Artículos

Climatología de las granizadas en Colombia

Climatology of Hailstorms in Colombia

Climatologia das quedas de granizo na Colômbia

Zaida Yamile Peña-Beltrán * zypenab@unal.edu.co
Universidad Nacional de Colombia, Colombia
José Daniel Pabón-Caicedo + jdpabonc@unal.edu.co
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, vol. 29, núm. 1, 2020

Facultad de Ciencias Humanas de la Universidad Nacional de Colombia

Recepción: 04 Octubre 2018
Recibido del documento revisado: 21 Enero 2019
Aprobación: 14 Mayo 2019

DOI: 10.15446/rcdg.v29n1.75438

CC BY-NC-ND

Resumen: A partir de datos históricos de registros de periódicos nacionales, regionales, de archivos y bases de datos especializadas, se identificaron 468 granizadas en diferentes regiones del país. Se analizó el comportamiento de diferentes variables (índices de inestabilidad, viento, humedad relativa, la altura de la isoterma de 0 °C y precipitación) de simulaciones horarias generadas por el modelo *Weather & Research Forecasting* (WRF) en cada evento de granizada, estableciendo umbrales en los que tales granizadas ocurrieron para tener un elemento de estimación de probabilidad de granizada. Se ajustaron los datos por orografía, pendiente, altitud a nivel del mar y la dirección del viento, y se generaron series de probables granizadas para una grilla de 10x10 km, las cuales se validaron frente a las registradas. Con estas series se establecieron los patrones espaciales y el ciclo anual de las granizadas para construir la climatología de este fenómeno en Colombia. Se obtuvo que las zonas con mayor probabilidad de granizadas se encuentran en zonas montañosas (cordillera Occidental, cordillera Central y cordillera Oriental) y en la Sierra Nevada de Santa Marta, especialmente en los departamentos de Antioquia, Caldas, Quindío, Valle del Cauca, Cauca, Norte de Santander, Santander, Cundinamarca y Boyacá.

Ideas destacadas: artículo de investigación que aborda cómo las granizadas en diferentes regiones de Colombia generan diversos impactos negativos a cultivos, edificaciones, infraestructura vial y redes de comunicaciones. Por la necesidad de información sobre estos eventos meteorológicos extremos, se elaboró una climatología de las granizadas para Colombia basada en el análisis de datos observados y modelados.

Palabras clave: climatología de granizadas, granizadas en Colombia, granizo, modelo *Weather & Research Forecasting*.

Abstract: 468 hailstorms were identified in different Colombian regions, on the basis of historical data collected from newspapers, archives, and specialized databases. An analysis was carried out of the behavior of different variables (instability indexes, wind, relative humidity, zero-degree (0 °c) isotherm, and precipitation) through hourly simulations generated by the *Weather & Research Forecasting* (WRF) model for each hailstorm event, establishing the thresholds in which these hailstorms occurred in order to obtain elements to estimate hailstorm probability. Data was adjusted according to orography, slope, altitude above sea level, and wind direction, and series of probable hailstorms were generated for a 10x10 km grid, which were then validated with those registered. These series made it possible to establish spatial patterns and the annual cycle of hailstorms in order to construct the climatology of this phenomenon in Colombia. Results show that the zones with the greatest probability of hailstorms are found in mountainous regions (western, central, and eastern branches of the Andes) and in the Sierra Nevada de Santa Marta, and especially in the departments of Antioquia, Caldas, Quindío, Valle del Cauca, Cauca, Norte de Santander, Santander, Cundinamarca, and Boyacá.

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Main Ideas: Research paper that addresses the manner in which hailstorms in different regions of Colombia generate diverse negative impacts for crops, buildings, road infrastructure, and communications networks. Given the need for information on these extreme meteorological events, a climatology of hailstorms in Colombia was developed on the basis of observed and modeled data.

Keywords: hailstorm climatology, hailstorms in Colombia, hail, Weather & Research Forecasting model.

Resumo: A partir de dados históricos de registros de jornais nacionais, regionais, de arquivos e bases de dados especializadas, foram identificadas 468 quedas de granizo em diferentes regiões do país. Foi analisado o comportamento de diferentes variáveis (índices de instabilidade, vento, umidade relativa, altura da isoterma de 0 °c e precipitação) de simulações horárias geradas pelo modelo *Weather & Research Forecasting* (WRF) em cada evento de queda de granizo, estabelecendo limites nos quais essas quedas ocorreram para ter um elemento de estimativa de probabilidade de granizo. Foram ajustados por orografia, pendente, altitude a nível do mar e direção do vento, e foram geradas séries de prováveis quedas de granizo para uma área de 10x10 km, as quais foram validadas ante as registradas. Com essas séries, foram estabelecidos os padrões espaciais e o ciclo anual dos granizos para construir a climatologia desse fenómeno na Colômbia. Obteve-se que as zonas com maior probabilidade de quedas de granizo se encontram em zonas montanhosas (cordilheira Ocidental, cordilheira Central e cordilheira Oriental) e na Serra Nevada de Santa Marta, especialmente nos estados de Antioquia, Caldas, Quindío, Valle del Cauca, Cauca, Norte de Santander, Santander, Cundinamarca e Boyacá.

Ideias destacadas: artigo de pesquisa que aborda como as quedas de granizo em diferentes regiões da Colômbia geram diversos impactos negativos a cultivos, edificações, infraestrutura viária e redes de comunicações. Pela necessidade de informação sobre esses eventos meteorológicos extremos, foi elaborada climatologia das quedas de granizo para a Colômbia baseada na análise de dados observados e modelados.

Palavras-chave: climatologia de quedas de granizo, granizo na Colômbia, granizo, modelo Weather & Research Forecasting.

Introducción

El granizo es un fenómeno meteorológico adverso que afecta a diversas actividades socioeconómicas que la población desarrolla en diferentes regiones del mundo, tanto en la parte urbana como rural. Aunque sus efectos son muy localizados espacial y temporalmente, pueden producir pérdidas importantes en la agricultura, así como en infraestructura (en viviendas y edificaciones, en sistemas de alcantarillados, en la red vial, entre otras) e incluso de vidas humanas[1].

Los aspectos históricos y la climatología de las granizadas han sido abordadas en diversos países como España (García Sanjuan 1976, 20; Olcina, Rico y Jiménez 1998, 29), China (Zhang, Zang y Wang 2008), India (De, Dube y Prakasa 2005, 187), Francia (Berthet, Dessens y Sanches 2011, 400; Vinet 2001), Grecia (Sioutas, Meaden y Webb 2009), Canadá (Zuohao 2008), Estados Unidos (Changnon y Changnon 2000, 664) y México (Pérez 2013, Pittaluga 2004, 26). Estos trabajos, realizados para las regiones en el hemisferio norte, concluyen que las granizadas ocurren durante los meses de mayo a octubre cuando las tormentas son más frecuentes e intensas, lo que produce millonarias pérdidas a la agricultura. Las granizadas más intensas suelen registrarse a finales de la primavera y durante el verano, generalmente precedidas de

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

una época de altas temperaturas y mucha humedad, que alimentan los procesos de convección. Las granizadas pueden presentarse incluso en los meses de octubre y noviembre. Para el hemisferio sur, específicamente para Argentina, según Lassig (2006) y Mezher y Mercuri (2008), la mayor frecuencia e intensidad de las granizadas es en el verano de dicho hemisferio.

En algunas regiones de Colombia (Sabana de Bogotá y montaña antioqueña, por ejemplo), el granizo se registra cada año y en diferentes fechas, ocasionando impactos importantes en la agricultura como pérdidas millonarias a los agricultores y daños significativos en zonas urbanas, especialmente en las infraestructuras viales, alcantarillados y viviendas, según lo señala Peña-Beltrán (2015) en el análisis de los reportes de granizadas en el periodo de 1970-2014. Sobre la distribución del granizo en Colombia, la Caja de Crédito Agraria (1998) publicó mapas departamentales en un estudio sobre riesgos de índole hidrometeorológicos del sector agropecuario colombiano. Recientemente Cepeda (2010, 142) realizó un estudio sobre el granizo en Bogotá en el que concluye que durante el periodo evaluado de 1939-2008, en promedio se reportan 4 eventos por año; los meses en los que más se presentan son febrero y marzo, en el primer semestre, y octubre y noviembre, en el segundo semestre; las horas más frecuentes se encuentran entre 14 y 15 horas, con una duración de 30 minutos.

También se encuentra el trabajo de Jiménez (2007, 34) en el que se menciona que las granizadas presentan dos temporadas (marzo-abril y octubre-noviembre) y manifiesta una relación directa entre la frecuencia y la altitud, siendo mayor la frecuencia en zonas ubicadas sobre los 2.500 m .s. n. m. Romo Parra et ál. (2001) analizaron la acción del granizo y del viento sobre el desarrollo y calidad de los frutos de plátano dominico hartón en el departamento del Quindío, y establecieron que una granizada puede ocasionar cuantiosas pérdidas (más de us $ 6.000.000) a los productores de plátano de este departamento. Arcila y Jaramillo (2010) señalan que el granizo se puede registrar en cualquier región del país, pero que es más frecuente entre los 2.000 y los 3.000 m.s.n.m. y, especialmente, en los altiplanos de Cundinamarca, Boyacá, Nariño, Antioquia y en la Sierra Nevada de Santa Marta. De igual manera se dispone de diversos reportes en medios de comunicación masiva *(El Espectador* 2008; *El Tiempo* 2002; Ramón 2009)[2] sobre los efectos del granizo en cultivos como la uchuva, flores y en la infraestructura de la floricultura en Colombia.

Debido a la magnitud de los impactos resulta de gran importancia comprender mejor este fenómeno, por lo que en diferentes partes del mundo se han llevado a cabo diversos esfuerzos para conocer mejor su distribución espacial y temporal, así como para disponer de sistemas de pronóstico que utilizan diversos métodos. Se ha logrado comprender, por ejemplo, que la formación y el crecimiento de diferentes tipos de granizo (bolas de hielo, granizo y pedrisco) se genera en el sector de los cumulonimbos cerca de la isoterma de -20 °C (Pruppacher y Klet 1980; Rogers [1997] 2003).

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

En la actualidad en diferentes países se realizan observaciones sistemáticas del granizo y se dispone de redes especiales (en estaciones de los servicios meteorológicos y de otras instituciones o por voluntarios) como las reseñadas por Frisby y Sansom (1967, 354) y por Cifelli et ál. (2005, 1077); también se utiliza la tecnología del radar para detectar el granizo dentro de los cumulonimbos como base para el *nowcasting* meteorológico local. Con el progreso en modelamiento de alta resolución espaciotemporal de los procesos meteorológicos se ha incorporado una nueva herramienta para el *nowcasting* y el pronóstico del granizo. En la actualidad se utiliza la combinación de modelamiento y de uso de radar para la vigilancia del granizo. Ceperuelo (2008, 113) incorporó una metodología basada en la identificación de objetos radar en tres dimensiones, junto con la inclusión de datos procedentes del modelo meteorológico mesoescalar MM5 y datos en superficie de observación de granizo, obteniendo como resultado ecuaciones de probabilidad de granizo que permiten mejorar la detección de granizadas.

