

ALGORITMO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SEÑALES DE CAMPO ELÉCTRICO GENERADAS POR PULSOS BIPOLARES ANGOSTOS ASOCIADOS A RAYOS INTRANUBE

ALGORITHM FOR THE IDENTIFICATION OF ELECTRIC FIELD SIGNALS GENERATED BY NARROW BIPOLAR PULSES ASSOCIATED WITH INTRA-CLOUD LIGHTNING

Samuel Leandro Jiménez Jiménez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
sljimenezj@correo.udistrital.edu.co

Herbert Enrique Rojas Cubides

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
herojasc@udistrital.edu.co

Recepción: 29/noviembre/2022

Aceptación: 22/diciembre/2022

Resumen

Los Pulsos Bipolares Angostos (NBPs) son una descarga eléctrica atmosférica que ocurre dentro de las nubes de tormenta, se caracterizan por generar un campo eléctrico de gran magnitud (fuerte radiación) y poseen una duración de varios microsegundos. Para facilitar su estudio, este artículo propone un algoritmo de identificación y caracterización de señales de campo eléctrico producidas por NBPs que permite reducir el proceso (incluyendo el tratamiento y procesamiento de señales) hasta una cuarta parte del tiempo con respecto a los procedimientos manuales. Adicionalmente, a partir de un grupo de señales recolectadas en Weligatta-Sri Lanka en 2016, se validó el funcionamiento del algoritmo identificando 55 NBPs. Finalmente, se caracterizaron las formas de onda estimando cinco parámetros agrupados según la polaridad y comparados con resultados de investigaciones previas. Para estudios realizados en la misma región se observaron parámetros con diferencias estadísticas por debajo de 10%.

Palabras Clave: Algoritmo de identificación, descargas intranube, firmas de campo eléctrico, Pulsos Bipolares Angostos.

Abstract

Narrow Bipolar Pulses (NBPs) are an atmospheric electrical discharge that occurs inside thunderstorm clouds, they are characterized by generating an electric field of great magnitude (strong radiation) and have a duration of several microseconds. To facilitate their study, this paper proposes an algorithm for the identification and characterization of electric field signals produced by NBPs that allows to reduce the process (including treatment and signal processing) up to a quarter of the time compared to manual procedures. In addition, from a set of signals recorded in Weligatta-Sri Lanka in 2016, the performance of the algorithm was validated by identifying 55 NBP signals. Finally, the waveforms of NBPs were characterized by estimating five parameters grouped according to polarity and compared with some results of previous investigations. For studies performed in the same region parameters with statistical differences under 10% were observed.

Keywords: *Electric field signatures, identification algorithm, intracloud discharges, Narrow Bipolar Pulses.*

1. Introducción

Las descargas eléctricas atmosféricas se clasifican en dos grandes grupos, descargas nube-tierra y descargas intranube o dentro de la nube. Aproximadamente el 75% de las descargas que ocurren a nivel mundial son descargas intranube [Rakov, 2003]. A pesar de esto, la mayoría de las investigaciones se han centrado en el estudio de las descargas nube-tierra, debido a que son causantes de lesiones o muertes de seres vivos, fallas en redes eléctricas, iniciación de incendios, destrucción e interferencia de equipos eléctricos, electrónicos y de comunicación [Ab Kadir, 2010].

En las últimas dos décadas, diversos estudios han mostrado que un tipo de descarga eléctrica intranube, denominada Pulso Bipolar Angosto (Narrow Bipolar Pulse: NBP), conocido también como descargas intranube compactas (Compact Intracloud Discharges: CID) o eventos bipolares angostos (Narrow Bipolar Events: NBEs), puede perturbar severamente dispositivos o sistemas de comunicación, causando inclusive una mayor interferencia que las descargas nube-tierra (return

strokes) [Ahmad, 2014]. Estas descargas poseen muy corta duración (varios microsegundos) [Ahmad, 2011] y son la mayor fuente natural de radiación en el rango de alta y muy alta frecuencia (entre 3–300 MHz) [Le Vine, 1980], alcanzando potencias de hasta 270 kW [Rison, 2016]. De hecho, el campo eléctrico radiado por NBPs puede tener una magnitud comparable al generado por las descargas nube-tierra [Willett, 1989].

