

Pronóstico de ocurrencia de microcorrientes descendentes en el Aeropuerto José Martí utilizando un radar meteorológico

Prediction of the occurrence of descending microcurrents at the José Martí Airport using a meteorological radar

Reynaldo Luis Rodríguez-Arias[✉], Juan Ayón-Alfonso

Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicadas (InSTEC), La Habana, Cuba

RESUMEN: La cizalladura del viento a poca altura ha sido la causa de numerosos incidentes y accidentes de aviación. Este trabajo aborda el desarrollo de un método para el pronóstico a muy corto plazo de ocurrencia de cizalladura del viento a poca altura provocada por microcorrientes descendentes en el Aeropuerto Internacional “José Martí” de La Habana. Utilizando el software Vesta Proceso para el análisis del radar meteorológico de Casablanca, así como de los anemómetros instalados en dicho aeropuerto, se identificaron los patrones de radioecos asociados con microcorrientes descendentes que producen rachas de viento por encima de 30 nudos. Para ello se analizaron las imágenes de radar meteorológico teniendo en cuenta la intensidad de los ecos en dBZ, la altura que alcanzan y la morfología de los mismos, así como la cercanía al aeropuerto y movimiento de las nubes cumulonimbo que pueden representar un peligro para este y las operaciones de tráfico aéreo. Se estableció un procedimiento para emitir alertas y alarmas de microcorrientes descendentes para el aeropuerto.

Palabras clave: Cizalladura del viento, radar, microcorrientes descendentes, pronóstico a muy corto plazo.

ABSTRACT: The low level wind shear has been the cause of many aviation incidents and accidents. This work focused in the development of a nowcasting method for occurrence of low level wind shear produced by microbursts in the Havana’s International Airport “José Martí”. Using Vesta Process software for the analysis of Casablanca’s radar images, as well as three anemometers installed in the airport, it was identified patterns of radioechoes associated with microbursts which produced wind gusts higher than 30 knots. For that, it was analyzed the meteorological radar images considering echoes intensity in dBZ, the reached height and the morphology of them, as well as the proximity to the airport and the movement of the cumulonimbo clouds that could represent hazard for it and the air traffic operations. It was established a procedure to emite microbursts alerts and alarms for the airport.

Key words: Wind shear, radar, microburst, nowcasting.



<http://opn.to/a/vd84J>

[✉] Autor para correspondencia: Reynaldo Luis Rodríguez-Arias. E-mail: reyluis171293@gmail.com

Recibido: 14/8/2017

Aceptado: 20/6/2018

INTRODUCCIÓN

Si bien la cizalladura del viento puede hallarse en todos los niveles de la atmósfera, su presencia en la capa inferior 500 m sobre el nivel del suelo reviste importancia especial para las aeronaves durante el despegue y el aterrizaje, ya que durante estas fases, las aeronaves poseen muy baja velocidad con respecto a la superficie. En ambas fases del vuelo, se despega con el viento de frente para ayudar a la sustentación, por lo que, cualquier cambio brusco en su intensidad o dirección, afectaría a la aeronave negativamente pudiendo esto conllevar a un accidente catastrófico. Por solo señalar un ejemplo entre 1964 y 1983 se citó la cizalladura del viento a baja altura en al menos 28 accidentes o incidentes de grandes aeronaves de transporte en los que, en conjunto, hubo más de 500 muertos y 200 heridos ([OACI, 2005](#)), por lo que está demás destacar la importancia del estudio de esta y de los fenómenos que la producen.

Varios son los fenómenos meteorológicos que producen cizalladura del viento a poca altura, entre estos fenómenos se pueden citar las microcorrientes descendentes o microaeroavalanchas (microbursts); definidas por Fujita en 1978 como una corriente descendente que origina una repentina explosión de vientos próxima a la superficie que ocasiona estragos en una extensión horizontal de 0,4 a 4 km. Por su pequeña escala espacio-temporal se hacen muy difíciles de detectar o pronosticar, siendo así una gran amenaza para la aviación. Dada la serie de incidentes y accidentes de aviación provocados por este fenómeno se llevaron a cabo desde 1978 varios proyectos de investigación con el fin de comprender mejor el fenómeno y de lograr una mayor seguridad operacional en los vuelos. Los esfuerzos que siguieron en los años 1990 se centraron en la detección de la cizalladura del viento causada por dichos fenómenos, logrando avances considerables en los radares Doppler y la tecnología de procesamiento de señales que llevaron al

desarrollo de sistemas de detección y avisos de cizalladura del viento basados en tierra, especializados y muy eficaces, entre los que podemos citar el LLWAS que consiste en un sistema anemométrico distribuido en el aeropuerto, el TDWR, que es un radar Doppler de mayor resolución espacio-temporal adaptado para la vigilancia meteorológica en las terminales aeroportuarias, y el Sistema Meteorológico de Terminal Integrado (ITWS), que integra los dos productos de los equipos anteriores eliminando así las deficiencias de uno y otro, permitiendo la detección y observación operacionales en tiempo real de cizalladura del viento a poca altura mediante equipo terrestre. Sin embargo, dicho equipamiento perfeccionado es costoso para la compra y el mantenimiento, por lo que su uso se limita a aeropuertos de gran intensidad de tráfico que también estén afectados por cizalladura del viento y especialmente microcorrientes descendentes ([OACI 2005](#)).

