

Evaluación de la factibilidad del pronóstico de descargas eléctricas mediante el Índice del Potencial de Rayos



Feasibility study of the forecast of electric shocks using the Lightning Potential Index <https://eqrcode.co/a/kLieTD>

 Leydi Laura Salazar Domínguez*, Adrián Luis Ferrer Hernández, Lourdes Álvarez-Escudero

Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de la Habana, La Habana 10400, Cuba

RESUMEN: El Índice del Potencial de Rayo (LPI por sus siglas en inglés) es una medida del potencial de generación y separación de cargas que conducen a relámpagos en nubes convectivas, el mismo es calculado dentro de la región de separación de carga de la nube entre 0°C y -20°C -20°C , teniendo en cuenta la velocidad de las corrientes ascendentes y parámetros microfísicos de las nubes. El objetivo general de nuestra investigación es evaluar la factibilidad del LPI para pronosticar descargas eléctricas sobre el territorio cubano, mediante el análisis de tres casos de estudios con información significativa respecto a la ocurrencia de tormentas. En este estudio se obtuvieron salidas del WRF con la parametrización del LPI inicializadas las 00:00 y 12:00 UTC con intervalos de salidas del modelo para un primer experimento cada 1 hora y un segundo experimento cada 1 minuto, ambas con una resolución espacial de 3km, las cuales se validan con los datos de la red de sensores de Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN). Los resultados muestran que el LPI realiza un pronóstico temporal acertado, pero sobrevalora el área de ocurrencia de las descargas eléctricas, aunque este índice es una muestra de la actividad convectiva en general, por lo que el LPI es una factible herramienta en el pronóstico a corto plazo de la actividad eléctrica y convectiva.

Palabras claves: LPI, WRF, Pronóstico de descargas eléctricas.

ABSTRACT: The Lightning Potential Index (LPI) is a measure of the potential for generation and separation of charges that lead to lightning in convective clouds. It is calculated within the cloud separation region between 0°C and -20°C , taking into account the speed of updrafts and microphysical parameters of the clouds. The general objective of our research is to evaluate the feasibility of the LPI to forecast electric shocks on the Cuban territory, by analyzing three case studies with significant information regarding the occurrence of storms. In this study, WRF outputs are obtained with the LPI parameterization at 00:00 and 12:00 UTC for a first experiment every 1 hour and a second experiment every 1 minute, both with a resolution of 3km, which are validated with the data from the Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN) sensor network. The results show that the LPI makes an accurate temporal forecast but overestimates the area of occurrence of electric discharges although this index is a sample of the convective activity in general. So, the LPI is a feasible tool in the short-term forecast of the electrical and convective activity.

Keywords: LPI, WRF, Lightning Forecast.

INTRODUCCIÓN

La elaboración de planes encaminados a la protección de vidas humanas y de diversos sectores de la economía se ven afectados por las tormentas eléctricas. Los impactos de los rayos directos tienen efectos mortales y destructores para los animales y seres humanos. La muerte por fulguración (muerte por el impacto de una descarga eléctrica) es la primera causa

de muerte por fenómeno natural en Cuba y la principal causa natural de ocurrencia de incendios forestales en el país. Las instalaciones, edificaciones, los servicios eléctricos y de telecomunicaciones y el transporte también se ven afectados por las tormentas eléctricas y las pérdidas económicas son elevadas. Por lo antes expresado la predicción de las descargas eléctricas es una prioridad en los estudios de la meteorología en Cuba.

*Autor para correspondencia: llsalazardom@gmail.com

Recibido: 21/01/2020

Aceptado: 19/11/2020

Debido a que en Cuba las tormentas solo pueden detectarse por observación directa en las estaciones meteorológicas y no existe un instrumental capaz de localizar de forma precisa las descargas eléctricas, es muy difícil hacer un pronóstico objetivo por modelación de la ocurrencia de estas, pues no existe información para validar y hacer estudios de sensibilidad sobre la presencia del fenómeno en estudio.

El modelo numérico Weather Research and Forecast (WRF) (Skamaroc, 2008) brinda la posibilidad de incorporar un pronóstico de ocurrencia de descargas eléctricas, aunque para su validación, los resultados deben ser comparados con los datos captados por alguna red de sensores detectores de relámpagos o sensores a bordo de satélites meteorológicos, los cuales brindan información específica sobre el fenómeno del rayo. En el 2018 Cuba recibe en el Instituto de Meteorología (INSMET) la donación por la empresa Earth Networks (EN por sus siglas en inglés) de una estación meteorológica automática equipada con un sensor detector de rayos, a partir del funcionamiento de este sensor en nuestro país pudimos acceder a los datos de la red de sensores ENTLN, posibilitándonos así la realización de nuevos estudios sobre este fenómeno meteorológico.

El WRF brinda dos parametrizaciones para pronosticar parámetros relacionados con las descargas eléctricas que son el PR92 (Price & Rind, 1992) y el LPI (Yair *et al.*, 2010). El LPI es una medida del potencial de generación y separación de cargas que conduce a relámpagos en tormentas de convección. Es calculado dentro de la región de separación de carga de la nube entre 0°C y -20°C a -20°C , donde el mecanismo no inductivo conlleva a colisiones de partículas de hielo y de "graupel" en presencia de agua súper-enfriada. Esta parametrización está altamente relacionada con observaciones de relámpagos y puede ser un parámetro útil para predecir las descargas eléctricas, así como también un mecanismo para mejorar el pronóstico a corto y mediano plazo de tormentas convectivas y lluvias intensas.

Posteriormente Yair y colaboradores en el 2010 como una manera de proporcionar pronósticos de riesgo de rayos para el público de manera cualitativa, demostraron que para la región mediterránea el LPI se correlaciona bien con las proporciones de rayos observadas y aunque no produce directamente una cantidad de rayos plantean la hipótesis de que la acumulación de carga debe ser proporcional a la cuarta potencia de las velocidades relativas de las partículas de carga (Yair *et al.*, 2010).

Lynn y Yair en el 2010 estudiaron la predicción de la densidad de tormentas con el modelo WRF, apoyados en análisis de regresión y correlación obteniendo relaciones sólidas entre los valores del LPI y la actividad de rayos observados. También concluyen que el uso del mencionado índice en los modelos operacionales de mallas con una resolución de 4km puede

arrojar información valiosa sobre las áreas principales donde se observa convección y donde el potencial de tormentas eléctricas es grande.

Demytyeva y colaboradores en el 2015 plantearon que el máximo valor del LPI tiene una fuerte dependencia del tipo de parametrización de microfísica que utiliza el modelo WRF, lo que no permite determinar un solo umbral de LPI para las diferentes microfísicas como un criterio de la ocurrencia de rayos. Los autores concluyeron además que el mapa topográfico del LPI subvalora significativamente el tamaño de las regiones donde puede ocurrir la tempestad y el modelo muestra que la diferencia de potencial para generar una descarga se encuentra en una región mayor que la que el LPI predice.

