



TRABAJO TEORICO EXPERIMENTAL

Simulador de radar meteorológico basado en modelo de Reflectividades en el espacio

Weather radar simulator based on space Reflectivity distribution

Vladimir - Rodríguez Díez
Milagros - Díez Rodríguez

Orlando - Rodríguez González

Recibido: Febrero del 2012
Aprobado: Abril del 2012

Resumen/ Abstract

Los radares meteorológicos son potentes instrumentos de medición de potencia eléctrica. Los simuladores de radar permiten estudiar la influencia de todos sus parámetros en las mediciones que realiza. Su aplicación en la actualidad comprende el estudio de la influencia de las propiedades físicas de los hidrometeoros y la configuración del radar en la observación; y el estudio del desempeño de los modelos climáticos a partir de la confrontación de la salida del simulador con la observación real. En este trabajo se utiliza como entrada al simulador una distribución de Reflectividades (parámetro proporcional a la potencia retornada) en la atmósfera; obviando la compleja relación que existe entre esta última y las propiedades físicas del blanco meteorológico. El resultado es un simulador que posibilita el estudio de los efectos de patrón de escaneo de la atmósfera y el esquema de adquisición y procesamientos de los datos, sobre la percepción de un blanco meteorológico.

Palabras clave: distribución espacial de reflectividades, simulador de radar meteorológico.

Weather radar are powerful measurement instruments for electric power. Radar simulators allows to investigate the influence of its parameter on measurements. Its application comprehend the study of influence of hydrometeor's physical properties and radar configurations in observation; and the study of climate model performance upon the confrontation of simulator output versus actual observations. In this work simulator input is given as a spacial reflectivity (proportional to returned power) distribution in atmosphere, obviating the complex relation between this and physical properties of meteorological target. The result is a simulator for the study of volume scan pattern and acquisition and processing scheme effects on weather target observation.

Key Words: spacial reflectivity distribution, weather radar simulator.

INTRODUCCIÓN

Los radares meteorológicos son potentes instrumentos de medición. Sus mayores ventajas con respecto a otros instrumentos de exploración de la atmósfera están asociadas a su capacidad de explorar grandes regiones alrededor de su ubicación. Son instrumentos complejos puesto que para su correcto funcionamiento necesitan calibraciones continuas. Aún cuando están correctamente calibrados, la relación con los parámetros meteorológicos medidos no es única y depende del modelo asumido para el eco meteorológico.

Esta complejidad ha dado pie al surgimiento de simuladores de radar meteorológico (SRM), de conjunto con el creciente poder de cómputo en manos del investigador. Estos simuladores permiten estudiar las complejas relaciones que existen entre las configuraciones del radar y los resultados de la medición. A continuación se expone un recorrido por la historia reciente de los SRM:

En el trabajo [1], se presenta un simulador que evalúa la señal en la entrada del receptor teniendo en cuenta la señal aportada por cada molécula reflectante. Pretende arribar a conclusiones sobre la relación que existe entre la composición física del objeto meteorológico, así como la configuración del radar y los efectos de propagación y polarización; y la señal recibida del eco. Se resalta como novedad del trabajo la generación de un ambiente meteorológico sintético. Este se genera distribuyendo homogénea y aleatoriamente partículas en el volumen del haz, previamente calculado a partir de las configuraciones del radar. Los hidrometeoros son actualizados en su posición debido al movimiento durante el período de repetición del pulso.

En [2], crearon un simulador de radar que toma como entrada las variables meteorológicas predichas por un modelo climático de alta resolución (11.1 km) y obtiene el patrón de Reflectividades observado por el radar. El objetivo del mismo es la validación en tiempo real de la efectividad del modelo climático, contrastando la salida del simulador con las observaciones hechas por el radar de campo. Calculan la trayectoria del haz a partir de la ley de Snell en cada punto de integración, para este fin se valen de la temperatura, presión y humedad ofrecidas por el modelo y reconocen que no está muy lejos de la atmósfera estándar. El error es solo notable en pequeños ángulos de elevación y de acuerdo con los autores puede ser importante en el estudio de la banda brillante. El modelo tiene en cuenta la atenuación y resuelve la fórmula de Mie en vez de utilizar la aproximación de Rayleigh de acuerdo con el procedimiento de [3].

