica de nubes convectivas. Las simulaciones realizadas muestran que con un incremento hipotético de la razón de emisión en más de 12 veces la utilizada por la red, el umbral de concentración requerido a 6500 m se obtendría solo en áreas muy pequeñas. Se recomienda profundizar el estudio con la utilización

de otros modelos numéricos teniendo en cuenta las limitaciones encontradas al Sistema de Modelación Calmet-Calpuff.

PALABRAS CLAVE: Aerosol, Calmet, Calpuff, concentraciones, MM5v3, siembra de nubes.

Abstract

A study of the dispersion of silver iodide emitted from the Ground-based Generators Network located on the eastern region of Cuba has been achieved. It has been used 29 study cases during the period 2005-2008 to determine the network effectiveness for the Cuban Cloud Seeding Program in that region. The numerical forecast model Mesoscale Model 5 Version 3 and the Calmet-Calpuff Modeling System were used to simulate the dispersion of silver iodide emitted from the network. Their concentrations over 0.1 ng/m³ at 2 000 and 6 500 m height above sea level have been analyzed in order to determine the possibility of dynamic seeding in convective supercooled clouds. The results showed that the network is not effective since the emitted aerosol does not reach the 6 500 m of height in the required concentrations so that the dynamical cloud seeding takes place. Sensitivity studies performed showed that increasing by over 12 times the current emission rate, reports of silver iodide concentrations at 6500 m to produce dynamical cloud

seeding are obtained in very small areas. This work suggests deepening the study by mean of other numerical models provided the Calmet-Calpuff Modeling System limitations.

Keywords: Aerosol, Calmet, Calpuff, concentrations, MM5v3, cloud seeding.

Introducción

En 2005, el gobierno cubano decidió reiniciar las actividades de siembra de nubes en el contexto del Programa de Modificación Artificial del Tiempo, (Martínez, *et al.*, 2012) con la finalidad de mitigar la escasez hídrica en la región del oriente cubano. El programa aplicó la siembra dinámica de nubes (Braham, 1986; Silverman, 2001; Silverman, 2003) y como producto glaciogénico introdujo el yoduro de plata (AgI) en nubes en desarrollo mediante el uso de aeronaves especializadas y con el apoyo de generadores terrestres de AgI, que aprovechan las corrientes ascendentes de la atmósfera propiciadas por la orografía para hacer llegar el aerosol a la altura donde este se activa como núcleos de hielo, lo cual se denomina nivel de siembra.

Debe señalarse que el método de siembra dinámica desde aviones se ha implementado en numerosas regiones del mundo y se han obteniéndose diversos resultados, unos más alentadores que otros. Se realizaron estudios acerca de la aplicación de este método en el Mar Caribe, en 1965; Florida, en los Estados Unidos, en 1968 y 1970; en Big Spring, Texas, los Estados Unidos, en 1986, 1987, 1989, 1990 y 1994 (Silverman, 2003) y en Tailandia durante el período 1994-1998 (Woodley *et al.*, 1994) donde se obtuvieron resultados positivos. Este método garantiza que el reactivo alcance las temperaturas negativas necesarias para su activación (aproximadamente, entre -5°C y -15°C) mediante la penetración del avión en las corrientes ascendentes de las nubes.

El método alternativo de siembra desde generadores terrestres, a menudo, se ha aplicado a nubes oro-

gráficas en las zonas montañosas con temperaturas frías, lo cual garantiza que el reactivo sea emitido a temperaturas negativas y, rápidamente, alcance los umbrales de activación. Varios han sido los estudios orientados a evaluar la efectividad de los generadores terrestres; por ejemplo, en los Estados Unidos, en Utah (Super, 1999) y Colorado (Holroyd, 1988) se realizaron mediciones directas, complementadas con simulaciones numéricas simples en el último caso, mientras que en Wyoming (Jensen *et al.*, 2004) se desarrolló un estudio mediante el modelo de pronóstico numérico Weather Research and Forecast (WRF). Se mostró que la extensión vertical de la pluma permaneció, siguiendo las laderas de las montañas, 500 m sobre el nivel del suelo; además, se determinó que la emisión del producto glaciogénico durante una tormenta solo contribuye a su desperdicio. En Italia, un estudio similar de evaluación arrojó que si el aerosol no se introduce directamente en el interior de una nube con suficiente contenido de agua líquida a temperaturas entre -5°C y -15°C , la siembra no tendría un efecto significativo en las precipitaciones (Jensen *et al.*, 2005).

Entre 2005 y 2006 se instaló y puso en funcionamiento una red de generadores terrestres en la región oriental de Cuba, con la finalidad de incrementar el volumen de agua en la cuenca del río Cauto (Martínez *et al.*, 2012). La suposición principal del trabajo con los generadores es que estos producen aerosol de yoduro de plata que se dispersa en la atmósfera y es arrastrado por los procesos convectivos de la capa subnubosa hasta la altura de activación del aerosol de yoduro de plata para la nucleación de hielo en el interior de las nubes. Sin embargo, no se ha realizado ningún estudio acerca de la capacidad de la red para hacer llegar el aerosol de AgI en la concentración requerida a las alturas donde es efectiva la siembra con yoduro de plata. El objetivo de este trabajo es evaluar las concentraciones de aerosol de yoduro de plata que se alcanzan en los niveles mínimos requeridos para

su activación como núcleos de hielo con las ubicaciones que tenían los generadores durante su período de funcionamiento.