Aunque se pensaba que los NBP eran eventos aislados [Corray, 1985] [Smith, 1999], actualmente es bien conocido que pueden aparecer antes, durante y después de descargas intranube, nube-tierra [Nag, 2010], y de las descargas eléctricas que ocurren por encima de las nubes denominados de Eventos Transitorios Luminosos (Transient Luminous Events: TLEs) [Liu, 2018]. Estas descargas aparecen principalmente en regiones tropicales, debido a que allí se presenta una mayor formación de nubes de tormenta. Dicha formación está asociada a una banda de baja presión denominada zona de convergencia intertropical. En este contexto, durante 2008 se realizó una campaña de medición de NBPs en Suecia (zona templada), y a pesar de estar en época de tormentas eléctricas, no se pudo obtener ningún registro [Sharma, 2008]. En cambio, en países tropicales como Malasia, Indonesia, Sri Lanka entre otros, han realizado múltiples estudios analizando una gran cantidad de registros [Azlinda, 2010], [Emeraldi, 2017], [Gunasekara, 2016]. Desde su descubrimiento, los NBPs han sido estudiados gracias a la caracterización de sus señales electromagnéticas asociadas (especialmente campo eléctrico). Estos procesos han permitido el diseño y mejora de sistemas de protección contra rayos, determinar los requisitos de compatibilidad electromagnética para dispositivos eléctricos y electrónicos, además de dar una mejor comprensión en la formación del fenómeno y generar modelos matemáticos.

No obstante, para su caracterización es necesario identificar y seleccionar formas de onda de NBPs válidas a partir de extensas jornadas de identificación cuyo punto de partida es la medición del campo eléctrico registrado por sistemas de medición diseñados y contruidos para tal fin (antenas de banda ancha y respuesta rápida). Esta es una tarea manual en la cual se deberá inspeccionar registro a registro y destinar una cantidad de tiempo considerable para su ejecución. Además, debido a

su corta duración, la identificación de NBPs requiere una inspección más minuciosa con respecto a otros eventos ampliamente estudiados como los return strokes.

Por estas razones, este artículo propone un algoritmo computacional semiautomatizado que reduce significativamente el tiempo empleado para la identificación de formas de onda de campo eléctrico producidas por NBPs, incluyendo procesos de tratamiento, adecuación, caracterización y análisis estadístico de parámetros. Este algoritmo se validó a partir de un banco de señales de descargas intranube recopiladas en una campaña de medición. Las señales identificadas fueron posteriormente caracterizadas y comparadas con otras investigaciones realizadas en otras regiones del mundo.

2. Métodos

Instrumentación y base de datos

Durante la investigación se analizaron ciento dieciséis (116) registros de campo eléctrico de descargas intranube, las cuales se obtuvieron durante una campaña de medición realizada en la provincia Weligatta, Sri Lanka (6.208° N y 81.209° E) entre octubre–noviembre de 2016. El lugar de medición fueron las instalaciones del UCIARS (Institute for Agro-Technology and Rural Sciences) de la Universidad de Colombo. Weligatta es una región agrícola de terreno plano, cercana a la costa sur del mar Índico. Tiene una altitud de 14 msnm con temperaturas entre 24 y 36°C. Esta región presenta una gran cantidad de tormentas eléctricas durante dos temporadas al año: abril-mayo y octubre-enero.

Las señales fueron adquiridas por el Grupo de investigación en Sistemas Eléctricos y Eficiencia Energética (GISE3) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y el Grupo EMC de la Universidad Nacional de Colombia durante el desarrollo de un trabajo doctoral [Rojas, 2018]. Durante dicha campaña se validó un nuevo circuito electrónico para la medición de señales de campo eléctrico producidas por diversos tipos de descargas eléctricas atmosféricas. La estación de medición de campo eléctrico empleada (Figura 1) estaba compuesta por cuatro bloques principales: A) antena de placas paralelas, (B) circuito electrónico amplificador-buffer (D) osciloscopio, y (F) computador personal.

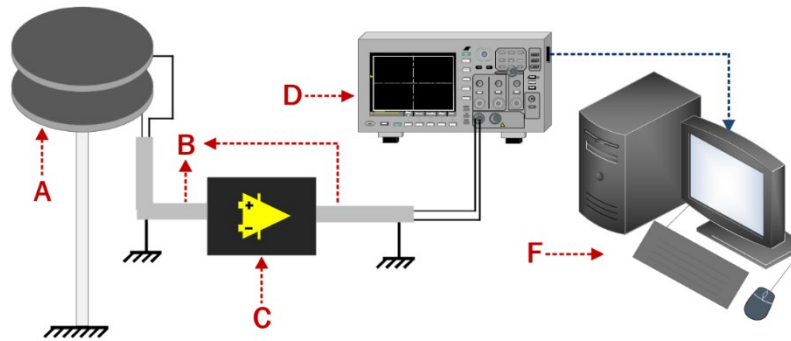


Figura 1 Sistema de medición de campo eléctrico.