En Cuba no son muchos los estudios realizados sobre la cizalladura del viento a poca altura o sobre el pronóstico de microcorrientes descendentes. En el año 1991, se llevó a cabo una investigación para desarrollar un sistema anemométrico para la detección de la cizalladura del viento a bajo nivel que brindaría vigilancia al Aeropuerto Internacional “José Martí”. Se había tomado la decisión de hacerlo, como una de las medidas derivadas del accidente catastrófico ocurrido en septiembre del año 1989 y no poder adquirir el equipamiento desarrollado en los Estados Unidos. Especialistas del Instituto de Aeronáutica Civil de Cuba (IACC) y del Instituto Central de Investigaciones Digitales (ICID) realizaron los estudios correspondientes y desarrollaron el sistema, el cual no pudo ser instalado al acentuarse los problemas económicos del país que no permitió la compra del conjunto de anemómetros para ser instalados alrededor del mencionado aeropuerto. A pesar de esto, fueron establecidos procedimientos operacionales ante la presencia de nubes cumulonimbo en las cercanías del

aeropuerto. Por tanto este trabajo se hace necesario dado que el Aeropuerto Internacional “José Martí”, el cual es el principal aeropuerto del país para la realización de vuelos internacionales y domésticos, no cuenta con métodos de alerta de cizalladura del viento a poca altura provocada por microcorrientes descendentes ni con instrumentos suficientes para la detección de la misma, siendo este el aeropuerto de Cuba más afectado por la cizalladura del viento a bajo nivel generada por tormentas (Tomé, 2015), la cual ha producido varios incidentes y un accidente catastrófico.

La imposibilidad de la compra de equipamiento especializado ha llevado a la búsqueda de una solución alternativa a este problema. El radar meteorológico de Casablanca, por las características que este posee y su proximidad al aeropuerto puede ser efectivo para realizar la vigilancia meteorológica en el mismo, por tanto para dar solución al problema de cómo confeccionar pronósticos a muy corto plazo sobre la posible ocurrencia de cizalladura del viento a bajo nivel producida por microcorrientes descendentes en el Aeropuerto Internacional de La Habana se parte de la hipótesis de que mediante el análisis de las imágenes del radar meteorológico de Casablanca y los datos de viento en superficie de los 3 anemómetros del aeropuerto de La Habana se puede crear un método para el pronóstico a muy corto plazo de ocurrencia de cizalladura del viento a bajo nivel provocada por microcorrientes descendentes. Este trabajo tiene como **objetivo general** desarrollar un método para el pronóstico a muy corto plazo de ocurrencia de cizalladura del viento a bajo nivel provocada por microcorrientes descendentes en el aeropuerto de La Habana (MUHA) mediante el uso del radar meteorológico de la estación de Casablanca y los 3 anemómetros con los que cuenta el aeropuerto.

MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Materiales utilizados

Para la realización de este estudio, se contó con los archivos “WIND_KT.his” con registros de viento de los tres sensores ultrasónicos de viento del Aeropuerto Internacional “José Martí” de La Habana; pertenecientes al año 2016, así como los archivos “REPORT.his” con las observaciones METAR y SPECI, correspondientes al mismo aeropuerto y al mismo período.

También se tuvo acceso a las imágenes del radar meteorológico de la estación meteorológica de Casablanca, La Habana, pertenecientes al Centro de Radares de Cuba correspondientes al período en estudio.

2.2 Características del Aeropuerto Internacional “José Martí” (MUHA)

El Aeropuerto Internacional “José Martí” se localiza en los 22°59' N y los 82°24' W, en el municipio Boyeros, La Habana, Cuba. Es el aeropuerto principal de vuelos internacionales y domésticos de Cuba. Posee una elevación de 64 m sobre el nivel medio del mar. La pista posee una orientación con rumbos recíprocos de 60°/240° magnéticos, lo que la identifica como pista 06 o pista 24, dependiendo del rumbo utilizado para aterrizar. La longitud de la misma es de 4 km.

2.3 Instrumentos utilizados

2.3.1 Sensores ultrasónicos de viento (anemómetros)

El aeropuerto José Martí cuenta con tres anemómetros instalados a lo largo de la pista 06/24, a una distancia mínima normada, lo cual permite obtener información representativa de las condiciones de viento en la pista, cumpliendo dichas normas para no ser considerados obstáculos para las operaciones aéreas.

Estos sensores ultrasónicos de viento Vaisala WINDCAP® WMT700 miden la velocidad y la dirección del viento, y envían los resultados de las mediciones a los sistemas de

adquisición de datos, en los que se registran la velocidad y dirección del viento a cada minuto; además, brindan información del viento máximo, mínimo y medio cada 2 y 10 minutos respectivamente, así como la dirección y velocidad de la racha máxima medida en 10 min. Dichos sensores de viento están distribuidos de la siguiente forma:

El sensor 06 y 24 a 150 m de la zona de toma de contacto de cada pista y el sensor MID a 150 m del centro de la pista ([Figura 1](#)).

2.3.2 Radar meteorológico

El radar meteorológico de Casablanca se encuentra ubicado en los 23°08' N y los 82°20' W, a una altura de 62m sobre el nivel medio del mar. Se encuentra a una distancia de 21 km al ESE del Aeropuerto de La Habana.

Es un radar MRL-5 de fabricación soviética, con una potencia de 850 kW y un alcance de 450 km, y aunque posee longitudes de onda de 3-10 cm, opera en la banda S (10 cm), ya que debido al tamaño de las gotas de agua en el trópico esta es la óptima para la vigilancia del tiempo ([Sánchez, 2014](#)).

2.4 Herramientas informáticas

2.4.1 Microsoft Excel 2007

Para la organización y análisis de los datos se utilizó Microsoft Excel del paquete de Microsoft Office 2007, con el cual se crearon tablas con la información del viento de los tres

anemómetros para cada día estudiado (ver [Tabla 1](#)).

La primera columna muestra la fecha y hora UTC. Las columnas “ws2x”, muestran la velocidad máxima del viento (racha máxima) en KT (nudos), medida en dos minutos. “06”, “mid” y “24” son los indicativos de cada anemómetro, según su posición en la pista. Las columnas “gd”, seguidas del indicador del anemómetro, indican la dirección de la racha máxima medida en grados desde 0-360°.

En esta tabla se buscan los valores de velocidad del viento superiores a 30 KT, la cual es el rango más bajo de velocidad del viento de una microcorriente descendente reportado por [Wakimoto \(2001\)](#).

2.4.2 Vesta-Proceso

El Vesta-Proceso es el software utilizado por el Centro Nacional de Radares para el procesamiento de las observaciones del radar. El mismo permite realizar una serie de análisis a las imágenes. Para este estudio se utilizaron los productos: “PPI” (indicador de posición en el plano), “Máximos” (vista superior de los máximos valores de reflectividad de los ecos entre todos los PPI), “RHI” (Indicador de distancia y altitud) y “Corte” (distribución vertical de la reflectividad en cualquier dirección en el volumen de radio-localización.).