Para este artículo, los generadores terrestres de AgI se consideran potencialmente efectivos si sus emisiones alcanzan el nivel de siembra en concentraciones lo suficientemente grandes como para que se realice la siembra dinámica de nubes sobre el área geográfica objeto de siembra (cuena del río Cauto). Las simulaciones se realizaron mediante el empleo el MM5v3 y el sistema de modelación Calmet–Calpuff (SMCC).

En las siguientes secciones del presente trabajo se profundiza sobre los modelos utilizados para simular la dispersión del producto glaciogénico (AgI), se destacan los estudios de caso escogidos y se describen los métodos empleados para determinar la efectividad potencial de la RGT. Al final, se exponen las conclusiones y recomendaciones.

Materiales y métodos

El MM5v3 y el SMCC constituyeron las herramientas fundamentales para simular la dispersión del AgI emitido por la RGT. El MM5v3 se configuró en el Centro de Física de la Atmósfera (CFA) para condiciones tropicales en dominios anidados centrados en Cuba (Jiménez *et al.*, 2008), y desde hace varios años se encuentra operativo para el pronóstico. Esta configuración del MM5v3 se utilizó con miras a proporcionar los campos meteorológicos al SMCC y simuló para un plazo de pronóstico de 48 h a partir de las 0000 UTC de cada caso de estudio. El MM5v3 fue inicializado con el modelo de pronóstico global Global Forecasting System (GFS), que tiene una resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ (aproximadamente, 110 km), y las condiciones de frontera se actualizaron cada 6 h.

La rejilla tridimensional (3D) de simulación del MM5v3 presenta una resolución espacial de 9 km, correspondiente al dominio 3 (el de mayor resolu-

ción) de la configuración empleada por el CFA, cuyos dominios 2 y 1 tienen resoluciones de 27 km y 81 km, respectivamente, y no se utilizan en este trabajo. Las salidas numéricas se obtuvieron cada una hora. La rejilla 3D posee una extensión horizontal de 187 x 97 puntos de rejilla y 23 niveles en el plano vertical, desde la superficie hasta 100 hPa, la cual abarca toda Cuba. Es necesario destacar que las parametrizaciones físicas utilizadas se corresponden con la configuración utilizada operativamente por el CFA (Jiménez *et al.*, 2008).

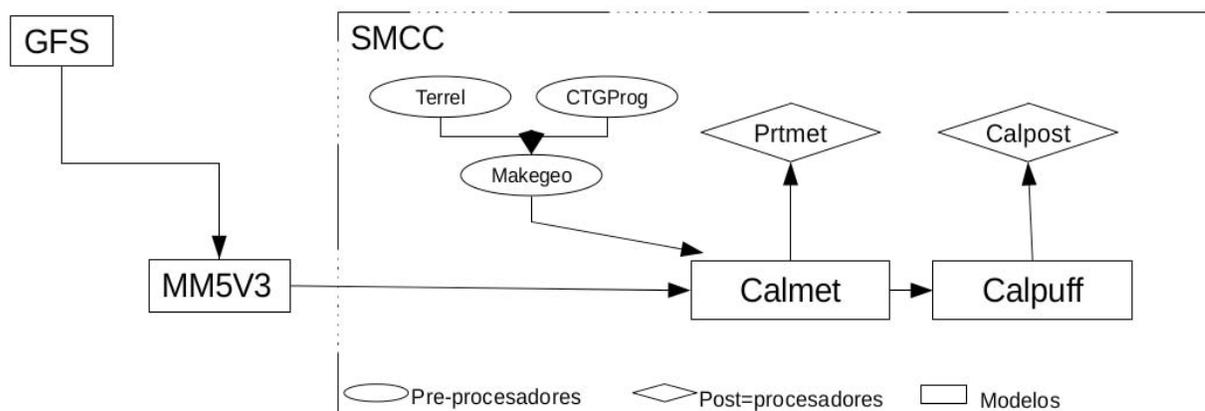
El SMCC contiene un modelo gaussiano de *puff* integrado no estacionario, tiene rango espacial amplio y puede aplicarse en condiciones meteorológicas complejas; estas características lo destacan como un modelo de dispersión apropiado para lograr los objetivos propuestos en este trabajo. Está compuesto por tres módulos principales: a) el modelo de diagnóstico meteorológico Calmet, b) el modelo de dispersión Calpuff y c) el paquete de posprocesamiento Prtmet-Calpost. Cuenta, además, con un conjunto de preprocesadores que permiten la creación y la preparación de los datos de entrada físico-geográficos y meteorológicos (Scire *et al.*, 2000a; Scire *et al.*, 2000b).

El SMCC aprovecha las salidas numéricas horarias obtenidas del MM5v3 que corresponden al plazo entre las 0600 y las 3600 horas de simulación del MM5v3 para obtener los campos de dispersión del AgI. Este rango temporal de 24 h es el intervalo de simulación del SMCC objeto de análisis en este trabajo. La *fig. 1* muestra el diagrama de flujo entre el GFS, el MM5v3 y el SMCC.