El sistema de medición está compuesto en su primera etapa por una antena de placas paralelas, dos cables coaxiales RG 58/U con una impedancia característica de 50Ω y un circuito electrónico basado en el amplificador-buffer de alta velocidad BUF602 de Texas Instruments® que posee alta impedancia de entrada, ancho de banda de 1000 MHz , alta velocidad de respuesta ($8 \text{ kV}/\mu\text{s}$) y ganancia unitaria. El equipo de registro utilizado fue el Yokogawa SL-1000 que dispone de una frecuencia de muestreo máxima de 100 MS/s (tiempo entre muestras de 10 ns) y una resolución de 12 bits. En su conjunto, el ancho de banda del sistema de medición es de 11.8 MHz con una constante de decaimiento de 37.9 ms , similar al de sistemas de medición empleados en investigaciones de NBPs.

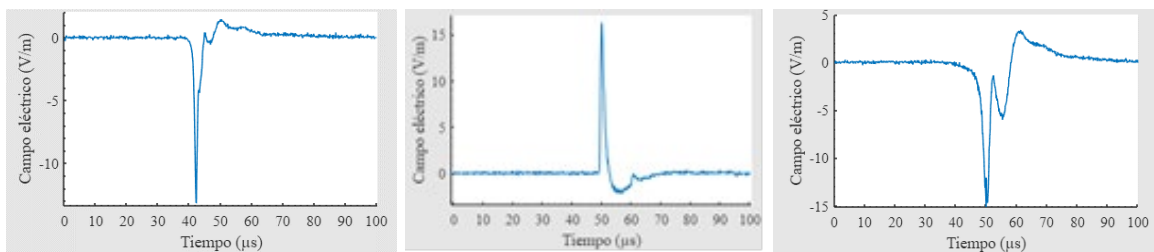
El sistema se configuró para obtener mediciones simultáneas de descargas nube-tierra y descargas intranube. La ventana de los registros fue configurada a 500 ms con tiempo de muestreo de 100 ns . El trigger de amplitud se ajustó con valor equivalente a 2 V/m y un tiempo previo al trigger de 100 ms . Las señales de campo eléctrico se asociaron a eventos con un radio de ocurrencia de hasta 250 km desde la estación de medición.

Al producirse una descarga eléctrica en la nube de tormenta, el sistema de medición capta su ocurrencia con ayuda de la antena en la cual se induce un voltaje directamente proporcional al campo eléctrico radiado. Esta señal viaja por el cable coaxial corto (50 cm) y llega al circuito electrónico que se encarga de aislar la impedancia de la antena y de proporcionar la energía necesaria a la señal de salida para llegar hasta el registrador de transitorios a través del cable coaxial largo (20 metros). Este último es el instrumento que permite la captura y registro de las

señales detectadas por la antena. Finalmente, estas señales son enviadas a un computador para ser almacenadas y conformar así la base de datos inicial.

Formas de onda características

Las formas de onda del campo eléctrico generado por los NBPs se caracterizan por tener una primera cresta de gran magnitud, seguido de una segunda cresta de una magnitud menor y de polaridad opuesta a la primera. La magnitud de las dos crestas puede ser tanto positiva como negativa. Estas formas de onda generalmente se clasifican según su polaridad. La comunidad científica actualmente utiliza dos convenciones de polaridad: convención de signos atmosféricos y convención de signos físicos. En este artículo, se emplea la convención de signos atmosféricos bajo la cual, si la primera cresta de la señal de campo eléctrico es de valor negativo, el pulso será considerado de polaridad positiva o PNBPs (Positive narrow bipolar pulse). En caso contrario (cresta con valor máximo positivo), el pulso será considerado de polaridad negativa o NNBPs (Negative narrow bipolar pulse) [Willett, 1989]. Adicionalmente, las formas de onda de los NBPs pueden presentar otras características tales como: amplio tiempo de frente lento, oscilaciones en ambas crestas y picos antes o después del valor máximo de la primera cresta [Leal, 2019]. En la figura 2 se observan tres tipos de NBPs que fueron identificados en la base de datos analizada.



a) Oscilaciones en su segunda cresta. b) Convencional. c) Pico adicional en la primera cresta.

Figura 2 Formas de onda de campo eléctrico de pulsos bipolares angostos (NBPs).

Para caracterizar las formas de onda de NBPs es necesario encontrar siete de puntos con ciertas particularidades. Estos se denominará puntos característicos de la señal y, a partir de su ubicación en tiempo y magnitud, permiten identificar los

parámetros del campo eléctrico. Estos puntos son esenciales en el proceso de identificación que realiza el algoritmo propuesto en este trabajo. La tabla 1 incluye la definición de los puntos característicos, mientras en la figura 3 se muestra un ejemplo de su ubicación en un registro de NNBP. La línea roja sobre la señal representa el nivel de referencia (campo eléctrico de fondo).