De igual manera, se han llevado a cabo esfuerzos para modelar los procesos de generación de granizo y de las granizadas con fines de pronóstico; en la mayoría de los casos se busca establecer los umbrales de índices de inestabilidad atmosférica bajo los que ocurren las granizadas. Leslie, Leplatrier y Buckey (2008) utilizaron un modelo general de circulación OU-CGCM para simular eventos fuertes de granizo. Simularon tres granizadas importantes que produjeron graves daños en la Cuenca de Sydney durante el periodo de enero de 1991 a febrero de 2002. Estas mostraron que el modelo podía reproducir la mayoría de las características claves de las tormentas de granizo y que confirmaría la capacidad del modelo para simular eventos grandes de granizo en las condiciones del clima actual. Jewell y Brimelow (2009) utilizaron con buenos resultados el modelo HAILCAST (herramienta que ha servido bien en la predicción del tamaño del granizo) con base en datos de radiosondeo para pronosticar granizadas fuertes.

Una aproximación hacia el modelamiento y el pronóstico del granizo es a través de la exploración de los procesos convectivos que generan las tormentas severas. Así, Litta, Mohanty e Idicula (2012) simularon varias tormentas eléctricas que ocurrieron en la época del premonsón (mayo) de 2006, 2007, 2008 y 2009 en el Este de la India utilizando el modelo *Weather & Research Forecasting* -en adelante, WRF- en una resolución espacial de 3 km, y obtuvieron como resultado que, con el esquema de parametrización de la microfísica de Ferrier y en la resolución trabajada, el WRF es una herramienta capaz de reproducir las condiciones en las que se generan las tormentas eléctricas y que sirve para el pronóstico de estos fenómenos severos. Con el objeto de identificar descargas eléctricas en sistemas de tormenta, Yair et ál. (2010) exploraron los procesos que conducen a la formación de tormentas severas en el Mediterráneo utilizando como parámetro el indicador energía potencial disponible para la convección -en adelante, CAPE-, el cual incorporaron en el cálculo de un índice de descargas eléctricas. Por otra parte Pabón-Caicedo y Beisiegel (2007), utilizando el modelo WRF, versión 3.1, ajustada para

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

el pronóstico operacional sobre el territorio colombiano, simularon la granizada severa ocurrida el 3 de noviembre de 2007 y obtuvieron como resultado que eventos de este tipo son pronosticables con una antelación mayor a 24 horas, dado que fue posible establecer, con dicha anticipación, la ubicación espacial de la región de mayor actividad convectiva en la que ocurrió la granizada, aunque con un error de dos horas. Pruebas con diferentes resoluciones espaciales, permitió establecer que con una grilla de 6 x 6 km es posible lograr una mejor aproximación de localización del fenómeno. Por su parte, Teitelbaum y D'Ándrea (2015) exploraron la convección profunda causante de tormentas de granizo en el norte de Argentina, utilizando datos de observaciones y de modelamiento con WRF en resolución de 2 x 2 km; los autores encontraron ciertas especificidades de los procesos aplicables solo para la región de estudio.

Varios esfuerzos se han realizado para construir una climatología del granizo, basados en modelamiento. Recientemente, Allen, Tippett y Sobel (2015, 243), con base en datos provenientes de la red de observación de granizo y con apoyo en datos de reanálisis, desarrollaron un modelo empírico para identificar la ocurrencia mensual de granizadas en América del Norte; la distribución espacial de la frecuencia mensual de las granizadas generada por el modelo coincide con la distribución de las registrada mediante observaciones. También es necesario mencionar el trabajo de Branchero (2017, 103) en el que se evalúa la capacidad del modelo WRF para representar las granizadas a través de los índices de convección.

Los avances en modelamiento de los procesos atmosféricos, algunos de los cuales ya se mencionaron anteriormente, permiten representar los procesos que generan el granizo y, a través de ello, es posible inferir sobre la ocurrencia del fenómeno, es decir, del evento "granizada", lo que invita a explorar esta aproximación para elaborar una climatología del granizo en Colombia, en donde no existe una red de registros regulares sobre este fenómeno, pero hay disponible información de reportes esporádicos de granizada, que puede ser utilizada para validar lo obtenido a través del modelamiento.

El presente reporte sintetiza los resultados de Peña-Beltrán (2015) y los avances posteriores en materia de utilización de información de modelamiento atmosférico para elaborar una climatología del granizo en Colombia.

Materiales y métodos

El presente trabajo se basó en el análisis de datos proveniente de observaciones y de modelamiento meteorológico en alta resolución, así como de imágenes de satélite, con la metodología planteada en Peña-Beltrán (2015).

Inicialmente se organizó un archivo con reportes de granizadas, utilizando la información de las fuentes que se muestran en la Tabla 1. En el proceso de verificación se eliminaron los reportes repetidos sobre un mismo evento, teniendo en cuenta la fecha y el lugar donde se observó

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

el evento, después de lo cual se conformó una sola serie de reportes. De 638 eventos, después de eliminar los reportes repetidos, quedaron 468 eventos, de los cuales el 90% corresponde a la región Andina, el 8% a la región Caribe y el 2% restante es de la región Amazónica y de la Pacífica. Del total de las granizadas, el 34% son de Bogotá, para un periodo de 1950-2014 (el periodo temporal depende de la fuente utilizada); por esta razón, la ciudad se consideró aparte de los municipios de Cundinamarca y se comparó con los demás departamentos. Con esta información se identificó el intervalo del día en el que las granizadas son más frecuentes; además, se generaron consolidados de número de granizadas mensuales y anuales por departamentos y municipios. Dado que en el país no existe una red de observación y registro regular de granizadas, estos reportes son la única base disponible para validar (confirmar) los eventos de granizada que representa el modelo, por lo que la información de esta base de datos, organizada en el marco de la investigación, será utilizada en la validación de lo modelado.

Tabla 1

Fuentes utilizadas para la generación de la base de datos de granizadas

Entidad	Año inicio	Año final	Cobertura	Número de eventos
UNGRD	2002	2014	Nacional	121
DesInventar	1970	2014	Nacional	87
Departamento De Geografía, grupo de investigación Tiempo, Clima y Sociedad	1950	2004	Sabana de Bogotá	109
SIATA	2012	2014	Valle de Aburrá	79
El Tiempo - El Espectador.	1990	2014	Nacional	114
El Universal, Vanguardia, La Patria	2006	2014	Departamental	128

En la exploración de las condiciones que favorecieron las granizadas se analizaron imágenes de satélite de banda infrarroja realzada del satélite GOES del Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climaticos (CPTEC) del día, horas antes y durante el evento para 13 granizadas en el periodo 2013-2015.

Por otra parte se utilizaron los datos meteorológicos generados con el modelo WRF por el grupo de investigación "Tiempo, Clima y Sociedad" del Departamento de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia. En la generación de los datos meteorológicos, el WRF (versión 3.2.1) se utilizó en modo *Advanced Research* WRF (ARW) con condiciones iniciales y de frontera provistas por el reanálisis *Climate Forecast System*

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Reanalysis (CFSR) del *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), con resolución espacial horizontal de 0,5° o 55 x 55 km aproximadamente, 37 niveles de resolución vertical y una frecuencia de salidas de 6 horas según Saha (2010) y Saha et ál. (2010). Con el WRF se produjeron para Colombia datos en resolución espacial de 10 x 10 km, cada tres horas en 27 niveles en la atmósfera para el periodo 1980-2010 (Armenta 2013, 21). Los esquemas de parametrización utilizados se definieron de acuerdo a diferentes estudios climáticos en los cuales se han obtenido buenos resultados (Evans, Ekström y Ji 2012, 1258; Gaines 2012, 36; Jin, Miller y Schlegel 2010, 11; Ravindranath, Raghavendra y Bohra 2010).

La validación de los datos de precipitación generados con WRF se realizó con la precipitación diaria medida en diferentes estaciones meteorológicas localizadas en diversos puntos del país operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -en adelante, IDEAM-. Las series de datos se seleccionaron de tal manera que cubrieran periodos influenciados por los eventos El Niño, La Niña y neutro, según el valor del Índice Oceánico El Niño (ONI) publicado por el Centro de Predicción Climática (CPC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (CPC-NOAA 2013). Con este criterio se organizaron las series diarias de precipitación para 1993, 1997 y 2000.

Se contó con series de datos de precipitación de 1.868 estaciones meteorológicas del IDEAM para el periodo 1980-2010. Para este estudio solo se utilizaron estaciones que tuvieran las series de datos completos para los años indicados de las cuales, después del control de calidad quedaron 642 series aptas para ser utilizadas en la validación. Esta última se realizó por trimestres: diciembre, enero y febrero -en adelante, DEF-, marzo, abril y mayo -en adelante, MAM-, junio, julio y agosto -en adelante, JJA- y septiembre, octubre y noviembre -en adelante, SON-. Para cada trimestre se calculó el coeficiente de correlación, el error del sesgo -en adelante, BIAS- y la raíz cuadrada del error cuadrático medio -en adelante, RMSE-.

Adicionalmente, se realizó una validación cualitativa de la ocurrencia de la lluvia, teniendo en cuenta que la base de datos de granizadas fue construida por observaciones extraídas de fuentes secundarias mencionadas anteriormente, lo que no permite tener la localización espacio-tiempo exacta del evento. Sumado a lo anterior, es difícil contar con datos de estaciones meteorológicas en las zonas donde se ha registrado este evento, lo cual dificulta el análisis de las condiciones meteorológicas o climáticas de los eventos de granizadas con datos observados del IDEAM. Para esta validación se tomaron los datos del periodo 1990-2010, que corresponden a más del 80% de la base de datos de granizo. De estos se utilizaron 155 granizadas que cuentan con información del día, la zona y la hora en que se presentó el evento (el 51% de los datos son de Bogotá, seguido por Medellín con un 6%). A estos datos se les asignaron coordenadas geográficas, teniendo en cuenta la información de los reportes incorporados al estudio; para cada localización establecida de esta manera se organizaron series de datos de precipitación cada 3

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

horas a partir de lo generado por el modelo WRF. Se verificó si, en el día de las granizadas, en los puntos de grilla del modelo adyacentes alrededor (en área de 3 x 3 puntos) del lugar de la granizada se registró precipitación intensa (mayor a 50 mm) en el periodo de 3 horas dentro de las cuales ocurrió el evento. La presencia de precipitación intensa (precipitación mayor a 50 mm) en estas series indica que el modelo representa convección; si esta última coincide con un evento de granizada, señalaría que el WRF representó la actividad convectiva correspondiente.

Para asegurarse aún más en la detección de granizadas en el modelo, a la condición relacionada con precipitación intensa se sumaron otros criterios de restricción basados en índices de inestabilidad atmosférica. De la base de datos de registro de granizadas se extrajeron 60 eventos de granizadas en diferentes regiones del país para el periodo de 1990-2010. A partir de esta información se procedió a analizar el comportamiento de diferentes variables (índices de inestabilidad: energía potencia disponible para la convección -en adelante, CAPE-, inhibición convectiva -en adelante, CIN-, índice de levantamiento -en adelante, LI-, índice total de totales -en adelante, TT- y el índice de amenaza de tiempo severo -en adelante, SWEAT-, humedad relativa, punto de rocío, dirección y velocidad del viento, la altura de la isoterma a 0 °C y la temperatura del aire en superficie, en simulaciones generadas por el WRF a las 13:00 horas locales). También se realizaron cortes verticales temporales de la evolución de la atmósfera durante el día de la granizada, además se realizó un corte longitudinal de Este a Oeste a las 13:00 hora local -esta hora se tomó debido a que gran parte de los eventos son registrados entre las 13:00 y 15:00 horas locales (65%) y las salidas del modelo se programaron para periodos de 3 horas, uno de los cuales está entre las 13:00 y 16:00 hora local-. A partir de este análisis se establecieron los umbrales de los índices que el modelo presenta para las granizadas reales.