Los estudios realizados en Cuba sobre las descargas eléctricas se han enfocado, principalmente, en la climatología de las mismas realizadas a partir de las observaciones de código de estado de tiempo presente y pasado registrado en la Red de Estaciones Meteorológicas del país (Lecha *et al.*, 1994; Álvarez & Borrero, 2018). Con respecto al pronóstico solo se caracteriza la ocurrencia en aisladas, algunas y numerosas para tres regiones del país (Rubiera *et al.*, 2017).

El objetivo del presente trabajo es evaluar la factibilidad del "Índice del Potencial de Rayos" (LPI) para pronosticar descargas eléctricas sobre el territorio cubano, mediante el análisis de tres casos de estudios con información significativa respecto a la ocurrencia de tormentas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente estudio se utilizó el modelo WRF Versión 3.8 (MMM, 2017), de amplio uso en el mundo y de código abierto. En Cuba ya se tiene experiencia en el uso de este modelo para el pronóstico a muy corto, corto y mediano plazo del estado del tiempo (Sierra *et al.*, 2014).

La figura 1 muestra los dominios de simulación utilizados en este estudio los cuales presentan una resolución espacial de 27, 9 y 3 km. El dominio 1 (d01 a 27km) abarca el Golfo de México, el Mar Caribe y una porción de la región occidental del Océano Atlántico, el dominio 2 (d02 a 9km) se limita al sur de la Florida, las Antillas Mayores y sus mares adyacentes y el dominio 3 (d03 a 3km) comprende a la región de Cuba y sus mares adyacentes.

En la Tabla 1 se muestra la configuración física utilizada en el WRF, esta se obtuvo del estudio realizado por Sierra y colaboradores en el 2014 y es utilizada actualmente de forma operativa en el Sistema de Pronóstico Inmediato (SISPI), pero en nuestra configuración se cambió la parametrización de microfísica, pues la empleada por el SISPI no tiene en cuenta los hidrometeoros necesarios para realizar el cálculo del potencial de descargas eléctricas en nubes de tormenta, por tanto empleamos la parametrización de Thompson

para los dominios de baja resolución (27 y 9 km) que tiene en cuenta los procesos de formación del hielo, nieve y “graupel”, sin embargo este estudio solo se basó en el dominio de mayor resolución (3km).



Figura 1. Representación del dominio de corrida. En el interior se señala el área de evaluación para los experimentos desarrollados con el WRF.

Para la verificación del desempeño del pronóstico del WRF se utilizaron los datos de la red global de detección de descargas eléctricas de ENTLN que tiene un detector ubicado en la estación meteorológica de Casablanca, en La Habana y proporciona con significativa precisión la detección de rayos nube-nube (IC) y nube-tierra (CG) y emite información cada 2 segundos. La información obtenida de la red de sensores corresponde al área de estudio según se muestra en la figura 1, que encierra a Cuba y mares adyacentes (ENTLN Datafeed, 2017).

Cada uno de estos sensores brinda una información clasificada de cada uno de los datos registrados, la misma depende de la configuración del sensor, entre las más importantes se encuentran las siguientes: latitud-longitud (con una resolución espacial máxima de 250m con alcance efectivo de hasta 400km), polaridad (positiva o negativa) y la clasificación de la descarga eléctrica en (IC /CG) (por definición, el rayo se clasifica como CG cuando existe algún stroke de retorno por tanto cualquier pulso que no contenga ningún stroke de retorno se clasifica como IC) (ENTLN Datafeed, 2017).

Diseño del experimento

Las corridas del WRF se iniciaron con los datos del modelo numérico de predicción Global Forecast System (GFS por sus siglas en inglés) en los horarios de las 00:00 y las 12:00 UTC, efectuando pronósticos de hasta 24 horas.

El experimento se realizó con salidas del modelo cada 1 minuto para poder describir con mayor detalle lo que ocurrió entre un horario de pronóstico y el siguiente y así poder trabajar con valores acumulados del LPI en 1 hora.

Se trabajó con el periodo del 16 al 18 de agosto del 2017, debido a que como las salidas fueron cada un minuto se necesitaba una gran capacidad de cómputo y teniendo en cuenta la disponibilidad de datos de la red ENTLN este periodo fue el que presentó mayor volumen de información en la misma, coincidiendo con un gran número de registro de descargas eléctricas.

Del 16 al 18 de agosto del 2017 la situación sinóptica prevaleciente fue la influencia de las altas presiones oceánicas y se dieron mayormente precipitaciones relacionadas con la inestabilidad atmosférica vespertina, derivada del fuerte calentamiento diurno y el suficiente contenido de humedad en la columna troposférica, en interacción con el ascenso forzado en superficie y niveles bajos por la confluencia del flujo a mesoescala.

Los sensores de detección de descargas eléctricas de ENTLN reportan las coordenadas de cada punto donde se registran caídas de rayos, sin embargo, el modelo da valores de LPI en puntos de la rejilla configurada por el WRF, lo que hace necesario compatibilizar ambas informaciones. Para esto se identifican los puntos de cada descarga eléctrica que coinciden dentro del área que ocupa cada celda del modelo y se genera un producto de acumulado [*cant./h*] por punto de rejilla, que brinda información de la cantidad de descargas que ocurrieron dentro de cada celda de la malla del modelo WRF (ver figura 2).

El grado de similitud entre las informaciones espaciales y temporales dadas por ENTLN y las pronosticadas por el modelo se evalúan usando el índice de correlación de Pearson dado en la ecuación 1) (Restrepo B & Gonzales L, 2007).

Tabla 1. Opciones del WRF más significativas utilizadas en las simulaciones, configuración física del modelo (parametrizaciones utilizadas)

Parámetros	Opción	
	D1 y D2 (27 y 9 Km)	D3 (3 Km)
Parametrización de Microfísica	Thompson	Morrison2-mom
Parametrización de la convección	Grell-Freitas.Grell and Freitas,(2013)	Con y sin Grell-Freitas, Grell and Freitas, (2013)
Parametrización de radiación de onda larga		RRTM scheme.
Parametrización de radiación de onda corta		Dudhia scheme.
Parametrización de la capa superficial		Revised MM5 Monin-Obukhov scheme.
Parametrización de la física del suelo		Unified Noah land-surface model
Parametrización de la capa fronteriza planetaria		MYNN2, Nakanishi y Niino (2004, BLM)
Parametrización de descargas eléctricas		LPI. Yair <i>et al.</i> , 2010

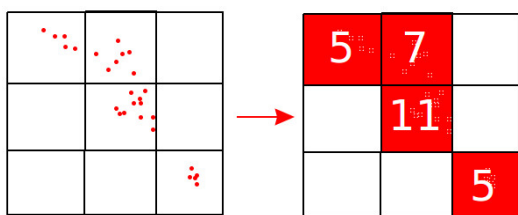


Figura 2. Esquema de la construcción de una rejilla con los datos del sensor de detección de descargas eléctricas.