En la [Figura 2](#) la cruz roja representa la posición del radar meteorológico, mientras que

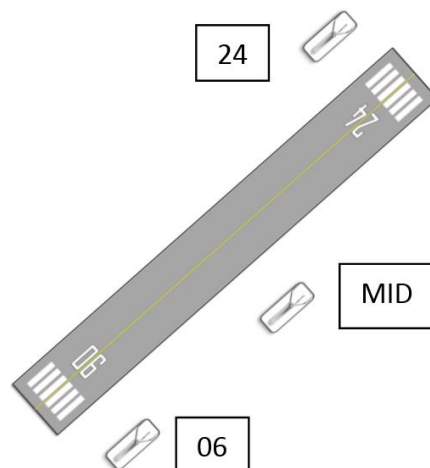


Figura 1. Distribución de los sensores de viento en el campo del aeropuerto

Tabla 1. Ejemplo de registro del viento en superficie de los 3 anemómetros del aeropuerto MUHA

Fecha	ws2x06	gd06	ws2xmid	gdmid	ws2x24	gd24
21/06/2016 20:50	34.21	41	31.49	359	31.49	285
21/06/2016 20:51	33.43	41	37.9	359	31.49	285
21/06/2016 20:52	31.68	41	38.29	359	33.63	285
21/06/2016 20:53	31.68	41	38.29	313	35.96	255
21/06/2016 20:54	33.63	41	26.44	313	36.74	260
21/06/2016 20:55	38.49	41	30.52	313	36.74	260

la cruz blanca representa la posición aproximada de la cabecera 24 y del anemómetro cercano a esta, y el triángulo naranja representa la posición aproximada de la cabecera 06 y del anemómetro cercano a esta.

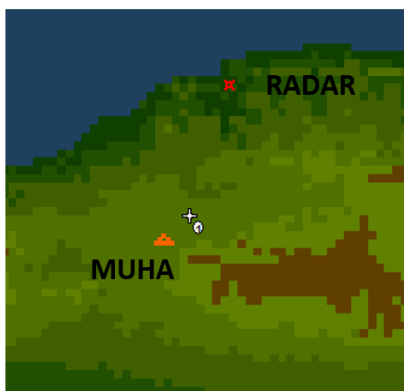


Figura 2. Ventana del Vesta Proceso de la región de estudio

2.5 Metodología utilizada

Para la realización del método de pronóstico de ocurrencia de microcorrientes descendentes se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos en el análisis de las imágenes del radar.

1. **La intensidad de los ecos:** El valor de reflectividad de los ecos es un indicador del contenido de agua o partículas de hielo que contienen las nubes. A mayores valores de reflectividad, mayores concentraciones de gotas de agua o partículas de hielo. Según De La Nuez (2010), las aeroavalanchas ocurridas en la región de estudio estaban asociadas a valores de reflectividad de 55 dBZ como promedio. Para este método se propuso tener en cuenta los ecos superiores a 45 dBZ.
2. **Altura de los ecos:** Según los resultados de Foster (1958), la mayoría de los arrastres del aire se originan en las capas medias de la atmósfera (aproximadamente 3-7 km). En este método se tuvo en cuenta los ecos superiores a 45 dBZ situados a alturas superiores a los 3 km como un indicador de peligrosidad para que se produzcan microcorrientes descendentes.
3. **La morfología de los ecos:** El reconocimiento de los patrones de radioecos que producen tiempo severo es necesario para el pronóstico de ocurrencia de microcorrientes descendentes. Para el desarrollo del método se contempló fundamentalmente los patrones que indicaran mayor organización de las tormentas, como clúster de multiceldas y líneas de multiceldas. El reconocimiento de otros indicadores de fortaleza de las corrientes verticales también es necesario como las regiones de ecos débiles y concentraciones de ecos fuertes. Estas se observan haciendo cortes verticales.
4. **Estado de la tormenta:** Conocer el estado de una tormenta también es importante para el pronóstico. El análisis de los diferentes planos PPI a diferentes elevaciones permitió conocer el desarrollo vertical de las mismas teniendo en cuenta que la altura de los ecos más fuertes indicaba la presencia de corrientes ascendentes o descendentes, conociendo así el estado en que se encontraban. Se consideró como

indicador de que una tormenta se encontraba en:

a) fase de desarrollo, cuando en el paso de una observación a otra se observó que a mayores alturas había aumentado la intensidad de los ecos;

b) fase de madurez, cuando en el paso de una observación a otra estaban presentes dos regiones de ecos fuertes separadas y ubicadas a diferentes alturas, indicando la presencia de corrientes ascendentes y descendentes; y

c) fase de disipación, si en el paso de una observación a otra se observaba que los ecos a mayor altura disminuían su valor y que a menores alturas aumentaban.

El descenso de la máxima señal radárica es una indicación de que se están iniciando las corrientes descendentes y es el principal indicador para diagnosticar la ocurrencia de microcorrientes descendentes. A mayor altura que alcancen los ecos, mayor será la posibilidad de que se produzca tiempo severo en superficie con vientos que superen los 30 KT.

5. **La proximidad de las tormentas al aeropuerto y movimiento de las mismas:**

Los frentes de rachas producidos por las corrientes descendentes pueden avanzar varios kilómetros por delante de la tormenta, por lo que se tuvo en cuenta en este método no solo las tormentas que se encontraban sobre el aeropuerto, sino también las próximas al mismo y con trayectorias que representarían peligro para este y las operaciones de tráfico aéreo. De igual forma se tuvo en cuenta la dirección de propagación de la tormenta para pronosticar la intensidad con que esta afectaría al aeropuerto así como la dirección del viento en superficie, conociendo que cuando una tormenta está en movimiento, por lo general la microcorriente descendente se produce de forma oblicua, tornándose los vientos en superficie más violentos y encontrándose la mayor

cizalladura del viento en el sentido de avance de esta ([Caymares, 2015](#)).