Dado que en la probabilidad de granizada influyen, además de los procesos convectivos, otros factores como la pendiente del terreno, la altitud sobre el nivel del mar (Zhang, Zang y Wang 2008), la localización a barlovento o sotavento (Knight 1996, 382) y la altura de la isoterma de 0 °C (Ceperuelo 2008; López 2003; Paraschivescu, Stefan y Bogdan 2011) para definir la "granizada", se incorporaron los factores mencionados con una participación ponderada para obtener un valor de probabilidad de ocurrencia del fenómeno. Con esto se definió para cada día una probabilidad de granizada en cada punto de grilla utilizada en el modelo WRF, la cual se calculó a partir de la verificación del cumplimiento de los umbrales de los índices modelados y adicionando una ponderación por el efecto que podría tener la orografía, la pendiente y la altitud a nivel del mar como se muestra en la Tabla 2.

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Tabla 2
Umbrales para la determinación de la probabilidad de las granizadas

Índices	Rangos	Probabilidad
CAPE	> 2500	-
CIN	50 a 150	-
LI	>36	-
TT	>55	-
SWEAT	>350	-
$\Delta h_{0°C}$ (45%)	< -12	0.45
	-12 y -8	0.30
	> -8	0
Altitud (m.s.n.m.) (35%)	0-1000	0.02
	1001-2000	0.25
	2001-3000	0.35
	3001-4000	0.15
	>4001	0.05
Pendiente (10%)	0°-10°	0.10
	11°-25°	0.07
	26°-50°	0.05
	>50°	0
Barlovento (10%)		0.10
Sotavento		0

Con la verificación de los criterios señalados en el párrafo anterior se generó una serie de factibles granizadas en cada punto de grilla para el periodo estudiado (2001-2010) considerando "granizada" si la probabilidad calculada es mayor al 85%. Estos resultados se validaron frente a las granizadas registradas.

Con la información de granizadas generada a partir de las simulaciones del modelo WRF y con los datos de granizadas reales proveniente de los reportes analizados, se estableció la ocurrencia o no ocurrencia diaria de granizada en resolución espacial de 10 x 10 km. Con estos datos diarios se construyeron consolidados mensuales y promedios multianuales de las granizadas, con los que se establecieron los patrones espaciales y el ciclo anual de las granizadas como base de una climatología de este fenómeno en Colombia. Para la interpolación de los datos en la construcción de las distribuciones espaciales de las granizadas se usó el método de la *Inverse Distance Weight* (IDW), incorporado en la herramienta ArcGIS® 10.1.

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Finalmente, ponderando con la frecuencia de las granizadas por mes, se elaboraron mapas en los que se pueden observar las zonas con muy alta, alta, media y baja probabilidad en el territorio colombiano.

Resultados y discusión

A partir del análisis de los 468 registros de granizadas, se estableció que las regiones con reportes de estos eventos son la región Andina (con el 90% de lo reportado), seguida de la región Caribe (8%); comparativamente, para la región del Pacífico y la Amazonía colombiana el número de reportes sobre este fenómeno resultó ser muy bajo. Los departamentos con mayor registro de granizadas fueron Antioquia, Cauca y Valle del Cauca con el 12%, el 9% y el 7% respectivamente; y los de menores eventos registrados son Córdoba, Sucre, Atlántico y Caquetá, con tres eventos o menos. La Figura 1 presenta la distribución espacial de las granizadas por municipios según los reportes analizados. Bogotá tuvo un 34% de los eventos reportados, seguida por Medellín, Cartagena y Pereira con 27, 16 y 10 eventos, que representan el 6%, el 3,5% y el 2%, respectivamente del total de reportes para el periodo y el país. El mapa de la Figura 1 es orientativo de las áreas del país con mayor frecuencia de granizadas reales; sin embargo, no significa que en los departamentos y municipios en blanco no se presentan granizadas, sino que no hubo reportes (tal vez por lo poco habitado o porque no se desarrollan actividades socioeconómicas). El mapa servirá de base para validar el mapa de granizadas generado a partir de los eventos detectados en el modelamiento de WRF.

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

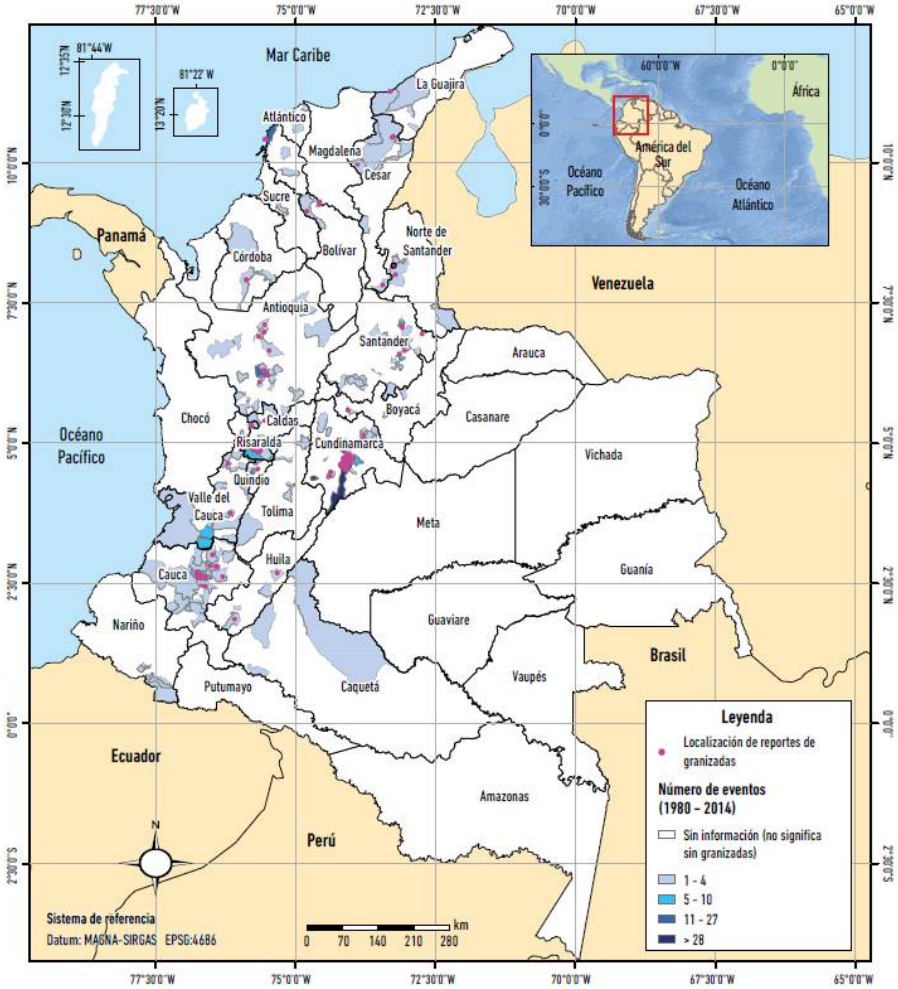


Figura 1

Distribución espacial por municipio de los reportes de granizadas en Colombia, periodo 1980-2014.

Datos: elaborado a partir de datos de las fuentes señaladas en la Tabla 1.

La Tabla 3 muestra los meses en los que se reportan granizadas en cada departamento en el periodo 19502010. Así para Antioquia, Cesar y Risaralda se presentan en marzo, para Santander en julio y agosto, para el Valle del Cauca en septiembre, para Cauca en octubre y para Cundinamarca y Bogotá en febrero y noviembre. En general, los eventos de granizadas reportadas se presentaron con mayor frecuencia en el primer semestre del año a excepción de los departamentos de Cauca, Nariño y Santander.

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Tabla 3
Número de granizadas mensuales por departamento (1950-2010)

Región	Departamento	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Sin Fecha
Andina	Antioquia	3	1	14	4	10	1	2	4	7	6	3	1	
Caribe	Atlántico						2		1					
Andina	Bogotá D. C.	18	27	17	15	10	3	2	2	7	17	32	11	
Caribe	Bolívar		1	1	1	1	2	1	2					12
Andina	Boyacá			1					1	2				
Andina	Caldas			1		3	3	1						
Amazónica	Caquetá		1	1							1			
Andina-Pacífico	Cauca		1	7	3	4	2	3	2	3	9	4	3	
Caribe	Cesar			3	1		1	1	1	1			1	
Caribe	Córdoba						1		1					
Andina	Cundinamarca		5	2	2	3	2		1	1	5	6		
Andina	Huila	1								1	1	2		
Caribe	La Guajira								2	1		1		
Andina-Pacífico	Nariño					1					4	1	1	
Andina	Norte de Santander						2		1	1				
Andina	Quindío	3	1	1	2		1	2		2	1			
Andina	Risaralda	1	3	6	2	3	1	5	2	4	3			
Andina	Santander		1	2	4		5	8	8	2				
Caribe	Sucre							1	1					
Andina	Tolima		2	1						1	2			
Andina-Pacífico	Valle del Cauca		2	7	4		3		1	9	5	1		
Total general		**26**	**45**	**64**	**38**	**35**	**29**	**26**	**30**	**42**	**54**	**50**	**17**	**12**

Datos: elaborado a partir de datos de las fuentes señaladas en la Tabla 1.

La ocurrencia anual de eventos de granizadas reportadas a nivel nacional es en promedio de 12 eventos; Antioquia, Cauca, Santander y Valle del Cauca son los departamentos con mayor registro, al igual que Bogotá D. C. Para el periodo 2001-2014 se observó un incremento en la frecuencia de reportes de eventos de granizadas (80% total de los registros de la base de datos); una de las posibles razones de tal incremento es el aumento de elementos expuestos a tal fenómeno y el progreso tecnológico de los medios de comunicación que tienen mayor cubrimiento y hacen más fácil reportar cualquier evento. Si bien algunos autores como Zuohao (2008) y Cepeda (2010) señalan el cambio climático como uno de los factores del incremento del número de eventos de granizadas, debido a la poca información histórica basada en registros reales de estos eventos no es posible sustentar tal afirmación.

Dado que el 53% de los reportes de granizadas (247) señalan la hora en que los eventos ocurrieron, se pudo establecer que el 84% de estos se

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

presentaron en la tarde (12-18 horas), especialmente entre las 13 y las 15 horas, seguido de la noche (18 hasta media noche) con el 9% (Tabla 4).