Tabla 1 Puntos característicos de la forma de onda de campo eléctrico de NNBP.

Punto	Descripción
A	Inicio del evento, la señal tiende a desviarse del nivel de referencia (Eref)
B	Se alcanza el 50% de su pico máximo por primera vez (positivo o negativo)
C	La señal alcanza su valor máximo (positivo o negativo)
D	Segundo punto en alcanzar el 50% del valor máximo (positivo o negativo)
E	La señal alcanza el valor de referencia por primera vez
F	La señal alcanza el valor máximo con polaridad opuesta al punto F
G	La señal vuelve al nivel de referencia (Eref)

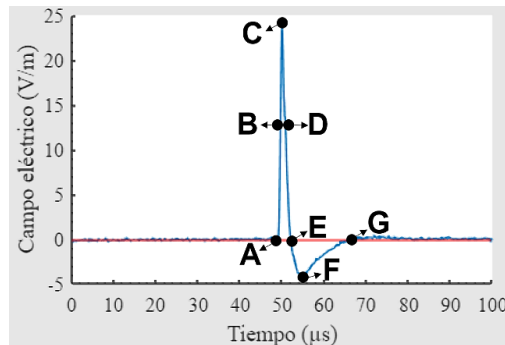


Figura 3 Ubicación de puntos característicos en un NNBP.

Una vez determinados los puntos característicos se pueden estimar parámetros de la señal tales como: el tiempo de ascenso (T_r), el tiempo de cruce por cero (T_z), el tiempo a la mitad del máximo pico (FWMH), la duración del pulso (T_p) y la relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico (E_{os}/E_p). En la tabla 2 se incluye la definición de cada parámetro y su expresión matemática.

Para las variables de la tabla 2 que se identifican con la letra “t” acompañadas de un subíndice simbolizan el tiempo en que se identifica el punto característico. Por su parte, las variables que inician con la letra “E” se asocian a la magnitud del campo eléctrico y la posición del punto característico.

Tabla 2 Parámetros de la forma de onda de campo eléctrico de NBPs.

Parámetro	Descripción	Formula
Tiempo de ascenso (Tr)	Lapso de tiempo que recorre la forma de onda desde el punto de deflexión inicial (A) hasta alcanzar su valor máximo (C).	$t_r = t_c - t_A$ (1)
Tiempo de cruce por cero (Tz)	Lapso de tiempo que recorre la forma de onda desde el punto inicio de la señal (A) hasta el primer cruce con el nivel de referencia (E).	$t_z = t_E - t_A$ (2)
Tiempo a la mitad del máximo pico (FWMH)	Lapso de tiempo que recorre la forma de onda entre el primer y último punto que alcanzan el 50% del pico inicial (B y D respectivamente) en la primera cresta.	$FWMH = t_D - t_B$ (3)
Duración del pulso (Tp)	Lapso de tiempo que recorre la forma de onda desde el punto de deflexión inicial (A) hasta su punto final (G).	$t_p = t_G - t_A$ (4)
Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico (Eos/Ep)	Relación entre los valores de mayor magnitud del pico de la segunda cresta (F) y el pico inicial (C).	$E_{os}/E_p = E_F / E_C $ (5)

Algoritmo de identificación de NBPs

Este algoritmo se desarrolló a partir del reconocimiento de los puntos característicos de las señales bajo estudio y se sintetiza en la figura 4. Estos puntos, presentados en la figura 3, se sintetizan a continuación: C y F se relacionan con la mayor amplitud en ambas crestas; A y E cruzan por el valor de referencia (campo eléctrico de fondo), y ocurren antes y después del punto máximo; B y D asociados al valor 50% antes y después del primer valor máximo.

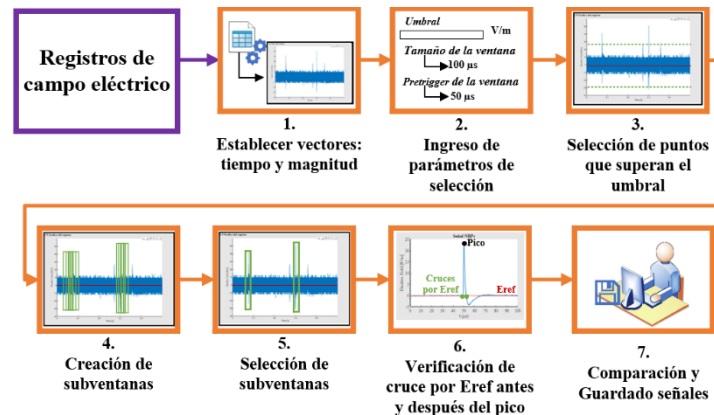


Figura 4 Etapas del algoritmo de identificación de NBPs.