En [4], se crea un simulador que recibe la salida de un modelo climático numérico con la idea de validar las predicciones a partir de las observaciones de radar. Demostraron que es mejor utilizar la atmósfera estándar para la trayectoria de haz que calcularla a partir de las variables meteorológicas predichas.

En el trabajo [5], se utiliza el simulador desarrollado por [2], acoplado a la salida de un modelo climático para estudiar el efecto de dos fuentes de incertidumbre en el dato de radar: la absorción producto de los gases atmosféricos y la atenuación por fuertes ecos atmosféricos entre el objeto y el radar. El simulador les permite considerar o no estos efectos y luego comparan los resultados.

El proyecto CloudSat de la NASA realiza mediciones de las nubes y precipitaciones (en particular de su estructura vertical) con un radar espacial que trabaja a 94 GHz. En [6], se describe el paquete de software QuickBean que se encarga de convertir las nubes obtenidas mediante los modelos climáticos en sus valores equivalentes de Reflectividades. Aunque fue pensado para CloudSat, trabaja además en el rango de 1 a 100 MHz. El usuario debe introducir una distribución de partículas junto con el perfil de temperaturas y humedad relativa obtenidas del modelo climático. Utilizan modelos de 100 km de resolución, por lo que tienen que "generar" las fluctuaciones dentro de esa escala. Es una poderosa herramienta para evaluar el desempeño de los modelos climáticos comparándolos con perfiles reales de Reflectividades.

En el trabajo [7], se extendió un modelo unidimensional del radar polarimétrico a dos dimensiones, utilizando como entrada las propiedades físicas de cada celda. Dividen el plano a estudiar en tres regiones concéntricas con Reflectividades homogéneas en su interior que decrecen de una región a otra del centro hacia afuera. Obtienen los productos polarimétricos y aplican todos los algoritmos de estimación de precipitaciones. Esto les permite evaluar el desempeño de estos últimos puesto que se conoce el resultado de antemano.

En [8], se desarrolló un simulador tridimensional de radar de la banda X que trabaja con la salida de un modelo numérico de meso-escala. Se tuvieron en cuenta los efectos de la retrodispersión y la propagación y se incluyen las variables polarimétricas. El objetivo es estudiar los algoritmos de estimación de precipitaciones para el radar de la banda X. Se prueban dos esquemas de estimación de precipitaciones a partir de las variables predichas por el modelo y luego se comparan con el valor real para arribar a conclusiones.

En [9], se presenta un simulador de las señales de radar doppler que realiza sobremuestreo (intervalos de muestreo menores que la dimensión radial del haz del radar). Es creado con el objetivo de analizar el comportamiento de los radares meteorológicos espaciales, pero sus resultados son aplicables al radar en tierra. Su mayor novedad es que considera en la generación de la señal simulada, la correlación entre muestras de una misma celda en distancia y un mismo pulso. Los autores de [10], aplican un simulador del radar WSR-88D a la salida de un modelo numérico para tornados, con el fin de estudiar los efectos de la resolución del radar en la forma que presentan dichas estructuras en la observación. Simulan la observación para las dos resoluciones posibles en estos radares: a) tradicional, con un 1km y 1° y b) alta resolución, con 250m y 0.5°. Los resultados para las celdas de baja resolución se obtuvieron promediando los de alta resolución.

De acuerdo con los ejemplos anteriores se puede clasificar el uso de los simuladores de radar con dos objetivos determinados. El primero de ellos es el estudio de la relación que existe entre las propiedades físicas de los hidrometeoros y la configuración del radar en la observación. El otro objetivo es el estudio del desempeño de los modelos climáticos a partir de la confrontación de la salida del simulador con la observación real a posteriori.

En este trabajo se propone un nuevo SRM que recibe como entrada una distribución de Reflectividades en el espacio, asociado a un modelo de tormenta. Este enfoque permite tomar en cuenta solamente los efectos que produce el proceso de adquisición del dato de radar sobre el parámetro meteorológico a medir, obviando la dependencia de este último con su estructura física real. El resultado es un simulador que posibilita el estudio de los efectos de patrón de escaneo de la atmósfera y el esquema de adquisición y procesamientos de los datos, sobre la percepción de un blanco meteorológico.