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(F_i - \bar{F})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

Donde O y \bar{O} (media aritmética de O) representan los datos observados (EN), F y \bar{F} (media aritmética de F) los estimados (LPI) y N el tamaño de la muestra.

Para la verificación del pronóstico determinístico se utilizaron 3 conceptos dados por Davydova Belitskaya y colaboradores en el 2016 y para analizar la calidad de dicho pronóstico se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- a es un evento observado y pronosticado, también conocido como “aciertos”
- b es un evento no observado pero pronosticado o un evento tipo “falsas alarmas”
- c es un evento observado, pero no pronosticado, es decir un evento “perdido” o “error”

1. Índice de Éxito Crítico (CSI, por sus siglas en inglés).

El CSI (ecuación 2) combina la Probabilidad de Detección (POD) con la Razón de Falsas Alarmas (FAR) en un total para eventos de baja frecuencia.

$$CSI = \frac{a}{a+b+c} \quad (2)$$

Este índice oscila entre 0 y 1. Cuando $CSI = 0$ no se pronosticaron los eventos extremos o de baja frecuencia, mientras $CSI = 1$ muestra una perfecta forma de pronosticar eventos de baja frecuencia (eventos conocidos también como extremos o atípicos).

2. Razón de Falsas Alarmas (FAR, por sus siglas en inglés).

La FAR (ecuación 3) es la fracción de eventos pronosticados y no observados y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (3)$$

Este índice también oscila entre 0 y 1, donde el valor igual a 0 muestra que no se dieron los pronósticos y realmente no se presentó ni un evento de interés y cuando el valor es 1 se da un 100 % de pronósticos erróneos o cuando no se registra ni un evento observado. Mientras más pequeño es el índice FAR, es menor el número de pronósticos erróneos emitidos.

3. Probabilidad de Detección (POD, por sus siglas en inglés)

La Probabilidad de Detección de Eventos de Interés (POD) (ecuación 4) es uno de los índices más importantes de las Tasas de Aciertos (HR, por sus siglas en inglés).

$$POD = \frac{a}{a+b} \quad (4)$$

La escala de variación del índice HR o POD igualmente fluctúa en el rango de 0 a 1. Cuando el índice es igual a 1, la probabilidad de detección de los eventos de interés es igual al 100 %, mientras que un índice igual a cero, muestra una nula probabilidad de detección.

En todos los análisis se consideró que ocurren descargas eléctricas cuando el acumulado [*cant.h*] de descargas eléctricas obtenido de EN es diferente de 0 y cuando el LPI es mayor o igual que 0.1 JKg⁻¹.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 3 se representa el ciclo diario para todos los días de experimento del promedio del acumulado de descargas eléctricas dado por ENTLN y del LPI obtenido a partir de las salidas del modelo WRF inicializado a las 00:00 y 12:00 UTC.

La marcha diaria de los acumulados promedios del LPI y el ENTLN (figura 3) muestra un proceder similar y una alta coincidencia en los horarios donde mayor es el número de tormentas (Álvarez & Borrero, 2015) con un máximo entre las 20:00 y las 21:00 UTC (entre las 15 y 16 hora local). Los resultados obtenidos para diferentes horarios de inicialización, con una correlación de 0,7 a las 00:00 UTC y de 0,85 a las 12:00 UTC, son bastantes similares, aunque las salidas inicializadas a las 12:00 para el dominio de 3km dieron correlaciones un poco más altas.

En la figura 4 se muestra este análisis para los puntos del dominio de 3km pertenecientes a la región occidental donde se supone que hayan mejores registros de la red global ENTLN por estar localizado el sensor en la estación meteorológica Casa Blanca.

En este caso también el comportamiento del ciclo diurno es similar para los registros del LPI y los acumulados promedios de ENTLN con horarios máximos de ocurrencia de descargas eléctricas a las 21:00 UTC (16 hora local). Las correlaciones entre los dos parámetros dados en estas marchas diarias muestran un mejor valor para cuando el modelo es inicializado a las 12:00 UTC y en ambos casos de inicializaciones los valores de correlación son semejantes en la región occidental de Cuba con los obtenidos en el dominio de 3km.

En las figuras 5 y 6 se muestran los índices CSI, FAR, POD para los 3 días analizados en este experimento con inicializaciones a las 00:00 y 12:00 UTC.

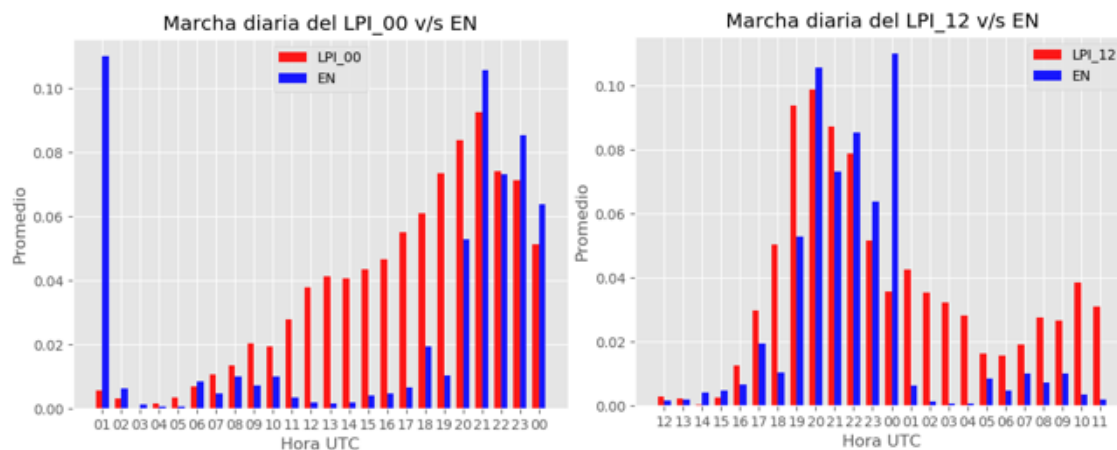


Figura 3. Marcha diaria del LPI [Jkg^{-1}] y el EN [$cant./h$] para el dominio de 3km. En el gráfico de la izquierda se muestran las salidas del WRF inicializadas a las 00:00 UTC y en el de la derecha se muestran las salidas del WRF inicializadas a las 12:00 UTC