El algoritmo inicia con la identificación de los vectores de tiempo y magnitud del registro. Posteriormente, selecciona los puntos de la señal que superan un valor definido por el usuario, denominado umbral. Este permite encontrar NBPs de ambas polaridades y será evaluado tanto con signo positivo como negativo. Luego, se

seleccionará una porción de la señal alrededor de cada punto identificado (punto de interés), esta porción se denominará subventana. cada subventana tendrá un tamaño de cien microsegundos (100 μ s), y los puntos de interés estarán ubicados en la zona intermedia, es decir 50 μ s después del inicio de la subventana.

Posteriormente, el algoritmo evalúa dos condiciones. La primera condición es que el punto de interés sea el punto de mayor magnitud (de signo positivo o negativo) dentro de la subventana. Esta condición permite encontrar el punto característico C. La segunda condición es que la señal cruce por la referencia antes y después del punto de mayor magnitud, esto permite asegurar que la señal posee los puntos característicos A y F. Finalmente, el usuario deberá inspeccionar cada subventana extractada por el algoritmo y compararla con las formas de ondas típicas de NBP. el flujograma del algoritmo de identificación, incluyendo las etapas descritas en los anteriores párrafos. Es importante mencionar que los procesos del 1 al 6 que se observan en el flujograma fueron programados e implementados en una rutina de MATLAB®. La figura 5 incluye la estructura completa del algoritmo.

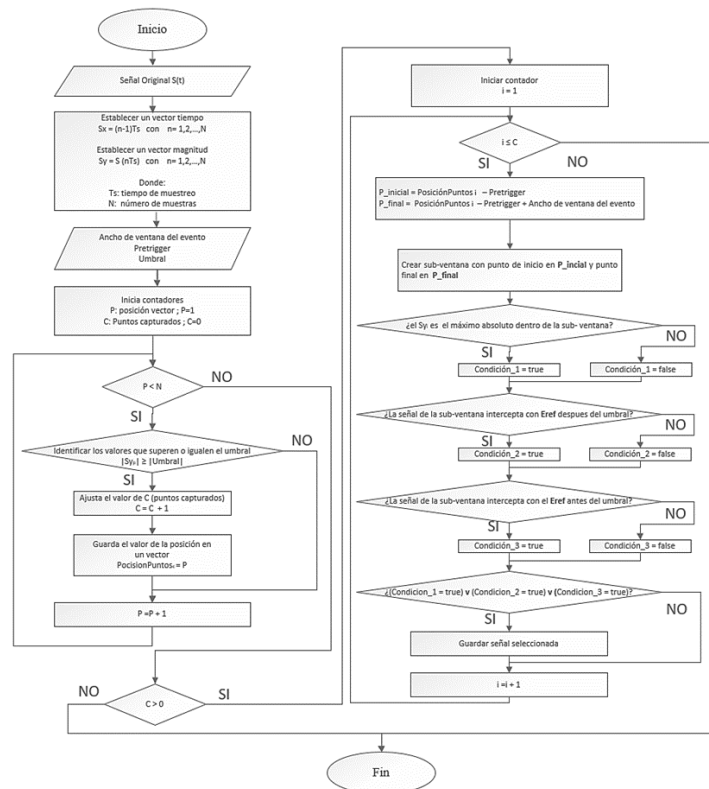


Figura 5 Diagrama de flujo del algoritmo de identificación señales de campo eléctrico.

Durante la implementación computacional del algoritmo, y a partir del número de muestras de la señal, se realiza una revisión punto a punto, evaluando la condición del Umbral. Los datos que cumplen esta condición, serán almacenados en un vector denominado *PosicionPuntos*. Luego, para cada uno de los datos almacenados, se creará la subventana y se evaluarán las condiciones descritas. Cada condición tendrá asignada una variable booleana, la cual tendrá un valor de “true” en caso de cumplirse, y “false” en caso contrario. Las subventanas que cumplen con todas las condiciones serán consideradas como potencialmente válidas y pasarán al proceso de comparación y finalmente su almacenamiento definitivo.

3. Resultados

A partir del grupo de 116 señales de descargas intranube (obtenidas en la campaña de medición) se identificaron 55 NBPs, de los cuales 31 fueron NPBP y 24 NNBPs. Inicialmente, el proceso de identificación se realizó de forma manual y posteriormente con el algoritmo de identificación. Analizando el conjunto total de señales, la identificación de NBPs tardó cinco horas aproximadamente con el proceso manual, mientras que usando el algoritmo se redujo el proceso a una hora y media. Por su parte, el tiempo de inspección de cada registro individual de NBP disminuyó de 150 segundos en promedio, a cuarenta y cinco segundos.