DESARROLLO

Descripción del Software Simulador de Radar Meteorológico

A continuación se describe el software desarrollado para el SRM. Como puede verse en la figura 1, el mismo consta de tres componentes: la interfaz de configuración, el simulador del proceso de adquisición del dato y la aplicación de procesamiento y visualización del dato. Cada etapa genera un fichero que sirve de entrada a la siguiente.

La interfaz de configuración permite a través de una Interfaz Gráfica de Usuario generar un fichero con las principales configuraciones del simulador. A partir de este fichero y la selección de un modelo de tormenta, el simulador produce una "observación". Finalmente el componente de procesamiento de datos y visualización, tomando como partida el fichero con la observación y algunos parámetros de configuración, genera el resultado (producto) y lo visualiza.

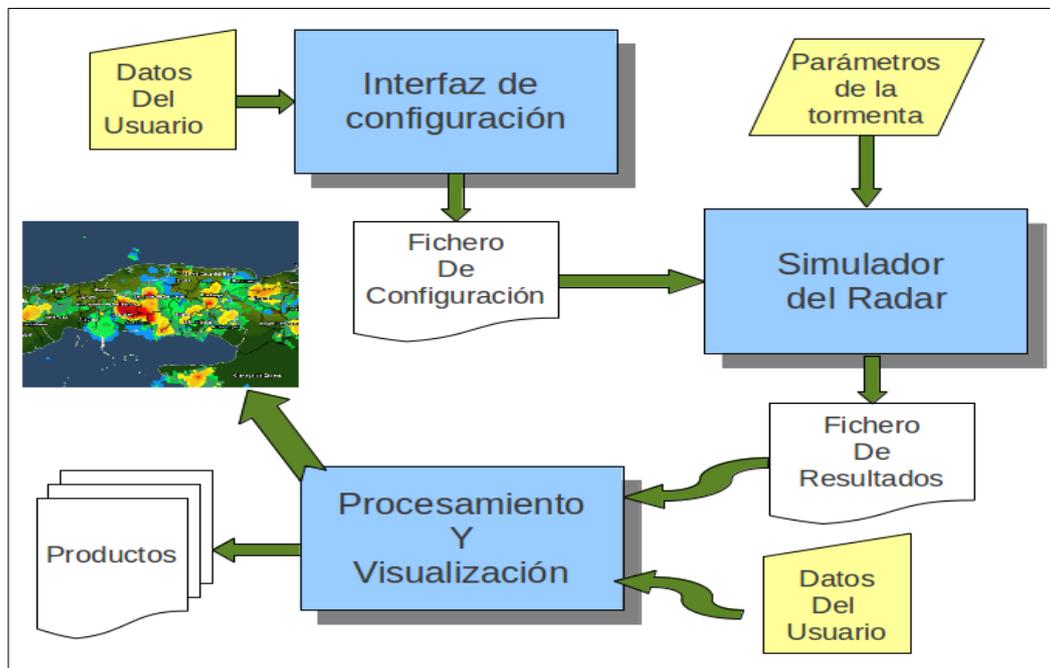


Fig. 1. Diagrama de flujo del Simulador del Radar.

La interfaz de configuración

El software de configuración permite la entrada de datos del usuario sobre los parámetros del radar, la observación y el simulador. Estos datos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de configuración del simulador.	
Parámetros de la observación	
Duración del pulso	2 μ s
Velocidad de rotación de la antena	4 rpm
Período de repetición del pulso	4 ms
Distancia de muestreo	150 m
Parámetros del radar	
Ancho de banda a -6dB	1.136 MHz
Ancho del Haz a -3dB	1.5 deg
Altura del radar sobre el nivel del mar	100 m
Coefficiente del patrón de la antena	-4031.43
Parámetros del simulador	
Extensión radial de la mitad del haz	250 m
Extensión angular del haz	1.5 deg

Parámetros de la observación

Los parámetros de la observación han sido seleccionados de forma similar a como funcionan los radares de Cuba. Esta selección no tiene mayor trascendencia para nuestros fines.

Parámetros del radar

El ancho de banda a -6dB se refiere al ancho de banda del receptor para esa atenuación. El ancho del haz a -3dB se refiere a la extensión angular del patrón de radiación del haz para ese nivel de atenuación.