1. Casos de estudio

Como casos de estudio se tomaron 29 días entre julio y agosto del período 2005 a 2008 (*Tabla 1*); estos días se escogieron teniendo en cuenta su disponibilidad, para el período lluvioso, en la base de datos del CFA. La simulación para cada caso se realizó en el intervalo comprendido entre las 0000 GMT y las 2300 GMT (hora local) del día analizado, correspondiente

Diagrama de Flujo de Simulación



Esquema espacial

Modelo (Resolución)



Esquema Temporal

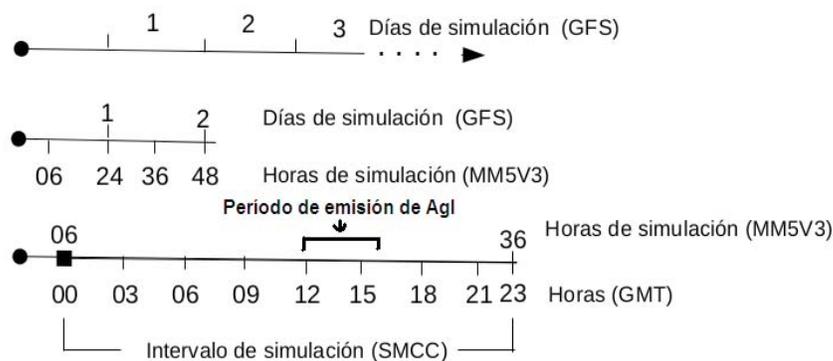


Fig. 1 Diagrama de flujo y esquemas espacial y temporal de simulación.

al intervalo de las 0600 a las 3600 horas de simulación del MM5v3. La *fig. 1* también presenta el esquema espacio-temporal de simulación.

Configuración del SMCC y determinación del nivel de siembra

La rejilla de simulación del SMCC (*fig. 2*) se obtuvo mediante una proyección cónica de Lambert (LCC); el centro de la rejilla se estableció en los 20.40° N y los 76° W, un punto situado sobre el oriente cubano. Con una resolución espacial de 1 km se obtuvo una rejilla

de 264 km en la dirección zonal por 200 km en la dirección meridional. Los datos de elevación y uso de suelos y cobertura terrestre utilizados en la formación de la rejilla se obtuvieron del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), con aproximadamente 1 km de resolución, la cual resulta ideal para este trabajo. En la vertical se definieron 14 niveles, con topes de 20 m, 60 m, 100 m, 300 m, 600 m, 1 000 m, 1 500 m, 2 000 m, 3 000 m, 4 000 m, 5 500 m, 6 500 m, 8 000 m y 10 000 m, respectivamente. Como nivel representativo de la siembra se utilizó el de 6 500 m; este nivel, que corresponde a la capa entre 5 500 m y 6 500 m, se eligió porque su rango de temperatu-

ras aproximado, a partir de mediciones reales, es de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Martínez *et al.*, 2002), o sea, el rango de temperaturas en que el AgI se activa como agente glaciogénico (Braham, 1986). Un análisis preliminar de los campos de temperaturas obtenidos por el SMCC corroboró que en el nivel de 6 500 m las temperaturas oscilan en el rango mencionado. Asimismo, para poder apreciar el comportamiento de la pluma durante su ascenso se analizaron las concentraciones de AgI en el nivel de 2 000 m.

Tabla I
Casos de estudio

Días simulados agrupados por año			
22-08-2005	03-07-2006	07-07-2007	24-08-2008
23-08-2005	12-07-2006	12-07-2007	25-08-2008
24-08-2005	13-07-2006	14-07-2007	26-08-2008
25-08-2005		17-07-2007	27-08-2008
26-08-2005		27-07-2007	28-08-2008
27-08-2005		01-08-2007	29-08-2008
28-08-2005		11-08-2007	30-08-2008
29-08-2005		13-08-2007	31-08-2008
30-08-2005		30-08-2007	

El modelo Calmet generó los campos de diagnóstico meteorológicos para una escala temporal de 1 h entre las 0000 y las 2300 GMT; además, las simulaciones de las concentraciones de AgI mediante el modelo Calpuff se realizaron para el plazo comprendido desde las 1200 hasta las 2300 GMT, manteniendo los generadores encendidos las primeras 5 h (entre las 1200 y 1600 GMT) (ver *fig. 1*).

En la configuración de las parametrizaciones del SMCC debe resaltarse que se tuvo en cuenta los efectos del terreno, puesto que el movimiento del material glaciogénico requiere de forzamiento orográfico para su ascenso. Asimismo, se emplearon el método simple tipo Calpuff para el ajuste del terreno y el método PDF (función de densidad de probabilidad) para la dispersión en condiciones de convección (Scire *et*

al., 2000), que son adecuados para la simulación de la dispersión del AgI en los casos de estudio y para la detección de sus concentraciones en los receptores ubicados en los niveles de estudio seleccionados (2 000 m y 6 500 m).

Red de generadores terrestres de AgI

La Red de Generadores Terrestres (RGT), que consta de 25 generadores terrestres, se ubicó en la rejilla de estudio según su posición geográfica real aplicando la metodología propuesta por Scire *et al.* (2000) para la conversión de coordenadas geográficas a la rejilla cartesiana de simulación mediante la proyección LCC (*fig. 2a*). La *tabla 2 muestra* los parámetros de emisión utilizados en las simulaciones. Se emplearon razones de emisión de 8 g/h, que es la razón de emisión real utilizada durante el período de funcionamiento de la red y, a su vez, es la máxima posible para la tecnología empleada, y emisiones de 100 g/h con el objetivo de hacer estudios de sensibilidad (12.5 veces superior a la emisión real).