Tomando como referencia algunas de las normas establecidas para el pronóstico de cizalladura del viento usadas en otros países ([NTC de la Dirección General de Aeronáutica Civil de Perú del 2012](#)), en este método se analizaron las tormentas que se encontraban a 20 km de distancia del aeropuerto teniendo en cuenta su evolución y trayectoria. Solo se presentaron dificultades para estudiar las tormentas que provenían de región norte dado que a esta distancia se encuentra la zona de silencio del radar y no se tienen información a 5 km de altura a distancias menores de 13 km del radar. La mayor cercanía de los ecos al aeropuerto permitió medir mejor la velocidad y dirección del viento en superficie y corroborar la eficacia del método.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Aplicación del método

Para la aplicación del método propuesto, se llevó a cabo el análisis de las imágenes del radar meteorológico de Casablanca correspondientes al año 2016, para aquellos días en que se registraron en el aeropuerto MUHA rachas de viento superiores a los 30 KT, al considerar que pudieran estar asociadas a la ocurrencia de microcorrientes descendentes.

Al momento de aplicar el método se había considerado como patrón de peligrosidad las tormentas con ecos superiores a 45 dBZ por encima de los 3 km de altura. Como resultado de la aplicación del método se observó que sólo las tormentas con presencia de ecos superiores a 50 dBZ por encima de los 5 km de altura produjeron microcorrientes descendentes.

El análisis de los PPI y el producto Máximos permitió reconocer dos patrones morfológicos de ecos asociados a la ocurrencia de microcorrientes descendentes: Clústeres de multiceldas y líneas de multiceldas. Las Figuras

3, 4 y 5 muestran un ejemplo de los patrones identificados.

La [Figura 3](#) muestra dos celdas divididas en diferentes estados, una con corrientes ascendentes y otra con corrientes descendentes. Este patrón permite identificar una tormenta multiceldas en fase de madurez. En este caso las celdas están agrupadas y se define como un clúster.

La [Figura 4](#) muestra una línea de multiceldas, identificada por la alineación de las distintas celdas de la tormenta en diferentes estados.

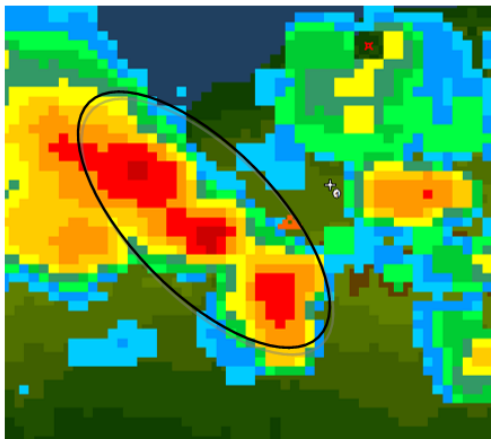


Figura 4. Producto: Máximos. 17:20 15/07/2016

En el análisis de la estructura vertical de las tormentas usando el producto “Corte” se pudo identificar corrientes ascendentes y descendentes. Las regiones de ecos débiles

como la señalada en la [Figura 5](#) permitió identificar las fuertes corrientes ascendentes y las concentraciones de ecos más fuertes próximos a la superficie, como la circulada en la [Figura 5](#) se asociaron a corrientes y microcorrientes descendentes.

En el análisis de las imágenes de radar meteorológico se observó que cuando se encontraba una tormenta en fase de madurez, a menos de 10 km del aeropuerto, y moviéndose en dirección a éste, con un área de ecos rojos por encima de los 5 km, se produjo el descenso de estos ecos en un promedio de diez minutos posteriores a la observación, y se registraron en superficie rachas de viento superiores a los 30 KT.

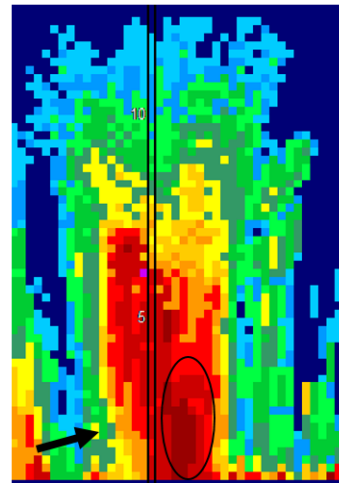


Figura 5. Producto “Máximos N-S” 16:10 hora local. 3/07/2016

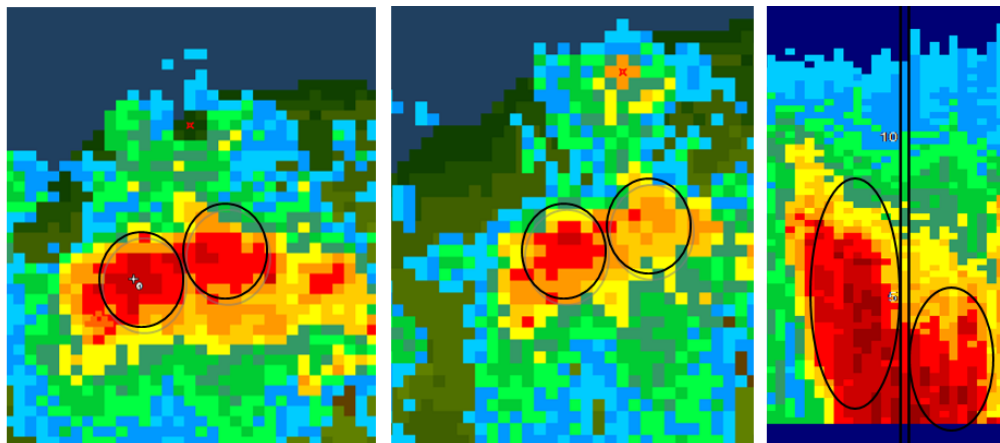


Figura 3. Producto: “Máximos” (izquierda), PPI a elevación $\Theta=13.5^\circ$ (centro), Máximos N-S (derecha). 16:20 hora local. 3/07/2016

Cuando se observó en las imágenes del radar el descenso en los ecos superiores a 50 dBZ, encontrándose éstos muy próximos a la superficie, se registraron rachas superiores a 30 KT dentro de los 5 minutos siguientes a la observación.

Cuando los ecos se encontraban entre los 5 km y los 7 km de altura antes de producirse el descenso se registraron como promedio, rachas de 34 KT; y cuando los ecos superiores a 50 dBZ se situaban por encima de los 7 km antes del descenso se registraron rachas de 42 KT como promedio.

La proximidad al aeropuerto de las microcorrientes descendentes permitió medir mejor la dirección e intensidad de sus vientos. A pesar de que no todas las microcorrientes descendentes afectaron al aeropuerto directamente se pudo registrar 5 de ellas que se produjeron cercanas al mismo. Estas solo se registraron, o en el anemómetro de la cabecera de la pista 06 o el de la cabecera de la pista 24. Por su lejanía se registraron rachas próximas a los 30 KT y en ocasiones superiores. Estas afectaciones se produjeron por los frentes de rachas y fronteras de exflujo de las microcorrientes descendentes.

El movimiento de las tormentas también influyó en la intensidad de la afectación; cuando las mismas se movían en dirección al

aeropuerto se registraron los vientos más fuertes que cuando se desplazaron de forma paralela o alejándose del mismo.

En su totalidad las microcorrientes descendentes que afectaron al aeropuerto con rachas de vientos superiores a 30 KT estaban asociadas a tormentas de multiceldas con ecos con valores de reflectividad superiores a los 50 dBZ a alturas por encima de los 5 km.

3.2 Análisis estadístico

Para este estudio fueron analizados los datos de viento e imágenes de radar del año 2016. De los 366 días analizados se encontraron 19 en los que se produjeron cizalladura del viento a poca altura asociada a microcorrientes descendentes. En 11 de estos días ocurrieron más de una microcorriente descendente asociadas a una misma tormenta. En total 36 microcorrientes descendentes afectaron al aeropuerto MUHA.

El [Figura 6](#) muestra en color azul la cantidad de días en que el aeropuerto fue afectado por tormentas que produjeron microcorrientes descendentes. En color verde se muestra la cantidad de microcorrientes descendentes que afectaron al aeropuerto.

En el gráfico se observa un máximo absoluto en el mes de julio, coincidiendo con uno de los resultados de [Tomé \(2015\)](#) de que el aeropuerto de La Habana es más afectado por la cizalladura

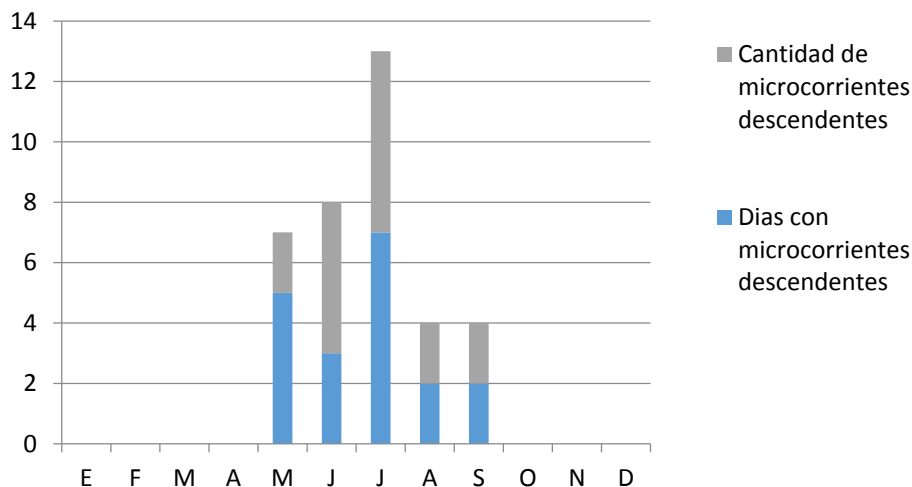


Figura 6. Distribución mensual de las microcorrientes descendentes

del viento a poca altura asociada a tormentas en este mes.

La mayor parte de las microcorrientes descendentes que afectaron al aeropuerto lo hicieron en el horario comprendido entre las 15:00 y 17:00 hora local (donde se produjo el 83.3% de los casos), con un máximo absoluto a las 16:00 (el cual representa el 47.2% del total), como se observa en el [Figura 7](#).

3.3 Método para el pronóstico de ocurrencia de microcorrientes descendentes en el Aeropuerto Internacional “José Martí”

Después de haber aplicado la metodología propuesta a los 19 casos de estudio se definió el método para el pronóstico de ocurrencia de microcorrientes descendentes de la siguiente forma:

Para la aplicación del método es necesario disponer de las observaciones del radar meteorológico de la estación meteorológica de Casablanca en tiempo real, así como del software Vesta Proceso que se utilizará para el procesamiento de las imágenes de radar.

En presencia de nubes del tipo cumulonimbo y en un área con un radio de 20 km con centro en el Aeropuerto Internacional “José Martí”, se procederá de la forma siguiente:

1. Se localizarán las nubes cumulonimbo que posean ecos con valores de reflectividad superiores a 50 dBZ utilizando para ello el producto “Máximos”.
2. Una vez localizados todos estos ecos, se determinará la altura que alcanzan mediante el uso del producto “Corte” del Vesta Proceso o de los planos PPI con inclinaciones desde $\Theta=1.4^\circ$ hasta $\Theta= 21^\circ$, teniendo en cuenta que las tormentas que presentan ecos superiores a 50 dBZ a alturas de 5 km o más pueden producir microcorrientes descendentes.
3. Se procederá a seleccionar aquellas tormentas con mayor grado de organización, atendiendo a los patrones morfológicos que presenten. Las líneas y clústeres de multiceldas tienen mayor posibilidad de generar microcorrientes descendentes fuertes que tormentas de celda simple.
4. Con el uso de los planos PPI a diferentes grados de elevación de la antena del radar en una secuencia de dos observaciones consecutivas (10 minutos), se determinará la fase en que se encuentran cada una de las tormentas identificadas.

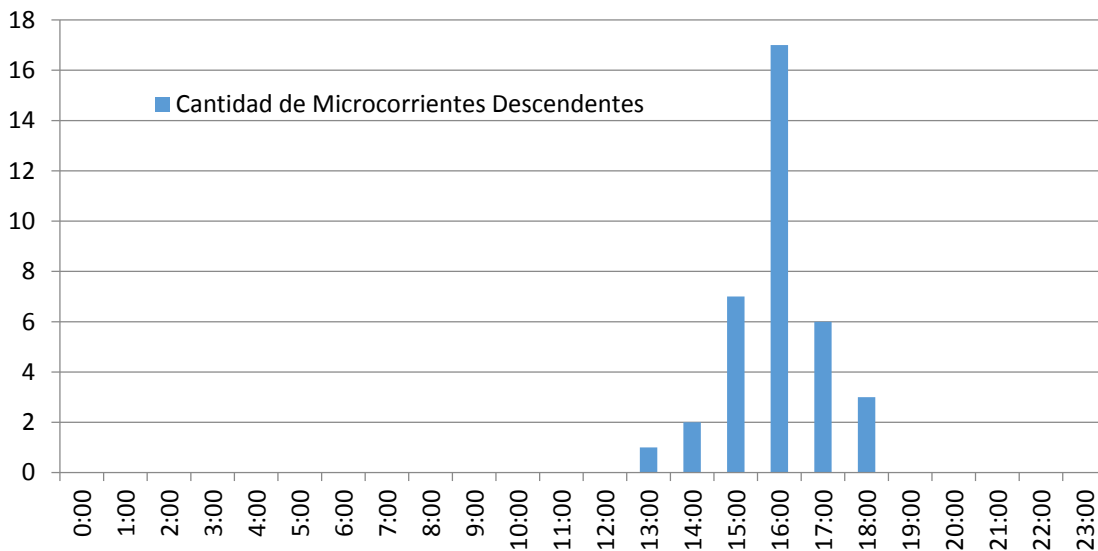


Figura 7. Distribución horaria de las microcorrientes descendentes

5. Se tendrán en cuenta sólo aquellas tormentas que se muevan en dirección al aeropuerto o próximas a este, calculando su dirección y velocidad aproximada mediante el uso de la herramienta del Vesta Proceso diseñada para tal fin.

Una vez evaluada la situación meteorológica y que se tengan definidas las tormentas que pueden representar un peligro para el aeropuerto, se tomarán en cuenta los siguientes aspectos para realizar un pronóstico a muy corto plazo de ocurrencia de microcorrientes descendentes:

1. Se emitirá una alerta debido a la posible ocurrencia de cizalladura del viento a poca altura por microcorriente descendente para el aeropuerto, cuando una tormenta en fase de desarrollo o madurez, y moviéndose en dirección al mismo, se encuentre a menos de 10 km de cualquier extremo de la pista. Si en la siguiente observación (10 minutos) aún no se ha producido la microcorriente descendente se deberá mantener la alerta.
2. Se emitirá una alarma de cizalladura del viento a poca altura por microcorriente descendente para el aeropuerto cuando una tormenta se encuentre a menos de 3 km o sobre este, y se aprecie en la última observación realizada (10 minutos antes) el descenso de altura de los ecos superiores a 50 dBZ.
3. Cuando los ecos superiores a 50 dBZ alcancen alturas entre 5 y 7 km, se pronosticarán rachas del orden de los 30 KT en el aeropuerto. Cuando alcancen alturas de 7 km o más, se pronosticarán rachas de al menos 40 KT en dicho aeropuerto. Se tomará en cuenta el movimiento de la tormenta para el pronóstico de la intensidad de los vientos y de la cizalladura, conociendo que las tormentas que se muevan en dirección perpendicular al aeropuerto generarán vientos más fuertes y mayor cizalladura.
4. Una vez que se haya producido la microcorriente descendente sobre el aeropuerto, se mantendrá la alarma durante

el tiempo que la tormenta mantenga las características descritas para generar microcorrientes descendentes. Sólo se cancelará la alarma cuando en el aeropuerto no se registren rachas de 30 KT o más y haya cesado la presencia de ecos con valores de reflectividad superiores a 50 dBZ.

3.4 Ejemplos de casos estudiados

3.4.1 Análisis del día 3 de julio de 2016

A las 15:50 se observó una tormenta que se denominó T1 a 13 km al E del aeropuerto. Esta mostraba ecos rojos con valores entre 51 y 61 dBZ a alturas entre 2 y 6.6 km. A 6.6 km de altura se observaban ecos de 59 dBZ, por lo que poseía fuertes corrientes ascendentes y se encontraba en fase de desarrollo; con una alta probabilidad de generar tiempo severo y producir fuertes vientos en superficie (ver [Figura 8](#)).

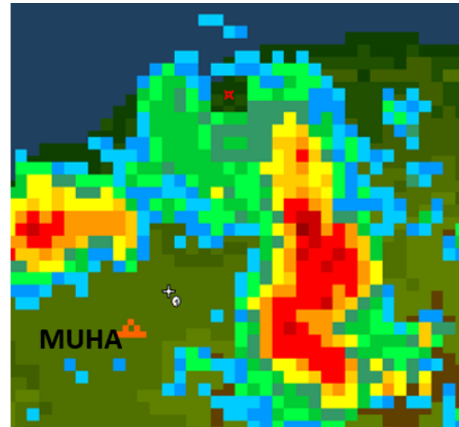


Figura 8. Producto “Máximos” 15:54 hora local. 3/07/2016

A las 16:00 la tormenta alcanzaba la fase de madurez. En la misma se observan dos regiones de ecos rojos, una por debajo de los 5 km de altura (corrientes descendentes) y otra delante de esta entre los 3 y 8 km de altura (corrientes ascendentes).

La tormenta T1 se encontraba a 8 km al E de la cabecera de la pista 24 con valores entre 51 y 62 dBZ. Por tal motivo se pudo haber emitido una alerta para el aeropuerto a las 16:05 hora local. El corte vertical muestra la pareja de

corrientes ascendentes y descendentes que indica que la tormenta está en fase de desarrollo (ver [Figura 9](#)).

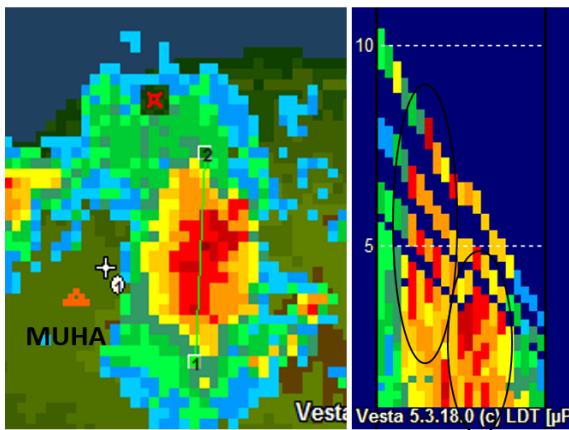


Figura 9. Productos “Máximos” y “Corte” realizado a T1. 16:04 hora local. 3/07/2016

A las 16:10 la tormenta T1 se encontraba a 1 km al E de la cabecera de la pista 24. El análisis de los PPI mostró que la tormenta continuaba en su fase de madurez, con corrientes descendentes en su parte posterior y fuertes corrientes ascendentes por delante de esta. Más próximo al extremo 24 los ecos rojos de hasta 56 dBZ se ubicaban a alturas entre los 5 y 7 km.

El corte muestra los ecos rojos a alturas superiores a los 5 km muy próximos al extremo de la pista 24 (ver [Figura 10](#)). En el anemómetro ubicado en este lugar se comenzaron a registrar rachas superiores a 20 KT desde las 16:14. Teniendo en cuenta que la tormenta estaba en fase de madurez se pudo haber emitido una alerta de cizalladura del viento a poca altura por microcorriente descendente a las 16:15 hora local.

A las 16:20 se observaron ecos rojos por debajo de 1 km de altura muy próximos al extremo de la pista 24 (ver [Figura 11](#)). En el PPI a una elevación $\Theta=2^\circ$ se observa una región de ecos rojos que puede indicar la posición donde se produce la microcorriente descendente. La dirección de la que provenían las rachas de viento en el anemómetro 24 indicaba esto.

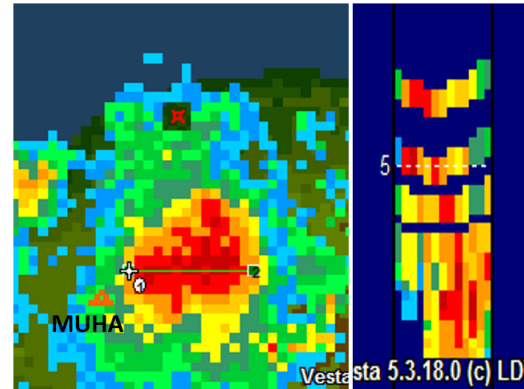


Figura 10. Productos “Máximos” y “Corte” realizado a T1 a las 16:14 hora local. 3/07/2016

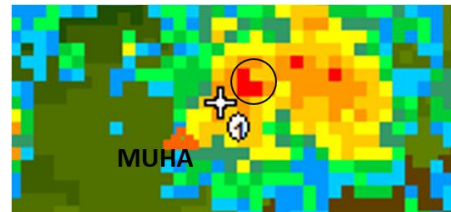


Figura 11. Producto “PPI a una elevación $\Theta=2.0^\circ$ ” 16:21 hora local. 3/07/2016

La [Tabla 2](#) muestra los datos de las rachas de viento en el aeropuerto, donde se observa la aceleración del viento en superficie a partir de las 16:24 hora local, alcanzando valores de hasta 70 KT en el anemómetro de la cabecera de la pista 24 y de 61 KT en el anemómetro del medio de la pista (MID).

Sobre el aeropuerto se ubicaban ecos de hasta 62 dBZ a alturas por encima de los 5 km por lo que se pudo haber emitido una alarma de cizalladura del viento por microcorriente descendente.

A las 16:30 se observaba el descenso de los ecos rojos en altura, indicando la presencia de nuevas microcorrientes descendentes ([Figura 12](#)).

Los cortes realizados a las 16:34 muestran las microcorrientes descendentes que se registraron en el anemómetro de la cabecera de la pista 06 a partir de las 16:30 y en los

Tabla 2. Registro de velocidad y dirección de las rachas de viento en el aeropuerto MUHA. 16:24-16:29 hora local

Fecha	ws2x06	gd06	ws2xmid	gdmid	ws2x24	gd24
03/07/2016 20:24	19.83	68	25.66	70	49.57	80
03/07/2016 20:25	15.36	68	37.32	50	57.93	30
03/07/2016 20:26	20.8	68	38.88	57	70.17	34
03/07/2016 20:27	20.8	68	61.43	42	70.17	34
03/07/2016 20:28	18.86	68	61.43	42	53.26	34
03/07/2016 20:29	14.19	68	56.57	42	44.71	34

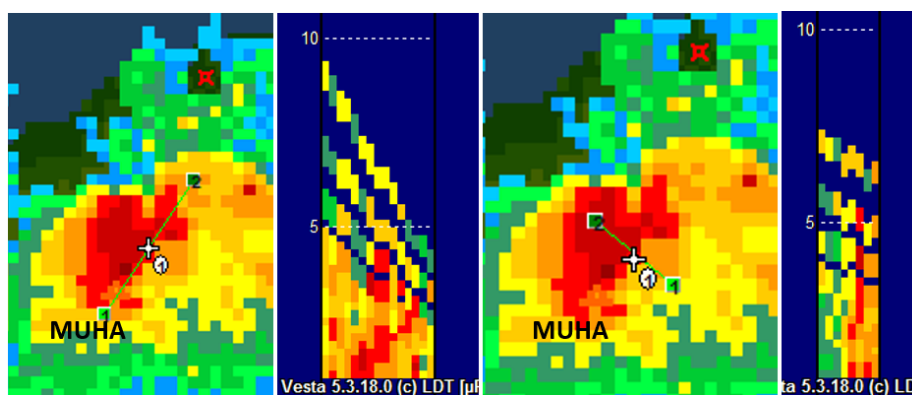


Figura 12. Productos “Máximos” y “Corte” realizados a T1 a las 16:34 hora local. 3/07/2016

anemómetros del medio (MID) y la cabecera de la pista 24 a partir de las 16:35. La dirección y velocidad del viento mostrada por los 3 anemómetros confirmaron los planteamientos anteriores.