La función *directivity*, que define el patrón de la distribución angular de la potencia (véase por ejemplo [11]) la asumimos simétrica en azimut y elevación. Tomando la aproximación de [1], tenemos:

$$G(\alpha, \theta)^2 = e^{C[(\alpha - \alpha_1)^2 - (\theta - \theta_1)^2]} \quad (1)$$

Donde C es el coeficiente del patrón de la antena. La posición de la antena está dada por α_1 y θ_1 . El valor utilizado para el caso que se muestra, se corresponde con las mediciones realizadas sobre el radar meteorológico de Camagüey [12].

Parámetros del simulador

La extensión del haz, tanto radial como angular, define la región de integración. Deben ser lo bastante grandes como para que la atenuación en distancia y ángulo sea de unos 12dB [1]. Los parámetros entrados en los datos se refieren a la mitad de la región de integración (medidos desde el centro del pulso en el espacio).

Simulador del proceso de adquisición del radar

El simulador del radar resuelve para cada punto de la observación la siguiente integral, como fue propuesto por [13]:

$$\bar{Z} = \iiint_V W(S_r) G(\alpha, \theta)^2 JD(S_r, \theta) Z dS_r d\theta d\alpha \quad (2)$$

Donde:

$$W(S_r) = \frac{1}{2} \left\{ \left[\operatorname{erf} \left(\frac{2aB_6}{c} (S_{r_0} - S_r + \frac{c\tau}{4}) \right) \right] - \left[\operatorname{erf} \left(\frac{2aB_6}{c} (S_{r_0} - S_r - \frac{c\tau}{4}) \right) \right] \right\} \quad (3)$$

es la distribución de la energía en el volumen del haz como dependencia de la distancia hasta el radar.

Esta expresión fue obtenida en [14], para receptores con respuesta gaussiana y pulsos rectangulares del transmisor. En esta expresión B_6 es el ancho de banda del receptor a -6dB, $a = \pi / \sqrt{\log 2}$ S_{r0} es la posición del centro del haz, c es la velocidad de la luz y τ la duración del pulso.

$$G(\alpha, \theta)^2 = e^{-2.7725 \frac{(\alpha - \alpha_1)^2}{\alpha_0}} e^{-2.7725 \frac{(\theta - \theta_1)^2}{\theta_0}} \quad (4)$$

Es la expresión para la distribución angular de la potencia, considerando solamente el lóbulo principal. En esta, α_0 y θ_0 representan el ancho de haz (a -3dB) en azimut y elevación respectivamente.

$$JD(S_r, \theta) = S_r^2 \cos(\theta) \quad (5)$$

Es el determinante jacobiano para realizar la integración en coordenadas esféricas.

Por último Z es el factor de reflectividad en unidades mm^6/m^3 .

La solución numérica de la integral (2) se hace por medio del algoritmo propuesto en [15], el cual fue portado al lenguaje Python por medio de la herramienta F2PY de *numpy*. El software realiza el procesamiento en paralelo para la región seleccionada, ajustándose automáticamente al número de núcleos que tenga la unidad de procesamiento. Esto ocurre de forma transparente, por medio de la biblioteca estándar de Python *multiprocessing*. Es importante notar que este procedimiento es computacionalmente costoso y tarda algunas horas en devolver el resultado.

Tolerancia relativa para el algoritmo de integración

Teniendo en cuenta que la integración se realiza sobre la magnitud Reflectividad en unidades de mm^6/m^3 y que se desea acotar el error del simulador en dBZ, se realiza el siguiente análisis para determinar la tolerancia relativa del algoritmo de integración:

$$A = 10 \log a \quad (6)$$

donde A es la magnitud de interés y a es la magnitud integrada.

$$A = \frac{10 \ln a}{\ln 10} = 4.34 \ln a \quad (7)$$

diferenciando:

$$\partial A = 4.34 \frac{\partial a}{a} \quad (8)$$

Aproximando para desviaciones pequeñas:

$$\Delta A = 4.34 \frac{\Delta a}{a} \text{ donde } \Delta A \text{ es la cota del error en dBZ y } \frac{\Delta a}{a} \text{ el error relativo en la magnitud integrada.}$$

Asumiendo una cota de error para el simulador de 0.1dBZ, tendremos:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta A}{4.34} = 0.023 \quad (9)$$

Procesamiento y visualización del dato

El paquete de procesamiento y visualización recibe como entrada un fichero que contiene la matriz 3D con las Reflectividades obtenidas en los puntos de medición y algunos parámetros que describen el proceso de adquisición del radar, permitiéndonos ubicar los valores de Reflectividades en el espacio. El primer paso es simular el proceso de integración post-detección que promedia algunas celdas en distancia y algunos rayos en azimut para reducir la varianza del dato (véase por ejemplo [11]). El número de celdas y rayos a utilizar es configurable. Para obtener el resultado que se muestra en la figura 4, se promediaron cinco celdas y 7 rayos para obtener un dato "primario" con celdas de 750m y 0.67grados.