Tabla II
Parámetros de emisión

Parámetros	EBF* (m)	DBEF* (m)	VE* (m/s)	TE* (K)
Valores	1,6	0,13	0,3	473

Nota: * Descripciones: EBF es la elevación sobre la base de la fuente puntual; DBEF es el diámetro de la boquilla de emisión de la fuente; VE es la velocidad de emisión y TE es la temperatura de emisión.

Umbral de concentraciones requeridas para la siembra de nubes

Algunas mediciones realizadas en el laboratorio de simulación de nubes y nieblas del Instituto de Meteorología Experimental de Obninsk, Rusia, perteneciente al Complejo Typhoon del Servicio Meteorológico ruso (Roshydromet), mostraron que la eficiencia de nucleación obtenida para los aerosoles producidos por los generadores varió, aproximadamente, entre 10^{11}

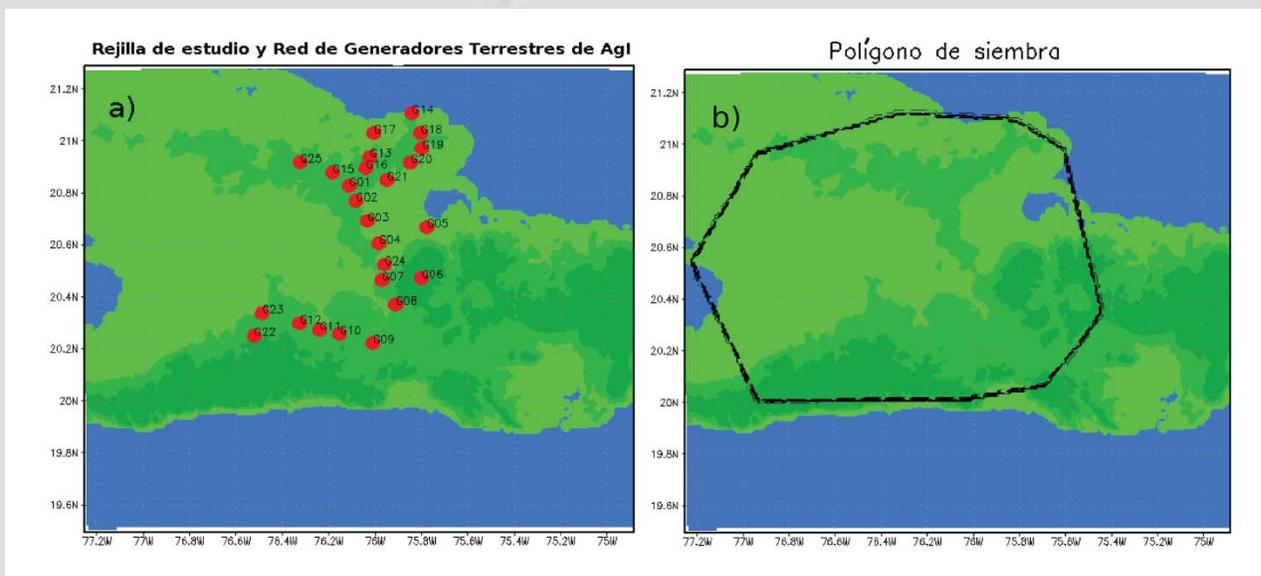


Fig. 2 *Rejilla de estudio. a) Red de Generadores Terrestres de AgI; b) Polígono de siembra.*

g^{-1} (núcleos por gramo de yoduro de plata) a temperaturas cercanas a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, y $10^{13}\text{ }g^{-1}$ para temperaturas próximas a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, que se tomará como valor extremo de referencia. Bajo este supuesto, las concentraciones de núcleos de hielo activos simuladas siempre estarán por encima de las reales.

Además, si se presupone que para realizar la siembra dinámica de nubes es necesario tener núcleos de congelación en el orden de 100 núcleos por litro, el umbral inferior de concentraciones de AgI que deberá analizarse es de $10^{-8}\text{ }g/m^3$ o $10\text{ }ng/m^3$.

Aunque en Cuba se aplica el método de siembra dinámico, en este trabajo también se analizan las concentraciones para la siembra estática; de esta manera, puede apreciarse mejor el comportamiento de las plumas de AgI, su evolución y su respuesta a las variables meteorológicas. En este sentido, en el caso de la siembra estática, la cual requiere de un núcleo de congelación por litro, se necesitarán concentraciones de $10^{-10}\text{ }g/m^3$ o $0,1\text{ }ng/m^3$.

Polígono de siembra

El polígono de siembra se define como la región de interés para la siembra de nubes en el oriente cubano; cubre la cuenca del río Cauto y sus áreas adyacentes

al este y el norte, incluyendo el este de Las Tunas, el norte de Holguín y una parte de Santiago de Cuba. Los puntos iniciales se obtuvieron de mapas de cuencas hidrográficas que permitieron representar no solo la cuenca del Cauto, sino también las de los ríos y presas adyacentes, los cuales, asimismo, son objeto del trabajo operativo de siembra de nubes para el incremento de la disponibilidad hidrológica en la región.

El cálculo del área de polígonos irregulares resulta complicado. El método utilizado para su simplificación es el de la envoltura convexa (Eddy, 1977), el cual consiste en reducir la cantidad de puntos que determinan cualquier polígono irregular a aquellos puntos que determinan el polígono convexo que inscribe a ese polígono irregular. La *fig. 2b* muestra el polígono de siembra obtenido numéricamente, con un área calculada de $A_p = 18\,640,0\text{ }m^2$.