En las formas de onda identificadas predominaron las siguientes características: forma convencional (15%), pico adicional en la primera cesta (38%), presencia de oscilaciones en el segundo ciclo (44%), y un frente de lento más amplio (3%). Adicionalmente, se compararon los parámetros de las señales analizadas en este trabajo con los reportados en varias investigaciones. En la tabla 3 y la tabla 4 se pueden observar el valor promedio y la desviación estándar de los parámetros mencionados en la sección 3. Los espacios vacíos en algunas casillas indican que en la investigación citada no se reportó información del parámetro.

Al comparar los resultados obtenidos para los NNBPs, con investigaciones realizadas en la misma región (Sri Lanka), se obtuvo que las diferencias porcentuales más bajas se evidenciaron en los siguientes parámetros: tiempo de ascenso (8.9%), tiempo de cruce por cero (4.2%), tiempo a la mitad del máximo pico

(10.3%), duración del pulso (0.4%) y relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico (6.3%).

Para el caso de los parámetros de NPBP las menores diferencias se evidenciaron en el tiempo de ascenso (10.4%), mientras en los demás parámetros se obtuvieron diferencias por encima del 18%. Ahora, comparando los parámetros obtenidos con otras regiones del mundo, no se observan similitudes apreciables entre regiones cercanas al Ecuador (Malasia, Indonesia y Sri Lanka) o entre zonas subtropicales o templadas (China y Estados Unidos). Sin embargo, es necesario adelantar estudios con mayor número de registros y evaluar el comportamiento estadístico de los parámetros en función de otras variables como la altitud y las temporadas climáticas.

Tabla 3 Parámetros de forma de onda de campo eléctrico de NNBP.

Referencia	Lugar	Tiempo de ascenso (μ s)	Tiempo de cruce por cero (μ s)	Tiempo a la mitad del máximo pico (μ s)	Relación (Eos/Ep)	Duración del pulso (μ s)
Este estudio	Weligatta - Sri Lanka	0.45 ± 0.09	3.14 ± 0.47	1.07 ± 0.60	0.16 ± 0.02	19.13 ± 2.72
[Gunasekara, 2018]	Colombo - Sri Lanka	0.73 ± 0.08	-	-	-	-
[Gunasekara, 2016]	Matara - Sri Lanka	0.58 ± 0.17	3.01 ± 0.54	1.38 ± 0.25	0.19 ± 0.06	19.21 ± 3.06
[Gunasekara, 2014]	Matara - Sri Lanka	0.49 ± 0.10	2.83 ± 0.43	1.18 ± 0.17	0.17 ± 0.04	18.63 ± 3.16
[Emeraldi, 2017]	Pagdan - Indonesia	1.25 ± 0.60	4.91 ± 1.02	-	-	12.95 ± 5.34
[Feifan, 2016]	Jianghuai - China	3.6 ± 0.9	8.3 ± 1.4	4.9 ± 1.2	-	30.3 ± 5.10
[Hazmi, 2016]	Pagdan - Indonesia	1.64 ± 0.51	5.23 ± 1.14	-	0.31 ± 0.07	15.06 ± 6.38
[Ahmad, 2013]	Malasia	1.54	4.03	2	0.34	25.3 ± 19.8
[Wu, 2011]	Guangdong - China	2.32 ± 1.27	6.42 ± 2.60	3.17 ± 1.29	-	-
[Nag, 2010]	Malasia	1.6 ± 1.0	9.0 ± 4.5	2.2 ± 0.7	0.28	24.6 ± 17.1
[Zhu, 2010]	China	2.6 ± 0.5	4.6 ± 0.7	2.2 ± 0.3	0.34 ± 0.08	16 ± 1.4
[Smith, 1999]	New México - U.S.A.	-	-	4.7 ± 1.3	0.37	25.8 ± 16.7
[Medelius, 1991]	Florida - U.S.A.	1.82 ± 0.87	-	1.83 ± 0.63	-	-
[Willett, 1989]	Florida - U.S.A.	-	-	2.4 ± 1.4	0.11	20 - 30

Tabla 4 Parámetros de forma de onda de campo eléctrico de NPBP.