En una segunda etapa se interpola el dato hacia coordenadas rectangulares. Con este fin se ha seguido el procedimiento descrito en [16]. El tamaño de las celdas escogido para obtener la imagen de la figura 4, es de 500m tanto en las aristas horizontales como en la vertical.

Las imágenes son generadas con el comando *imshow* de *matplotlib2* asignando a cada cuadrícula un color de acuerdo con la escala de colores (a la derecha en la figura 4) y su valor de reflectividad. El programa es capaz de generar tanto productos horizontales como verticales.

Validación

Para la validación del simulador vamos a valernos de las conclusiones de [13], sobre el proceso de escaneo de la atmósfera, en el cual se realiza un análisis cuantitativo de la observación de radar. De acuerdo con dicho trabajo, "las observaciones interpretadas como valores puntuales subestiman los valores máximos de Reflectividades en la atmósfera, con una subestimación que crece con la distancia (ósea, con el grado de suavidad provocada por el crecimiento del haz y por la integración post-detección). Por otro lado, en las regiones con un gradiente constante de Reflectividades, la medición del radar sobrestima los valores puntuales. Obteniéndose como resultado la uniformidad creciente de los patrones de precipitaciones, que es familiar a los meteorólogos".

Descripción de la tormenta

Los resultados mencionados anteriormente aplican para una distribución de Reflectividades en la atmósfera que varía linealmente con la distancia (en dBZ). A partir del trabajo de [17], se construyó una tormenta sintética con las características que se exponen a continuación.

La tormenta ha sido situada a 50km del radar con el centro en la línea del eje x y tiene un diámetro de 12km. Se seleccionó un perfil de Reflectividades como el que se muestra en la figura 2, que responde a la expresión:

$$Z_c = \begin{cases} 4.54 * 10^{-11}h^3 - 9.06 * 10^{-7}h^2 + 3.73 * 10^{-3}h + 45.25 & \text{para } 3000 < h < 10406 \\ 49.52 & \text{para } 0 < h < 3000 \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (10)$$

Donde Z_c es la reflectividad en el centro de la tormenta a una altura dada h .

Aplicando la ecuación (2) de [17], para una tormenta cilíndrica con el eje vertical nos queda para un punto interior a la tormenta:

$$Z_p = Z_c - 2\pi[(x - 50000)^2 + y^2] \quad (11)$$

Donde Z_p es la reflectividad en dBZ para un punto de la tormenta en el plano de altura h con coordenadas (x,y) . Se ha seleccionado un valor de -2 para el gradiente de Reflectividades que, de acuerdo con la figura 10 de [17], es un valor típico. El esquema de Reflectividades resultante se puede ver en una proyección horizontal en la figura 3.

Donde Z_p es la reflectividad en dBZ para un punto de la tormenta en el plano de altura h con coordenadas (x,y) . Se ha seleccionado un valor de -2 para el gradiente de Reflectividades que, de acuerdo con la figura 10 de [17], es un valor típico. El esquema de Reflectividades resultante se puede ver en una proyección horizontal en la figura 3.

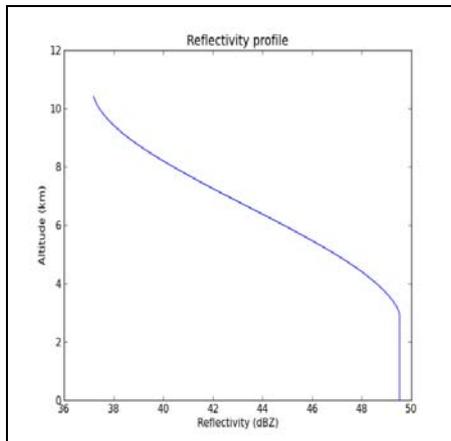


Fig. 2. Valores de Reflectividades de núcleo de la tormenta en función de la altura.

