

# EVALUACIÓN DEL INCREMENTO DE LA ACTIVIDAD DE RAYOS EN ZONAS DE EXPLOTACIÓN PETROLERA

## Increase of the lightning activity in oil fields

Diego Del Rio<sup>1</sup>, Camilo Younes<sup>2</sup>, Edison Soto<sup>3</sup>, Daniel Aranguren<sup>4</sup>

<sup>1</sup>E3P, Departamento de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación., Universidad Nacional de Colombia, Manizales Colombia. Email: dfdelriot@unal.edu.co

<sup>2</sup>E3P, Departamento de ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación., Universidad Nacional de Colombia, Manizales Colombia. Email: dfdelriot@unal.edu.co

<sup>3</sup>GISEL, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga Colombia, Email: easotor@uis.edu.co

<sup>4</sup>Keraunos S.A.S, Bogotá Colombia. Email: daranguren@keraunos.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

### RESUMEN

El presente artículo evalúa la forma como la actividad eléctrica atmosférica se ha incrementado en un campo petrolero. El incremento es de aproximadamente un 43% en la actividad de rayos en el campo cuando se compara con los alrededores de la zona. Para determinar la variación de la actividad de rayos se utilizó el sistema de localización de rayos LINET. Dicho incremento es atribuido al posible aumento en la temperatura de la zona, o la emisión de material particulado lo que genera un incremento en la cantidad de aerosoles afectando probablemente la microfísica de la nube.

**PALABRAS CLAVE:** Rayos, Isla de Calor, aerosoles, material particulado.

### ABSTRACT

This paper evaluates the way in which the atmospheric electrical activity has increased in an oil field. The increase in the lightning activity is approximately 43% when oil field is compared with surroundings areas. To determine the variation of the lightning activity, the lightning location system was used LINET lightning localization system. This increase is attributed to the possible enhancement of the temperature in the zone, as well as to the emission of particulate material which generates an increase in the amount of aerosols affecting probably the microphysics of the clouds.

**KEYWORDS:** Lightning, urban heat island, aerosols, particulate matter.

### 1. INTRODUCCIÓN

Fenómenos como las islas de calor y la polución son fenómenos de origen antrópicos, los cuales han ocasionado la formación de microclimas principalmente en zonas urbanas y suburbanas. La UHI (Isla de calor Urbana por sus siglas en inglés), se forman en ambientes urbanos y suburbanos, y es ocasionada principalmente por el reemplazo de la capa vegetal, para realizar edificaciones construcciones, utilizando para esto materiales como hormigón, bien sea en la construcción

de vías o canalización ríos. Muchos de los materiales que son usados para reemplazar la capa vegetal, retienen más tiempo el calor del sol que los materiales naturales que se encuentran en las zonas rurales. Al reemplazar la capa vegetal se forman áreas que son altamente eficientes para calentar grandes volúmenes de aire y esto asociado principalmente a factores como la rugosidad de las superficies, estructuras verticales en las zonas, los colores (reflexión de la radiación o albedo) y la conductividad térmica asociada a los materiales de que se emplearon para la construcción, se generan efectos

como UHI. Adicionalmente, se produce la reducción del enfriamiento de la ciudad debido a la disminución de la evaporación en comparación con las zonas rurales. También es posible ver la aparición de este fenómeno en zonas urbanas y suburbanas por la producción antrópica de energía a través de la emisión de calor por las industrias y automóviles, es decir por las fuentes móviles y fijas [1], [2].

Ahora bien, algunas investigaciones afirman que la polución también tiene la capacidad de modificar el clima de una zona específica, debido a que ésta puede afectar la microfísica de la nube debido a que los núcleos de condensación modifican el tamaño de las gotas de la nube [3],[4] [5].

Estudios muestran que ciudades donde los niveles de polución y los incrementos de temperatura, debidos a la isla de calor, pueden incrementar la actividad eléctrica atmosférica. El trabajo realizado por Westcott [6] fue tal vez el primero donde se relaciona la actividad de rayos en zonas urbanas y la actividad antropogénica. El estudio fue realizado para 16 ciudades de los Estados Unidos y mostró que hubo incrementos entre el 45% y 80% en la actividad de rayos atribuido principalmente a este tipo de actividad.