Referencia	Lugar	Tiempo de ascenso (μ s)	Tiempo de cruce por cero (μ s)	Tiempo a la mitad del máximo pico (μ s)	Relación (Eos/Ep)	Duración del pulso (μ s)
Este estudio	Weligatta - Sri Lanka	1.54 ± 0.74	7.08 ± 2.30	1.60 ± 0.55	0.23 ± 0.07	21.62 ± 8.30
[Gunasekara, 2018]	Colombo - Sri Lanka	1.14 ± 0.31	-	-	-	-
[Gunasekara, 2016]	Matara - Sri Lanka	1.38 ± 0.47	4.66 ± 1.29	1.93 ± 0.33	0.37 ± 0.33	16.42 ± 8.43
[Sharma, 2008]	Colombo - Sri Lanka	2.6 ± 1.1	5.78 ± 2.1	2.4 ± 1.6	0.35	13.3 ± 16.7
[Cooray, 1985]	Sri Lanka	-	13 ± 4.9	-	0.30	75 ± 25.9
[Emeraldi, 2017]	Pagdan - Indonesia	0.91 ± 0.42	4.20 ± 0.68	-	-	14.93 ± 2.58
[Feifan, 2016]	Jianghuai - China	2.7 ± 0.7	6.7 ± 1.2	3.8 ± 0.8	-	21.9 ± 3.1
[Ahmad, 2013]	Malasia	1.71	1.71	1.65	0.49	13.4 ± 7.5
[Wu, 2011]	Guangdong - China	2.06 ± 1.14	5.46 ± 1.79	2.89 ± 1.02	-	-
[Ahmad, 2010]	Malasia	2.7 ± 1.6	6.5 ± 3.2	2.4 ± 1.4	0.27	30.2 ± 12.3
[Nag, 2010]	Florida - EEUU	-	5.6	-	0.18	23
[Wansheng, 2010]	China	2.06 ± 1.14	5.46 ± 1.79	2.89 ± 1.02	-	-
[Zhu, 2010]	China	2.2 ± 0.2	3.8 ± 0.3	1.9 ± 0.1	0.37 ± 0.05	12.1 ± 1.3
[Medelius, 1991]	Florida - EEUU	1.54 ± 1.04	-	1.6 ± 0.63	-	-
[Le Vine, 1980]	EEUU - Florida	-	<10	-	-	10-20

4. Discusión

En este artículo se propuso un algoritmo capaz de reducir significativamente los tiempos de inspección de registros de campo eléctrico de descargas intranube, para la identificación de NBPs. Este algoritmo identifica secciones de los registros que se asemejen a las características de la forma de onda de los NBPs a partir de sus puntos característicos. Luego, el usuario se encarga de validar o descartar señales recopiladas. Esta última etapa puede mejorar al reducir la intervención del usuario

con la implementación de técnicas de decisión autónoma, tales como: redes neuronales, Machine Learning, Deep Learning, entre otros.

5. Conclusiones

Durante la validación del algoritmo, se caracterizaron las señales NBPs identificadas y los resultados fueron comparados con otras investigaciones, agrupando la información según la polaridad de la señal y la región de medición. Las medidas estadísticas para los parámetros caracterizados fueron similares en este estudio con aquellos reportados previamente en Sri Lanka tuvieron valores similares para NNBP, caso contrario que los NBP que tuvo diferencias porcentuales mayores al 10%.

Por otro lado, al comparar conjuntamente los parámetros con las otras regiones, se puede observar que no hay una relación concreta entre el lugar de medición (latitud) y cada parámetro. Es posible que el comportamiento de estos parámetros sea influenciado por otros factores tales como: la distancia de ocurrencia del evento, las características del terreno, la ocurrencia simultánea de otros eventos atmosféricos. Esta comparación mostro, de manera preliminar, que no hay una relación directa entre el lugar de medición (latitud) y los valores estadísticos de cada parámetro.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ab Kadir A., Zainal M., Cooper M. A., & Gomes C. An Overview of the Global Statistics on Lightning Fatalities. 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP), pp. 1–4, 2010.
- [2] Ahmad M. R. Interaction of Lightning Flashes with Wireless Communication Networks. University Uppsala Sweden, 2014.
- [3] Ahmad M. R., Mohd E. M. R., & Cooray V. Narrow Bipolar Pulses and Associated Microwave Radiation. Progress in Electromagnetics Research Symposium, Stockholm, Sweden, pp. 1087–1090, 2013.
- [4] Azlinda A. N., Fernando M., Baharudin Z. A., Cooray V., Ahmad H., & Malek A. Z. Characteristics of Narrow Bipolar Pulses Observed in Malaysia. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 72 (5–6), pp. 534–540, 2010.