Tabla 4

Número de granizadas por periodo del día de los registros que cuentan con información horaria del evento

Departamento	Madrugada	Mañana	Tarde	Noche
Antioquia	4	6	21	2
Atlántico		1	1	
Bogotá, D. C.		1	126	2
Bolívar		1	4	1
Boyacá				
Caldas			3	2
Caquetá			1	
Cauca			8	2
Cesar			1	2
Córdoba				
Cundinamarca	1		9	1
Huila			1	1
La Guajira				
Nariño			1	
Norte de Santander			1	
Quindío			5	2
Risaralda			10	
Santander			5	7
Sucre				1
Tolima			2	
Valle del Cauca	1	1	9	

Datos: elaborado a partir de datos de las fuentes señaladas en la Tabla 1.

En los reportes de granizadas analizados se mencionan otros fenómenos extremos como las lluvias intensas, los vendavales y las tormentas eléctricas. Así, las primeras son nombradas en el 70% de los casos en la mayoría de los departamentos excepto Caldas, Cauca, Cesar, La Guajira, Quindío y Valle del Cauca donde se resaltan los vendavales. Curiosamente las descargas eléctricas, que son el común de todos los procesos relacionados con granizadas, se mencionan raramente en los reportes.

Según el análisis de estos reportes, en Colombia las granizadas son más frecuentes en las regiones Andina y Caribe, donde dejan impactos considerables, principalmente en el sector agrícola (el 30% de los reportes mencionan daños en cultivos), sin desconocer que en áreas urbanas también impactan considerablemente las edificaciones, generando impactos negativos a través de los efectos en el transporte. En campo abierto, el granizo afecta los cultivos por el impacto mecánico y por el posterior resecamiento al fuerte enfriamiento; también se han reportado daños en galpones, invernaderos y en el techo de las viviendas. En la ciudad el principal impacto se da a través de la acumulación

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

del granizo en los techos, los cuales pueden desplomarse; también ocurren daños en edificios y apartamentos por taponamiento en los sistemas de drenaje y la consecuente inundación de las áreas de oficinas/ apartamentos; asimismo las granizadas producen en la ciudad bloqueos de vías e interrupción de servicio de transporte urbano.

Las condiciones meteorológicas bajos las cuales se formaron las granizadas

En principio, las granizadas se producen por sistemas de convección fuertes que posibilitan la creación de cumulonimbos de gran tamaño. Estos se pueden observar en las imágenes de satélite IR horas antes del evento de granizada y en la hora más cercana a la granizada, por lo que con el seguimiento de una secuencia de imágenes es posible rastrear el desarrollo de estos sistemas convectivos sobre una región determinada. En las imágenes IR de la Figura 2 se observa la formación de los sistemas convectivos horas antes de que ocurrieran algunas de las granizadas analizadas (por limitaciones de espacio no es posible presentar las imágenes para todas las granizadas). Es posible constatar que las granizadas no ocurren dentro de grandes sistemas convectivos sino en la mayoría de los casos en cumulonimbos aislados. En algunos eventos, la nube generadora dela granizada es tan pequeña que no se alcanza a ver en la resolución espacial de las imágenes IR, como es el caso de las granizadas del 26 de julio de 2014 en Mahates (Bolívar) y del 22 de marzo de 2015 en Bogotá (Cundinamarca).

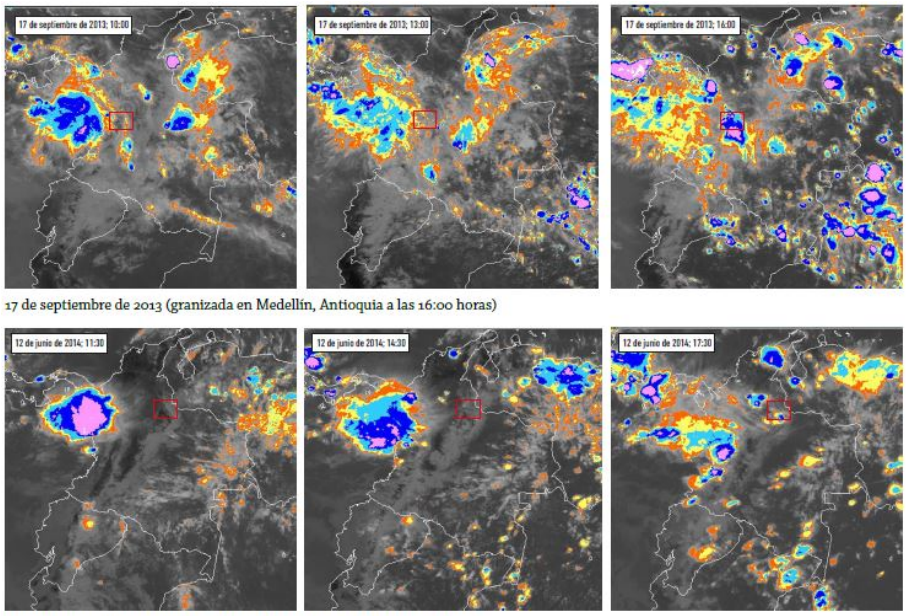
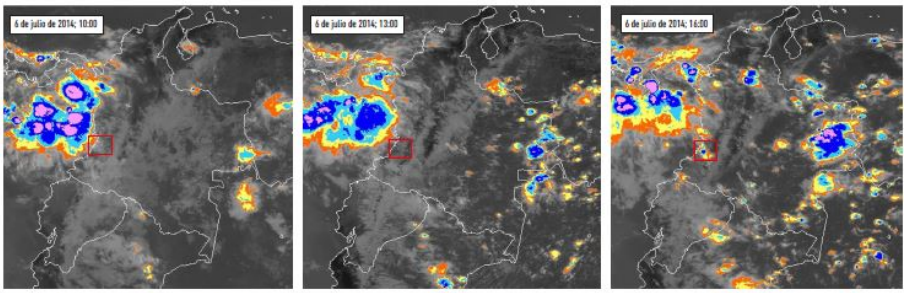
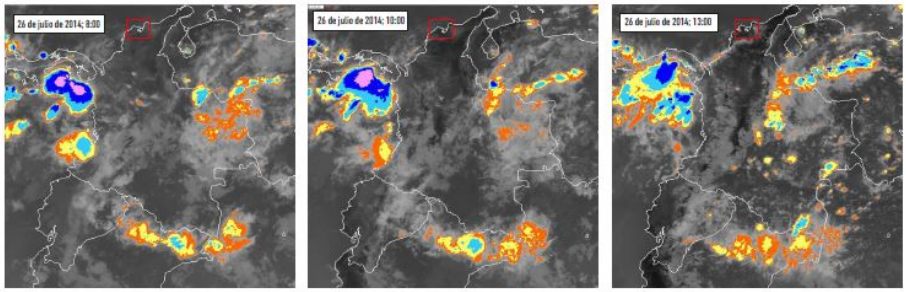


Figura 2
Formación de los sistemas conectivos horas antes que ocurrieran algunas de las granizadas analizadas.

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



6 de julio de 2014 (granizada en Tambo, Cauca a las 16:00 horas)



26 de julio de 2014 (granizada en Mahates, Bolívar a las 13:00 horas)

Figura 2

Formación de los sistemas conectivos horas antes que ocurrieran algunas de las granizadas analizadas. Continuación

Datos: imágenes extraídas de la página del Centro de Predicción del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC). *Nota:* el recuadro rojo señala la zona en donde se reportaron granizadas en cada fecha. Las zonas de las nubes en donde se registra la convección intensa se señalan en azul oscuro y violeta.

La Tabla 5 sintetiza las condiciones atmosféricas de diversa escala en las que las granizadas se observaron. Se puede apreciar que la mayor parte de las granizadas ocurre fuera del centro de los sistemas convectivos, en su periferia, o en zonas en las que, por la poca actividad convectiva y poca nubosidad, se facilita un calentamiento intenso de la superficie en horas de la mañana, lo que favorece la formación de convección local intensa, que conduce a la formación del granizo y a la correspondiente granizada. Al parecer las granizadas ocurren en las zonas no cubiertas por los sistemas de las ondas de la zona de confluencia intertropical -en adelante, ZCIT-, pero con convergencia, suficiente humedad y calentamiento en el día, lo que propicia el desarrollo de cumulonimbos activos en la periferia de la ZCIT y de los sistemas asociados a sus ondas; en ocasiones, en el borde de la baja anclada de Panamá.

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Tabla 5
Procesos de diferentes escalas que configuraron la ocurrencia de granizadas

Granizada	Nubes convectivas en la zona	Sistema de mesoescala-*Cloud clusters*	Escala sinóptica	Macro escala ZCIT	Análisis
17/09/2013 Medellín (Antioquia)	Cumulonimbo conectado en el borde norte al sistema convectivo mayor localizado al sur-sureste.	En la tarde, después del medio día se desarrolló un sistema convectivo (*cloud cluster*) de gran extensión al sur-sureste.	Dorsal de una onda de la ZCIT sobre la región. Se evidencia en la poca nubosidad entre dos áreas con nubosidad convectiva, una al oriente y la otra al occidente.	Presencia de la ZCIT.	La granizada se produjo bajo un sistema convectivo aislado que se formó en horas de la tarde el mismo día en un sector que estaba bajo la influencia de una dorsal (fase subsidente) de una onda en la zona de confluencia intertropical.
12/06/2014 Malagavita (Santander)	Potente cumulonimbo localizado dentro de un sistema más intenso que se formó en horas de la tarde.	Se desarrolla rápidamente desde las 15:00, hora local.	Toda la zona está bajo una fase subsidente entre la baja anclada de Panamá y una relativa baja presión sobre Venezuela.	Se encuentra al norte sobre el Caribe poco activa.	La granizada se produjo dentro de un cumulonimbo localizado dentro de un sistema más intenso, en una fase de baja actividad convectiva entre la baja anclada de Panamá y una baja presión en Venezuela.
6/07/2014 Tambo (Cauca)	El cumulonimbo se ubicó en el *cluster* formado en horas de la tarde.	Sobre el área, en un sector sin nubosidad de ningún tipo, cerca del borde sureste de la baja anclada de Panamá, se desarrolla un sistema de cumulonimbos en horas de la tarde.	Colombia se encuentra bajo la influencia de una fase de poca actividad de una onda de la ZCIT. Al occidente la baja anclada de Panamá está bastante activa con pulsaciones en su extensión.	Se localiza entre los 7° y 10° de latitud Norte.	La granizada se originó en una zona sin nubosidad cerca del borde SE afuera de la baja anclada de Panamá. Se formó un cumulonimbo en horas de la tarde.
26/07/2014 Mahates (Bolívar)	Se formó un sistema aislado entre las 12:00 y las 13:00, hora local.	No se observa la formación de un sistema convectivo en la zona, momentos antes del evento se observa la formación de un cumulonimbo pequeño.	La zona se encuentra bajo la influencia de una dorsal de una onda de la ZCIT.	Se localiza entre 10° y 12° latitud Norte.	La granizada se forma en una zona que no tiene sistemas convectivos activos, que se encuentra bajo la influencia de una dorsal de una onda de la ZCIT. En horas de la tarde se forma un sistema convectivo aislado.
22/03/2015 Bogotá	Se desarrolla un cumulonimbo potente en menos de una hora.	No hay desarrollo de sistemas de varios cumulonimbos que cubran un área notoria.	Al estar fuera de la ZCIT no está bajo sistemas sinópticos de esta. Pero claramente está en un área de baja actividad convectiva.	Se encuentra entre 3° latitud Sur y 3° latitud Norte. La zona de la granizada está afuera del borde noreste de la ZCIT. El sector está bajo la influencia de los vientos alisios del noreste.	La granizada se genera en una zona de baja actividad convectiva. En horas de la tarde se desarrolló un cumulonimbo potente en poco tiempo.