Orville et.al [7] , analizaron los registros de 12 años de rayos CG entre 1989 y 2000 sobre Houston - Texas, para los meses de verano e invierno. Los resultados presentados muestran que hay un aumento de la densidad de descargas a tierra - DDT, atribuido probablemente al fenómeno de isla de calor y a la polución. En España se analizaron 9 pequeñas ciudades utilizando para ello los datos de tres años de rayos nube-tierra, se halló un aumento de los rayos CG en casi todas las áreas urbanas analizadas, mostrando un vínculo entre el nivel de concentración de SO<sub>2</sub> y el aumento de CG, además otros factores como el número de habitantes y el área de la ciudad también influyen en dicho incremento [8].

Steiger et.al [9] utilizando datos de la NLDN en el periodo comprendido entre 1989 - 2000, encontró un aumento del 45% en la actividad de rayos sobre Houston - Texas, comparada con sus alrededores. Uno de los resultados más relevantes de esta investigación, al igual que el aumento de la densidad de descargas, fue la disminución en un 12 % de los rayos positivos observados sobre la ciudad, como también valores altos de corrientes de rayo encontradas en la costa y el Golfo de México. Al parecer los resultados están relacionados con los efectos generados por la isla de calor, la brisa del mar y la polución asociada a las emisiones hechas por el hombre, principalmente por las actividades asociadas con la explotación de petróleo.

En Brasil estudios para la región metropolitana de Sao Paulo [10] muestran que hay un aumento entre 60% - 100 % comparado con sus alrededores, además que hubo una disminución en el número de rayos positivos, entre el 7 % y 8 %, similar a lo reportado en Houston - Texas en [9]. Para explicar lo acontecido se manejan dos hipótesis: 1) Hipótesis térmica: propone que las islas de calor son las responsables del aumento de la convección local y 2) hipótesis de aerosol: relaciona las emisiones hechas por el hombre y la microfísica de la nube, debido a que puede modificar el proceso de electrificación de las nubes de tormenta.

En 2004 se hizo un estudio [11] en la ciudad de Belo-Horizonte, en el Estado de Minas Gerais (Brasil) encontrando un aumento del 100 % en las descargas negativas comparado con sus alrededores y una disminución del 25 % en los rayos positivos. En Corea del Sur [12] encontraron un aumento de rayos del 42 % para positivos y 60 % para negativos y una disminución del porcentaje de rayos positivos del 20 % comparando la ciudad de Seúl con sus alrededores.

Pinto et.al. [13] realizaron el primer estudio para observar la sensibilidad de CG a la temperatura en una gran área urbana, la ciudad de Sao Paulo. Para el análisis emplearon datos de rayos provenientes de la red de localización de rayos de Brasil, BrasilDat, desde 1999 a 2006, datos de días tormentosos desde 1951 - 2006, y tanto los datos de BrasilDat, como los días tormentosos fueron comparados entre la temperatura superficial del aire. Al comparar la información se encontró que hay un aumento en la actividad de rayos CG, con una sensibilidad del 40 % por cada 1°C para la escala diarias y mensuales. En el caso de la variación en las décadas se encontró una sensibilidad del 30 % por cada 1°C.

Kar et.al [14], para cinco ciudades de Corea del Sur, revela que hay un aumento entre el 40% y 64% para rayos negativos y un aumento entre 26% y 49% en los rayos positivos comparado con las áreas alrededor de estas ciudades. Por otro lado, hay una disminución entre 7% y 19% de rayos ocurridos en las áreas urbanas. También se relacionó el aumento de la actividad de rayos CG, con el material particulado PM<sub>10</sub> y el SO<sub>2</sub>. Se observa que hay una correlación positiva entre PM<sub>10</sub> y el SO<sub>2</sub> y los rayos negativos, y una correlación negativa entre estas concentraciones y el porcentaje de rayos positivos.

En 2009 Farias et.al. [15] observaron un incremento en el número de rayos CG y una disminución en el porcentaje de rayos positivos CG en la ciudad de Sao Paulo. Ellos sugieren que esto probablemente es debido a la influencia de la polución y las islas de calor, empleando seis años de datos de la red BrasilDat (1999 -

2004). Los resultados muestran que el aumento de CG durante los días de la semana sobre la región metropolitana de Sao Paulo, está relacionada con la concentración de PM10, además los niveles de concentración de PM10 tienden a incrementar la vida de las tormentas y en consecuencia el número de rayos por tormenta, y por último el efecto de la polución en el aumento de CG es probablemente menor que el ejercido sobre el efecto generado por el fenómeno de isla de calor.