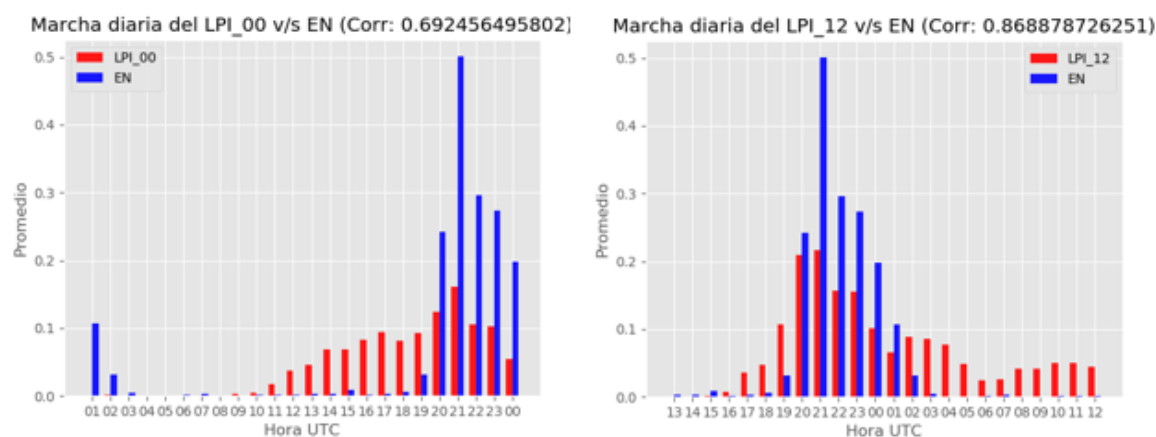


Figura 4. Marcha diaria del LPI [Jkg^{-1}] y el EN [$cant./h$] para la región occidental de Cuba. En el gráfico de la izquierda se muestran las salidas del WRF inicializadas a las 00:00 UTC y en el de la derecha se muestran las salidas del WRF inicializadas a las 12:00 UTC. En cada gráfico se muestra la correlación entre el LPI y el EN por el método de Pearson

En la **figura 6** se observan valores máximos del índice de POD entre 0.4 y 0.7 siendo estos representativos de la probabilidad de aciertos del LPI con respecto a las descargas eléctricas detectadas por el EN, sin embargo, la **figura 5** presenta valores máximos de este índice inferiores, entre 0.4 y 0.5. De igual manera la FAR representada en la **figura 6** muestra valores entre 0.8 y 1 siendo estos representativos del alto número de falsas alarmas pronosticadas por el LPI, variando en este mismo rango la FAR para las salidas inicializadas a las 00:00 UTC (**figura 5**). El CSI, para ambas horas de inicialización presenta valores bajos entre 0 y 0.2 representando esto la relación existente entre los pronósticos acertados contra todos los pronósticos realizados.

Debido a que la formulación del LPI tiene en cuenta la velocidad vertical del viento y la generación y separación de carga, es un índice de la actividad convectiva, por tanto, al pronosticar "falsas alarmas" está dando indicios del posible desarrollo de nubes convectivas. En los casos de estudio analizados se ob-

servan mayores áreas de falsas alarmas que de aciertos e incluso de errores, al unir los pronósticos acertados con las falsas alarmas no sólo estamos pronosticando la actividad eléctrica sino también la convección que puede ser motivo de fuertes precipitaciones u otros fenómenos meteorológicos peligrosos, pues no todas las nubes convectivas llegan a proporcionar descargas eléctricas.

En la **figura 7** se muestra la marcha diaria del índice del coeficiente de correlación de Pearson entre los valores del LPI frente al ENTLN, presentándose valores bajos de esta correlación (entre 0 y 0,25) indicando que las descargas eléctricas pronosticadas por el LPI se encuentran desplazadas sustancialmente con respecto al área de ocurrencia detectada por la red de sensores ENTLN, sin embargo se aprecia que los valores más altos de dicha correlación se encuentran en los horarios de predominio de actividad eléctrica para ambas inicializaciones, siendo relativamente mayores en las salidas del modelo WRF inicializadas a las 12:00 UTC.

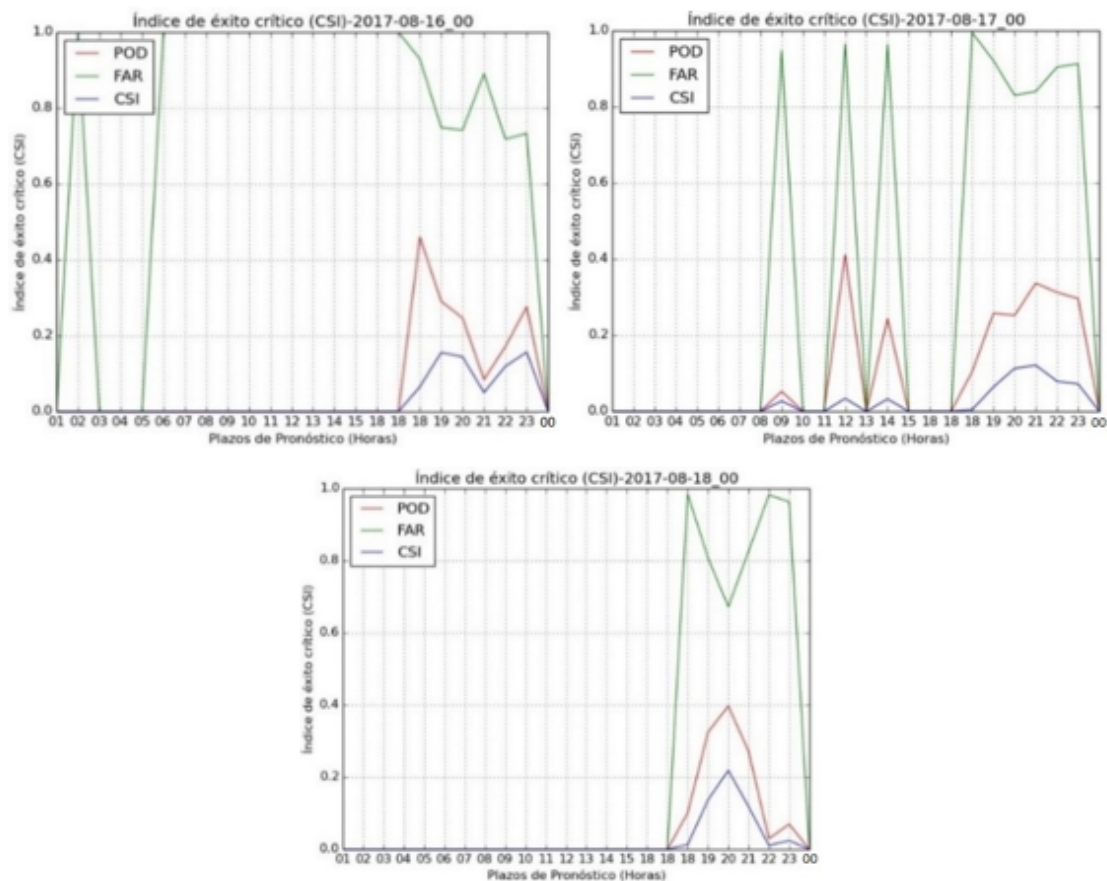


Figura 5. Tasas de acierto CSI, FAR, POD del LPI [Jkg^{-1}] con respecto al EN[cant./h] para los días 16 (figura de la izquierda), 17 (figura de la derecha) y 18 (figura inferior centrada) de agosto del 2017, con salidas del modelo WRF inicializadas a las 00:00 UTC