Las granizadas según el modelo WRF

La Tabla 6 muestra los resultados de la validación del modelo WRF, la cual se hizo mediante la correlación entre el valor de precipitación diaria modelado con el valor medido en estaciones pluviométricas (esto se realizó para 1997 -condición El Niño 1993, neutral 2000- La Niña). Se consideró buen desempeño del modelo con un coeficiente de correlación por encima de 0,6, criterio que es particularmente estricto si se tiene en consideración que la correlación entre variables en la escala meteorológica difícilmente alcanza valores de 0,6. Se obtuvo en general que un 30% de las estaciones cumplió esta condición; también se observó que el número de estaciones que cumple este requisito aumenta en el 2000 (año con influencia del fenómeno de La Niña) y se reduce en 1997 (año con influencia del fenómeno de El Niño). En lo que se refiere al

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

RMSE, se utilizó como criterio de buen desempeño valores menores de 10, condición que dependiendo de la época del año y de la variabilidad interanual cumple un rango de estaciones entre el 15% y el 100%, pero no hay ningún patrón estacional o interanual que controle el comportamiento de este índice. El BIAS, para el cual se estableció el criterio el rango de -5 a 5, se cumplió en promedio para más del 60% de las estaciones. Es notorio que para 1997 (año El Niño) el porcentaje de estaciones que cumplieron este criterio se redujo.

Tabla 6

Síntesis del desempeño del modelo en cuanto a la representación de la precipitación diaria

Índice	1993 (% estaciones)				1997 (% estaciones)				2000 (% estaciones)			
	DEF	MAM	JJA	SON	DEF	MAM	JJA	SON	DEF	MAM	JJA	SON
Coeficiente de correlación > 0.6	30	30	30	30	18	25	35	20	34	36	38	33
RMSE <10	56	33	28	31	50	100	57	40	36	15	54	25
BIAS -5 a 5	74	60	80	68	52	78	89	76	74	65	83	84

Nota: se presenta el porcentaje de estaciones que se mantiene dentro del rango de aceptación.

La validación realizada para la precipitación mayor a 50 mm generada por el modelo WRF entre las 13:00 y las 16:00, hora local, versus los eventos de granizada, dio como resultado que en el 75% de los casos se registraron lluvias durante el evento o dentro de las tres siguientes horas en algún punto de la grilla del modelo adyacente al lugar de las granizadas y el 56% muestra lluvias superiores a 50 mm.

Para tener idea de las condiciones de la atmosfera que propiciaron las granizadas en diferentes lugares del país se analizaron los valores de las variables e índices que el modelo WRF produjo para el día, hora y sitio de la granizada en perfiles verticales para identificar patrones de comportamiento que permitan establecer umbrales para la detección de granizadas en las simulaciones de mesoescala que realiza este modelo. De esta manera se estableció que los días con eventos de granizada presentaron dentro del modelo WRF las siguientes condiciones:

- Humedad relativa mayor al 70%, especialmente en la Sabana de Bogotá; en la montaña antioqueña la humedad relativa estuvo por encima del 80%. Algunas granizadas de los departamentos de Cauca, Valle del Cauca y Risaralda presentaron valores de humedad relativa superiores al 60%.
- La altura de la isoterma de 0 °C entre los 530 hpa y 600 hpa; la isoterma de -25 °C entre los 330 hpa y 360 hpa; en tanto que el valor cero del déficit del punto de rocío se localizó entre los niveles de 580 hpa y 700 hpa.
- Las granizadas en WRF se presentan tanto en vientos del noreste como del sureste; sin embargo, durante el día, en horas de la tarde

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

se detectan cambios marcados de la dirección en relación con el flujo predominante de ese día; la velocidad del viento en los momentos en que ocurren las granizadas tiende ser por debajo de 10 m/s.

- Los índices de inestabilidad (CIN, KI, TT y SWEAT) para los eventos de granizadas de los departamentos de Antioquia, Cauca, Cundinamarca (incluida Bogotá) y Quindío presentaron el valor de cero; para el CAPE los valores fueron diferentes a cero, aunque no alcanzaron el valor teórico establecido (CAPE >2.500 j) para considerarse una alta probabilidad de tormenta con granizo. En cuanto a las granizadas registradas en otros departamentos se presentaron valores de los índices diferentes de cero, sin embargo, el índice CAPE tampoco alcanzó el umbral teórico para granizada.

La verificación de si, para las horas en que ocurrieron granizadas reales el modelo WRF mostró las condiciones establecidas (por altura de la isoterma de 0 °C, pendiente y orografía) para la ocurrencia de granizadas, permitió establecer que, de los 98 eventos de granizadas revisadas (de los cuales el 93% son de la región Andina, el 6% de la región Caribe y el 1% de las regiones Amazónica y Pacifica), el 46% coincide; es decir, el modelo detecta cerca de la mitad de las condiciones bajo las que ocurrieron granizadas.

Climatología de las granizadas en Colombia según el modelo WRF

De acuerdo a los criterios establecidos en la metodología y el análisis de las condiciones que el WRF generó para las diversas granizadas, se realizó un proceso de detección de posibles granizadas cada día en los puntos de grilla del modelo. Para el efecto se consolidaron valores mensuales y se contabilizó el número de granizadas que se acumularon en cada mes durante una década (periodo 2001-2010), estableciendo así una climatología de las granizadas en Colombia, la cual se resume en los mapas de la Figura 3 (distribución mensual) y la Figura 4 (distribución anual).

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

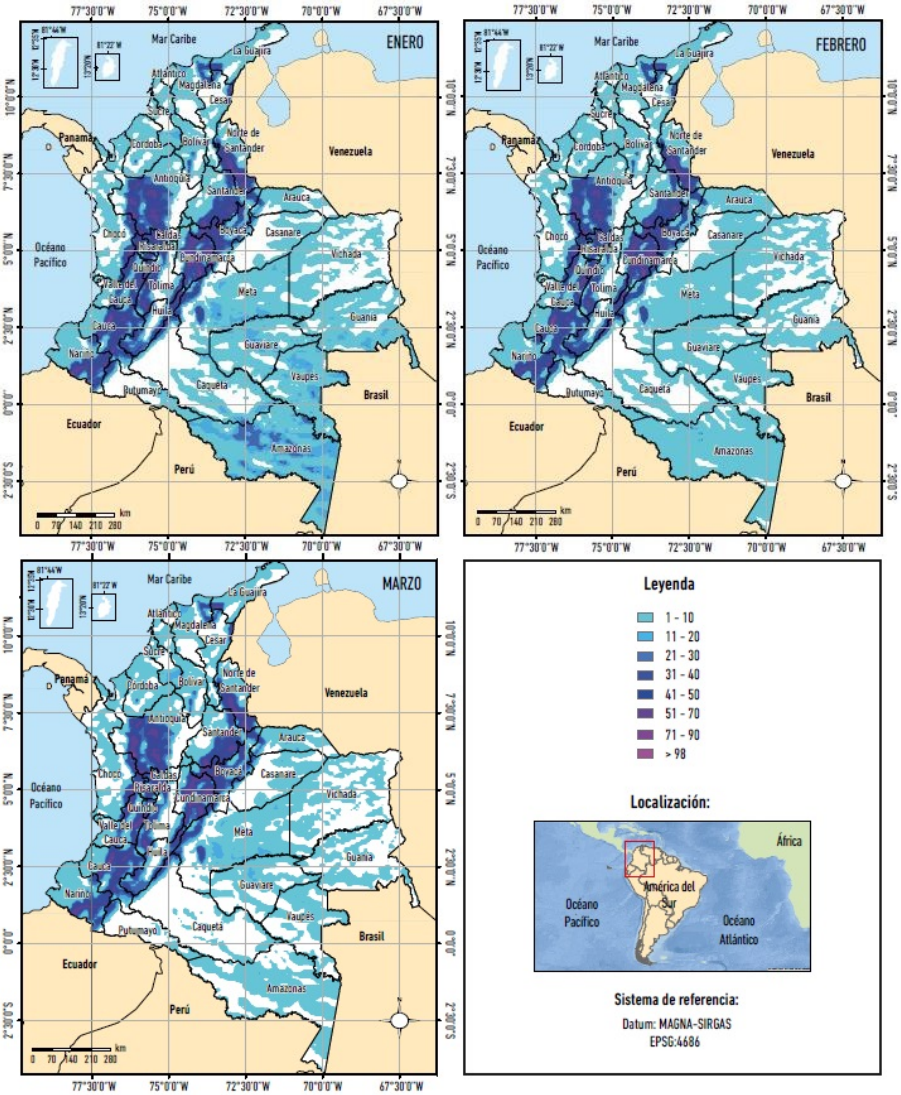


Figura 3
Distribución espacial del número de granizadas en una década (2001-2010) presentados por mes (enero a diciembre).

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

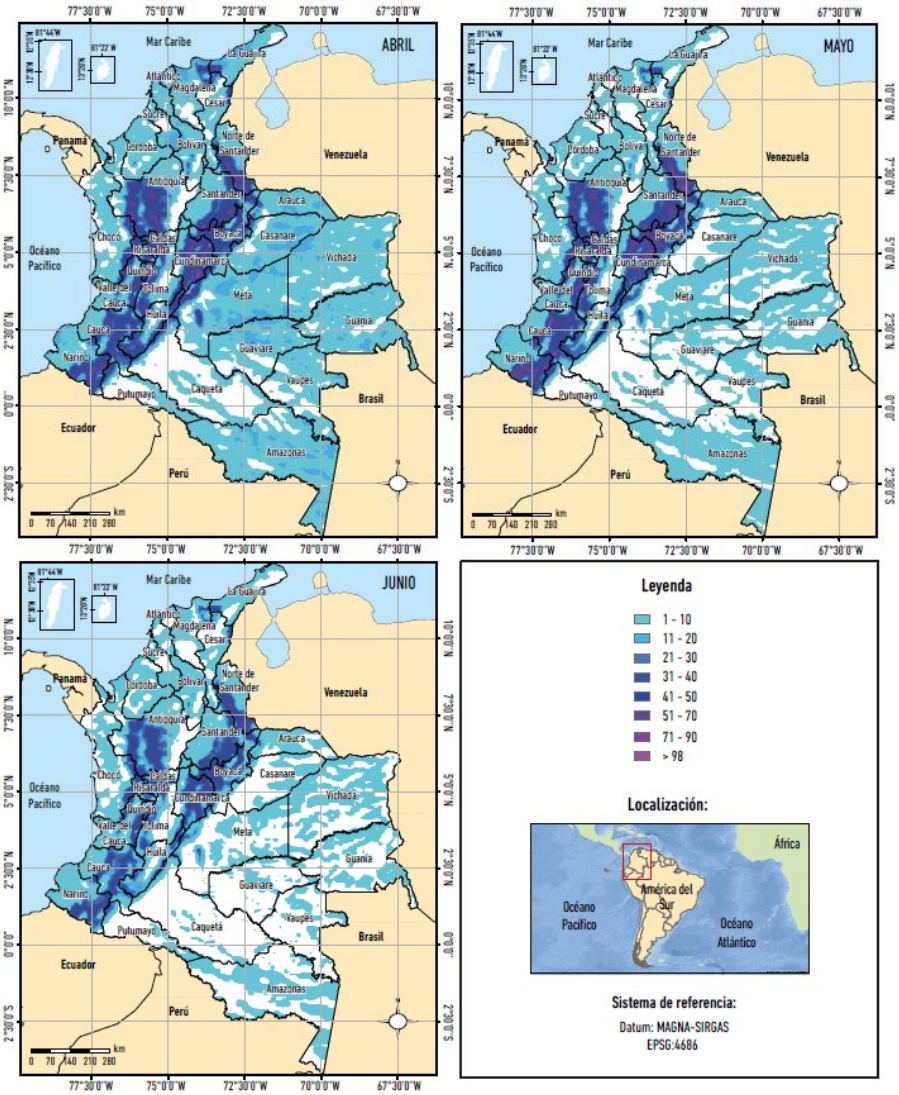


Figura 3
Distribución espacial del número de granizadas en una década (2001-2010) presentados por mes (enero a diciembre). Continuación