Metodología de análisis

Para el análisis de la efectividad potencial de los generadores terrestres de AgI se tuvieron en cuenta tres parámetros fundamentales medidos en el nivel de siembra:

1. Porcentaje de cobertura espacial ocupada por el AgI sobre el polígono de siembra, en concentraciones iguales y superiores al valor umbral inferior para la siembra estática. Porcentaje referido al área del polígono de siembra.
2. Porcentaje de cobertura espacial ocupada por el AgI sobre el polígono de siembra, en concentraciones iguales y superiores al valor umbral inferior para la siembra dinámica. Porcentaje referido al área del polígono de siembra.
3. Valores de concentración máximos obtenidos sobre el polígono de siembra.

Estos parámetros se analizaron en cada caso de estudio (29 días) y para cada hora del período de simulación (0000–2300 GMT horas). La cobertura espacial del reactivo sobre el polígono de siembra determina la efectividad de la RGT; para ello, es necesario encontrar el AgI en el interior de la nubosidad convectiva que pudiera originarse o encontrarse en este a alturas iguales o superiores al nivel de siembra. Sin embargo, deben existir concentraciones con valores superiores a 10 ng/m^3 para que se produzca la siembra dinámica, la cual ha mostrado resultados significativos en la región, (Koloskov *et al.*, 1995).

Discusión de los resultados

Cobertura espacial del AgI emitida por la red de generadores. Siembra estática

El término *siembra estática* refiere a que las áreas de cobertura espacial del AgI reportadas en el nivel de siembra (6 500 m) están determinadas por concentraciones mayores o iguales a $0,1 \text{ ng/m}^3$. La *fig. 3* muestra los porcentajes de cobertura espacial del AgI coincidentes con el polígono de siembra para cada día estudiado y para cada paso de tiempo simulado, así como su comportamiento medio a partir de razones de emisión de 8 g/h . La *fig. 3a* reporta el nivel de 2 000 m, mientras que la *fig. 3b* reporta el nivel de 6 500 m. Se observa una distribución de valores en forma de campana desde el inicio de las emisiones, con el valor medio máximo localizado 1 h o 2 h después de haber finalizado la emisión del producto glaciogénico desde los generadores (1800–1900 GMT).

Es de notar que el lapso entre 1 h y 2 h es también el tiempo de retardo para que comiencen a detectarse, aunque muy pequeñas, las concentraciones del pro-

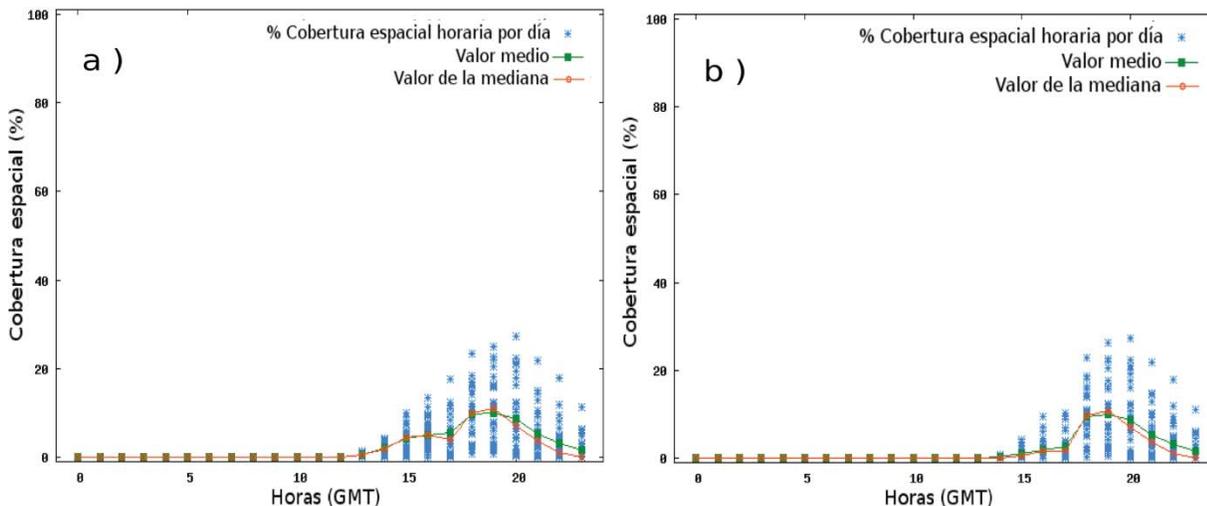


Fig. 3 Cobertura espacial de las concentraciones de AgI con valores superiores a $0,1 \text{ ng/m}^3$ para razones de emisión de 8 g/h . Porcentaje referido al área del polígono de siembra. a) Nivel de 2 000 m; b) Nivel de siembra (6 500 m).

ducto sobre el polígono de siembra. Se aprecia que los porcentajes de cobertura espacial resultan mayores en plazos más tempranos (entre las 1200 y 1600 GMT) en el nivel de 2 000 m, mientras que para el nivel de siembra los porcentajes son inferiores y su razón de incremento en estas horas es más suave. Sin embargo, los valores medios máximos se reportan en las mismas horas para los dos niveles y son aproximadamente iguales, con valores inferiores a 15 %. Para los días estudiados en el nivel de 6 500 m, los valores no superan 30 % y durante el tiempo de emisión de los generadores ni siquiera se sobrepasa 5 %. Este comportamiento refleja la habilidad del SMCC en representar correctamente el ascenso del aerosol. Es evidente que su retardo está relacionado con la altura a la cual se analizan las concentraciones de AgI. Los valores bajos para los porcentajes de cobertura espacial se justifican por las razones de emisión bajas de los generadores terrestres en combinación con el efecto del viento en la dispersión del material glaciogénico.