En la [figura 8](#) se muestran los valores promedios de LPI en los casos en que el ENTLN reporta descargas eléctricas (gráfico de la izquierda) y en los casos que no reporta descargas eléctricas (gráfico de la derecha). Estos valores son máximos entre las 18:00 y 23:00 UTC concordando con el horario de mayor ocurrencia de las tormentas eléctricas ([Álvarez & Borrero, 2015](#)). En dicha figura se observa cómo existe una gran diferencia entre los valores de LPI correspondientes a las mediciones con descargas eléctricas (gráfico de la izquierda, con valor máximo del LPI de $72,7 Jkg^{-1}$ y valor promedio de $7,3 Jkg^{-1}$) y los valores correspondientes a las mediciones sin descargas eléctricas (gráfico de la derecha, con valor máximo de LPI de $13,9 Jkg^{-1}$ y valor promedio de $3,8 Jkg^{-1}$), siendo significativamente superiores los valores del índice para cuando el ENTLN detecta el fenómeno en cuestión, aunque es difícil con la información que se tiene, dado que son casos de estudio, determinar un umbral de LPI a partir del cual pueda considerarse ocurrencia de actividad eléctrica en la atmósfera.

La representación de los promedios de LPI para los puntos con información (puntos diferentes de cero en las mediciones de ENTLN y/o LPI) se observan en la [figura 9](#) donde resalta la superioridad de los valores promedios del LPI en comparación con estos mismos

valores mostrados en la [figura 8](#), pero coincidiendo la presencia de los valores máximos en los horarios de mayor actividad eléctrica. Esta figura nos representa ([figura 9 izquierda](#)) el LPI promedio para los aciertos en un caso y para las falsas alarmas en otro ([figura 9 derecha](#)). El valor máximo se alcanza a los $209,7 Jkg^{-1}$ con promedio de $25,7 Jkg^{-1}$ para los pronósticos acertados y para las falsas alarmas el máximo valor llega a ser de $186,8 Jkg^{-1}$ con promedio de $70,2 Jkg^{-1}$.

Los valores del LPI obtenidos en este estudio, empleando la parametrización de microfísica Morrison2-mom para el dominio de 3km, resultan significativamente altos en comparación con investigaciones anteriores, como los mostrados por [Lynn & Yair \(2010\)](#), que al utilizar la parametrización de microfísica WSM6 obtuvieron valores de este índice entre los 0 y $50 Jkg^{-1}$ y usando la microfísica de Thompson Yair et al. (2010) expusieron valores de LPI entre los 0 y $36 Jkg^{-1}$. Esto se debe al uso de diferente parametrizaciones microfísicas, pues [Dementyeva et al. \(2015\)](#) afirmaron que el máximo valor del LPI tiene una fuerte dependencia del tipo de parametrización, lo que imposibilita formular un solo umbral de LPI para las diversas parametrizaciones como un criterio de la ocurrencia de rayos.

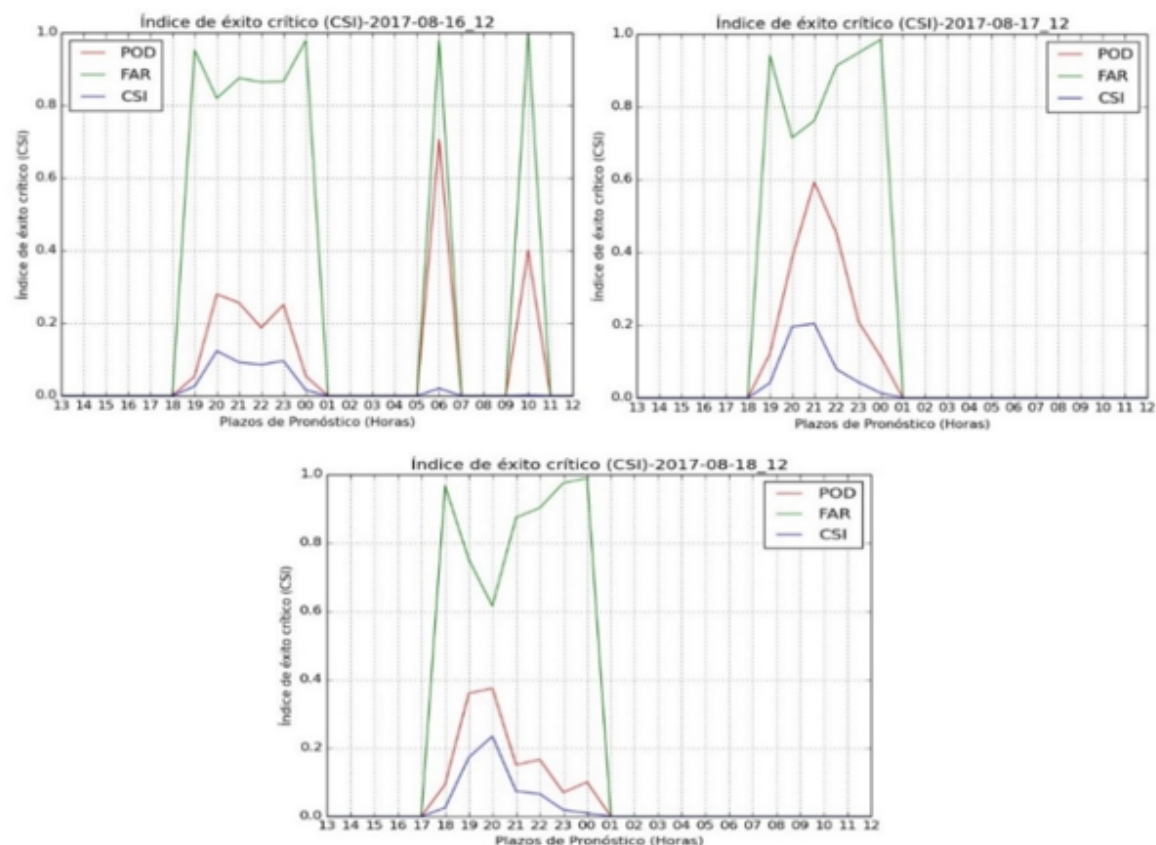


Figura 6. Tasas de acierto (Índice de Éxito Crítico (CSI), Razón de falsas alarmas (FAR), Probabilidad de detección (POD)) del LPI[Jkg^{-1}] con respecto al EN[*cant./h*] para los días 16 (figura de la izquierda), 17 (figura de la derecha) y 18 (figura inferior centrada) de agosto del 2017, con salidas del modelo WRF inicializadas a las 12:00 UTC