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

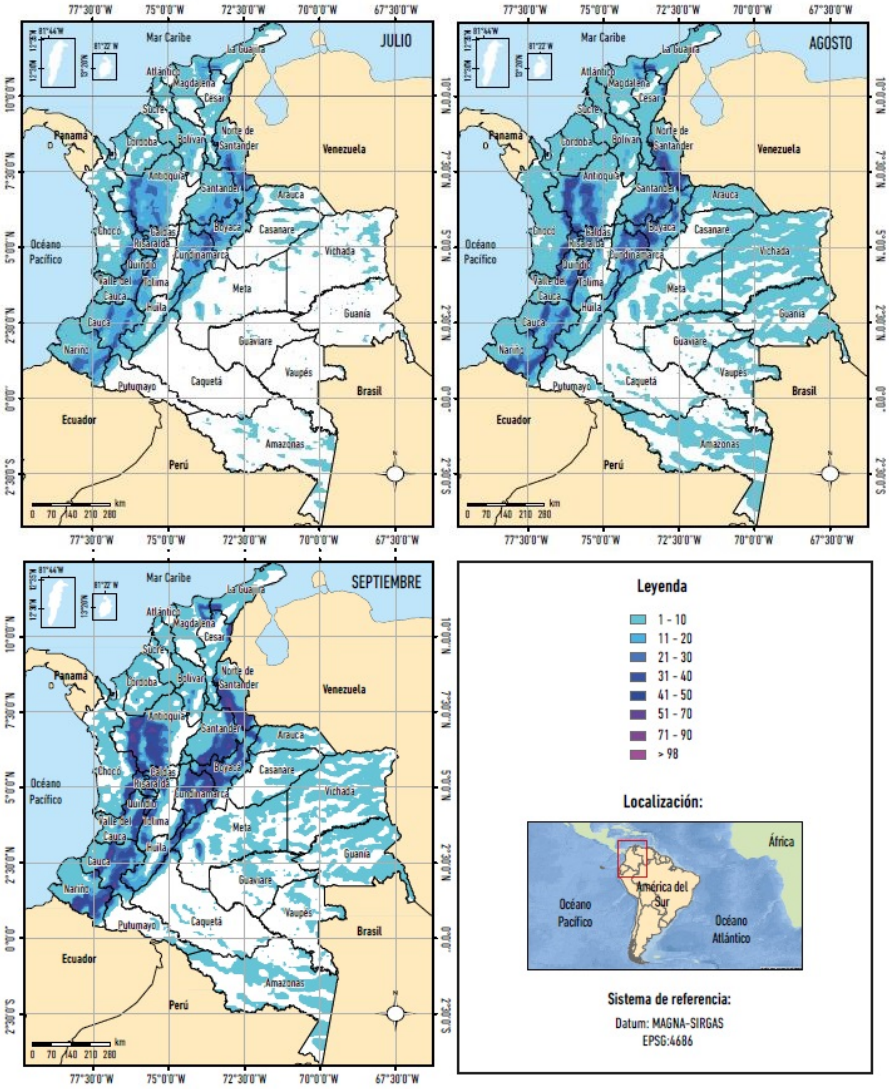


Figura 3
Distribución espacial del número de granizadas en una década (2001-2010) presentados por mes (enero a diciembre). Continuación

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

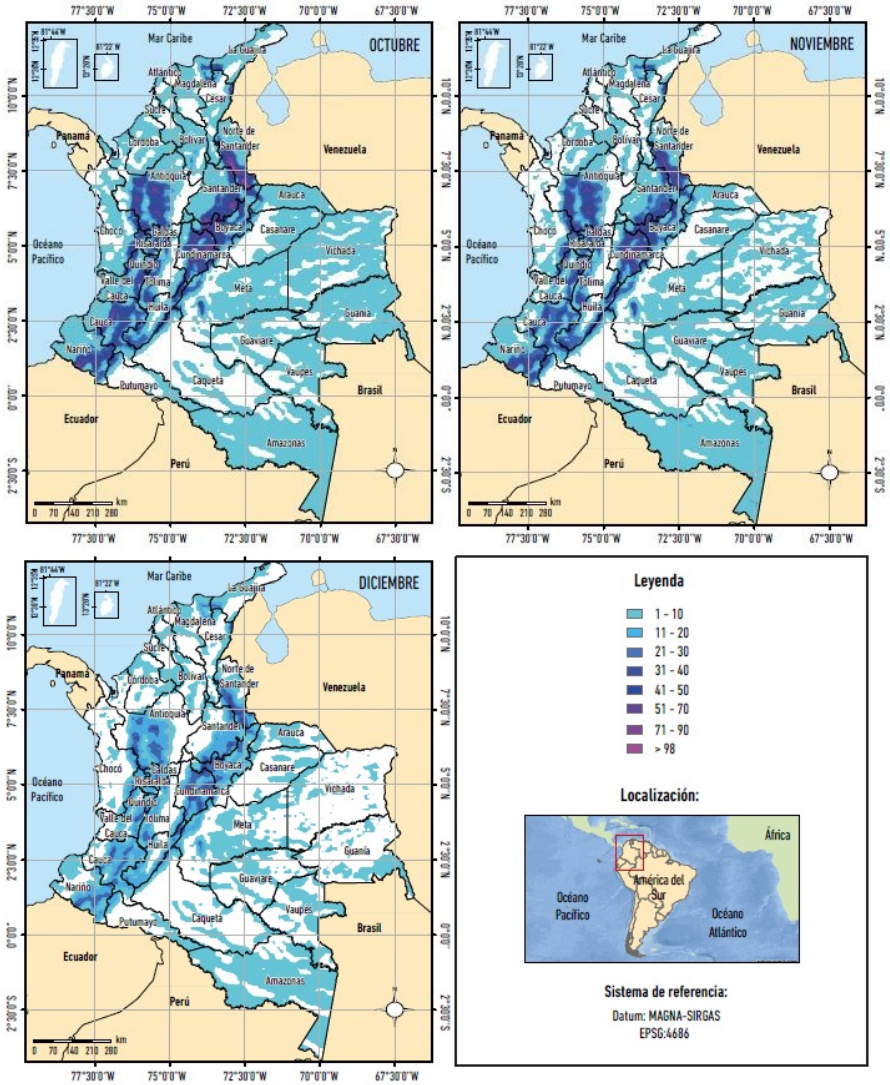


Figura 3
Distribución espacial del número de granizadas en una década (2001-2010) presentados por mes (enero a diciembre). Continuación

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

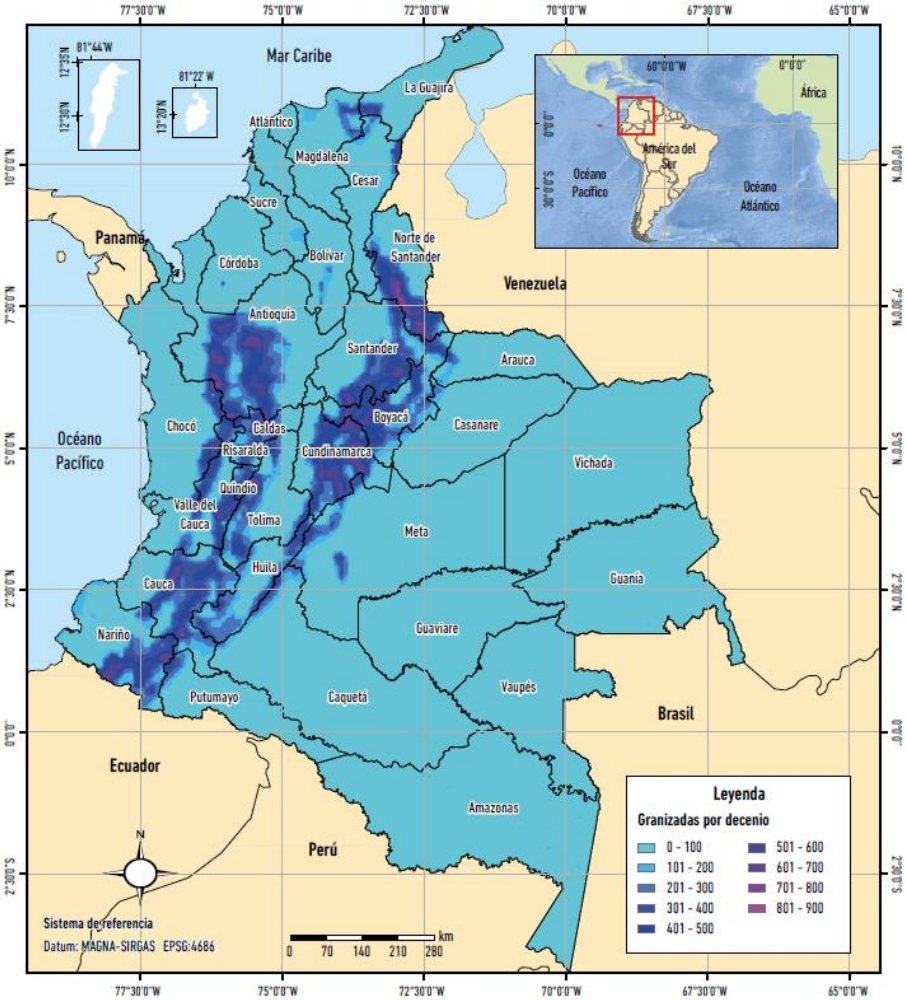


Figura 4
Distribución espacial del número de granizadas en una década (2001-2010).