- [5] Ahmad N. A. Broadband and HF Radiation from Cloud Flashes and Narrow Bipolar Pulses. University of Uppsala, 2011.
- [6] Cooray V., & Lundquist S. Characteristics of the Radiation Fields from Lightning in Sri Lanka in the Tropics. *Journal of Geophysical Research* 90 (D4), 1985.
- [7] Emeraldi P., & Hazmi A. Observed Preliminary Breakdown Pulses of Intracloud Discharges. *International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. vol. Jan, pp. 488–92, 2017.
- [8] Feifan L., Dong M., Zhu B., Ma M., & Liu P. Characteristics of Narrow Bipolar Events. *33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Vol. 91, pp. 1–4, 2016.
- [9] Gunasekara T. A. L. N., Fernando M., Sonnadara U., & Cooray V. Characteristics of Narrow Bipolar Pulses Observed from Lightning in Sri Lanka. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, pp. 66–73, 2016.
- [10] Gunasekara T. A. L. N., Fernando M., Sonnadara U., & Cooray V. Horizontal Electric Fields of Lightning Return Strokes and Narrow Bipolar Pulses Observed in Sri Lanka. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 173:57–65, 2018.
- [11] Gunasekara T. A. L. N., Mendis U., Fernando M., Sonnadara U., & Cooray V. Electric Field Signatures of Narrow Negative Bipolar Pulse Activities from Lightning Observed in Sri Lanka. *International Conference IEEE on Lightning Protection (ICLP)*, Pp. 624–28, 2014.
- [12] Hazmi A., Emeraldi P., Hamid M. I., & Takagi N. Research on Positive Narrow Bipolar Events in Padang. *3rd International Conference IEEE on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, Pp. 156–59, 2016.
- [13] Liu F., Zhu B., Lu G., Qin Z., Lei J., Peng K. M., Chen A. B., Huang A., Cummer S. A., Chen M., Ma M., Lyu F., & Zhou H. Observations of Blue Discharges associated with Negative Narrow Bipolar Events in active deep convection. *Geophysical Research Letters*, 45(6), pp. 2842–2851, 2018.

- [14] Le Vine D. M. Sources of the Strongest RF Radiation from Lightning. *Journal of Geophysical Research Oceans* 85 (C7), 4091–4095, 1980.
- [15] Leal A. F. R., Rakov V. A., & Rocha B. R. P. Compact intracloud discharges: new classification of field waveforms and identification by lightning locating systems, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 173, April, pp. 251–262, 2019.
- [16] Medelius P. J., Thomson E. M., & Pierce J. S. E and dE/dT Waveshapes for Narrow Bipolar Pulses in Intracloud Lightning. in NASA. Kennedy Space Center, The 1991 International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Vol. 1, 1991.
- [17] Nag A., Rakov V. A., Tsalikis D., & Cramer J. A. On Phenomenology of Compact Intracloud Lightning Discharges. *Journal of Geophysical Research* 115(D14), 2010.
- [18] Rakov V. A., & Uman M. A. *Lightning*. Cambridge University Press, 2003.
- [19] Rison W., Krehbiel P. R., Stock M. G., Edens H. E., Shao X., Thomas R. J., Stanley M. A., & Zhang Y. Observations of Narrow Bipolar Events Reveal How Lightning Is Initiated in Thunderstorms. *Nature Communications* 7(1), 10721-10728, 2016.
- [20] Rojas H. E., *Técnicas avanzadas para el tratamiento y procesamiento de señales de campos electromagnéticos generados por rayos*, Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, 2018.
- [21] Sharma S. R., Fernando M., & Cooray V. Narrow Positive Bipolar Radiation from Lightning Observed in Sri Lanka. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70(10), 1251–1260, 2008.
- [22] Wansheng D., Ting W., & Hengyi L., Comparison of Electrical Waveforms of Positive and Negative Polarity Narrow Bipolar Events. 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 1–3, 2010.
- [23] Willett J. C., Bailey J. C., & Krider E. P. A Class of Unusual Lightning Electric Field Waveforms with Very Strong High-Frequency Radiation. *Journal of Geophysical Research* 94(D13):16255, 2010.
- [24] Smith D. A., Shao X. M., Holden D. N., Rhodes C. T., Brook M., Krehbiel P. R., Stanley M., Rison W., & Thomas. R. J., A Distinct Class of Isolated

- Intracloud Lightning Discharges and Their Associated Radio Emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D4), 4189–4212, 1999.
- [25] Wu T., Wansheng D., Yijun Z., & Tao W. Comparison of Positive and Negative Compact Intracloud Discharges. *Journal of Geophysical Research* 116 (D3), D03111, 2011.
- [26] Zhu B., Zhou H., Ma M., & Tao S. Observations of Narrow Bipolar Events in East China. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 72(2–3), pp. 271–278, 2010.