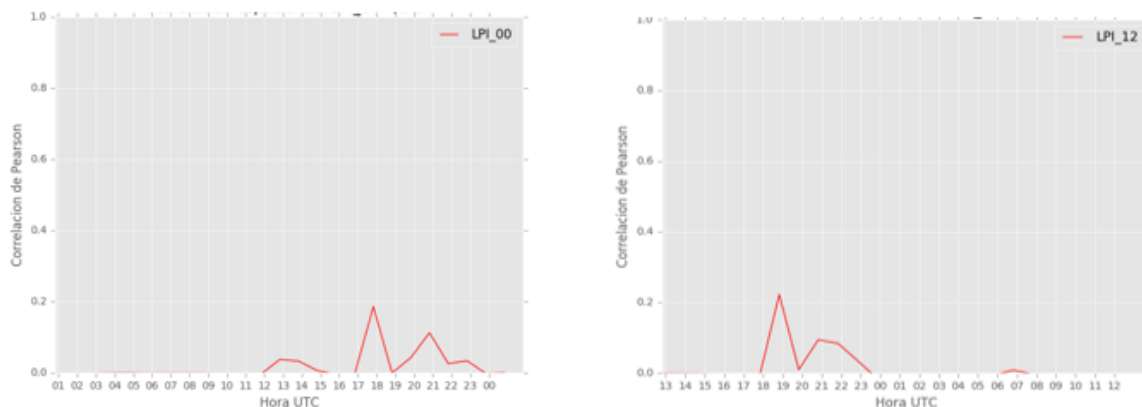


Figura 7. Marcha diaria del índice del coeficiente de correlación de Pearson entre el LPI[Jkg^{-1}] y el ENTLN[*cant./h*], para todos los casos de estudio. El gráfico de la izquierda muestra la correlación de Pearson existente entre el LPI obtenido a partir de las inicializaciones realizadas a las 00:00 UTC y el ENTLN y el gráfico de la derecha a partir de las inicializaciones realizadas a las 12:00 UTC.

En las figuras 8 y 9 se observa que no existe un límite claro para los valores de LPI asociados a descargas eléctricas con respecto a los que no, esto sucede cuando se tiene solo en cuenta los puntos con información. Sin embargo, cuando se consideran los verdaderos negativos (ninguna de las dos fuentes informa descargas) podría situarse un umbral de aproximadamente

15 Jkg^{-1} para la ocurrencia de descargas eléctricas, aunque esto está muy ligado a la hora del día.

En la figura 10 se representa el mejor pronóstico del LPI se encuentra desplazada significativamente con respecto al área detectada por el ENTLN con actividad eléctrica, sin embargo se observa que la zona de

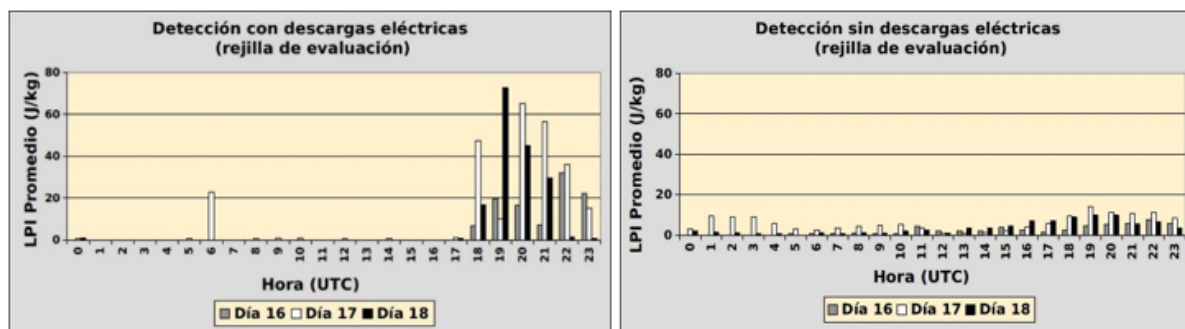


Figura 8. Promedios por horas de los pronósticos del LPI [Jkg^{-1}] para toda la rejilla de evaluación, el gráfico de la izquierda muestra los pronósticos con descargas eléctricas y el de la derecha los pronósticos sin descargas eléctricas

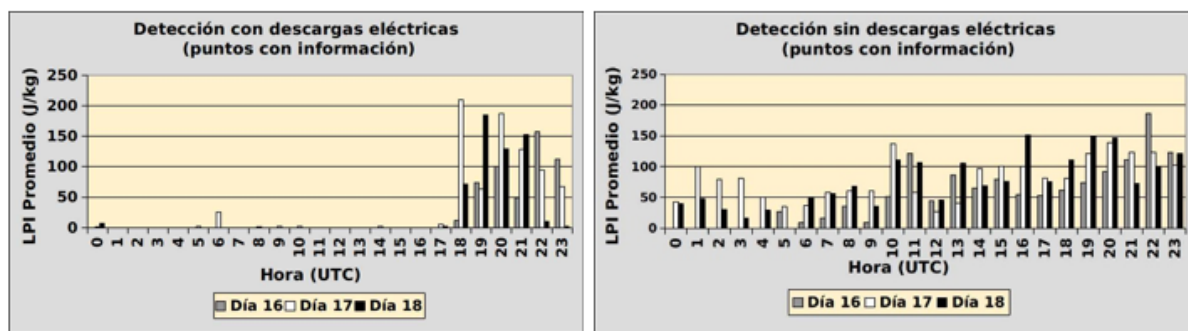


Figura 9. Promedios por horas de los pronósticos del LPI [Jkg^{-1}] para los puntos con información (puntos diferentes de cero para las mediciones del ENTLN y/o LPI), el gráfico de la izquierda muestra los pronósticos realizados para cuando el EN detecta descargas eléctricas (aciertos) y el de la derecha los pronósticos realizados para cuando el ENTLN no detecta descargas eléctricas (Falsas Alarmas)

falsas alarmas (pronóstico de la actividad convectiva) es superior a las áreas comprendidas por los errores y los aciertos, significando esto que el LPI sobre-estima el área de ocurrencia de las descargas eléctricas, pero realiza un pronóstico acertado de la actividad convectiva. También vemos pequeñas áreas que muestran lo contrario, como al sur de La Habana, sobre Artemisa donde se observa que el LPI pronostica un área mucho menor, con bajos valores en comparación con los registrados por el ENTLN; esto puede ser debido a que los modelos tienden a tener un desfase en el tiempo (como se muestra en las figuras 3 y 4) en el pronóstico de la precipitación y la convección.