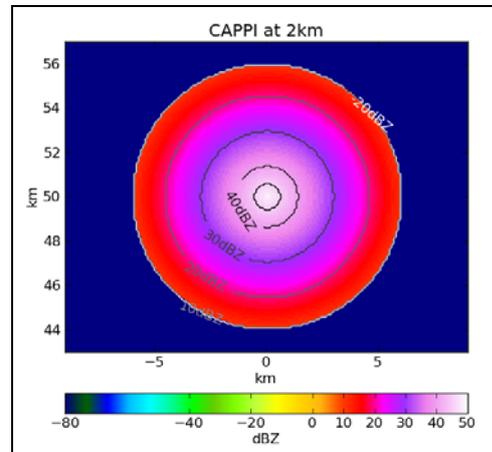


Fig. 3. CAPPI para la tormenta sintética (80dBZ para el valor nulo).

Procesamiento de las observaciones puntuales

El análisis se realizó solamente para los valores de y mayores que 0, puesto que existe simetría para la otra mitad de la tormenta y se tendría un resultado redundante con el doble del consumo de tiempo de cálculo del simulador. En la figura 4, se muestra un corte horizontal (CAPPI) de la observación para una altura de 2km.

Para zonas de la tormenta alejadas del centro del radar, se observan valores de Reflectividades que no están presentes en la tormenta sintética de partida que se muestra en la figura 3, (cerca del contorno de los 10dBZ). Esto es debido al volumen del pulso en el espacio. Para seleccionar los puntos de la observación útiles a fin de comparar con los valores puntuales, se definió una región interior de la tormenta para la cual el haz del radar no se sale de la zona de gradiente constante de Reflectividades. De un modo conservador, definimos una esfera cuyo radio es igual a la mayor distancia desde el punto central del volumen muestreado hasta la frontera del mismo para toda la región ocupada por la tormenta. Se consideraron para el análisis aquellos puntos con una distancia, hasta la superficie exterior de la tormenta, mayor que este radio.

Se obtuvieron las diferencias entre los valores medidos y sus correspondientes valores puntuales calculados por medio de (10) y (11). Es importante notar que los valores medidos corresponden a una celda volumétrica de 500m de lado. En la figura 5, se muestra el diagrama de caja para cada ángulo de elevación, donde los valores negativos significan una sobrestimación de los valores puntuales de la tormenta. Los positivos pueden verse como valores *atípicos* representados por pequeños círculos encima de los bigotes de los diagrama de caja, indicando una subestimación.

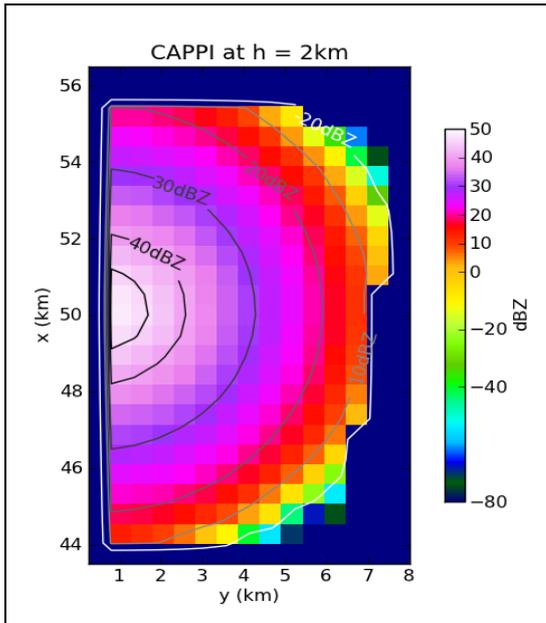


Fig. 3. Reflectividades obtenidas por el simulador.

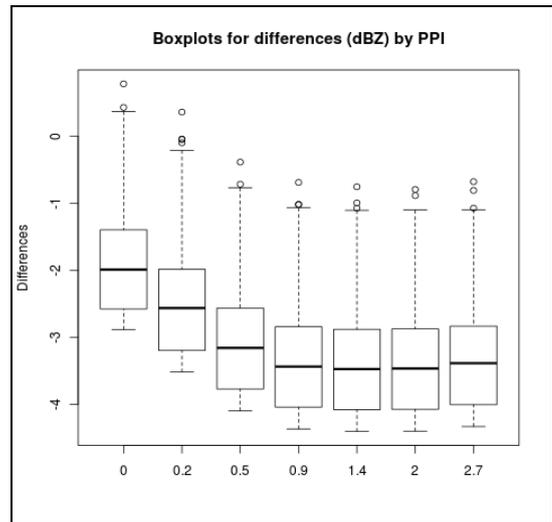


Fig. 4. Diferencias por ángulo de elevación.