La *fig. 4* expone los porcentajes de cobertura espacial en los niveles de 2 000 m y 6 500 m para razones de emisión de 100 g/h por cada generador. Se observa un patrón de comportamiento similar al descrito para las emisiones de 8 g/h, pero, en este caso, los valores

medios mayores de cobertura espacial son superiores y oscilan alrededor de 60 %, y los máximos discretos valores en el entorno de 80 %. Los valores obtenidos resaltan la sensibilidad del modelo de dispersión a la razón de emisión de las fuentes puntuales.

Cobertura espacial del AgI emitida por la red de generadores y valores de concentración máximos en el nivel de siembra. Siembra dinámica

De manera similar a la siembra estática, el término *siembra dinámica* se refiere a que las áreas de cobertura espacial encontradas en el nivel de siembra estén determinadas por concentraciones mayores o iguales a 10 ng/m³. La *fig. 5* muestra los valores máximos de concentraciones para cada hora de ~~encontrados~~ en el polígono de siembra para las emisiones de 8 g/h y 100 g/h, respectivamente. En la *fig. 5a* se aprecia que la media de valores máximos de concentraciones por hora no supera 3 ng/m³ y solo es posible observarla a las 1800 GMT; para el resto de las horas, los valores medios no superan 1 ng/m³.

En los casos estudiados se encontró un día en que, a las 1800 GMT, se alcanzó un valor máximo entre 8 ng/m³ y 9 ng/m³. Incluso, para emisiones de 100 g/h (*fig. 5b*), los máximos encontrados son relativamente

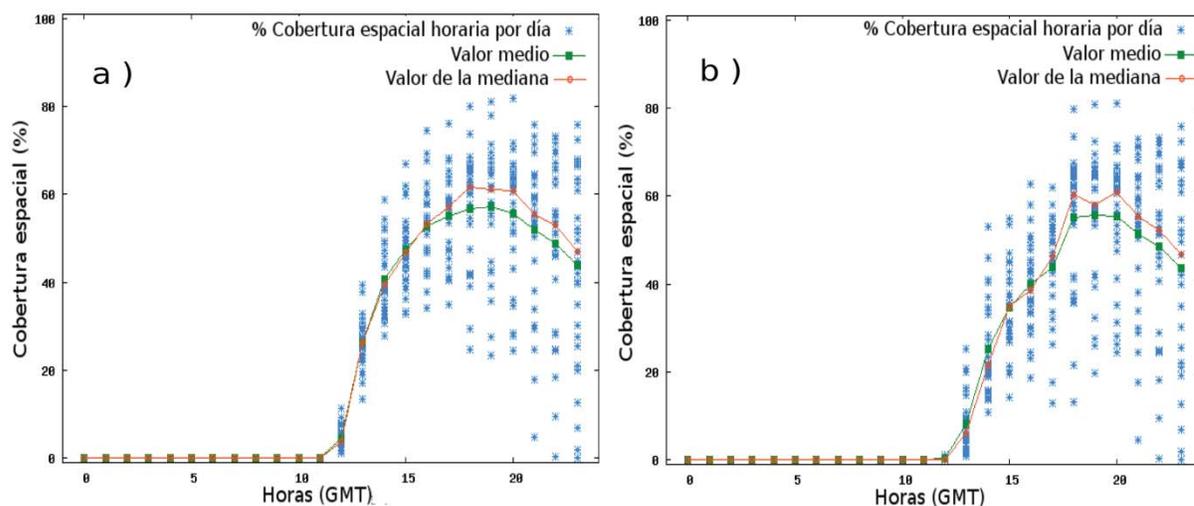


Fig. 4 Cobertura espacial de las concentraciones de AgI con valores superiores a 0,1 ng/m³ para razones de emisión de 100 g/h. Porcentaje referido al área del polígono de siembra. a) Nivel de 2 000 m; b) Nivel de siembra (6 500 m).

bajos y se reportó, también a las 1800 GMT, la media máxima de máximos horarios, con un valor aproximado de 30 ng/m^3 ; en los demás horarios, los valores medios oscilan entre 1 ng/m^3 y 6 ng/m^3 . Los valores de concentración máximos para la siembra dinámica reportados a las 1800 GMT alcanzan 80 ng/m^3 , mientras que a las 1900 GMT se observan algunos casos que superan ligeramente 10 ng/m^3 .

Con vistas a validar estos máximos encontrados se analizaron los porcentajes de cobertura espacial con valores superiores a 10 ng/m^3 (umbral inferior para que se produzca la siembra dinámica). Este análisis se realizó solo para emisiones de 100 g/h , puesto que no tendría sentido hacerlo para emisiones de 8 g/h dado que para ninguno de los días estudiados se hallaron valores máximos superiores o iguales al umbral.