La tabla 4 muestra los 5 mejores pronósticos obtenidos entre los casos de estudio, estos se encuentran entre las 20:00 y 21:00 UTC siendo consecuentes con el horario de mayor ocurrencia de las tormentas eléctricas, destaca también que tres de ellos fueron obtenidos de las salidas inicializadas a las 12:00 UTC.

La figura 11 es representativa de los pronósticos con 0 % de aciertos, los cuales se encuentran entre los horarios de las 09:00 y 13:00 UTC correspondientes a las horas de la noche y la madrugada donde los desarrollos convectivos son mínimos (Álvarez & Borrajo, 2015), en este caso también se observa una

sobreestimación de las áreas de falsas alarmas en comparación con el resto del pronóstico.

La tabla 5 muestra 5 pronósticos con 0% de aciertos donde resalta la superioridad de las falsas alarmas con respecto a los errores, subrayándose también que la mayoría de estos casos se obtuvieron a partir de las salidas inicializadas a las 00:00 UTC.

CONCLUSIONES

1. En los casos de estudio el LPI muestra de forma acertada el ciclo diurno de la actividad de las descargas eléctricas.
2. El LPI presenta un comportamiento similar al mostrado por la red de sensores Earth Networks Total Lightning Network, sin embargo, sobrestima el área de ocurrencia de la actividad eléctrica para los casos de estudio.
3. La parametrización LPI muestra un mayor acierto en el pronóstico de las descargas eléctricas para las salidas inicializadas a las 12:00 UTC en los casos de estudio.

Se recomienda ampliar el estudio con la comparación de los resultados obtenidos con otras fuentes de información y diferentes horarios de pronóstico.

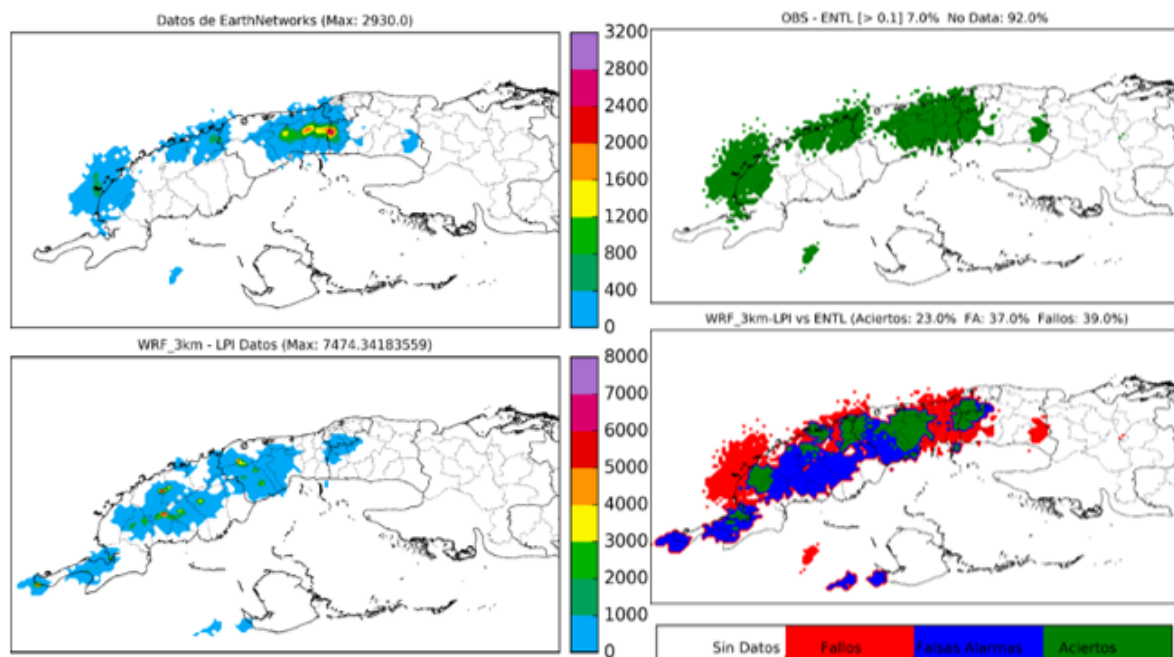


Figura 10. Detección (EN)[cant/h] y pronóstico (LPI Jkg^{-1}), inicializado a las 12:00 UTC de las descargas eléctricas ocurridas el 18 de agosto del 2017 a las 20:00 UTC

Tabla 4. Los cinco pronósticos con mayor porcentaje de aciertos

Pronósticos (Fecha y Hora)	Horario de inicialización	Aciertos (%)	Falsas Alarmas (%)	Errores (%)
18/08/2017 (20:00 UTC)	12:00 UTC	23	37	39
18/08/2017 (20:00 UTC)	00:00 UTC	21	44	33
17/08/2017 (21:00 UTC)	12:00 UTC	20	65	14
17/08/2017 (20:00 UTC)	12:00 UTC	19	49	31
16/08/2017 (23:00 UTC)	00:00 UTC	15	43	41