La figura 6, muestra un diagrama de dispersión de las diferencias en función de la distancia para el ángulo de elevación de la antena de cero grados. Puede notarse una tendencia al aumento de las diferencias con el aumento de la distancia y por lo tanto con el aumento del grado de suavizado del haz de radar. Podemos ver que los valores atípicos (subestimaciones), se producen cerca de los 50km donde se encuentra justamente el máximo de Reflectividades. Estos resultados concuerdan con las conclusiones de [13], corroborando así la validez de nuestro simulador numérico en base al análisis analítico de este trabajo.

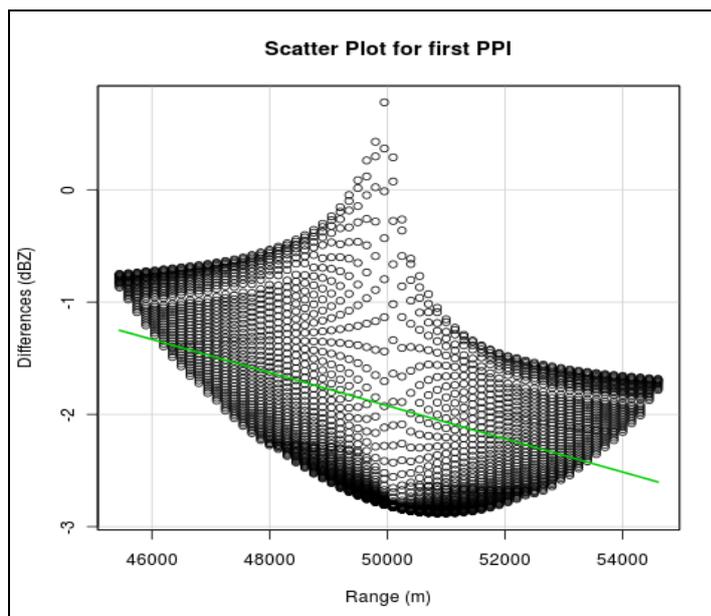


Fig. 5. Diagrama de dispersión para ángulo de elevación cero.

CONCLUSIONES

El presente trabajo aporta un simulador de radar que parte de la distribución espacial de reflectividades. Esto permite obviar la compleja relación existente entre la estructura física de un objeto meteorológico y su reflectividad. Este enfoque posibilita estudiar de una forma clara la incidencia del patrón de escaneo de la atmósfera y el esquema de adquisición y procesamientos de los datos, sobre la percepción de un blanco meteorológico. El simulador obtenido ha sido validado contra los resultados del estudio analítico del proceso de observación de radar [13]. La concordancia entre los resultados experimentales y las predicciones de [13], para el mismo tipo de tormenta permite la aplicación del simulador al estudio de otros patrones de reflectividades.