Se obtuvo que, para enero las zonas con mayor número de granizadas (50-70 eventos) y para el periodo estudiado se encuentran al occidente de los departamentos de Antioquia, Cauca, Nariño, Norte de Santander y en los límites entre Choco y Valle del Cauca, al oriente del departamento de Santander y en al altiplano cundiboyacense. También se observan algunas zonas de las regiones Caribe, Pacífica, Orinoquía y Amazonía donde la modelación registra eventos de granizadas (11-20 eventos). Para las dos últimas regiones no se encontraron registros históricos de eventos de granizadas en las diferentes fuentes consultadas y tampoco se contó con series de tiempo de la variable precipitación para realizar la validación del modelo WRF en esta zona. Para el mes de febrero el modelo registra en las cordilleras, mayores zonas con números de eventos de granizadas entre los 50 y 70 en la década estudiada. Para marzo este patrón tuvo un notable aumento en el número de eventos y en el área de cobertura, llegando a registrar más de 70 eventos para el periodo estudiado, especialmente en el altiplano cundiboyacense y en los departamentos de Arauca, Antioquia, Santander y Norte de Santander; este mes fue el de mayores registros según el WRF. Para los meses del periodo abril-agosto el número de

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

eventos y de zonas con presencia de granizo empiezan a disminuir paulatinamente; el mes de julio fue el de menor extensión territorial y menor número de eventos de granizadas, seguido de los meses de junio y agosto. En los meses de septiembre y octubre se observa nuevamente el aumento de zonas y número de granizadas registradas por el modelo, especialmente en los departamentos de Antioquia, Cauca, Santander y Norte de Santander, al igual que en el altiplano cundiboyacense. Para los meses de noviembre y diciembre nuevamente disminuye el número de granizadas (Figura 3).

Como se puede observar, las zonas de mayor número de granizadas se encuentran en las cordilleras y en la parte de la Sierra Nevada de Santa Marta, las cuales varían según la estacionalidad. Los meses con mayor número de granizadas y zonas se registran en marzo, abril, septiembre y octubre; contrario a los meses de junio, julio, agosto y diciembre, que registran los menores eventos.

En la Figura 4 se observa la distribución espacial del acumulado de granizadas en una década (20012010) simuladas por WRF y las reportadas durante ese mismo periodo. En el mapa se observan las zonas con mayor número de eventos en los departamentos de Antioquia, Cauca, Nariño, Santander, Norte de Santander, Cundinamarca y Boyacá (región Andina).

Conclusiones

Sobre la base de una revisión histórica de los desastres generados por granizadas se pudo evidenciar que este fenómeno es frecuente en el país y tiene impactos importantes especialmente en la agricultura (cultivos), así como en infraestructura urbana (unidades habitacionales, dotaciones escolares y de salud, redes de acueducto, entre otros) y rural (invernaderos, graneros, establos, etc.).

A partir de la revisión del material histórico, se estableció que los eventos son más frecuentes en la región Andina con el 90%, especialmente en los departamentos de Antioquia, Cauca, Valle del Cauca, Santander, Risaralda y Cundinamarca. Los meses en los que más se registran granizadas son los de transición de época seca a lluviosa (marzo con el 64%) y de lluviosa a seca (noviembre con el 50%) ocurriendo generalmente en horas de la tarde, especialmente entre las 13:00 y 15:00, hora local. Bogotá, que se considera como una unidad de análisis diferente a las otras, presenta un 34% de los datos reportados, donde en febrero y noviembre se presenta la mayor frecuencia de eventos. La región Caribe registra el 8% de las granizadas, destacándose los departamentos de Bolívar, Cesar, Córdoba y La Guajira con el mayor número de eventos; los meses donde más se presentan las granizadas son entre junio y agosto, durante el llamado "veranillo de San Juan".

Se estableció que las granizadas no ocurren dentro de los grandes sistemas convectivos sino en la periferia de estos, en zonas en las que tal vez, habiendo escasa nubosidad, se facilita el calentamiento intenso de la superficie en horas de la mañana, favoreciendo la formación de

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

convección local intensa que conlleva a la formación del granizo y la correspondiente granizada.

Los resultados obtenidos del modelamiento a través del WRF muestran que en el momento de la granizada la humedad relativa es mayor al 70%, aunque esta resultó ser una variable que no muestra una influencia a la hora de la ocurrencia del evento. En cuanto a la dirección del viento, no se detectó ninguna predominancia de alguno de los rumbos en particular, por lo que las granizadas se presentan tanto en vientos del noreste como del sureste, destacándose cambios abruptos en el sentido horas antes de la granizada. Asimismo, la velocidad del viento en los instantes en que ocurren las granizadas tiende a estar por debajo de 10 m/s.

El modelo WRF representa satisfactoriamente los eventos para el día y la hora de la granizada, especialmente a través de las variables como la altura de la isoterma de 0 °C (por debajo de 550 hpa) la cual, combinada con factores como la altura sobre el nivel del mar (mayor frecuencia por encima de los 2.500 m.s.n.m.), la pendiente (valores bajos 0°-10°, más favorables) y la relación de orografía con el viento (condiciones más propicias a barlovento), permite detectar los eventos de granizadas para diferentes regiones. No obstante, la modelación efectuada con la parametrización indicada en la metodología no arrojó un buen resultado para los índices de inestabilidad (CAPE, CIN, Kl, TT y SWEAT), por lo que se recomienda seguir explorando diversos umbrales de parametrización que permitan establecer reglas de pronóstico.

La modelación tuvo un buen desempeño en la representación de la precipitación diaria (75%) y en la ocurrencia o no de la "lluvia" o "lluvia intensa" (56% > a 50 mm) en los días y horas en que se presentan las granizadas, lo que infiere que el modelo representa con cierto grado de acierto la actividad convectiva suficiente para generar una granizada en el área.

En la validación de la ocurrencia de eventos de granizadas el modelo obtuvo una coincidencia del 46% con las granizadas registradas para el periodo 2001-2010. El modelo tiene un desempeño satisfactorio en la reproducción de las condiciones bajo las que ocurrieron las granizadas, lo cual lo habilita para ser usado, con los cuidados señalados, en la detección del fenómeno de las granizadas.

Con base en la posibilidad que brinda el WRF para detectar granizadas, se pudo esbozar una climatología de este fenómeno sobre el territorio colombiano, la cual se resume en lo siguiente: el mayor número de eventos de granizadas ocurren en la región Andina, especialmente en las zonas montañosas (cordillera Occidental, cordillera Central y cordillera Oriental). Los departamentos que mayores eventos registran son Antioquia, Cauca, Nariño, Santander, Norte de Santander, Cundinamarca y Boyacá, lo cual varía de acuerdo a la estacionalidad de las lluvias. Los meses con mayor número de granizadas son marzo, abril, septiembre y octubre, contrario a los meses de junio, julio, agosto y diciembre, que registran los menores eventos. En las demás regiones, durante el mes de enero se presentan la mayor cantidad de eventos, con excepción de la zona de la Sierra Nevada de Santa Marta (región Caribe);

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

los meses donde se presenta el mayor número de granizadas son marzo y septiembre.

La climatología del granizo generada por el WRF para Colombia puede servir de base para estimar la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno en determinados lugares del país, lo que puede ser útil para diferentes propósitos prácticos en la gestión del riesgo de desastres asociados a este fenómeno y para la elaboración de una climatología, como fue el caso de la presente investigación. Esta aproximación podría ser explorada en otras regiones del continente americano.

Agradecimiento

Los autores reconocen y expresan agradecimientos por el apoyo obtenido a través del proyecto de investigación "Análisis de procesos regionales que acentúan o suavizan la señal global del calentamiento y del cambio climático sobre el territorio colombiano", financiado por Colciencias (Código 1101-569-35174; Contrato 01542013 Colciencias - Universidad Nacional de Colombia). Igualmente al proyecto DIB 16065 y Código Quipu 201010018520, el cual financió al grupo de investigación Tiempo, Clima y Sociedad del Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas, en el marco de la Convocatoria Nacional de apoyo para el fortalecimiento de grupos de investigación o creación artística que soporten programas de posgrado de la Universidad Nacional de Colombia 2012 (modalidad: Convocatoria nacional apoyo para el fortalecimiento de grupos de investigación o creación artística que soporten programas de posgrado de la Universidad Nacional de Colombia -2012, modalidad única).

Referencias

Allen, Jhon, Michael Tippett, y Adam Sobel. 2015. "An Empirical Model Relating U.S. Monthly Hail Occurrence to Large-Scale Meteorological Environment." *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 7 (1): 226-243. doi: 10.1002/2014MS000397.

Arcila Pulgarín, Jaime, y Álvaro Jaramillo Robledo. 2010. "Recuperación de cafetales afectados por granizadas." *Avances Técnicos Cenicafe*, 397: 1-4.

Armenta Porras, Guillermo Eduardo. 2013. "Análisis detallado del efecto Föhn generado por la cordillera Oriental del Alto Magdalena (Huila y Tolima)." Tesis de Maestría en Ciencias-Meteorología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Berthet, Claude, Jean Dessens, y José Luis Sánchez. 2011. "Regional and Yearly Variations of Hail Frequency and Intensity in France." *Atmospheric Research* 100 (4): 391-400. doi: 10.1016/j.atmosres.2010.10.008.391-400.

Branchero, Santiago. 2017. "Evaluación de la capacidad de predicción de granizo de índices atmosféricos." Tesis de maestría en Explotación de Datos y Descubrimiento de Conocimiento, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Caja de Crédito Agraria. 1998. *Los riesgos hidroclimáticos del agro Colombiano*. Santafé de Bogotá: Seguros Caja Agraria.

Cepeda Arias, Edisson Ramiro. 2010. "Recopilación histórica y análisis climatológico de eventos de granizada ocurridos sobre Bogotá y su relación con el cambio climático." Tesis de Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Ceperuelo, M. M. 2008. "Identificación y caracterización del granizo mediante el radar meterologico. Modelos de predicción del ciclo de vida de las células convectivas." Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, Barcelona.

Changnon, Stanley, y David Changnon. 2000. "Long-Term Fluctuations in Hail Incidences in the United States." *Journal of Climate* 13 (3): 658-664. doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<0658:LTFIHI>2.0.CO;2.

Cifelli, Robert, Nolan Doesken, Patrick Kennedy, Lawrence D. Carey, Steven A. Rutledge, Chad Gimmestad, y Tracy Depue. 2005. "The Community Collaborative Rain, Hail, and Snow Network." *Bulletin of the American Metorological Society* 86 (8): 1069-1077. doi: 10.1175/BAMS-86-8-1065.

CPC-NOAA (Climatic Prediction Center-National Oceanic and Atmospheric Administration). 2013. "El Niño / Southern Oscillation (ENSO)." *Climate & Weather Linkage*. Consultado el 15 de Agosto de 2015. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

CPTEC/lNPE. s.f. "Centro de Previsao de Tempo e estudos Climáticos." Consultado el 25 de agosto de 2015. http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goesi6.formulario.logic

De, U. S., Rajiv Kumar Dube, y G. S. Prakasa Rao. 2005. "Extreme Weather Events over India in the last 100 Years." *Journal of Indian Geophysical Union* 9 (3): 173-187.