La *fig. 6* muestra los porcentajes de cobertura espacial horarios entre las áreas del polígono de siembra con concentraciones superiores a 10 ng/m^3 reportadas en el nivel de siembra. Resulta evidente que los porcentajes encontrados a las 1800 y 1900 GMT no son representativos al no superar 0.4% del área total de la cuenca; son, prácticamente, puntuales y, por consiguiente, podrían no representar la situación real y sí ser una consecuencia del cálculo numérico del modelo bajo valores extremos puntuales de las variables meteorológicas empleadas en la ecuación de dispersión. Este fenómeno se reconoce como una deficiencia del SMCC con miras a representar valores de concentración extremos en la altura, la cual puede determinarse por el método simple tipo Calpuff utilizado para obtener valores de concentración en puntos ubicados a gran altura. Un elemento que permitió considerar el efecto numérico en el cálculo de los máximos de concentración es su carácter identificador, en la mayoría de los casos, de los generadores en superficie con los cuales, claramente, se vincula su aparición.

La *fig. 7* muestra cómo para distintos días cuyas condiciones meteorológicas no son las mismas a las

1800 GMT, los reportes de máximos parecen representar la ubicación geográfica en superficie del generador fuente que, en cada caso, determinó su respectivo reporte de máximo en el nivel de siembra. La *fig. 7c* representa el caso discreto donde se reportó un área mayor con concentraciones para la siembra dinámica (0.4% del área del polígono de siembra). El análisis de esta variable no arrojó preferencia de ningún generador en relación con la aparición en el nivel de siembra de valores máximos en los días estudiados, lo cual sugiere la independencia entre la posición geográfica de los generadores y el reporte de máximos necesarios para que se produzca la siembra en $6\ 500 \text{ m}$.

Conclusiones

1. En los casos estudiados y los flujos de emisión reales de los generadores (8 g/h) no se encontraron en los niveles de siembra concentraciones superiores o iguales a 10 ng/m^3 , por lo cual la red de generadores terrestres de AgI no es potencialmente efectiva para obtener incremento de la lluvia por siembra dinámica.
2. Para razones de emisión de más de 12 veces la real (100 g/h), los porcentajes simulados de áreas con concentraciones superiores o iguales a 10 ng/m^3 no son significativos debido a su presencia efímera en el nivel de siembra y su carácter puntual.
3. En todos los casos de estudio se observó un retardo entre 1 h y 2 h para que el aerosol, desde su emisión, alcanzara el nivel de siembra en concentraciones iguales o superiores a $0,1 \text{ ng/m}^3$.
4. Todos los días estudiados, para razones de emisión de 8 g/h , los porcentajes medios máximos de cobertura espacial de concentraciones de AgI mayores e iguales a $0,1 \text{ ng/m}^3$ se reportaron de 6 h a 7 h después de haberse encendido los generadores.
5. La implementación del sistema de modelación Calmet-Calpuff representa aceptablemente los valores

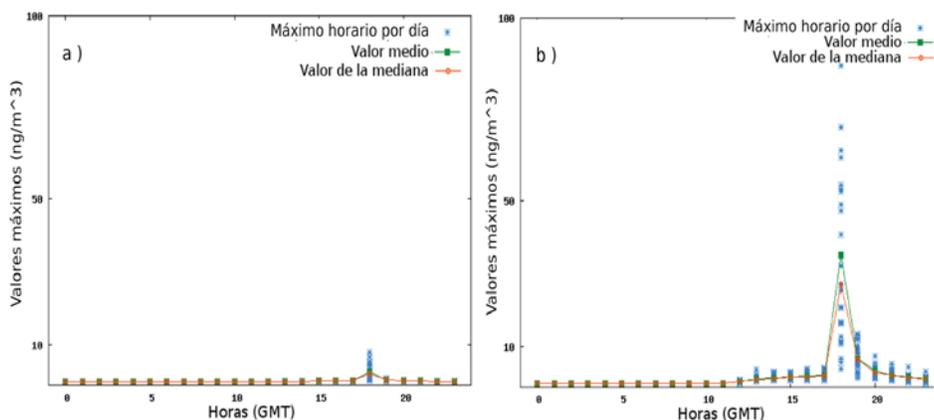


Fig. 5 Valores máximos de concentraciones horarias reportados en el nivel de siembra (6 500 m). a) Razones de emisión de 8 g/h; b) Razones de emisión de 100g/h.

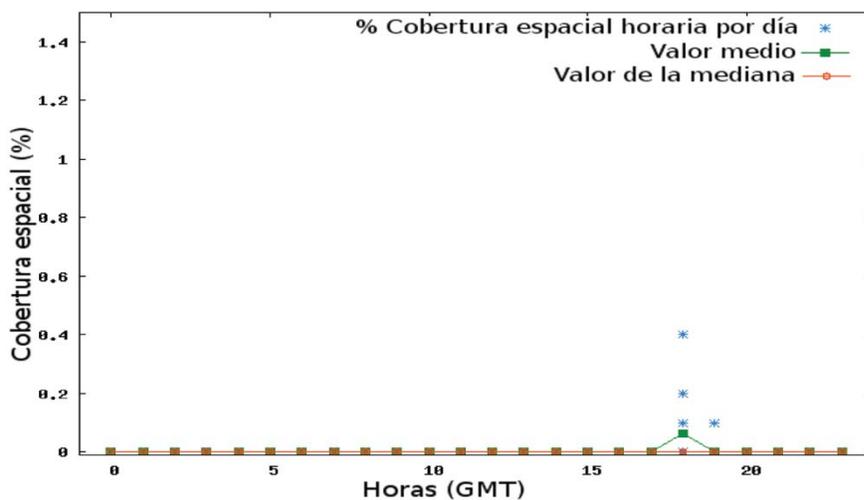


Fig. 6 Cobertura espacial de las concentraciones de AgI con valores superiores a 10 ng/m³ para razones de emisión de 100 g/h reportados en el nivel de siembra (6 500 m). Porcentaje referido al área del polígono de siembra.

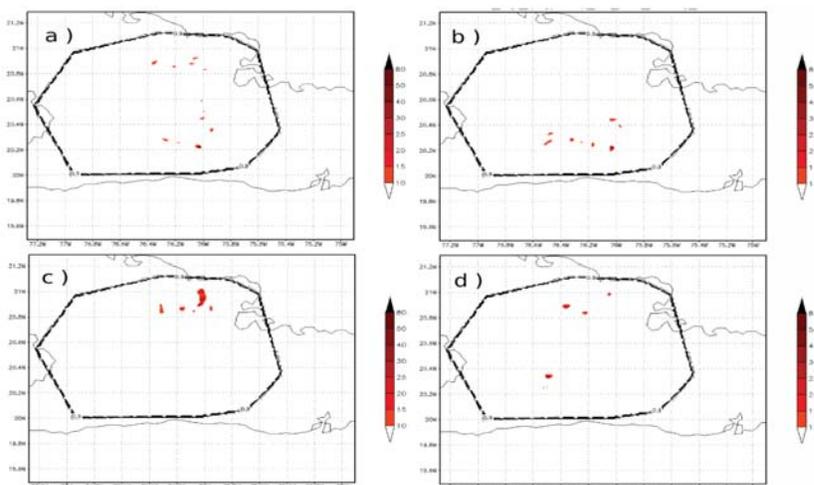


Fig. 7 Cobertura espacial de las concentraciones de AgI con valores superiores a 10 ng/m³ a las 1800 GMT horas, reportadas en el nivel de siembra (6 500 m) para emisiones de 100 g/h. a) 23-08-2005; b) 29-08-2005; c) 13-07-2006; d) 14-07-2007.

de concentración del material dispersado a diferentes alturas, aunque, por limitaciones intrínsecas del modelo, muestra ciertas deficiencias para describir la forma de la pluma.

6. Se recomienda continuar investigando la dispersión del AgI emitido desde fuentes puntuales con el empleo de modelos numéricos que utilicen esquemas advectivos, tales como el WRF, en lugar de las ecuaciones gaussianas para la dispersión, con miras a obtener una descripción de la forma espacial del comportamiento de la pluma de aerosol.

Recomendaciones

Se recomienda continuar investigando la dispersión del AgI emitido desde fuentes puntuales con el empleo de modelos numéricos que utilicen esquemas advectivos, tales como el WRF, en lugar de las ecuaciones gaussianas para la dispersión, con miras a obtener una descripción de la forma espacial del comportamiento de la pluma de aerosol

Referencias bibliográficas

BRAHAM, R. R. J. 1986. Precipitation enhancement. A scientific challenge, *Amer. Meteor. Soc.*, 43.

EDDY, W. F. 1977. A new convex hull algorithm for planar sets. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 3, 398–403.

FUENTES JIMÉNEZ, Y. 2008. *Evaluación del pronóstico a corto plazo de la temperatura del aire con el modelo numérico MM5v3*. Tesis de grado de licenciatura en Meteorología, Instituto de Tecnología y Ciencias Aplicadas (INTEC), Ciudad de la Habana, Cuba.

HOLROYD, E. W., MACPARTLAND, J. T. & SUPER, A. B. 1988. Observations of silver iodide plumes over the Gran Mesa of Colorado, *J. of Applied Meteor.*, 27, 1125–1144.

JENSEN, T. O. 2004. A model based feasibility study of glaciogenic seeding during a winter orographic precipitation event in Wyoming. Tech. rep., Natio-

nal Center of Atmospheric Research, Boulder, CO USA; Weather Modifications Incorporates, Fargo, ND USA; University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.

JENSEN, T. O. 2005. Use of wrf for winter precipitation enhancement studies. Tech. rep, *National Center for Atmospheric Research*, Boulder, Colorado, USA.

KOLOS KOV, B. O. 1995. Results of experiments on convective precipitation enhancement in the Camagüey experimental area, Cuba, *J. of Applied Meteor.*, 35.

MARTÍNEZ, D., RIVERO, I. & BÁEZ, R. 2002. Caracterización estadística de los perfiles meteorológicos de Camagüey en horas de la tarde y su relación con la lluvia, *Rev. Cub. Meteor.*, 9.

MARTÍNEZ, D. 2012. Programa de incremento artificial de la lluvia por siembra de nubes. Logros y dificultades en el período 2005–2010, *Revista Cubana de Meteorología*, 17.

SCIRE, J. S. & *et al.* 2000a. A user's guide for the Calmet meteorological model (version 5). Tech. rep., Earth Tech. inc.

SCIRE, J. S. & *et al.* 2000b. A user's guide for the Calpuff dispersion model (version 5). Tech. rep., Earth Tech. inc.

SILVERMAN, B. A. 2001. A critical assessment of glaciogenic seeding of convective clouds for rainfall enhancement, *Bulletin of the American Meteorological Society*.

SILVERMAN, B. A. 2003. A critical assessment of hygroscopic seeding of convective clouds for rainfall enhancement, *Bulletin of the American Meteorological Society*.

SUPER, A. B. 1999. Summary of the NOAA/Utah atmospheric modification program 1990–1998, *J. Wea. Mod.*

WOODLEY, E. A. 1994. Thailand applied atmospheric resources research program. Tech. rep., *Research and Laboratory Services Division*, Denver, Colorado, E.U.A.