REFERENCIAS

- [1] CAPSONI, Carlo; D'AMICO, Michele, "A Physically Based Radar Simulator". In: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1998, vol.15, n.2, p. 593–598, ISSN 0739-0572, Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<0593:APBRS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0593:APBRS>2.0.CO;2)
- [2] HAASE, G. and FORTELIUS, C., "Simulation of radar reflectivities using Hirlam forecasts". HIRLAM Tech. Rep, 2001, 24 p.
- [3] ULABY, F.T., MOORE, R.K. and FUNG, A.K., "Microwave remote sensing: Active and passive". Vol.1- Microwave remote sensing fundamentals and radiometry. Longman Higher Education, 1981, vol.1, 456 p. ISBN 9780890061909.
- [4] CAUMONT, Olivier *et al.*, "A radar simulator as a validation tool for very short-term forecasts". In: International Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting WSN05 [online]. S.l.: s.n., 2005, n.3, p.6. Disponible en: <http://www.meteo.fr/cic/wsn05/DVD/presentations/FRI-am/Caumont-8.05/FRI-am-Caumont-8.05.pdf>.
- [5] MOLINI, L., *et al.*, "Assessing uncertainty in radar measurements on simplified meteorological scenarios". In: Adv. Geosci. 20 February 2006, vol.7, p. 141–146.
- [6] HAYNES, J. M, *et al.*, "A Multipurpose Radar Simulation Package: QuickBeam". In: Bulletin of the American Meteorological Society. 2007, vol.88, n.11, p. 1723–1727.
- [7] ELMZOUGH, A., *et al.*, "2d weather radar data simulator using specific reflectivity and phase measurements for the rain rate estimation algorithms validation". In: European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2007). S.l.: s.n., 2007. p.1663–1666.
- [8] ZAHIRI, E-P., *et al.*, V. "Use of a Radar Simulator on the Output Fields from a Numerical Mesoscale Model to Analyze X-Band Rain Estimators". In: J. Atmos. Oceanic Technol. 2008, vol.25, n.3, p. 341–367. ISSN 0739-0572.
- [9] SCHUTGENS, NAJ., "Simulating range oversampled Doppler Radar profiles of inhomogeneous target". In: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2008, vol.25, n.9, p. 1514–1528. ISSN 0739-0572
- [10] WOOD, Vincent T, *et al.*, "Simulated WSR-88D Velocity and Reflectivity Signatures of Numerically Modeled Tornadoes". In: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2009, vol.26, n.5, p. 876–893. ISSN 0739-0572
- [11] RJ DOVIK and ZRNIC, D. Doppler radar and weather observations. 2da Edición, San Diego: Academic Press, 1993, 562 p., ISBN 0122214226.
- [12] PEÑA, A., *et al.*, "Modernization of the Cuban weather radar network". In: Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. 2000, vol.25, n.10-12, p. 1169–1171.
- [13] ZAWADZKI, I. The quantitative interpretation of weather radar measurements. In: Atmosphere-Ocean. June 1982, vol.20, n.2, p. 158–180. ISSN 0004-6973

- [14] DOVIAK, RJ and ZRNIC, D. Receiver Bandwidth Effect on Reflectivity and Doppler Velocity Estimates. In: Journal of Applied Meteorology. 1979, vol.18, p. 69–75, ISSN 0021-8952.
- [15] BERNTSEN, J., *et al.*, “Algorithm 720: An algorithm for adaptive cubature over a collection of 3-dimensional simplices”. In: ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). 1993, vol.19, n.3, p. 320–332.
- [16] MOHR, C. G and VAUGHAN, R. L.,” An Economical Procedure for Cartesian Interpolation and Display of Reflectivity Factor Data in Three-Dimensional Space”. In: Journal of Applied Meteorology. 1979, vol. 18, n. 5, p. 661–670, ISSN 0021-8952
- [17] KONRAD, Thomas G., “Statistical Models of Summer Rainshowers Derived from Fine-Scale Radar Observations”. In: Journal of Applied Meteorology. 1978, vol.17, n.2, p. 171–188, ISSN 0021-8952.

AUTORES

MSc. Vladimir Rodríguez Diez.

Asistente. Ingeniero Electricista, Universidad de Camagüey, 2008, Máster en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, 2009. En la actualidad trabaja en el Departamento Ing. Eléctrica de la Facultad Electromecánica, de la Universidad de Camagüey.

e-mail : vladimir.rodriguez@reduc.edu.cu

Dra. Milagros Diez Rodríguez.

Profesora Titular. Ingeniera en Automática, Telemecánica y Comunicaciones para el Transporte Ferroviario, en el Instituto de Transporte de Moscú, 1981. Dra. En Ciencias Técnicas, UCLV, 1999. Trabajó como profesora invitada en el Instituto Técnico de Monterrey así como en varias universidades de Venezuela. En la actualidad trabaja en el Departamento Ing. Eléctrica de la Facultad Electromecánica, de la Universidad de Camagüey.

e-mail : milagros.diez@reduc.edu.cu

Orlando Lázaro Rodríguez González.

Ingeniero Eléctrico, especialista en Automática, Telemecánica y Comunicaciones para el Transporte Ferroviario, en el Instituto de Transporte de Moscú, 1980. Doctor en Ciencias Técnicas Investigador Auxiliar .Jefe del Centro Nacional de Radares del Instituto de Meteorología (2003 hasta la fecha). Profesor Titular Adjunto de la Universidad de Camagüey. Cuba.

e-mail : orlando@cmw.insmet.cu