En París, en [16] analizaron sobre un área de 200 km × 200 km, la influencia de la polución sobre la actividad de rayos nube tierra. Para esto analizaron 12 años de datos de rayos entre 1992 y 2003. Allí dividieron los días de la semana en dos partes: entre semana (compuesto por los días de lunes a viernes) y fin de semana (sábado y domingo), con el fin de observar si realmente existe una relación entre la polución en París y la actividad de rayos. Encontraron, que hay un aumento estadísticamente significativo del número de rayos sobre París, atribuyendo tal aumento al fenómeno UHI y la polución. Además se encontró que efectivamente existe una influencia de la polución en los días entre semana, observándose un pico en la actividad de rayos de martes a jueves.

Pinto et.al [17] en 2013 publicaron un estudio para la ciudad de Manaus, ubicada en la amazonia brasilera. El estudio se centra en observar la influencia que tiene el fenómeno de isla de calor sobre las descargas eléctricas atmosféricas en la ciudad. Para esto se observa la evolución del área urbana de Manaus, desde 1973 hasta 2008 y con la ayuda del satélite AQUA, se determina si se presenta el fenómeno de UHI. Los datos de actividad atmosférica son provistos por la red mundial de localización de rayos (WWLLN) y el *Lightning Imaging Sensor* (LIS). Con base en la información suministrada por LIS y WWLLN, se observó que la ciudad de Manaus, presenta una alta actividad de rayos, que es atribuida probablemente al fenómeno de Isla de Calor. Farias et.al. [18] encontraron estadísticamente que hay una relación en el incremento de los rayos del 95% y 99% con SO<sub>2</sub> y PM10 respectivamente. Para esto establecieron tres niveles de concentración de PM10, bajo, medio y alto. El nivel bajo está de 0 - 30 µg/m<sup>3</sup>, medio 30 - 60 µg/m<sup>3</sup> y alto mayor a 60 µg/m<sup>3</sup>, encontrando que el mayor número de descargas ocurren cuando los niveles de material particulado se encuentran entre 30 - 60 µg/m<sup>3</sup> y que para el nivel alto tiende a disminuir. Dicho estudio fue realizado para la Región Metropolitana de Sao Paulo, Campinas y San Jose de los Campos, en Brasil.

Un estudio realizado para la ciudad de Georgia modeló la frecuencia del rayo en relación a la distancia más

cercana a las plantas de carbón ubicadas en la zona. Los resultados muestran que hay un incremento en la ocurrencia del rayo cerca de las plantas de carbón y que la variabilidad espacial no supera el 11% en la frecuencia del rayo [19]. En Colombia se registra dos estudios [20] donde se observa que hubo un incremento del 147% en la actividad de rayos sobre la ciudad de Bogotá, debida a la polución y a la isla de calor, ahora bien, Para el año 2017 se reporta un estudio también para la ciudad de Bogotá donde se registra un incremento entre el 33% y 340%, cuando se compara Bogotá con sus alrededores, además los autores muestran que hay una aparente correlación entre las zonas con mayores niveles de contaminación del aire y la distribución de los rayos en Bogotá [23].

Este estudio es llevado a cabo en Colombia, la zona de estudio está ubicada al oriente del país, en el departamento del Meta. La zona tiene una altura promedio de 195 msnm, con un área de 400 km<sup>2</sup> aproximadamente, en la cual se desarrolla la actividad de extracción de petróleo. El propósito de este estudio es observar si la actividad antrópica desarrollada en el área ha afectado la actividad atmosférica de rayos en la zona comparada con sus alrededores.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

### 2.1. Datos

La Figura 1 muestra la ubicación geográfica de los sensores del sistema de localización de rayos de LINET en el territorio Colombiano, la cual es una red administrada por Keraunos S.A.S. LINET en Colombia está compuesta por 15 sensores ubicados en lugares estratégicos del territorio Colombiano, según [22] la eficiencia en la detección DE para la red es del 90% para la zona de mayor eficiencia.

LINET es una red que opera en los rangos de frecuencia VLF/LF y es un sistema *Total Lightning*, utiliza la técnica de TOA y está compuesta básicamente por cuatro módulos. El módulo 1 está compuesto por dos antenas de lazos utilizadas para detectar las señales de Campo magnético B<sub>x</sub>(t) y B<sub>y</sub>(t) las cuales están en el orden de los 1 - 200 kHz, ningún circuito electrónico se emplea en esta etapa. El módulo 2 está compuesto por un GPS, que se encarga de registrar el tiempo de la señal (*Signal Timing*) con una precisión de 100ns. Una etapa amplificación, filtrado procesamiento de la señal es la que compone el módulo 3 y por ultimo una unidad de procesamiento (modulo4) [21]. La red está en la capacidad de entregar para cada *stroke*, el tiempo de ocurrencia, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno, polaridad, tipo de *stroke* (IC or CG), altura de emisión y la Forma de onda. Para propósitos de la

investigación se utilizaron únicamente los strokes CG detectados por la red. Los datos utilizados para este estudio son los datos entre 2012 – 2014.



Figura 1 Sistema de localización de rayos LINET sobre el territorio Colombiano

## 2.2. Metodología

La metodología implementada se basó en estudios previamente reportados: [8],[9],[12],[14],[23] y cuenta con los siguientes pasos:

1. Inicialmente el área bajo estudio y un área adyacente son seleccionadas. Ambas regiones deben tener condiciones meteorológicas y geográficas similares. Luego dichas regiones se dividen en subregiones de 1 km X 1 km.
2. El número de strokes que impactan sobre cada subregión debe ser contado.
3. Se determina el valor promedio de la densidad de strokes para ambas áreas o regiones, utilizando los valores de densidad de strokes obtenidos para cada subregion. Luego el valor promedio del área 1 es comparada contra el área 2.

Como se observa la metodología utilizada consiste en seleccionar la zona bajo estudio y compararla con sus alrededores. Las zonas a comparar deben tener condiciones meteorológicas y geográficas similares para realizar el análisis la Figura 2 muestra el área de estudio y el área con la cual comparar.

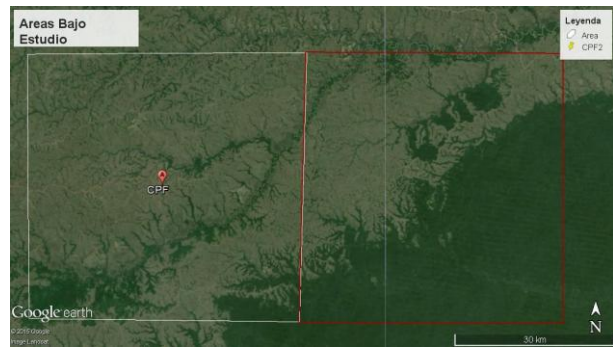


Figura 2 Área bajo estudio campo petroleros (rectángulo blanco) y área adyacente (rectángulo rojo). Latitud 3.55 – 4, longitud -71.66 – -70.8.

## 3. RESULTADOS

La Figura 3 muestra la distribución espacial de la densidad de *strokes* sobre la Zona A (campo petrolero) para los años 2012-2014, allí se puede apreciar que hay zonas con valores máximos de aproximadamente 25 Strokes/ km<sup>2</sup>/Año.

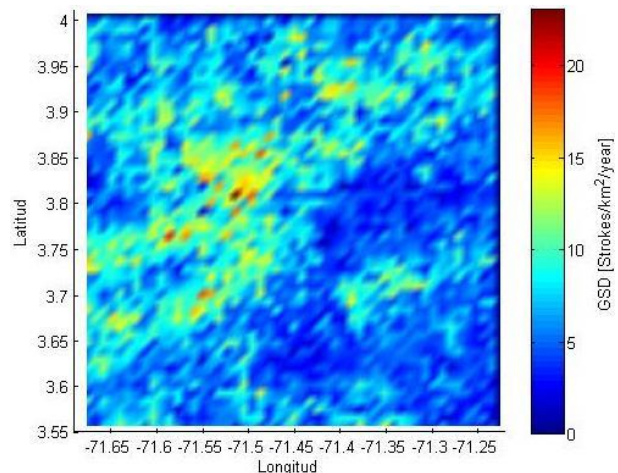


Figura 3 Densidad de strokes en el área del campo petrolero

La Figura 4 muestra la zona seleccionada para realizar la comparación, ésta se encuentra al oriente de la zona A. Aquí se puede observar la distribución espacial de la densidad de *strokes*, para los años 2012-2014, para dicha zona, se puede ver que puede llegar a tener valores máximos de densidad de 19 Strokes/ km<sup>2</sup>/Año.



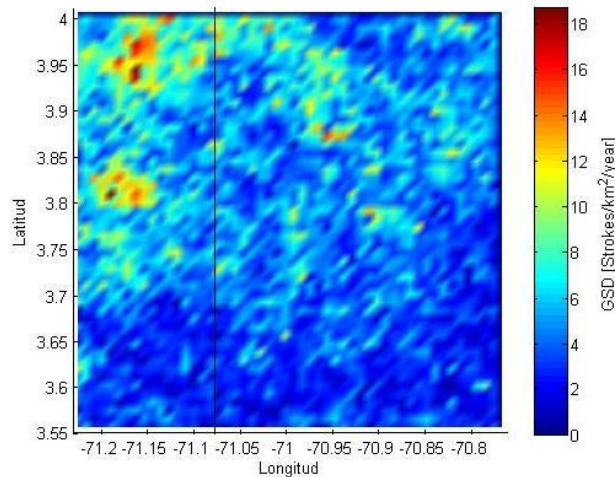


Figura 4 Densidad de Strokes Zona B (área para comparar)

A continuación se determina la densidad promedio del área del campo petrolero que es 20,4 Strokes/km<sup>2</sup>/Año y la de la zona B, usada para comparar es 14,25 Strokes/km<sup>2</sup>/Año. Al realizar la comparación de las zonas se encuentra que hay un incremento en la actividad de rayos en el campo petrolero de aproximadamente un 43%. La Figura 2-7 muestra el mapa de densidad sobre ambas áreas, allí se puede apreciar las variaciones de los valores de densidad entre 0 Strokes/km<sup>2</sup>/Año y 25 Strokes/km<sup>2</sup>/Año.

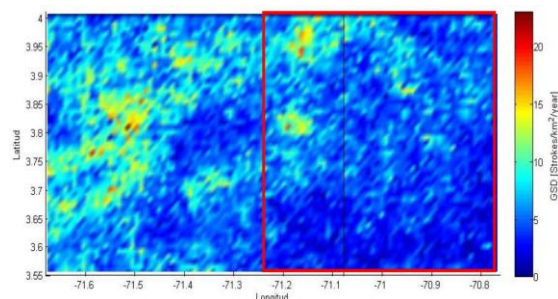


Figura 5 Mapa de densidad de strokes sobre el Campo Rubiales, y la zona B (encerrada por cuadro rojo)

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados presentados en el presente estudio, muestran que la mayor actividad de rayos se presenta en el predio donde se encuentra el campo petrolero. Se registra un incremento de aproximadamente 43% en la densidad de *strokes* en el campo petrolero comparado con el área rural (cuadro rojo, este incremento puede ser atribuible a la actividad industrial desarrollada en la zona la cual puede generar un microclima que está afectando la actividad de rayos en la zona.

Los resultados presentados están acordes con los presentados por otros autores en otras latitudes, donde se ha reportado un incremento sobre ciudades donde se desarrolla, al igual que en este caso, la actividad industrial de extracción de crudo. En dichos estudios, este aumento en la actividad de rayos se le atribuye al incremento de la temperatura en la ciudad y a la actividad de extracción de petróleo, ya que un incremento puede modificar el gradiente de temperatura de la ciudad, lo que ocasiona que las corrientes de aire que se desplazan por la ciudad se calienten y asciendan más rápidamente y, estas corrientes, a su vez pueden transportar los aerosoles generados por la contaminación, los cuales pueden modificar la microfísica de las nubes de la zona, ya que muchas de estas partículas son higroscópicas y semi-higroscópicas permitiendo así la formación de nubes que pueden llegar a ser de tipo cumulonimbos.

Adicionalmente y como trabajo futuro, para una mayor comprensión del fenómeno, se hace necesario observar el comportamiento de las variables meteorológicas como temperatura, precipitación y aerosoles en la zona.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] T. R. Oke, "The energetic basis of the urban heat island.," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 108, 1982.
- [2] M. A. LOMBARDO, *Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo*. Hucitec, 1985.
- [3] W. A. Fernandes, "Características dos relâmpagos gerados por nuvens de tempestades em ambientes sob a influencia das queimadas em Rondonia," Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais - INPE, 2006.
- [4] D. Rosenfeld and W. Woodley, "Pollution and Clouds," *Science* (80-. ), 2001.
- [5] C. A. Morales Rodriguez, R. P. da Rocha, and R. Bombardi, "On the development of summer thunderstorms in the city of Sao Paulo: Mean meteorological characteristics and pollution effect," *Atmos. Res.*, vol. 96, no. 2-3, pp. 477-488, 2010.
- [6] N. E. Westcott, "Summertime Cloud-to-ground lightning activity around midwestern urban areas," *J. Appl. Meteorol.*, vol. 34, 1995.
- [7] R. E. Orville, G. Huffines, J. Nielsen-Gammon, R. Zhang, B. Ely, S. M. Steiger, P. Stephen, S. Allen, and W. Read, "Enhancement of cloud to ground lightning over Houston Texas," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, pp. 2597-2600,

- 2001.
- [8] L. Rivas and F. de Pablo, "Effect of small urban areas in central Spain on the enhancement of cloud-to-ground lightning activity," *Atmos. Environ.*, vol. 36, no. 17, pp. 2809–2816, 2002.
- [9] S. M. Steiger, R. E. Orville, and G. Huffines, "Cloud-to-Ground Lightning Characteristics over Houston, Texas: 1989 - 2000," *J. Geophys. Res.*, vol. 107, no. August 1989, 2002.
- [10] K. P. Naccarato, O. Pinto Jr, and I. R. C. A. Pinto, "Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, 2003.
- [11] I. R. C. . Pinto, J. O. Pinto, M. A. S. . Gomes, and N. J. Ferreira, "Urban effect on the characteristics of cloud-to-ground lightning over Belo Horizonte-Brazil," *Ann. Geophys.*, pp. 697–700, 2004.
- [12] S. K. Kar, Y.-A. Liou, and K.-J. Ha, "Characteristics of cloud-to-ground lightning activity over Seoul, South Korea in relation to an urban effect," *Ann. Geophys.*, vol. 25, no. 10, pp. 2113–2118, 2007.
- [13] O. Pinto Jr and I. R. C. . Pinto, "On the Sensitivity of cloud-to-ground lightning activity to surface air temperature Changes at different timescales in São Paulo, Brazil," *J. Geophys. Res.*, vol. 113, 2008.
- [14] S. K. Kar, Y.-A. Liou, and K.-J. Ha, "Aerosol effects on the enhancement of cloud-to-ground lightning over major urban areas of South Korea," *Atmos. Res.*, vol. 92, no. 1, pp. 80–87, 2009.
- [15] W. R. G. Farias, O. Pinto, K. P. Naccarato, and I. R. C. . Pinto, "Anomalous lightning activity over the Metropolitan Region of São Paulo due to urban effects," *Atmos. Res.*, vol. 91, no. 2–4, pp. 485–490, 2009.
- [16] S. Coquillat, M.-P. Boussaton, M. Buguet, D. Lambert, J.-F. Ribaud, and A. Berthelot, "Lightning ground flash patterns over Paris area between 1992 and 2003: Influence of pollution?," *Atmos. Res.*, vol. 122, pp. 77–92, 2013.
- [17] O. Pinto Jr, I. R. C. . Pinto, and O. P. Neto, "Lightning Enhancement in the Amazon Region Due to Urban Activity," *Am. J. Clim. Chang.*, vol. 2, pp. 270–274, 2013.
- [18] W. R. G. Farias, O. P. Jr., I. R. C. A. Pinto, and K. P. Naccarato, "The influence of urban effect on lightning activity: Evidence of weekly cycle," *Atmos. Res.*, vol. 135–136, no. 0, pp. 370–373, 2014.
- [19] O. M. Strikas and J. B. Elsner, "Enhanced cloud-to-ground lightning frequency in the vicinity of coal plants and highways in Northern Georgia, USA.," *Atmosph. Sci. Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 243–248, 2013.
- [20] D. Del Río, C. Younes, and J. Pulgarín, "Lightning Activity Behavior Over Bogota - Colombia Due to Urban Effect," in *International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)*, 2015, pp. 369–373.
- [21] H. D. Betz, U. Schumann, and P. Laroche, Eds., *Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research*. Springer, 2008.
- [22] D. Aranguren, J. Lopez, J. Inampues, H. Torres, and H. D. Betz, "Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography," in *2014 International Conference on Lightning Protection, ICLP 2014*, 2014, pp. 1850–1855.
- [23] D. Del Rio, C. Younes, and J. Pulgarín, "Lightning activity over large cities located in mountainous tropical zones and its relationship with particulate matter PM10 distribution- the Bogotá City Case". In *Revista Facultad de Ingeniería*, No. 82, pp. 22-30, 2017.