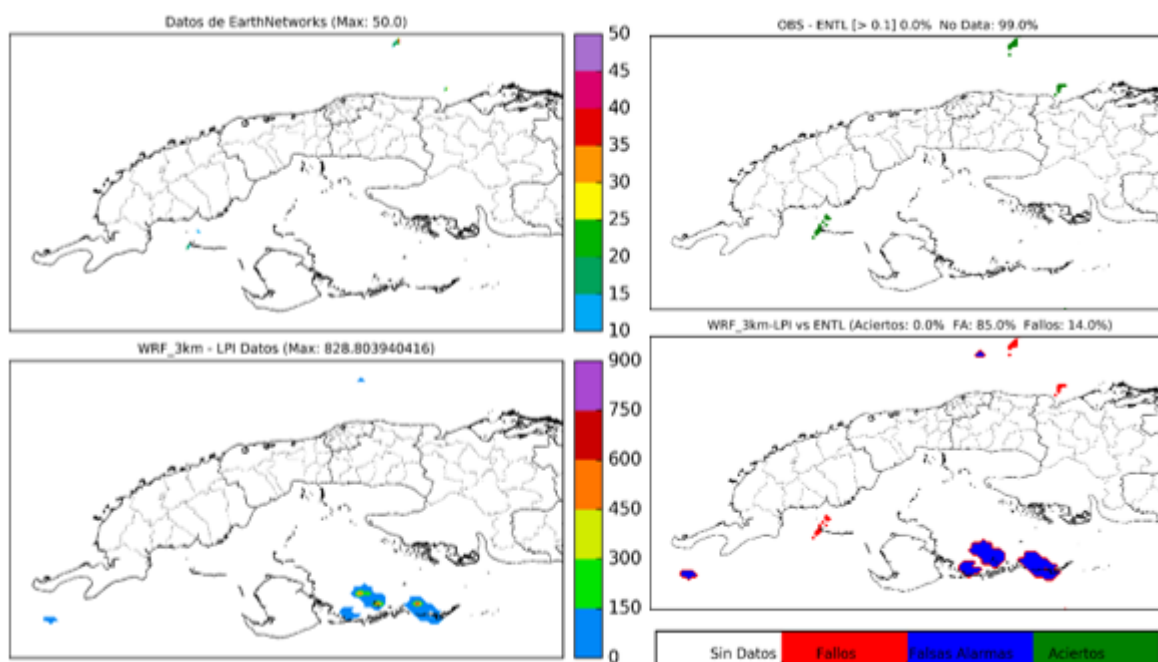


Figura 11. Detección (ENTLN)[cant./h] y pronóstico (LPI Jkg^{-1}), inicializado a las 00:00 UTC de las descargas eléctricas ocurridas el 16 de agosto del 2017 a las 09:00 UTC

Tabla 5. Cinco casos representativos de los pronósticos con 0% de aciertos

Pronósticos (Fecha y Hora)	Horario de inicialización	Aciertos (%)	Falsas Alarmas (%)	Errores (%)
16/08/2017 (16:00 UTC)	00:00 UTC	0	96	3
16/08/2017 (09:00 UTC)	00:00 UTC	0	85	14
18/08/2017 (14:00 UTC)	00:00 UTC	0	84	15
18/08/2017 (17:00 UTC)	12:00 UTC	0	70	29
16/08/2017 (13:00 UTC)	12:00 UTC	0	0	100

REFERENCIAS

- Davydova Belitskaya, V., Cruz, R., & R.-L. (2016). *Un modelo de verificación de pronósticos de precipitación. Aaaa model of precipitation forecast verification. Ingeniería Revista Académica*, 20:24-33.
- Dementyeva, S., V. Il'in, N., & A. Mareev, E. (2015). *Calculation of the lightning potential index and electric field in numerical weather prediction models. Atmos. Ocean. Phys.* 51: 186. <https://doi.org/10.1134/S0001433815010028>, pages 210-217.
- Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN) Datafeed versión 3.0. Interface Control Document (2017). *EN.PM.UM 20170323*.
- Lecha, L. B., Paz, L. R., & Lapinel, B. (eds) (1994). *El Clima de Cuba*. Editorial Academia, La Habana. ISBN: 959-02-006-0.
- Lynn, B. & Yair, Y. (2010). *Prediction of lightning flash density with the WRF model. Advances in Geosciences*, 23, 11-16.
- MMM (2017). *Meso-scale & Microscale Meteorology Division. ARW Version 3.8 Modeling System User's Guide. Complementary to the ARW Tech Note, 411pp. Boulder, Colorado, USA*.
- Price, C. & Rind, D. (1992). *A Simple Lightning Parameterization for Calculating Global Lightning Distributions. Journal of Geophysical Research*, VOL. 97, NO. D9. NASA Goddard Institute for Space Studies, New York Columbia University, New York, pages 9919-9933.
- Restrepo B, L. & Gonzales L, J. (2007). *De pearson a spearman. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, vol. 20, núm. 2, abril-junio. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia., pages 183-192.
- Rubiera, J. M., Gonzáles, C., Llanes, M. T., & Bermúdez, Y. (2017). *Manual de Procedimientos Operacionales Ordinarios. Sistema Nacional de pronósticos. La Habana, INSMET*.
- Sierra, M., Ferrer, M., Hernández, R., Gonzáles, Y., Borrajero, L., & Rodríguez, R. (2014). *Sistema automático de predicción a mesoescala de cuatro ciclos diarios. Informe del resultado No.1 del Proyecto: Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos. Instituto de Meteorología de Cuba*.
- Sierra Lorenzo, M., Ferrer Hernández, A. L., Valdés, R., G. Mayor, Y., Carlos Cruz Rodríguez, R., Borrajero Montejó, I., Rodríguez Genó, C. F., Rodríguez, N., & Roque, A. (2015). *Sistema automático de predicción a mesoescala de cuatro ciclos diarios. doi: 10.13140/RG.2.1.2888.1127*.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., ... Powers, J. G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3* (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D68S4MVH.
- Wang, Y., Yang, Y., & Jin, S. (2018). *Evaluation of Lightning Forecasting Based on One Lightning Parameterization Scheme and Two Diagnostic Methods. Atmosphere. doi: 10.3390/atmos9030099*.
- Yair, Y., Lynn, B., Price, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Morin, E., Mugnai, A., & Llasat, M. d. C. (2010). *Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the Weather Research and Forecasting (wrf) model dynamic and microphysical fields. Journal of geophysical research*, vol.115, D04205, doi: 10.1029/2008JD010868.
- Álvarez, L. & Borrajero, I. (2015). *Estudio de las marchas anual y diaria de fenómenos meteorológicos clasificados según el código de tiempo presente. Proyecto: Estudio de la distribución espacial de fenómenos meteorológicos en Cuba a partir del código de tiempo presente II (Código Programa: P211LH007-002. PNCT: "Meteorología y Desarrollo Sostenible del País. Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología)*.
- Álvarez, L. & Borrajero, I. (2018). *Distribución espacial de fenómenos meteorológicos en Cuba clasificados a partir del tiempo presente I y II. Revista Cubana de Meteorología. Vol. 24, No. 1, pages 95-110 and 111-127*.

Leydi Laura Salazar Domínguez. Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de la Habana, La Habana 10400, Cuba. E- mail: lalsalazardom@gmail.com

Adrián Luis Ferrer Hernández. Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de la Habana, La Habana 10400, Cuba

Lourdes Álvarez-Escudero. Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de la Habana, La Habana 10400, Cuba

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Contribución de los autores: Concepción de la idea: **Leydi Laura Salazar Domínguez.** Obtención de datos y elaboración del artículo: **Leydi Laura Salazar Domínguez, Lourdes Álvarez Escudero, Adrián Luis Ferrer Hernández.** Revisión crítica del artículo: **Leydi Laura Salazar Domínguez, Lourdes Álvarez Escudero, Adrián Luis Ferrer Hernández.**

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