En la observación de las 16:40 los ecos rojos se alejaban del aeropuerto y en el mismo los vientos disminuyeron gradualmente, por lo que el peligro disminuyó y se hubiese podido retirar la alarma.

Resumen

Los eventos ocurridos este día se debieron a un brote de TLS en el occidente de Cuba. Las tres microcorrientes descendentes que afectaron al aeropuerto estuvieron asociadas a un clúster de multiceldas que se formó a las 16:40 hora local a 16 km al E del aeropuerto. La tormenta alcanzó valores de reflectividad de hasta 62 dBZ y presentó ecos rojos a alturas superiores a los 7 km. Se movió de E a W provocando en el aeropuerto vientos de hasta 70 KT y daños en el aeropuerto e incluso a una aeronave estacionada. Teniendo en cuenta los aspectos del método se pudo haber emitido una

alerta hasta 20 minutos antes de producirse la primera microcorriente descendente.

CONCLUSIONES

Los resultados alcanzados con este trabajo demostraron el cumplimiento de la hipótesis planteada. Se creó un método capaz de emitir una alerta temprana de ocurrencia de cizalladura del viento a poca altura por microcorrientes descendentes a partir del análisis de las imágenes del radar de Casablanca para el aeropuerto de La Habana.

A pesar de que las microcorrientes descendentes son un fenómeno de microescala de rápida evolución, el uso del método mostró que se puede prever la ocurrencia de cizalladura del viento a poca altura por microcorrientes descendentes con 10 minutos de antelación como promedio.

Correlacionando los datos de viento de los tres anemómetros del aeropuerto MUHA con las imágenes del radar de Casablanca se determinó que como condición necesaria para la ocurrencia de microcorrientes descendentes

las tormentas deben poseer ecos con valores de reflectividad superiores a 50 dBZ por encima de los 5 km de altura.

Las microcorrientes descendentes que afectan al aeropuerto con vientos superiores a los 30 KT están asociadas a tormentas de multiceldas que poseen ecos con valores de reflectividad de 58 dBZ como promedio y en las cuales, los ecos superiores a 50 dBZ alcanzan una altura promedio de 6.7 km. Estas se producen en los meses del período lluvioso, en horarios de la tarde.

RECOMENDACIONES

Dado que la muestra utilizada para este estudio fue de solo un año, se recomienda continuar los estudios sobre el método para determinar el porcentaje de eficiencia del mismo.

La aplicación del método se debe hacer en tiempo real, por lo que se recomienda gestionar el acceso de los meteorólogos de Aeropuerto Internacional "José Martí" a las observaciones del radar meteorológico de Casablanca en tiempo real, para realizar de forma correcta la vigilancia.

Este trabajo demostró que se puede pronosticar la ocurrencia de microcorrientes descendentes para el Aeropuerto Internacional "José Martí", por lo que se recomienda realizar estudios para otros aeropuertos usando el método propuesto y haciendo las adaptaciones necesarias para cada aeropuerto.

Para un mejor trabajo operacional se recomienda crear una plantilla para el Vesta Proceso que muestre la posición real del aeropuerto, con la pista y posición de los anemómetros.

De contar con datos de vientos en las cercanías del aeropuerto se pudiera detectar la presencia de las microcorrientes descendentes y obtener mediciones antes que afecten al aeropuerto, por lo que se recomienda la instalación de una red anemométrica en la vecindad del aeropuerto que contribuya a una mayor eficiencia del método, y por tanto una

mayor seguridad en las operaciones de tránsito aéreo.

REFERENCIAS

- AYON, J. 2016. Conferencias: Meteorología Aeronáutica. La Habana.
- CAYMARES, A. 2015. Conferencias: Meteorología de Mesoescala. La Habana.
- DE LA NUEZ R, W. 2010. Ambientes favorables a mesoescala para la ocurrencia de aeroavalanchas en las provincias habaneras. Tesis presentada en opción al título de Lic. Meteorología. La Habana.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL. 2012. "Norma Técnica Complementaria". Reporte de cizalladura del viento a poca altura. Perú.
- FOSTER, D. S. 1958. Thunderstorm gusts compared with computed downdraft speeds. Monthly Weather Review.
- FUJITA, T. T. 1978. Manual of downburst identification for project NIMROD. 19780022828.118p. Estados Unidos.
- MIT Lincoln Laboratories. 2009. Terminal Doppler Weather Radar (TDWR). Estados Unidos.
- NATIONAL WEATHER SERVICE. 2009. Terminal Doppler Weather Radar Information. Estados Unidos.
- OACI. 2005. Manual sobre cizalladura del viento a poca altura. Doc 9817AN/4
- SÁNCHEZ, C.A. 2014. Conferencias: Meteorología de Radar. La Habana.
- TELVENT. 2007. LLWAS Low Level Windshear Alert System. España.
- TOMÉ M, Y. 2015 Cizalladura del viento a bajo nivel en la Región de Información de

Vuelo de La Habana en el período 2007-2014. Tesis presentada en opción al título de Licenciatura en Meteorología.

VAISALA. 2013. Sensores ultrasónicos de viento WINDCAP® de la serie WMT700; Guía del Usuario. Finlandia.

WAKIMOTO, R. M. 2001. Convectively driven high wind events. Severe Convective Storms, Meteor. Monogr., No. 50, Amer. Meteor. Soc., 255–298.

NOTA: Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo de se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)