DesInventar. s.f. "Sistema de inventarios deefectos de desastres." Consultado el 15 de mayo de 2015. https://online.desinventar.org/desinventar/#COL-1250694506-colom-bia_inventario_historico_de_desastres

El Espectador. 2008. "140 viviendas resultaron afectadas por el aguacero en Tunjuelito." 30 de marzo de 2008. Consultado el 15 de febrero de 2015. https://www.elespectador.com/noticias/bogota/articulo-140-viviendas-resultaron-afectadas-el-aguacero-tunjuelito

El Tiempo. 2002. "Granizo e inundaciones." 9 de abril de 2002. Consultado el 15 de febrero de 2015. https://www.eltiem-po.com/archivo/documento/MAM-1313670 https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1313670

El Universal. 2012. "Vendaval deja 27 vivienda sin techo en barrio Policarpa y llovió con granizo en algunas zonas." 29 de junio de 2012. Consultado el 15 de febrero de 2015. https://www.eluniversal.com.co/cartagena/vendaval-deja-27-viviendas-sin-techo-en-barrio-policarpa-y-llovio-con-granizo-en-alg-NXEU165787

Evans, Jason P., Marie Ekstròm, y Fei Ji. 2012. "Evaluating the Performance of a WRF Physics Ensemble over SouthEast Australia." *Climate Dynamics* 39 (6): 1241-1258. doi: 10.1007/soo382-011-1244-5.

Frisby Emily M., y H. W. Sansom. 1967. "Hail Incidence in the Tropics." *Journal of Applied Meteorology* 6 (2): 339-354. doi: 10.1175/1520-0450(1967)006<0339:HIITT>2.0.CO;2.

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Gaines, Mitchell. 2012. "Application of the Weather Research and Forecasting (WRF) Model to Simulate a Squall Line: Implications of Choosing Parameterization Scheme Combinations and Model Initialization Data Sets." Tesis de Maestría en Ciencia, Western Kentucky University, Bowling Green.

García Sanjuan, Julio. 1976. *Pedriscos y granizadas,* no. 2076 de la serie *Hojas divulgadoras*. Madrid: Ministerio de Agricultura.

Jewell, Ryan, y Julian Brimelow. 2009. "Evaluation of an Alberta Hailgrowth Model using Severe Hail Proximity Soundings in the United States." *Weather and Forecasting* 24 (6): 1592-1609. doi: 10.1175/2009WAF2222230.1.

Jiménez Torres, Abraham David. 2007. "Cargas de granizo en Colombia." Tesis de pregrado en Ingenierica Civil, Universidad de los Andes, Bogotá.

Jin, Jiming, Norman L. Miller, y Nicole Schlegel. 2010. "Sensitivity Study of Four Land Surface Schemes in the WRF Model." *Advances in Meteorology*, article ID 167436. doi: 10.1155/2010/167436.

Knight, Nancy. 1996. "Hail." En *Encyclopedia of Climate and Weather*, editado por Stephen H. Schneider, Terry Root y Michael Mastrandrea, vol. I, 380-382. Oxford: Oxford Press.

La Patria. 2014. "Inundaciones de ayer mantienen caos de movilidad en Medellín." 30 de octubre de 2014. Consultado el 15 de febrero de 2015. https://www.lapatria.com/nacional/inundaciones-de-ayer-mantienen-caos-de-movilidad-en-medellin-142281

Lassig, Jorge Luis. 2006. "Precipitaciones de granizo en el Alto Valle del río Negro y Neuquen, su influencia en la fruticultura regional." Tesis de doctorado en Ciencias de la Atmósfera, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Leslie, Lance M., Mark Leplatrier, y Bruce W. Buckey. 2008. "Estimating Future Trends in Severe Hailstorms over the Sydney Basin: A climate Modelling Study." *Atmospheric Research* 87 (1): 37-51. doi: 10.1016/j.atmos-res.2007.06.006.

Litta, Arakkal John, Uma Charan Mohanty, y Sumam Mary Idicula. 2012. "The Diagnosis of Severe Thunderstorms with High-Resolution WRF Model." *Journal of Earth System Science* 121 (2): 297-316. doi: 10.1007/S12040-012-0165-y

López Campano, Laura. 2003. "Convección atmosférica severa: pronóstico e identificación de tormentas con granizo." Tesis de doctorado en Física, Universidad de León, León-España.

Mezher, Romina, y Pablo Mercuri. 2008. "Analisis geoestadistico de la distribución de eventos de granizada en Argentina." Ponencia presentada en el *XV Congresso brasileiro de meteorologia,* Instituto de Clima y Agua, Centro de investigación de recursos natutales (CIRN) e Instituto nacional de tecnología agropecuaria (INTA), Sao Paulo, 24 al 29 de agosto.

Olcina Cantos, Jorge, Antonio Manuel Rico Amorós, y Arturo Jiménez Rodríguez. 1998. "Las tormentas de granizo en la comunidad Valenciana: cartografía de riesgo en la actividad agraria." *Investigaciones Geográficas,* no. 19, 5-29.

Pabón-Caicedo, José Daniel, y Thorsten Beisiegel. 2007. "Pronóstico de granizadas mediante modelos númericos regionales en la zona Andina: el caso de la tormenta del 3 de noviembre de 2007 sobre Bogotá D.C."

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Consultado el 7 de septiembre de 2014. http://static.geoentropica.com/publicaciones/Granizada.pdf

Paraschivescu, M., S. Stefan, y M. Bogdan. 2011. "Verification of an Algorithm (DWSR 2500C) for Hail Detection." *Atmosfera* 24 (4): 417-433.

Peña-Beltrán, Zaida Yamile. 2015. "Análisis de las granizadas en Colombia." Tesis de Maestría en Ciencias-Metereología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Pérez Baltazar, María Irene. 2013. "Análisis espacio-temporal de las amenazas naturales en el Estado de San Luis Potosí, México 1960-2010." Ponencia presentada en el *XIV Encuentro de Geografos de América Latina*. Colegio de Geógrafos de Perú, Comité Nacional Perú de la Unión Geográfica Internacional, Lima, 8 al 12 de abril.

Pittaluga, Gustavo. 2004. "Granizo, una amenaza para la producción agrícola." *Marca Líquida Agropecuaria* 14 (132): 25-26.

Pruppacher, Hans R., y James D. Klett. 1980. *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Ravindranath, M., A. Raghavendra, y A. Bohra. 2010. "Experiment on Utilization of AWiFS LU/LC data in WRF Mesos-cale Model." Reporte de investigación, National Centre for Medium Range Weather Forecasting.

Rogers, R. (1997) 2003. *Fisica de las nubes*. Traducido por Joaquín Catalá Alemany. Barcelona: Reverté.

Romo Parra, Carmen, Daniel Gerardo Cayón Salinas, L. Lara Sarmiento, y Germán Giraldo. 2001. "Efectos del granizo y el viento sobre el desarrollo y calidad de los frutos de plátano Dominico Hartón y FHIA-21." *Infomusa* 10 (2): 13-17.

Saha, Suranjana. 2010. "The NCEP Climate Forecast System Reanalysis." Bulletin of the American Meteorological Society 91 (8): 1015-1058.

Saha, Suranjana, Shrinivas Moorthi, Hua-Lu Pan, Wu Xingren, Jiade Wang, y Sudhir Nadiga. 2010. "Supplement to the NCEP Climate Forecast System Reanalysis." Bulletin of the American Meteorological Society 91 (8): ES9-ES25.

SIATA. 2010. "Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá." Consultado el 5 mayo del 2015. https://siata.gov.co/siata_nuevo/

Sioutas, Michalis, Terrence Meaden, y Jonathan Webb. 2009. "Hail Frequency, Distribution and Intensity in Northern Greece." *Atmospheric Research* 93 (1-3): 526-533. doi: 10.1016/j.atmosres.2008.09.023.

Teitelbaum, Hector, y Fabio D'Andrea. 2015. "Deep Convection East of the Andes Cordillera: Four Hailstorm Cases." *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 67 (1). doi: 10.3402/tellusa.v67.26806.

Tiempo, Clima y Sociedad. 2008. Grupo de investigación del Departamento de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Consultado el 5 de mayo de 2015. http://www.humanas.unal.edu.co/2017/unidades-academicas/departamentos/geografia/investigacion/tiempo-clima-y-sociedad

Torrens, Ramón. 2009. "Granizada en Cartagena." *YouTube*, 3' 47." Consultado el 23 de mayo de 2014. https://www.you-tube.com/watch?v=G8dMhbenq7M

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). s.f. "Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres." Consultaldo el 20 de junio de 2015. http://www.gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/emergencias/temporada/MapD.aspx

Vanguardia. 2011. "Fuerte lluvia dejo más de 100 viviendas destechadas." 29 de agosto de 2011. Consultaldo el 20 de junio de 2015. https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/fuerte-lluvia-dejo-mas-de-100-viviendas-destechadas-OBVL119236

Vinet, Freddy. 2001. "Climatology of Hail in France." *Atmospheric Research* 56 (1-4): 309-323. doi: 10.1016/S0169-8095(00)00082-X.

Yair, Yoav, Barry C. Lynn, Colin Price, Vassiliki Kotroni, Konstantinos Lagouvardos, Efrat Morin, Alberto Mugnai, y María del Carmen Llasat. 2010. "Predicting the Potential for Lightning Activity in Mediterranean Storms Based on the Weather Research and Forecasting (WRF) Model Dynamics and Microphysical Fields." *Journal of Geophysical Research* 115. doi: 10.1029/2008JD010868.

Zhang, Chunxi, Qinghong Zang, y Yuging Wang. 2008. "Climatology of Hail in China: 1961-2005." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47 (3): 795-804. doi: 10.1175/2007JAMC1603.1.

Zuohao, Cao. 2008. "Severe Hail Frecuency over Ontario: Recent Trend and Variability." *Geophysycal Research Letters* 35. doi: 10.1029/2008GL034888.

Notas

1 Como ejemplo de este tipo de fatalidades puede servir el caso de la peor tormenta de granizo conocida que tuvo lugar en Moradabad (India) el 30 de abril de 1888, antes de la llegada del monzón de verano. En esa ocasión ocurrieron granizadas que causaron la muerte de 246 personas, muchas de las cuales se produjeron por el impacto directo de las piedras de hielo, mientras que otras murieron a causa de las heridas provocadas por estas (De, Dube y Prakasa 2005, citados por Ceperuelo 2008).

2Del periódico *El Espectador,* se realizaron 50 consultas desde el año 2008 hasta el 2015. Del periódico *El Tiempo* se realizaron 213 consultas desde el año 1991 hasta el 2015.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO Peña-Beltrán, Zaida Yamile; Pabón-Caicedo, José Daniel. 2020. "Climatología de las granizadas en Colombia." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 29 (1): 259-282. doi: 10.15446/rcdg.v29n1.75438.

Zaida Yamile Peña-Beltrán Geógrafa y magíster en Meteorología de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). Investigadora del grupo de investigación Tiempo, Clima y Sociedad, Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia. Se ocupa en el análisis de fenómenos meteorológicos extremos y en el estudio de la variabilidad climática.

José Daniel Pabón-Caicedo Meteorólogo, Ph.D. en Geografía del Instituto Hidrometeorológico de Odessa (Ucrania). Actualmente es profesor asociado del Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). Lidera el grupo de investigación Tiempo, Clima y Sociedad, adscrito al Departamento de Geografía. Se ocupa del estudio de la variabilidad climática y del cambio climático, así como de las amenazas y riesgos de desastres originados por fenómenos hidrometeorológicos e hidroclimáticos extremos.

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Notas de autor

Correspondencia:
carrera 30 n.° 45-03, edificio 212 (Aulas de Ciencias Humanas), oficina 317, Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. - Colombia.

PDF generado a partir de XML-JATS4R por Redalyc
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto