Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Física

Distribución global de tormentas eléctricas en diferentes escalas espaciales y temporales

TESIS

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Josue Gabriel ANCA CCOPA

ASESOR

Walter Robert GUEVARA DAY

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Anca, J. (2023). *Distribución global de tormentas eléctricas en diferentes escalas espaciales y temporales*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Físicas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Josue Gabriel Anca Ccopa
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	46674193
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-8947-0548
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Walter Robert Guevara Day
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06300994
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9361-1104
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Rafael Edgardo Carlos Reyes
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06443628
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	David Pareja Quispe
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	41273620
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Fernando Mestanza Hernandez
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	06585518
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Brasil. Coordenação de Aperfeiçonamento de Pessoal de Nivel Superior (CAPES) Brasil. Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM), Universidade Presbiteriana Mackenzie
Ubicación geográfica de la investigación	Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM), Prédio 45 T, cobertura, Rua da Consolação, 896 - 7o andar - Consolação, São Paulo - SP, 01301-000, Brasil Latitud: -23.547 Longitud: -46.652
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022 - 2023
URL de disciplinas OCDE	Meteorología y ciencias atmosféricas https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.09 Investigación climática https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.10

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 09:30 horas del martes 05 de diciembre del 2023, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Físicas (Auditorio 109), bajo la Presidencia del Dr. Rafael Edgardo Carlos Reyes (Presidente), Dr. David Pareja Quispe (Miembro Titular), Lic. Walter Robert Guevara Day (Asesor), y el Lic. Fernando Mestanza Hernandez (Miembro Suplente), se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para la Licenciatura en Física, mediante la Modalidad M1, del Bachiller:

JOSUE GABRIEL ANCA CCOPA

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invitó al Bachiller a realizar una exposición de la Tesis titulada: titulado "Distribución global de tormentas eléctricas en diferentes escalas espaciales y temporales ".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el presidente, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, el Dr. Rafael Edgardo Carlos Reyes, invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión, para dar lectura al Acta de sustentación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por el bachiller, la misma que ha sido de:

Aprobado con máximos honores (MENCIÓN) ..... 19 (NÚMERO) ..... diecinueve (LETRAS)

Finalmente, el presidente del Jurado, propone al consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al Bachiller Josue Gabriel Anca Ccopa, Siendo las 11:12 Horas, se levanta la Sesión.

Ciudad Universitaria, 05 de diciembre del 2023

Dr. Rafael Edgardo Carlos Reyes
PRESIDENTE

Dr. David Pareja Quispe
MIEMBRO

Lic. Walter Robert Guevara Day
ASESOR

Lic. Fernando Mestanza Hernandez
MIEMBRO SUPLENTE

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

CALIFICACIÓN DEL JURADO

BACHILLER: JOSUE GABRIEL ANCA CCOPA

SUSTENTACIÓN DE TESIS

"Distribución global de tormentas eléctricas en diferentes escalas espaciales y temporales "

JURADO CALIFICADOR	NOTA	FIRMA
Dr. Rafael Edgardo Carlos Reyes PRESIDENTE	19	
Dr. David Pareja Quispe MIEMBRO	19	
Lic. Walter Robert Guevara Day ASESOR	19	
Lic. Fernando Mestanza Hernandez SUPLENTE	19	
PROMEDIO FINAL	19	

CONDICIÓN : Aprobado con máximos honores

HORA : 09:30 horas

FECHA : Martes 05 de diciembre del 2023

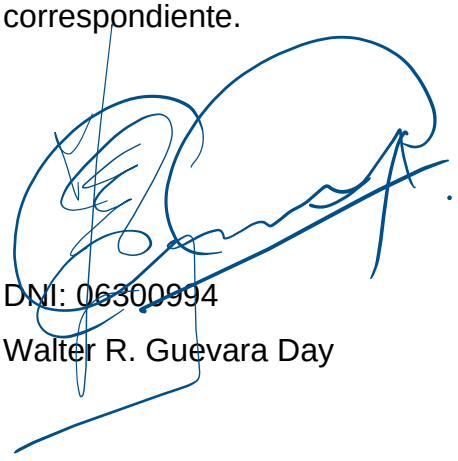
Dirección: Calle Germán Amézaga N.º 375 - Lima
Facultad de Ciencias Físicas
Apartado Postal: 14-0149 – Lima 14 Perú

Escuela Profesional de Física
6197000 Anexo 3805
E-mail eapfis@unmsm.edu.pe

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Walter R. Guevara Day en mi condición de asesor acreditado mediante Acuerdo del Comité de Gestión N°073-EPF-FCF-22 del 16 de noviembre de 2022, de la tesis, cuyo título es “Distribución global de tormentas eléctricas en diferentes escalas espaciales y temporales”, presentado por el bachiller Josue Gabriel Anca Ccopa para optar el título profesional de Licenciado en Física CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 6 % de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado/ título/ especialidad correspondiente.





DNI: 06300994
Walter R. Guevara Day

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos(UNMSM) por todo lo aprendido durante mi formación académica. Agradezco especialmente al Prof. Walter Guevara por darme la oportunidad y el voto de confianza de trabajar bajo su orientación y desarrollar este trabajo.

Agradezco al Centro de Radioastronomía y Astrofísica Mackenzie (CRAAM) en especial al Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin y Dr. José Tacza por permitirme iniciar este trabajo en esta área de la ciencia. También agradezco al Prof. Dr. Carlos Morales de la Universidad de São Paulo por los consejos, conversaciones y discusiones que ayudaron al desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Presbiteriana Mackenzie y a la Coordinación de Perfeccionamiento del Personal de Educación Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamiento 001, por importante apoyo financiero.

Por ultimo y no menos importante, agradezco a mis familiares y amigos, que de alguna forma participaron en el desarrollo y conclusión de este trabajo.

Resumen

Estudios realizados sobre la electricidad atmosférica a lo largo del siglo XX han destacado la importancia y el papel fundamental de las tormentas eléctricas dentro del Circuito Eléctrico Global (CEG). En consecuencia, surgió la hipótesis de que las tormentas eléctricas eran los principales generadores de corriente eléctrica, desempeñando el rol de baterías globales en el CEG. Estudios actuales sugieren que el cambio climático puede estar relacionado con variaciones en la cantidad de rayos y tormentas eléctricas en el planeta. El incremento en la temperatura global, resultado del cambio climático, podría influir tanto en el aumento como en la disminución de la frecuencia de rayos y tormentas. Por lo tanto, para poder estudiar y cuantificar estas variaciones en el tiempo, es crucial identificar correctamente la distribución global de las tormentas eléctricas. En este estudio nos propusimos identificar las tormentas eléctricas a nivel global, utilizando datos de relámpagos obtenidos entre los años 2012 a 2013 por la Red Mundial de Localización de Relámpagos (WWLLN - World Wide Lightning Location Network). Esta red provee información precisa sobre la ubicación y el momento de ocurrencia de los relámpagos detectados a nivel global y en tiempo real. Nuestra metodología está basada en un algoritmo de agrupamiento, el cual consiste en agrupar los relámpagos detectados en cuadrículas de 0.1°x0.1° (1 píxel) para cada hora de los datos. Luego, el algoritmo agrupa estos píxeles con los píxeles vecinos para formar la tormenta eléctrica completa. Una vez identificadas las tormentas eléctricas, se generaron curvas diurnas, diagramas de dispersión entre el número de relámpagos y el área de cada tormenta, mapas de densidad y periodicidad. Nuestros resultados muestran que en promedio ocurren 841 tormentas eléctricas por hora a nivel global. Donde, el 54 % de las tormentas son continentales y el 46 % oceánicas; el 59 % de las tormentas se encuentran en el Hemisferio Norte y el 41 % en el Hemisferio Sur. Además, la región de América es la región dominante, contribuyendo con el 41 %; Asia y Oceanía con el 36 %; mientras que África y Europa con el 23 % de las tormentas eléctricas globales. EEUU, Golfo de México, Brasil, Australia y los océanos Pacífico y Atlántico son regiones del planeta con grandes tormentas eléctricas y numerosos relámpagos intensos. El estrecho de Malaca, la región centro - este de La República Democrática del Congo, el Lago de Maracaibo y el noroeste de Colombia son las regiones con mayor densidad de tormentas eléctricas en el mundo, con alrededor de 50 tormentas/año.120 km².

Palabras clave: Tormentas Eléctricas, WWLLN, Relámpagos.

Abstract

Studies of atmospheric electricity throughout the 20th century have highlighted the importance and fundamental role of thunderstorms within the Global Electric Circuit (GEC). Consequently, the hypothesis arose that thunderstorms were the main generators of electrical current, playing the role of global batteries in the CEG. Current studies suggest that climate change may be related to variations in the amount of lightning and thunderstorms on the planet. The increase in global temperature, a result of climate change, could influence both the increase and the decrease in the frequency of lightning and thunderstorms. Therefore, to study and quantify these variations over time, it is crucial to correctly identify the global distribution of thunderstorms. In this study, we set out to identify thunderstorms globally, using lightning data obtained between 2012 and 2013 by the World Wide Lightning Location Network (WWLLN). This network provides precise information on the location and time of occurrence of detected lightning globally and in real-time. Our methodology is based on a clustering algorithm, which consists of grouping the detected lightning into grids of 0.1°x0.1° (1 pixel) for each hour of the data. The algorithm then groups these pixels with neighboring pixels to form the complete thunderstorm. Once the thunderstorms were identified, diurnal curves, scatter diagrams between the number of lightning and the area of each thunderstorm, density maps, and periodicity were generated. Our results show that an average of 841 thunderstorms per hour occur globally. Where 54 % of the thunderstorms are continental and 46 % oceanic; 59 % of the thunderstorms are in the Northern Hemisphere and 41 % in the Southern Hemisphere. Furthermore, the Americas region is the dominant region, contributing 41 %; Asia and Oceania with 36 %; while Africa and Europe with 23 % of global thunderstorms. The USA, the Gulf of Mexico, Brazil, Australia, and the Pacific and Atlantic Oceans are regions of the planet with large thunderstorms and numerous intense lightning. The Strait of Malacca, the central-eastern region of the Democratic Republic of the Congo, Lake Maracaibo, and northwestern Colombia are the regions with the highest density of thunderstorms in the world, with around 50 thunderstorms/year.120 km².

Keywords: Thunderstorms, WWLLN, Lightning.

Índice General

Agradecimientos I

Resumen II

Abstract III

Índice General IV

Índice de Figuras VI

Índice de Cuadros IX

1. Introducción 1
- 1.1. Justificativa . . . 3
- 1.2. Objetivos . . . 3
  - 1.2.1. Objetivos Específicos . . . 3

2. Marco Teórico 5
- 2.1. Tormentas Eléctricas . . . 5
  - 2.1.1. Ciclo de Vida de una Tormenta Eléctrica . . . 9
- 2.2. Descargas Eléctricas o Relámpagos . . . 11
  - 2.2.1. Relámpagos o Rayos CG . . . 12

3. Instrumentación, Datos y Metodología 15
- 3.1. Instrumentación . . . 15
- 3.2. Datos . . . 19
- 3.3. Metodología . . . 21

4. Resultados y Discusiones 25
- 4.1. Variación Diurna Anual de las Tormentas Eléctricas . . . 25
- 4.2. Dimensión Espacial y Número de Relámpagos de las Tormentas Eléctricas . . . 33
- 4.3. Densidad de Tormentas Eléctricas en Asia y Oceanía . . . 38
- 4.4. Densidad de Tormentas Eléctricas en África y Europa . . . 40

4.5. Densidad de Tormentas Eléctricas en América 43
4.6. Cálculo de la Periodicidad de las Tormentas Eléctricas 46
4.7. Tormentas Eléctricas en el Territorio Peruano 49

5. Conclusiones **55**

Referencias **58**

A. Cuadros de Datos de Tormentas Eléctricas **64**

B. Mapas de Densidad de Tormentas **66**

C. Mapas Estacionales de Densidad de Tormentas del Territorio Peruano **70**

Índice de Figuras

1. Diagrama representativo de T - P que ilustra el CAPE: el eje vertical corresponde a la presión (hPa) y el eje horizontal a la temperatura (°C). El área sombreada de color naranja entre las curvas de temperatura es el CAPE (Fuente: COMET program). 8
2. Modelo representativo que describe el ciclo de vida de una tormenta eléctrica unicelular. Las flechas representan corrientes de aire verticales ascendentes (rojo) y descendentes (azul). La línea discontinua representa la isoterma de 0 °C. Las tres etapas de su ciclo de vida son: a) etapa de cúmulo o de desarrollo, b) etapa de madurez, c) etapa de disipación. Fuente: Ahrens (2008). 9
3. Distribución de carga eléctrica en una tormenta: Cuando las cargas eléctricas se separan lo suficiente dentro de una nube de tormenta, algunas regiones adquieren carga neta negativa y otras positiva. En este caso, es probable que se produzca una descarga eléctrica. Aproximadamente, un tercio de los relámpagos se originan en las regiones de carga negativa y se propagan desde la base de la nube hacia el suelo. Fuente: `https://www.britannica.com/science/thunderstorm/Thunderstorm-electrification`. 11
4. Desarrollo de un relámpago: (a) Cuando la carga negativa de la nube es lo suficientemente grande como para vencer la resistencia del aire, un flujo de electrones (el líder escalonado) desciende hacia el suelo; (b) A medida que los electrones viajan hacia el suelo, una región de carga positiva en la superficie comienza a ascender a través de cualquier objeto conductor, como árboles, edificios e incluso humanos; (c) Cuando el flujo descendente de electrones se encuentra con las cargas positivas ascendentes, una corriente de retorno muy brillante transporta las cargas positivas hacia la nube (Fuente: Ahrens C. Donald; Henson (2018;2019)). 13
5. Mapa que muestra las ubicaciones de los sensores WWLLN (círculos grises) a partir de 2013. La cantidad de sensores aumentó de 11 en 2003 a 70 en 2013 (Imagen adaptado de Mallick y cols.,2014) 16
6. Propagación de las múltiples frecuencias emitidas en una descarga eléctrica. Las emisiones VHF están asociados con la primera fase de la formación del rayo, mientras que las emisiones VLF están asociadas con las descargas de retorno, (Imagen adaptado de Cummins y Murphy, 2009). 17

7. Un relámpago cae en la superficie de la Tierra (+). Las estaciones **a** y **b** miden el TOGA de la radiación electromagnética procedente de las descargas eléctricas que se propagan a la velocidad de la luz (c). Donde, el algoritmo de localización intenta encontrar una posición óptima (λ, ϕ) para el relámpago con base en las mediciones TOGA. Fuente: Rodger y cols.,2009. 18
8. Ejemplo de algunos datos de relámpagos detectados por WWLLN durante el 20 de julio del 2013. 20
9. Mapa global de distribución de relámpagos detectados durante las 24 horas del 20 de julio del 2013. 20
10. Esquema representativo del método de agrupamiento. Donde, según este ejemplo, el algoritmo logró identificar siete tormentas eléctricas. 22
11. Información de las tormentas eléctricas, como resultado del proceso de agrupamiento de los datos del 20 de julio del 2013 mostrados en la Figura 8. 23
12. Mapa global de la distribución de tormentas eléctricas en una resolución espacial de 2°x2°, correspondiente a los dos años de datos (2012 a 2013). 24
13. Promedio anual de la variación diurna de las tormentas eléctricas: A) Tormentas oceánicas y continentales; B) Tormentas eléctricas en el Hemisferio Norte y en el Hemisferio Sur; C) Tormentas eléctricas en Asia y Oceanía, África y Europa, y América. 26
14. Mapas de densidad de tormentas eléctricas para diferentes intervalos del día: A) Entre los horarios de 00 a 06 UT; B) Entre 06 a 12 UT; C)Entre 12 a 18 UT y D)Entre 18 a 24 UT. 29
15. Diagrama de dispersión entre número de relámpagos y el área de cada tormenta eléctrica para las diferentes regiones del planeta. A) Océano - continente; B) HN - HS; C) América, África - Europa y Asia - Oceanía. 34
16. Mapas de distribución de las tormentas eléctricas de acuerdo a su extensión. A) Todas las tormentas; B) tormentas con 1 a 10 píxeles; C) con 11 a 50 píxeles; D) con 51 a 100 píxeles; E) con 101 a 500 píxeles; F) con 501 a 1229 píxeles. . 36
17. Mapas de distribución de tormentas eléctricas de acuerdo al número de relámpagos. A) Todas la tormentas; B) tormentas con 2 a 10 relámpagos; C) con 11 a 100 relámpagos; D) con 101 a 1000 relámpagos; E) con 1001 a 5000 relámpagos; F) con 5001 a 14052 relámpagos. 37
18. Densidad de tormentas eléctricas en la región de Asia - Oceanía. El cuadrado de color azul encierra una de las regiones de mayor densidad de tormentas en el planeta (El Estrecho de Malaca). 39
19. Densidad de tormentas eléctricas en la región de África - Europa. El rectángulo de color azul encierra una de las regiones de mayor densidad de tormentas en el planeta (La República Democrática del Congo). 41
20. Densidad de tormentas eléctricas en la región de América. El rectángulo de color azul encierra una de las regiones de mayor densidad de tormentas en el planeta (El Norte de Colombia y el Lago Maracaibo en Venezuela). 44

21. a) Sucesión temporal de las de tormentas eléctricas, con una resolución temporal de una hora. (b) Espectro de potencia Wavelet. La región sombreada representa el cono de influencia (COI). (c) Espectro de potencia global (línea azul). La línea discontinua naranja representa el nivel de significancia del 95 % para el espectro total. 48
22. Promedio de la variación diurna de las tormentas eléctricas para las diferentes escalas temporales: A) Anual; B) Estacional; C) Mensual. 51
23. Densidad de tormentas eléctricas en el territorio peruano. 52
24. Diagrama de dispersión entre el número de relámpagos y el área de cada tormenta en el territorio peruano. 53

25. Mapa completo de tormentas eléctricas en Asia-Oceanía. 67
26. Mapa completo de tormentas eléctricas en África-Europa. 68
27. Mapa completo de tormentas eléctricas en América. 69

28. Densidad de tormentas eléctricas de verano (diciembre - enero - febrero). . . . 71
29. Densidad de tormentas eléctricas de otoño (marzo - abril - mayo). 72
30. Densidad de tormentas eléctricas de invierno (junio - julio - agosto). 73
31. Densidad de tormentas eléctricas de primavera (setiembre - octubre - noviembre). 74

Índice de Cuadros

1. Valores de CAPE: Esta escala depende de la ubicación y la época del año. Por ejemplo, un valor de CAPE de 500 J/kg se considera bastante débil en el mes de mayo en Illinois, pero sería mucho más impresionante en enero. (Fuente: https://www.weather.gov/ilx/swop-severetopics-CAPE). . . 7

2. Relación entre el número de relámpagos y el número de tormentas. Por ejemplo: Encontramos 1054 tormentas eléctricas que produjeron entre 5001 a 14052 relámpagos detectados por WWLLN. 64

3. Relación entre el número de píxeles(área) y el número de tormentas. Por ejemplo: Encontramos 546 tormentas eléctricas con áreas entre 501 a 1229 píxeles. . 64

4. Número de tormentas eléctricas por hora para las diferentes regiones del planeta. 65

Capítulo 1

Introducción

La actividad de tormentas eléctricas y rayos alrededor del planeta están relacionados directamente con el clima y con las regiones de mayor inestabilidad y convección atmosférica (Price, 2009). El calentamiento diurno y estacional de las masas continentales debido a la radiación solar durante el día y la mezcla de gases de diferentes densidades, genera grandes variaciones de temperatura que influyen en la estabilidad atmosférica, el desarrollo de las tormentas eléctricas y sus peligros asociados, como rayos, tornados, granizo, ráfagas de viento e intensas lluvias (Price, 2009; Rädler, Groenemeijer, Pistotnik, Sausen, y Faust, 2015; Bullock, Haddow, y Coppola, 2021). Por lo tanto, si el clima cambia, las regiones de convección y su intensidad también cambian, y consecuentemente los patrones de tormentas y rayos en todo el mundo también cambian (Price, 2009). Los estudios de Price y Asfur (2006) muestran que la ocurrencia de rayos se correlaciona positivamente con la temperatura de la superficie en cortos períodos de tiempo. En consecuencia, si tuviéramos días más cálidos (ejemplo, como consecuencia del calentamiento global), esto afectaría la actividad e intensidad de las tormentas, rayos y precipitaciones (Price, 2009; Schefczyk y Heinemann, 2017).

Diversos estudios de proyección climática realizados, utilizando modelos numéricos mues-

tran, que en el futuro el planeta Tierra presentará condiciones más cálidas. Estas condiciones generarán una reducción en el número tormentas eléctricas. Sin embargo, esta disminución de tormentas generaría tormentas eléctricas más intensas, o sea un aumento de la cantidad de rayos en un 10 % por cada grado de calentamiento global (Price, 2009). Por consiguiente, si queremos estudiar estas variaciones espaciales y temporales del número de tormentas eléctricas a lo largo de los años, es importante realizar una correcta identificación de las mismas.

La formación de tormentas eléctricas dependen de una combinación de diferentes condiciones atmosféricas, tales como: el aire cálido e inestable que asciende rápidamente a la atmósfera; suficiente humedad para formar nubes y lluvias; corrientes ascendentes de aire causadas por la colisión de frentes fríos y cálidos; brisas marinas y montañas (Bullock y cols., 2021). Las tormentas eléctricas pueden ocurrir individualmente o en grupos. Por lo que, alguno de estos eventos pueden causar efectos devastadores si permanecen en un lugar durante un período prolongado. Tales efectos conducen a un clima severo como la sobre-saturación del suelo y las consiguientes inundaciones repentinas (Bullock y cols., 2021). Las tormentas eléctricas severas ocurren con mayor frecuencia en forma de tormentas multicelulares (multiceldas) y supercelulares. Sin embargo a veces pueden alcanzar extensiones extremamente grandes como los sistemas conectivos de meso-escala (SCM) o las líneas de turbonada, que pueden propagarse durante varias horas o días en casos extremos (Trapp, 2003; Schumacher y Rasmussen, 2020). La mayoría de los elementos individuales de un SCM o de una línea de turbonada son del tipo multicelular. Sin embargo, algunas celdas en la línea, particularmente en el extremo, pueden ser supercelulares (Trapp, 2003).

El incremento de la temperatura global debido al aumento de los gases de efecto invernadero, pueden tener influencia en la formación y desarrollo de los relámpagos y tormentas eléctricas, por lo que es importante conocer el pasado y presente de estos fenómenos para entender de como el calentamiento global puede afectar las tormentas eléctricas en un clima futuro (Price,

2009). Sin embargo, es necesario enfatizar que la relación entre las tormentas y el clima no siempre puede usarse como un indicador del calentamiento global futuro. Pues, la formación de tormentas en diferentes ubicaciones pueden verse influenciadas por factores de la topología, la vegetación, los patrones de circulación atmosférica, las corrientes oceánicas, etc (Price, 2009). Por lo tanto, es importante el estudio de las tormentas eléctricas en estos diferentes escenarios.

1.1. Justificativa

En este trabajo se presenta un estudio global de las tormentas eléctricas, así como su extensión horizontal, el número de rayos y las regiones de mayor densidad de tormentas. El motivo para desarrollar este trabajo, es debido a que este conjunto de estudios aún no fueron realizados. Además, identificar y estimar la distribución global de tormentas nos permitirán estudiar en un futuro, el funcionamiento del Circuito Eléctrico Global (CEG) y los efectos del cambio climático en la formación de tormentas y rayos. Por tal motivo consideramos la importancia y el aporte de este trabajo.

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es estimar y analizar la variación diurna anual de las tormentas eléctricas a nivel global y regional. También, analizar su distribución global y encontrar las regiones de mayor densidad de tormentas en el mundo.

1.2.1. Objetivos Específicos

- Identificar los grupos de tormentas eléctricas a partir de datos de relámpagos de WWLLN, utilizando una metodología de agrupamiento.

- Calcular el número de tormentas eléctricas por hora para las diferentes regiones del planeta: Asia-Oceanía; África-Europa; América; Hemisferio Norte; Hemisferio Sur; océanos y continentes.
- Generar mapas de densidad de tormentas eléctricas de alta resolución para identificar las regiones de mayor densidad de tormentas.
- Realizar una comparativa entre el número de relámpagos y el área (extensión horizontal) de cada tormenta para las diferentes regiones geográficas.
- Encontrar la periodicidad de las tormentas eléctricas utilizando la transformada Wavelet.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Tormentas Eléctricas

Las tormentas eléctricas o nubes cumulonimbos, son perturbaciones climáticas violentas y de corta duración asociadas principalmente con rayos, truenos, lluvia, granizo y vientos fuertes. Las tormentas eléctricas surgen cuando las capas de aire cálido y húmedo se elevan en una gran y rápida corriente ascendente de aire hacia las regiones más frías de la atmósfera (Brooks, 2011). Allí, la humedad contenida en la corriente de aire se condensa para formar nubes cumulonimbus y finalmente la precipitación (R. Ahrens C. Donald; Henson, 2018;2019). Las tormentas eléctricas pueden estar formadas por una sola nube cumulonimbus. Sin embargo no siempre ocurren así, ya que comúnmente tienden a formarse en grupos de células individuales (Doswell, 2015). En algunos casos, pueden formarse en línea o como parte de grandes Sistemas Convectivos de Mesoescala que pueden abarcar cientos de kilómetros (R. Ahrens C. Donald; Henson, 2018;2019; C. Ahrens, 2008; Houze, 1993).

La capacidad de las tormentas eléctricas para formar diferentes tipos de tiempo está relacionada en parte con la energía potencial convectiva disponible (CAPE). Esta energía está relacionado con la velocidad vertical máxima dentro de una corriente ascendente de aire; por lo que,

los valores más altos de CAPE indican un mayor potencial para un tiempo severo (Monkam, 2002). La CAPE es una medida de la energía cinética que podría obtener una parcela flotante de aire al ascender desde un estado de reposo en el nivel de convección libre (NCL) hasta el nivel de flotabilidad neutra o nivel de equilibrio (NE). La energía cinética de una parcela de unidad de masa que se desplaza verticalmente viene dada por la Ecuación 1.

$$CAPE = \int_{Z_{NCL}}^{Z_{NE}} g(\frac{T_{parcel} - T_{env}}{T_{env}}) \cdot dZ \tag{1}$$

donde g es la aceleración de la gravedad; T_{parcel} es la temperatura de la parcela de aire; T_{env} es la temperatura del ambiente; Z_{NCL} es el nivel de convección libre (es la capa de inestabilidad donde la parcela de aire ascendente es mas cálida que su entorno) y Z_{NE} es el nivel de flotabilidad neutra o de equilibrio donde la parcela de aire no puede subir mas.

La CAPE es un indicador de inestabilidad atmosférica en cualquier sondeo atmosférico dado. Por lo que, es una condición necesaria para el desarrollo de cúmulos y cumulonimbos. La CAPE está medido en julios por kilogramo de aire (J/kg). Cualquier valor más grande que 0 J/kg indica inestabilidad y una posibilidad creciente de tormentas eléctricas y granizo (Moncrieff y Miller, 1976).

En resumen, el desarrollo de las tormentas convectivas depende de las condiciones ambientales favorables para la ocurrencia de convección profunda. La CAPE mide la energía cinética máxima posible que puede requerir una parcela de aire húmedo y cálido ascendente sin mezclarse con el medio ambiente, e instantáneamente, se ajusta a la presión ambiental local. Finalmente, la CAPE mide cuándo las condiciones termodinámicas son favorables para el desarrollo de la convección de cúmulos y por lo tanto, proporciona una guía sobre la fuerza de la convección (Monkam, 2002). CAPE integra una parte sustancial de la información termodinámica contenida en un sondeo, y es proporcional a la energía disponible de una parcela ascendente,

proporcionando una estimación de la fuerza máxima de la corriente ascendente $(Wmax)$ en tormentas convectivas, dada por la relación:

$$W_{max} = \sqrt{2CAPE} \tag{2}$$

Los valores observados en ambientes tormentosos a menudo pueden exceder los 1000 julios por kilogramo (j/kg), y en casos extremos pueden exceder los 5000 j/kg. Sin embargo, al igual que con otros índices o indicadores, no existen valores de umbral por encima de los cuales el tiempo severo se vuelve inminente. Sin embargo, al estimar la probabilidad de tormentas, siempre se debe tener en cuenta el índice elevado.

Cuadro 1: Valores de CAPE: Esta escala depende de la ubicación y la época del año. Por ejemplo, un valor de CAPE de 500 J/kg se considera bastante débil en el mes de mayo en Illinois, pero sería mucho más impresionante en enero. (Fuente: https://www.weather.gov/ilx/swop-severetopics-CAPE).

CAPE (J/kg)	**Potencial convectivo**
< 0	Estable, posibilidad de tormentas nula.
0 - 1000	Levemente inestable. Tormentas leves o moderadas.
1000 - 2500	Moderadamente inestable. Tormentas fuertes.
2500 - 3500	Notablemente inestable. Tormentas severas, granizo.
> 3500	Extremadamente inestable. Posibilidad de supercélulas y tornados.

CAPE se representa en un diagrama de sondeo por el área encerrada entre el perfil de temperatura ambiental y la trayectoria de una parcela de aire ascendente, sobre la capa dentro de la cual la última es más cálida que la primera. Esta área a menudo se llama área positiva. Un ejemplo de un diagrama de sondeo de CAPE se puede observar en la Figura 1.

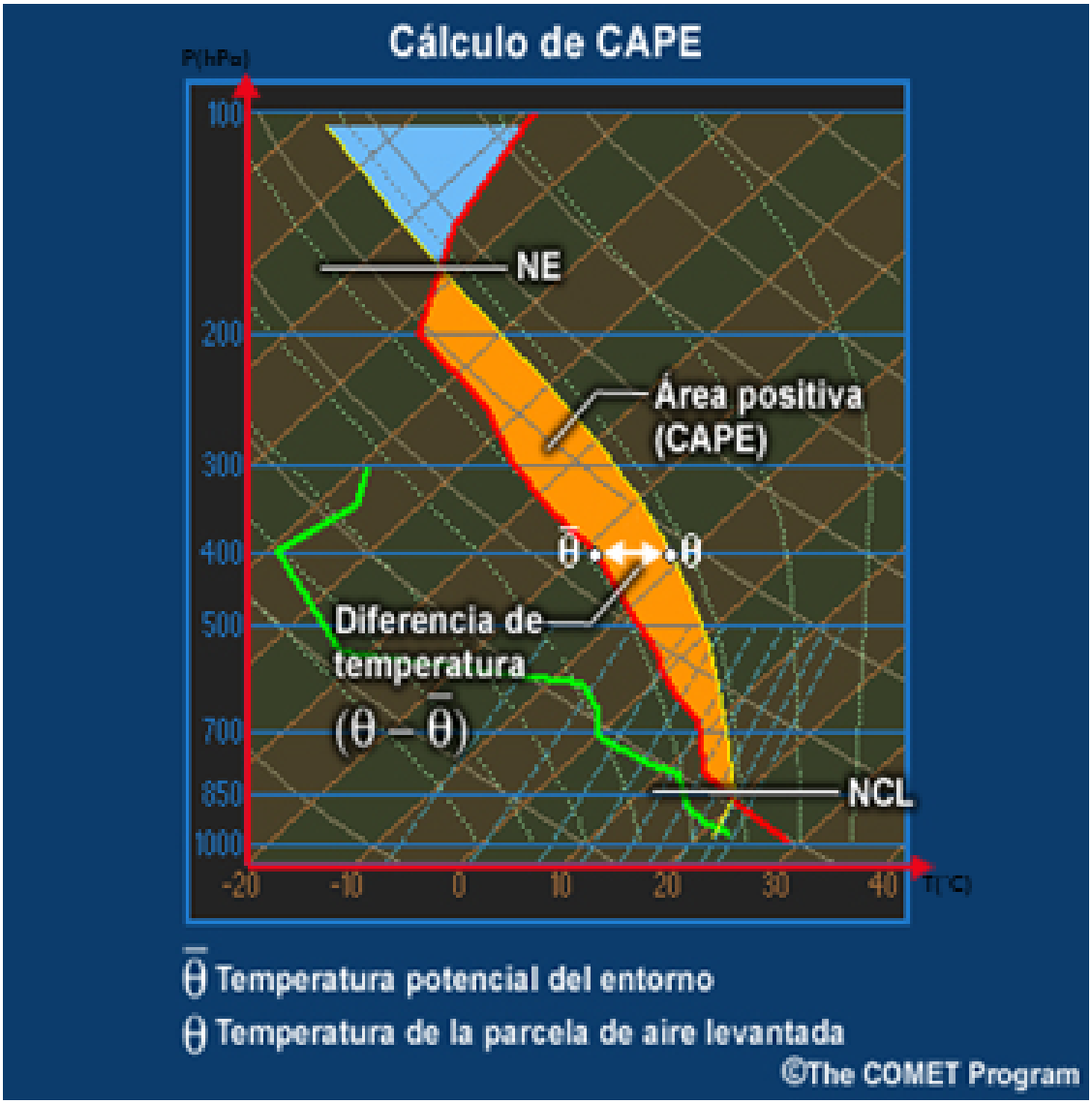


Figura 1: Diagrama representativo de T - P que ilustra el CAPE: el eje vertical corresponde a la presión (hPa) y el eje horizontal a la temperatura (°C). El área sombreada de color naranja entre las curvas de temperatura es el CAPE (Fuente: COMET program).

2.1.1. Ciclo de Vida de una Tormenta Eléctrica

Una nube de tormenta atraviesa por tres diferentes etapas durante todo su ciclo de vida, las cuales son: la etapa de cúmulo o crecimiento, la etapa de madurez y etapa de disipación.

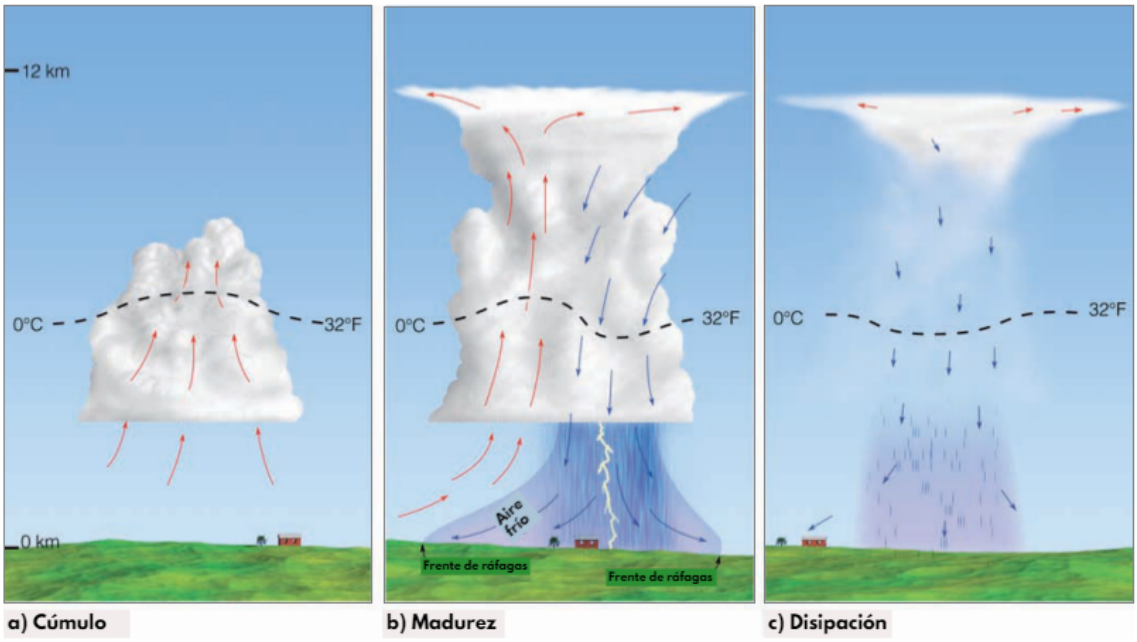


Figura 2: Modelo representativo que describe el ciclo de vida de una tormenta eléctrica unicelular. Las flechas representan corrientes de aire verticales ascendentes (rojo) y descendentes (azul). La línea discontinua representa la isoterma de 0 °C. Las tres etapas de su ciclo de vida son: a) etapa de cúmulo o de desarrollo, b) etapa de madurez, c) etapa de disipación. Fuente: Ahrens (2008).

1. **Etapa de cúmulo o etapa de desarrollo:** La etapa de cúmulo comienza cuando una parte del aire cálido y húmedo que se encuentra cerca de la superficie se eleva hacia las regiones más frías de la atmósfera. Luego, esta se enfría y se condensa formando así una nube cúmulus (Figura 2a). A medida que el vapor de agua se eleva debido a las corrientes ascendentes de aire, esta se condensa en partículas sólidas y/o liquidas liberando grandes cantidades de calor latente y manteniendo el aire ascendente dentro de la nube más caliente que el aire circundante (Krider, 2020; C. Ahrens, 2008). Las corrientes ascendentes

de aire, mantienen suspendidos dentro de la nube a las gotas de agua y los cristales de hielo, evitando la formación de precipitación (R. Ahrens C. Donald; Henson, 2018;2019). En esta etapa se da inicio a un desarrollo vertical de las nubes de tormentas.

2. **Etapa de madurez:** En esta etapa se observa la aparición de una corriente descendente de aire frío. La presencia simultánea tanto de las corrientes descendentes como ascendentes de aire en el interior de la tormenta provoca que se vuelva más intensa. Durante esta fase de madurez la parte superior de la tormenta toma la forma de un yunque a medida que los vientos ascendentes del nivel superior se esparcen horizontalmente junto con las partículas de hielo (Figura 2b). En esta etapa, las tormentas eléctricas desarrollan su proceso de electrificación (Vernon Cooray, 2015). Por lo que son capaces de generar relámpagos, truenos, lluvia (ocasionalmente granizo) y una corriente descendente de aire frío sobre la superficie que se desplaza horizontalmente en todas las direcciones, lo que se conoce como frentes de ráfaga (Krider, 2020; C. Ahrens, 2008).

3. **Etapa de disipación:**

   La etapa de disipación de una tormenta eléctricas comienza cuando las corrientes descendente y ascendente de aire se superponen, interrumpiendo el suministro de humedad (vapor de agua) hacia las capas mas altas de la tormenta (C. Ahrens, 2008). Las corrientes ascendentes se debilitan, dejando sólo a las corrientes descendentes como las dominantes dentro de la tormenta. A medida que la tormenta muere, genera una pequeña precipitación acompañada de corrientes descendentes débiles, dejando sólo la parte superior de la tormenta (R. Ahrens C. Donald; Henson, 2018;2019; C. Ahrens, 2008), como se muestra en la Figura 2c.

2.2. Descargas Eléctricas o Relámpagos

Los relámpagos o rayos son fenómenos meteorológicos asociados principalmente a las tormentas eléctricas y ocurren por lo general en la etapa de madurez de una tormenta después del proceso de electrificación (Vernon Cooray, 2015; R. Ahrens C. Donald; Henson, 2018;2019).

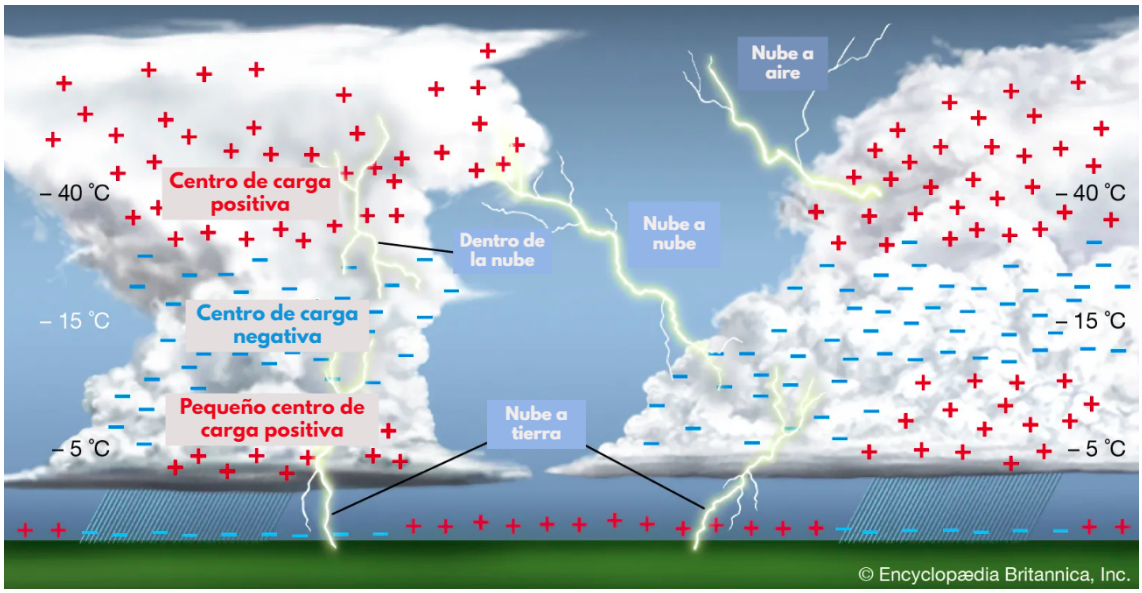


Figura 3: Distribución de carga eléctrica en una tormenta: Cuando las cargas eléctricas se separan lo suficiente dentro de una nube de tormenta, algunas regiones adquieren carga neta negativa y otras positiva. En este caso, es probable que se produzca una descarga eléctrica. Aproximadamente, un tercio de los relámpagos se originan en las regiones de carga negativa y se propagan desde la base de la nube hacia el suelo. Fuente: https://www.britannica.com/science/thunderstorm/Thunderstorm-electrification.

Existen diferentes tipos de rayos, e incluso dentro de una familia de rayos, no hay un rayo "típico". Esto dificulta el estudio y el modelado de los efectos de los rayos, ya que cada rayo tiene un perfil de corriente diferente e irradia diferentes cantidades de energía. Los rayos en la naturaleza (o relámpagos naturales) se originan en una nube de tormenta y de forma simplificada pueden ser de dos categorías básicas: relámpagos que ocurren de nube a tierra (cloud to ground-CG) y los relámpagos que ocurren dentro de la nube (intra cloud-IC), dependiendo de si toca

o no el suelo (Mazur, 2016). Donde, para tormentas eléctricas típicas, cerca del 80 % de los relámpagos son IC y cerca del 20 % restante son CG (Vernon Cooray, 2015; C. Ahrens, 2008; Betz, Schumann, y Laroche, 2008).

2.2.1. Relámpagos o Rayos CG

El tipo de rayo que es más común y el más estudiado se llama rayo de nube a tierra (CG). Los rayos CG forman un camino conductor entre la nube y el suelo, a lo largo del cual fluyen grandes cantidades de corriente eléctrica debido a una diferencia de potencial entre la nube y el suelo. Debido a estas grandes corrientes que fluyen entre la nube y el suelo, los rayos CG son un problema de seguridad, por lo que se han desarrollado redes de detección de rayos para monitorizarlos.

Dentro de la categorización de rayos CG, hay dos tipos principales: rayos CG negativos y positivos. Los rayos CG negativos transfieren la carga negativa de la nube al suelo y comprenden aproximadamente el 90 % de los rayos CG. Esto debido a que el centro de carga negativa de las nubes suele tener una altitud más baja que el centro de carga positiva (Figura 3), donde la longitud del canal del rayo CG negativo suele ser de 5 a 8 km de longitud. La corriente que fluye en estos canales generan radiación electromagnética con longitudes de ondas kilométricas (3-30 kHz, con muy baja frecuencia; VLF). Por lo tanto, una descarga eléctrica está compuesta por un canal inicial descendente llamado líder escalonado (first stroke: FS), y una corriente de retorno (return stroke: RS) que se propaga en dirección hacia la nube (Rakov y Uman, 2014).

En resumen, una descarga eléctrica se inicia cuando el campo eléctrico generado por los centros de carga dentro de la tormenta es muy intenso, alcanzando los $\sim$300 kV/m, siendo capaz de romper la rigidez dieléctrica del medio que lo rodea (C. Ahrens, 2008). Después de esta ruptura del medio, el relámpago comienza a propagarse a través del líder escalonado hasta

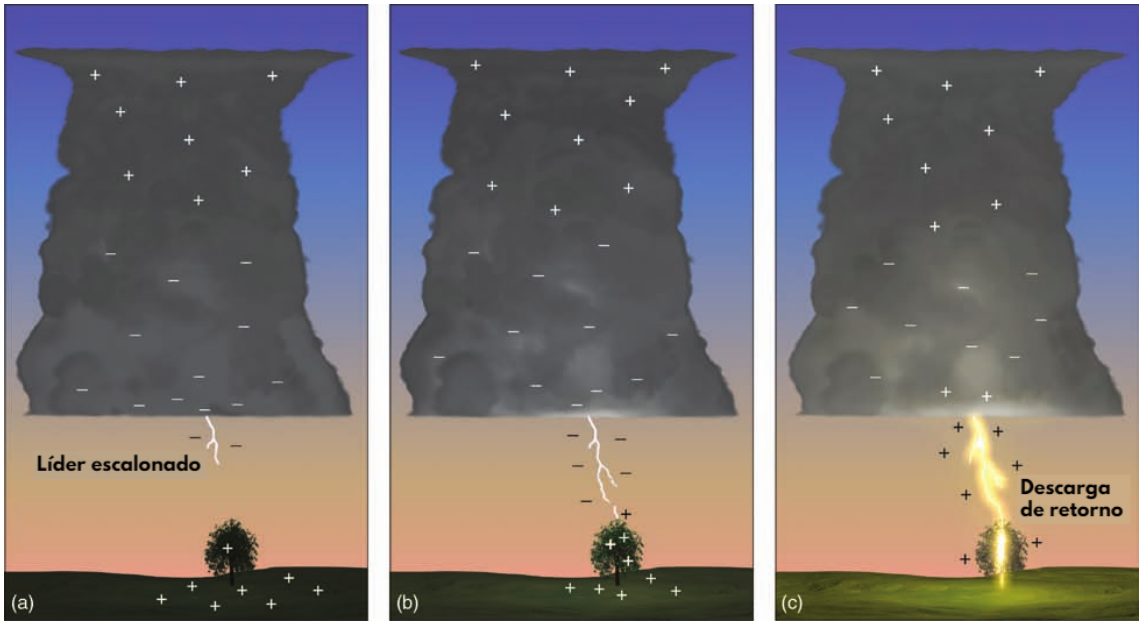


Figura 4: Desarrollo de un relámpago: (a) Cuando la carga negativa de la nube es lo suficientemente grande como para vencer la resistencia del aire, un flujo de electrones (el líder escalonado) desciende hacia el suelo; (b) A medida que los electrones viajan hacia el suelo, una región de carga positiva en la superficie comienza a ascender a través de cualquier objeto conductor, como árboles, edificios e incluso humanos; (c) Cuando el flujo descendente de electrones se encuentra con las cargas positivas ascendentes, una corriente de retorno muy brillante transporta las cargas positivas hacia la nube (Fuente: Ahrens C. Donald; Henson (2018;2019)).

el inicio de la corriente de retorno, alcanzando alrededor de los 30 000 °C, casi cinco veces más caliente que la temperatura de la superficie del Sol (Vernon Cooray, 2015). Este calentamiento extremo permite que el aire se expanda como una onda de choque, convirtiéndose en una onda sonora llamada trueno, que se propaga en todas direcciones (C. Ahrens, 2008; Vernon Cooray, 2015).

Las descargas negativas descendentes de rayos, se inician en la nube, se desarrollan generalmente en una dirección descendente y transportan carga negativa a tierra, representando alrededor del 90 por ciento de todas las descargas CG (Rakov y Uman, 2014). Todos los procesos de rayos están asociados con el movimiento de carga, por lo tanto, pueden estudiarse mediante la medición de los campos eléctricos y magnéticos asociados con ese movimiento de

carga. La radiación VHF-UHF asociada con los procesos de descomposición, en particular los involucrados en la formación de canales líderes cargados negativamente, puede usarse para rastrear la extensión del canal. Mientras que la radiación VLF están asociados a las corrientes de retorno.

Capítulo 3

Instrumentación, Datos y Metodología

Diversos estudios hasta la actualidad han realizado buenas estimaciones de la actividad de rayos. Instrumentos de detección como Optical Transient Detector (OTD), Lightning Imaging Sensor (LIS), World Wide Lightning Location Network (WWLLN), Sferics Timing And Ranging NETwork (STARNET), National Lightning Detection Network (NLDN) , Geostationary Lightning Mapper (GLM), etc, han sido muy útiles para elaborar mapas de densidad de rayos regionalmente y/o globalmente, y evaluar el ciclo diurno de las tormentas eléctricas e identificar las regiones de mayor densidad de rayos a nivel global. Sin embargo, es importante resaltar que no existen muchos estudios que muestren mapas globales de tormentas eléctricas en diferentes escalas espaciales y temporales. Siendo éste uno de los motivos de realizar este trabajo.

3.1. Instrumentación

Los datos utilizados en este estudio fueron obtenidos de la Red Mundial de Localización de Rayos (WWLLN). Esta red detecta y localiza los rayos producidos por las tormentas eléctricas en una escala de cobertura global en tiempo real (Dowden, Brundell, y Rodger, 2002). Iniciada en 2003 con 11 estaciones, y con un total de 70 estaciones hasta finales del 2013 (Mallick y

cols., 2014). Cada estación WWLLN está diseñada para detectar la radiación electromagnética de baja frecuencias (VLF: 3kH - 30kH) producida por las descargas eléctricas nube-tierra (CG) y intra-nube (IC)(Kazadi Mukenga Bantu, Kigotsi, Keto, y Ndontoni, 2018; Cummins y Murphy, 2009; Wanta, 1951). Esta radiación se puede propagar largas distancias hasta algunas decenas de miles de kilómetros de los receptores sin sufrir atenuación apreciable, a través de múltiples reflexiones en la guía de ondas tierra- ionósfera (Earth–ionosphere waveguide: EIWG) (Lay, Rodger, Holzworth, y Dowden, 2005).



Figura 5: Mapa que muestra las ubicaciones de los sensores WWLLN (círculos grises) a partir de 2013. La cantidad de sensores aumentó de 11 en 2003 a 70 en 2013 (Imagen adaptado de Mallick y cols.,2014)

.

La eficiencia de detección de WWLLN es de 10 % para todos los rayos, lo que dificulta obtener mapas completos de la distribución de rayos (Abarca, Corbosiero, y Galarneau Jr., 2010; Hutchins, Holzworth, Brundell, y Rodger, 2012). Sin embargo, a pesar de esta baja eficiencia de detección, diversos estudios han mostrado buenas estimaciones de la variabilidad diurna de tormentas eléctricas por hora (Mezuman, Price, y Galanti, 2014; Hutchins, Holzworth, y Brundell, 2014; Ccopa, Tacza, Raulin, y Morales, 2021). La baja eficiencia de WWLLN es

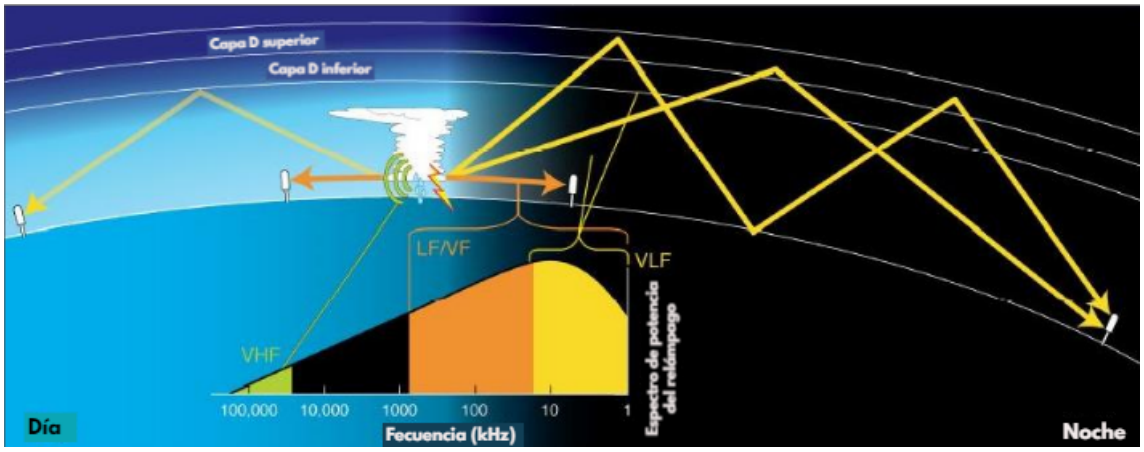


Figura 6: Propagación de las múltiples frecuencias emitidas en una descarga eléctrica. Las emisiones VHF están asociados con la primera fase de la formación del rayo, mientras que las emisiones VLF están asociadas con las descargas de retorno, (Imagen adaptado de Cummins y Murphy, 2009).

debido a que está diseñado para detectar en promedio 3 descargas de retorno por segundo por estación, limitando a detectar solamente las descargas eléctricas más intensas de las tormentas (Dowden y cols., 2008). Estudios recientes mencionan que WWLLN tiene una eficiencia de detección del 11 % para las descargas de retorno nube a tierra (CG) (Mezuman y cols., 2014) y una eficiencia de detección del 30 % para descargas de retorno con picos de corriente de 30 kA, como se indica en `http://wwlln.net/`.

Las estaciones WWLLN operan con un algoritmo de detección llamado TOGA (Time Of Group Arrival), que mide el campo eléctrico y la velocidad de grupo de la radiación (pulso electromagnético) por medio de antenas whip-VLF sincronizadas en tiempo con las antenas GPS. Cada estación WWLLN está equipada con una antena whip-VLF de campo eléctrico, una computadora de procesamiento con conexión a internet para enviar los valores de TOGA de cada pulso detectado al procesador central (Rodger, Brundell, Holzworth, y Lay, 2009). El algoritmo TOGA fue desarrollado por Dowden y cols. (2002), y es calculado como se muestra en la Ecuación 3:

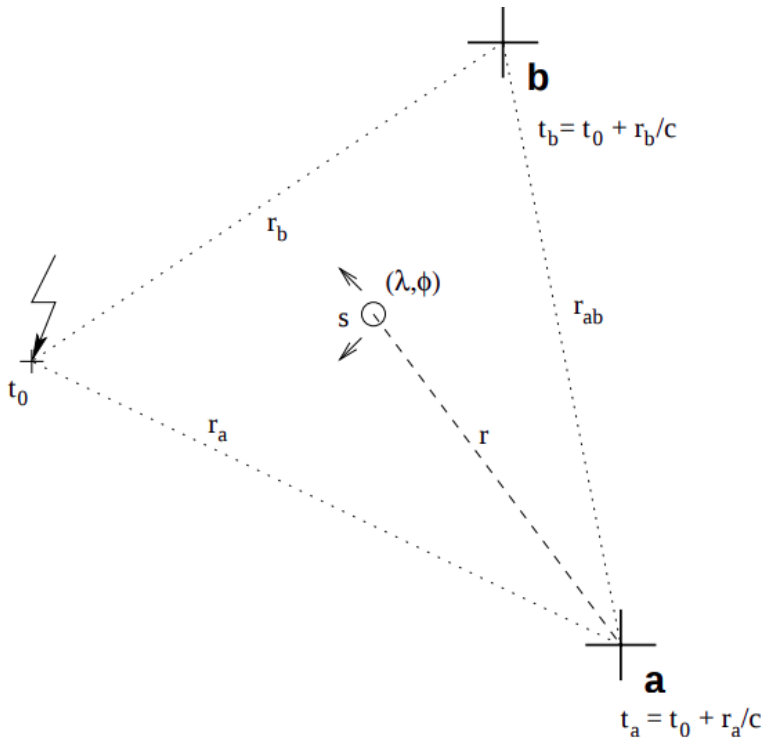


Figura 7: Un relámpago cae en la superficie de la Tierra (+). Las estaciones **a** y **b** miden el TOGA de la radiación electromagnética procedente de las descargas eléctricas que se propagan a la velocidad de la luz (c). Donde, el algoritmo de localización intenta encontrar una posición óptima (λ, ϕ) para el relámpago con base en las mediciones TOGA. Fuente: Rodger y cols.,2009.

$$v_g(k) = \frac{dw_{(k)}}{dk}$$

$$TOGA = t_g = \frac{r}{v_g} \tag{3}$$

donde $v_g(k)$ es la velocidad de grupo del pulso electromagnético, $dw(k)$ es la relación de dispersión debido a la atmósfera, k es el vector de onda y el $TOGA = t_g$ es el tiempo que demora el pulso en viajar desde la fuente del rayo hasta el receptor a una distancia r.

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de un relámpago que ocurre en un instante y ubicación desconocida sobre la superficie de la Tierra. Las estaciones receptoras **a**, **b**, etc, detectan y miden

el TOGA, t_a, t_b, etc, de los pulsos de este y muchos otros relámpagos. El objetivo del algoritmo de detección es determinar el tiempo y la localización de los relámpagos a partir de estas mediciones TOGA. En nuestro ejemplo, las dos mediciones TOGA, t_a y t_b, son consideradas de la misma descarga eléctrica si se cumple que $|t_a - t_b| < r_{ab}/c$. Luego, se utiliza la optimización de Nelder - Mead para determinar una ubicación ideal, para que los valores TOGA calculados correspondan a las mediciones TOGA reales que detectaron la descarga eléctrica. Para el caso de WWLLN, una detección será válida, siempre y cuando se obtenga un mínimo de cinco valores TOGA de un mismo relámpago (Rodger y cols., 2009).

3.2. Datos

Para este trabajo utilizamos datos de relámpagos (strokes) de WWLLN para un periodo de dos años de 2012 a 2013, siendo en total alrededor de 404×10^6 relámpagos registrados. Donde, inicialmente estos datos son proporcionados en archivos diarios en formato ASCII, de los cuales utilizando el lenguaje de programación python proseguimos a la búsqueda e eliminación de los datos erróneos en cada archivo diario y finalmente adaptarlo a un formato adecuado (Figura 8).

Cada archivo de datos contiene el tiempo de ocurrencia del relámpago, la localización (latitud y longitud), la incertidumbre del tiempo de localización y el número de estaciones (mínimo 5 estaciones) que detectaron tal relámpago. Sin embargo, para el desarrollo de este trabajo solo utilizamos el tiempo de ocurrencia y la localización de los relámpagos. La Figura 9 muestra la distribución global de relámpagos detectados el 20 de julio del 2013. En esta configuración los datos de relámpagos están prácticamente listos para el procesamiento y aplicación del algoritmo de agrupamiento, que se explicará con detalle en la metodología.

Relámpagos				
Tiempo	**Latitud**	**Longitud**	**Incertidumbre [μs]**	**N° de estaciones**
2013/07/20,00:00:00.042362	6.8551	24.8744	14.0	6
2013/07/20,00:00:00.380646	47.9820	65.7747	7.4	7
2013/07/20,00:00:00.877150	36.1546	-111.6249	5.9	6
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
2013/07/20,23:59:59.608994	14.4363	-85.8969	21.5	10
2013/07/20,23:59:59.420770	-6.1882	105.1156	16.6	7

Figura 8: Ejemplo de algunos datos de relámpagos detectados por WWLLN durante el 20 de julio del 2013.

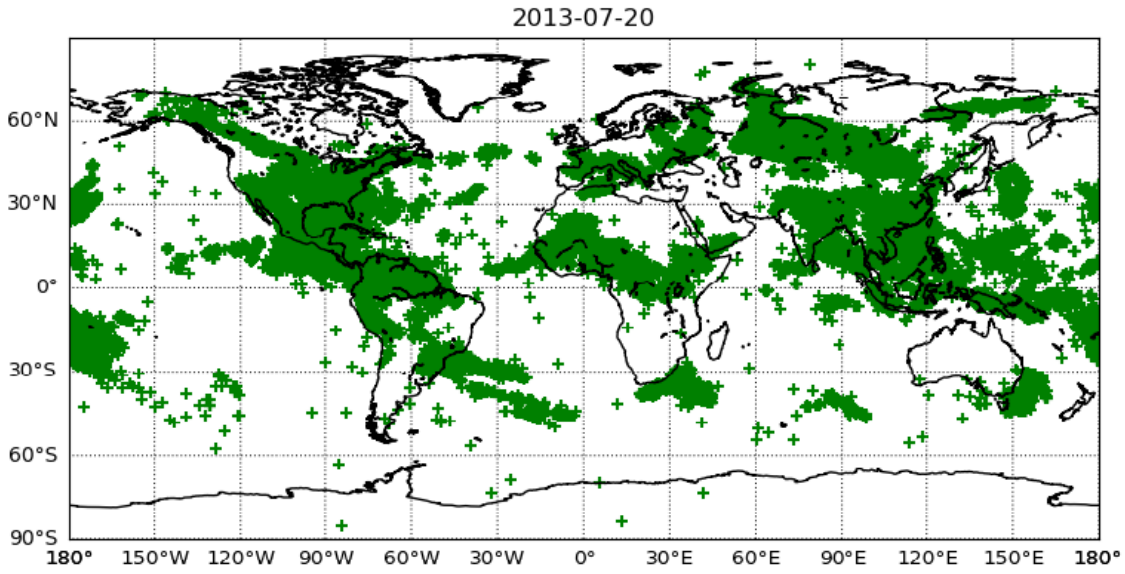


Figura 9: Mapa global de distribución de relámpagos detectados durante las 24 horas del 20 de julio del 2013.

3.3. Metodología

Para identificar los grupos de tormentas, convertimos los relámpagos de WWLLN en celdas de tormentas a través de una metodología de agrupamiento que fue desarrollado en el lenguaje IDL y validado en Ccopa y cols. (2021). El método consiste en agrupar las detecciones de rayos en una matriz de densidad con una resolución espacial de 0.1°x0.1° (1 píxel) y una resolución temporal de una hora. Se eligieron estos valores debido al tamaño y a la vida típica de una celda de tormenta (1píxel = 0.1°x0.1°= 123.6 km²). Pues, la resolución del píxel tenia que tener el tamaño suficiente para capturar tormentas de una sola célula que tienen un ciclo de vida promedio de una hora. Se identificó los píxeles con rayos, luego se agruparon con los píxeles vecinos con presencia rayos para formar la tormenta eléctrica. Por lo tanto, según este esquema, una tormenta eléctrica seria definida como un conjunto completo de píxeles continuos unidos lateral o diagonalmente. Además, para evitar ubicaciones de rayos incorrectos, solo se consideraron tormentas eléctricas que tienen un mínimo de 2 rayos durante un intervalo de tiempo de una hora.

Según el esquema mostrado en la Figura 10b podemos observar un total de siete tormentas eléctricas identificadas. De las cuales los píxeles de color gris representan tormentas individuales de una sola célula y los cinco restantes tormentas de células múltiples o multicelulares. De éstos, podemos suponer que los cúmulos de color amarillo y verde representan tormentas multicelulares aisladas; el cúmulo de color azul un sistema convectivo de mesoescala; el cumulo de color morado una línea de turbonada[1] y el de color rojo una tormenta de supercélula.

Por lo tanto, utilizando un método de agrupamiento a nuestro conjunto de datos, fue posible identificar tormentas eléctricas aisladas y agrupadas, así como sistemas convectivos de mesoescala (SCM) y líneas de turbonada que muestran formas más irregulares. Tras la identificación

[1]Una línea de turbonada es un conjunto de tormentas eléctricas organizadas en forma de linea que se desplazan en forma conjunta, generando descargas eléctricas, vientos fuertes, precipitaciones acompañadas de granizo (C. Ahrens, 2008).

	1					4	15
1			1	1		3	1
				15			
	20	18		24		25	
	7			36	80		17
				9	30		
70	8	42					
			10		15		10

(a) Identificación de los píxeles con relámpagos.

	1					4	15
1			1	1		3	1
				15			
	20	18		24		25	
	7			36	80		17
				9	30		
70	8	42					
			10		15		10

(b) Agrupamiento entre píxeles vecinos con relámpagos

Figura 10: Esquema representativo del método de agrupamiento. Donde, según este ejemplo, el algoritmo logró identificar siete tormentas eléctricas.

de las tormentas eléctricas, calculamos el número total de rayos, el área en función del número de píxeles, la hora en tiempo universal (UT) y la posición media de latitud y longitud de cada tormenta eléctrica, como se muestra en la Figura 11.

Tormentas				
Hora	**Longitud**	**Latitud**	**Área[píxel]**	**N° de relámpagos**
00	-20.40	-45.18	4	9
00	152.98	-43.22	5	13
00	35.78	-40.26	5	6
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
23	61.33	68.23	3	6
23	62.80	68.30	3	4

Figura 11: Información de las tormentas eléctricas, como resultado del proceso de agrupamiento de los datos del 20 de julio del 2013 mostrados en la Figura 8.

Como resultado del proceso de agrupamiento de los datos de WWLLN, logramos identificar un total del 14 761 057 tormentas eléctricas con mas de 2 relámpagos por hora sobre todo el planeta durante los dos años de estudio. La Figura 12 muestra un mapa completo de densidad de las tormentas eléctricas mencionadas. Donde las cuadriculas de colores indican el nivel de concentración de tormentas eléctricas en un área de 2°x2°, manteniendo la misma proporción para los histogramas correspondientes (2° para latitud y 2° para longitud). Se utilizó la cuadrícula de 2°x2° solo para la visualización de la distribución de tormentas eléctricas, por lo que no hay un motivo específico de esta elección.

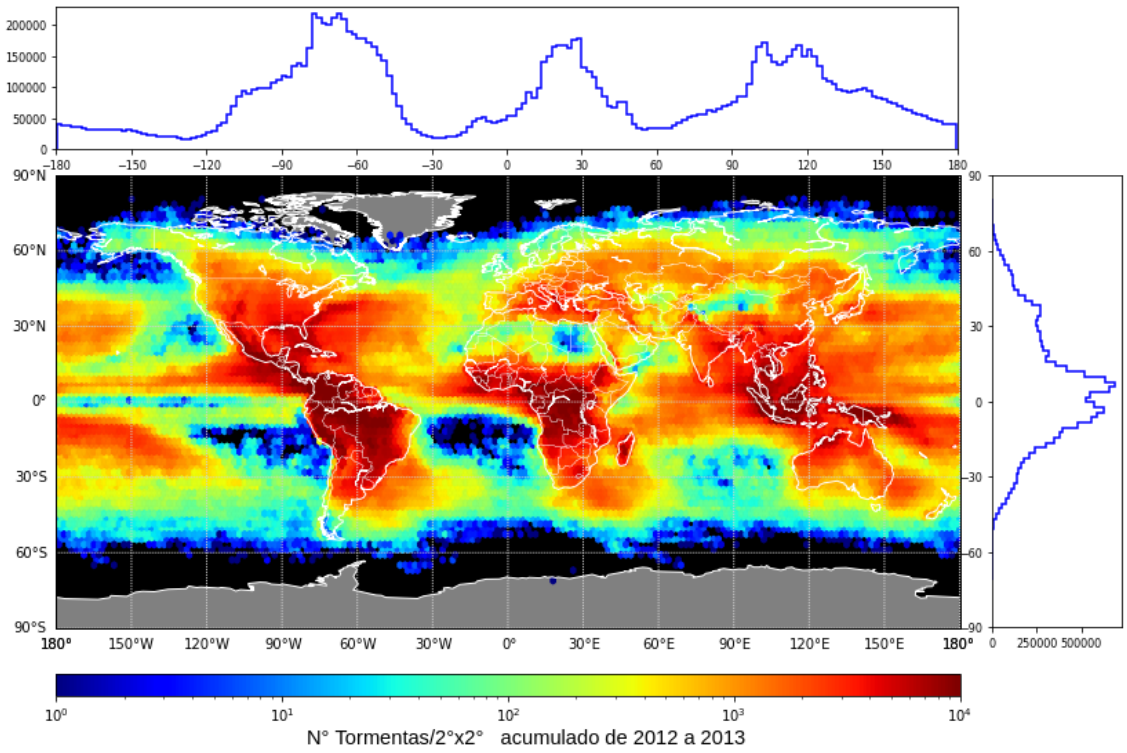


Figura 12: Mapa global de la distribución de tormentas eléctricas en una resolución espacial de 2°x2°, correspondiente a los dos años de datos (2012 a 2013).

Capítulo 4

Resultados y Discusiones

En este capitulo se muestran los resultados obtenidos en este trabajo. A continuación mostramos un análisis general de la distribución global de las tormentas eléctricas en diferentes escalas espaciales y temporales.

4.1. Variación Diurna Anual de las Tormentas Eléctricas

Para estimar la variación diurna anual de las tormentas eléctricas, primero se realizó un conteo global de las tormentas para cada hora de los dos años de datos. Luego se calculó el promedio para cada hora. Como resultado, en la Figura 13 presentamos la variación diurna anual de las tormentas eléctricas para las diferentes regiones geográficas. La Figura 13A muestra las variaciones diurnas de tormentas eléctricas para las regiones continentales (curva verde oscuro) y oceánicas (curva verde claro). La actividad de tormentas continentales presenta una variabilidad muy pronunciada durante el día, alcanzando su punto de actividad máxima alrededor de las 19:30 UT con 620 tormentas y su actividad mínima alrededor de las 03:30 UT con 397 tormentas en promedio. Mientras que la actividad de tormentas oceánicas muestra una variabilidad aproximadamente constante durante todo el día, alcanzando su máxima actividad entre

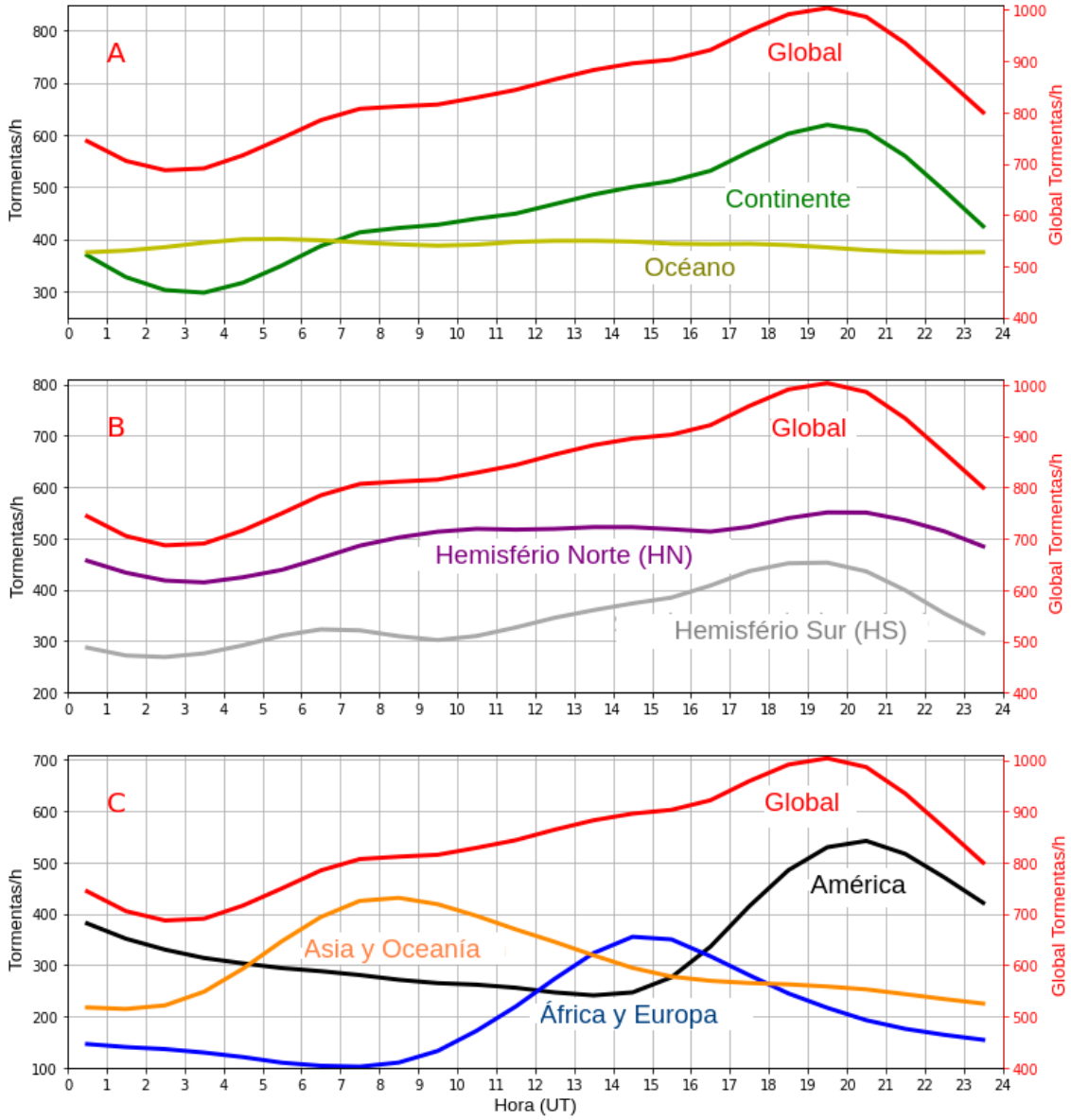


Figura 13: Promedio anual de la variación diurna de las tormentas eléctricas: A) Tormentas oceánicas y continentales; B) Tormentas eléctricas en el Hemisferio Norte y en el Hemisferio Sur; C) Tormentas eléctricas en Asia y Oceanía, África y Europa, y América.

las 04 a 05 UT con 400 tormentas en promedio. Hablando en términos de números absolutos estimamos que en las regiones continentales se forman en promedio 453 tormentas por hora, lo que representa aproximadamente el 54 % de las tormentas eléctricas. Por otro lado, en las regiones oceánicas estimamos un promedio de 388 tormentas por hora, y esto representa apro-

ximadamente el 46 % de las tormentas eléctricas globales. Esta diferencia muestra claramente que las regiones continentales (que representan el 29 % de la superficie terrestre) crean condiciones más favorables para la formación de tormentas eléctricas en comparación a las regiones oceánicas (que representan el 71 % de la superficie terrestre). Además, también observamos que aproximadamente durante siete horas continuas del día, el planeta es gobernado por tormentas eléctricas oceánicas y el resto del día por tormentas continentales. Esta diferencia en el número de tormentas continentales sobre las tormentas oceánicas puede ser causado por la intensa convección atmosférica que ocurre con mayor frecuencia en los continente que en los océanos, y ésto principalmente debido a la menor capacidad térmica del suelo con respecto al agua. Pues el suelo al tener menor capacidad térmica necesitas menos calor para incrementar su temperatura, esto implica que se calienta de manera más eficiente que el océano. Lo cual permite un incremento en la cantidad de vapor de agua y posteriormente la presencia de las corrientes convectivas ascendentes (Albrecht, Goodman, Buechler, Blakeslee, y Christian, 2016; Nicholson, 2009).

La Figura 13B muestra la variabilidad diurna anual de las tormentas eléctricas para los diferentes hemisferios del planeta. En el Hemisferio Norte-HN (curva morada) encontramos que el horario de mínima actividad ocurre alrededor de las 03:30 UT con 414 tormentas y la máxima actividad alrededor de las 19:30 UT con 551 tormentas. Calculando la media total encontramos que en el HN ocurren en promedio 495 tormentas por hora. En el Hemisferio Sur-HS (curva gris) encontramos que la mínima actividad ocurre alrededor de las 02:30 UT con 269 tormentas y la máxima actividad alrededor de las 19:30 UT con 453 tormentas. También encontramos que en el HS en promedio ocurren 347 tormentas eléctricas por hora. Por lo tanto, según estos resultados podemos decir que en el HN se encuentran aproximadamente el 59 % de las tormentas eléctricas globales y en el HS aproximadamente el 41 %. Una de las causas de esta superioridad de tormentas en el HN respecto al HS puede ser debido a la cantidad de áreas

terrestres en cada hemisferio. Pues, en el HN se encuentra el 68 % de las áreas continentales y en el HS el 32 %.

En la Figura 13C se muestra la variabilidad diurna anual de las tormentas eléctricas para las diferentes regiones continentales. Para este estudio dividimos el globo terrestre en tres regiones: Asia y Oceanía (60°E hasta 180°E), África y Europa (30°W hasta 60°E), y América (180°W hasta 30°W). Analizando la curva diurna de Asia y Oceanía (curva naranja) encontramos que alrededor de las 08:30 UT, esta región alcanza su máxima actividad con 431 tormentas, y un promedio de 301 tormentas eléctricas por hora. En el caso de África y Europa (curva azul), el máximo de actividad ocurre alrededor de las 14:30 UT con 355 tormentas, y un promedio de 194 tormentas eléctricas por hora. Por último, tenemos a la región de América (curva negro) con una actividad máxima alrededor de las 20:30 UT con 542 tormentas, y un promedio de 346 tormentas eléctricas por hora. Por lo tanto, según estos resultados podemos decir que América es la región dominante en términos de tormentas eléctricas, contribuyendo con aproximadamente el 41 %. Luego tenemos a Asia y Oceanía como la segunda región con mayor número de tormentas eléctricas, representando aproximadamente el 36 %, y finalmente a la región de África y Europa con una contribución del 23 % de las tormentas eléctricas globales. Los horarios de máxima actividad de cada región continental expresados en UT, representan horarios de la tarde en tiempo local. Esto muestra claramente que las tormentas eléctricas son mas frecuentes durante las tardes locales en cada región continental.

Analizando la curva diurna global de las tormentas eléctrica (Figura 13, linea roja), encontramos que su mínima actividad ocurre a las 03:30 UT con 690 tormentas y su máxima actividad a las 19:30 UT con 1004 tormentas eléctricas. El promedio global calculado indica que existen aproximadamente 841 tormentas eléctricas por hora a nivel global. Donde, el comportamiento diurno de la curva global es dominado por la actividad de las tormentas continentales (curva verde), ya que ambas curvas muestran comportamientos similares durante el día. Además,

la curva global refleja muy bien los picos de máxima actividad de tormentas en las regiones continentales, Asia y Oceanía, África y Europa, y América.

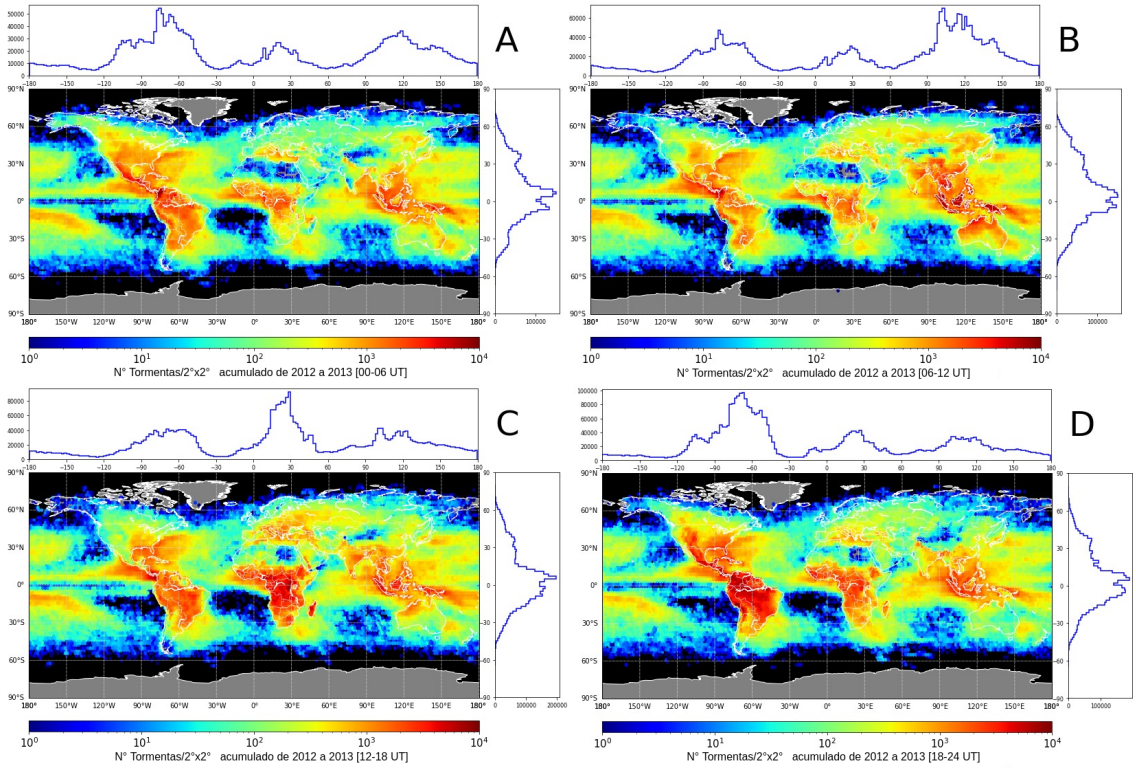


Figura 14: Mapas de densidad de tormentas eléctricas para diferentes intervalos del día: A) Entre los horarios de 00 a 06 UT; B) Entre 06 a 12 UT; C)Entre 12 a 18 UT y D)Entre 18 a 24 UT.

Para una mejor visualización de la distribución de tormentas eléctricas, realizamos mapas de densidad para los diferentes intervalos del día correspondientes a los horarios de máxima actividad de tormentas en las diferentes regiones del planeta. La predominancia de tormentas eléctricas en cada región del planeta se muestran claramente en sus respectivos histogramas de distribución de latitud y longitud de la Figura 14. La Figura 14A muestra la densidad de tormentas eléctricas ocurridas entre las 00 a 06 UT, el cual corresponde a los horarios de mayor actividad de tormentas eléctricas en los océanos y menor actividad de tormentas eléctricas en los continentes. Donde, esta diferencia en el número de tormentas oceánicas y continentales

se observó inicialmente en las curva de variabilidad diurna mostradas en la Figura 13A. Las Figuras 14B,14C y 14D muestran mapas de distribución de tormentas eléctricas correspondiente a los horarios de máxima actividad en las regiones continentales. Donde, entre las 06 a 12 UT se observa mayor actividad de tormentas en las regiones de Asia y Oceanía, y entre las 12 a 18 UT observamos mayor actividad de tormentas en las regiones de África y Europa. Mientras que entre las 18 a 24 UT las actividad de tormentas es dominante en la región de América. Estos patrones de distribución de tormentas durante el día, también se pueden observar en la Figura 13C, el cual muestra las variaciones diurnas y los horarios de máximas actividad de tormentas en las tres regiones analizadas; Asia y Oceanía, África y Europa, y América.

La distribución global de tormentas está concentrada, principalmente, en las regiones de medias y bajas latitudes entre 40°N e 40°S, siendo mas intensa en las regiones continentales de la zona ecuatorial, alcanzando su máximo pico alrededor de los 10°N. Esta predominancia de tormentas en la zona ecuatorial puede estar asociado principalmente al ecuador térmico[1], el cual representa las regiones de máxima temperatura media anual de cada meridiano, esto permite que se generen grandes cantidades de vapor de agua en estas regiones, y en consecuencia la formación tormentas eléctricas.

Existen también una combinación de factores locales y globales que influencian directamente en la formación, distribución espacial y temporal de la actividad de tormentas en el planeta. Por ejemplo; la migración estacional de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) del HN al HS y viceversa; la posición de los vientos del este que migran estacionalmente con la ZCIT; el ciclo de vida nocturno de los SCM; la desestabilización de la capa limite planetaria durante la tarde; la topografía local; efectos locales de las brisas marinas y la temperatura de la superficie del mar (Albrecht y cols., 2016; Nicholson, 2009).

[1]El ecuador térmico, es un cinturón de temperaturas elevadas que rodea a la superficie del planeta y está conformado por las regiones con máxima temperatura media anual de cada meridiano del planeta. Donde, la latitud aproximada de la temperatura superficial media más alta se encuentra alrededor de 10°N (Fuente: American Meteorological Society Glossary).

La diferencia entre las regiones continentales y oceánicas puede ser observada por una intensa convección que ocurre con mayor frecuencia en los continentes debido a la menor capacidad térmica de la tierra, ya que puede calentar el aire de manera más eficaz que el océano, aumentando así las corrientes convectivas ascendentes (Albrecht y cols., 2016; Williams y Stanfill, 2002)

Estudios de Mezuman y cols. (2014) y Hutchins y cols. (2014) mostraron grandes semejanzas con nuestros resultados en el comportamiento diurno anual de tormentas eléctricas. Los autores mencionados utilizaron datos de WWLLN de siete años (2006 a 2012) y tres años (2010 a 2013) respectivamente. Donde, estimaron en total un promedio global de 870 y 660 tormentas por hora. Consideramos que esta pequeña diferencia con nuestros resultados en el número de tormentas, es debido a los diferentes años de datos y a las diferentes metodologías utilizadas por los autores.

Estudios de Christian y cols. (2003) utilizando datos satelitales de OTD, mostraron que aproximadamente el 88 % de los rayos globales ocurren en las masas continentales, y el 12 % en los océanos. Mientras que según nuestros resultados encontramos que el 54 % de las tormentas eléctricas son continentales y el 46 % oceánicas. Comparando estas proporciones de rayos y tormentas en el mundo, podríamos concluir que las tormentas continentales producen mayor cantidad de rayos en relación a las tormentas oceánicas.

Nuestros resultados también muestran que las tormentas eléctricas prevalecen con mayor frecuencia en las regiones tropicales y subtropicales, pero son raros en las regiones de latitudes altas, como las zonas polares. La distribución longitudinal de las tormentas eléctricas en los diferentes horarios muestra tres picos de máxima actividad correspondiente a las regiones continentales (Asia y Oceanía, África y Europa, y América), mientras que fuera de estas regiones hay pocas tormentas eléctricas, como en los polos y océanos. Por lo tanto, podemos decir que las tormentas eléctricas no se distribuyen uniformemente en todo el planeta.

De forma general, la distribución global de tormentas eléctricas en regiones de latitudes medias y bajas (Figuras 12 y 14) se relacionan principalmente a la ZCIT, la propagación de frentes atmosféricos, y al desplazamiento de las corrientes oceánicas cálidas.

La ZCIT es una región de baja presión ubicada en la zona ecuatorial donde convergen los vientos alisios del sureste y del noreste, y está relacionado de forma directa con la circulación de las células de Hadley. Las células de Hadley convergen en la ZCIT, región donde se origina la mayoría de las tormentas eléctricas, vientos alisios, huracanes, ciclones tropicales y alta precipitación,y divergen en la zona de divergencia subtropical, donde el aire descendente es seco, siendo una región de alta presión y atmósfera seca como el desierto del Sahara, los desiertos de Arabia (Whitford y Duval, 2020; Waliser y Jiang, 2015) y el desierto de Atacama.

En las regiones oceánicas, las corrientes cálidas de agua se originan principalmente en las regiones tropicales; debido al movimiento rotacional de la Tierra se propagan de Este a Oeste en dirección a altas latitudes transportando calor y humedad en dirección hacia los polos (Hastenrath, 2015). Las altas temperaturas de estas corrientes oceánicas pueden crear inestabilidad atmosférica y permitir el desarrollo de las tormentas eléctricas, precipitación, ciclones tropicales y ciclones extra-tropicales en mar abierto y en las regiones costeras (Hirata y Nonaka, 2021). En cambio, las corrientes oceánicas frías de los polos pueden causar aridez extrema al alcanzar las regiones costeras. Las masas de aire que se mueven junto con estas corrientes frías, se enfrían y retienen poca humedad al llegar a las regiones continentales, evitando el desarrollo de nubes de tormentas y precipitación. Como consecuencia tenemos los desiertos más secos del planeta: El Atacama de América del Sur por la corriente de Humbolt, la árida península de Baja California en México por la corriente de Alaska, y el desierto de Kalahari en el Sur de África por la corriente de Benguela (Whitford y Duval, 2020).

Otro de los factores que favorecen la formación de tormentas eléctricas es la propagación de las frentes atmosféricas, que son regiones de transición entre masas de aire cálido provenientes

de las zona intertropical, y las masas de aire frío provenientes de la zona polar (Cushman-Roisin y Beckers, 2011). Las frentes atmosféricas se observan en gran parte en el cinturón de latitud extra-tropical, y están relacionados a una serie de eventos dinámicos de la atmósfera como los ciclones extra-tropicales (Joly, 2015; Blumen, 2003). Un frente frío se genera cuando una masa de aire frío alcanza a una masa de aire cálido y causa una disminución de la temperatura local. El aire cálido al ser menos denso comienza a subir rápidamente hasta formar tormentas eléctricas capaces de generar rayos y lluvias intensas. Mientras que un frente cálido ocurre cuando una masa de aire cálido alcanza una masa de aire frío y lo empuja debido a su movimiento, causando un aumento de la temperatura local. El aire cálido al ser húmedo y menos denso tiende a subir y enfriarse rápidamente formando tormentas, rayos y leve precipitación (Joly, 2015; Cushman-Roisin y Beckers, 2011).

4.2. Dimensión Espacial y Número de Relámpagos de las Tormentas Eléctricas

En esta sección presentamos una descripción general del área (extensión horizontal) y el número de relámpagos de las tormentas eléctricas globales encontradas en este trabajo a partir de nuestra metodología. Es importante aclarar que WWLLN detecta en promedio sólo el 10 % de los rayos globales, por lo general aquellos con corrientes de pico superiores a los 30 kA (Sección 3.1). Por lo tanto, para este estudio, el número de rayos encontrados en las tormentas eléctricas representan sólo los rayos más intensos de cada tormenta, y no el total de rayos producidos por la tormenta eléctrica.

La Figura 15 muestra los diagramas de dispersión de las tormentas eléctricas en función de su área y su número de relámpagos para las diferentes regiones analizadas de la Figura 13. En la Figura 15A se puede observar que en las regiones continentales existe una ligera

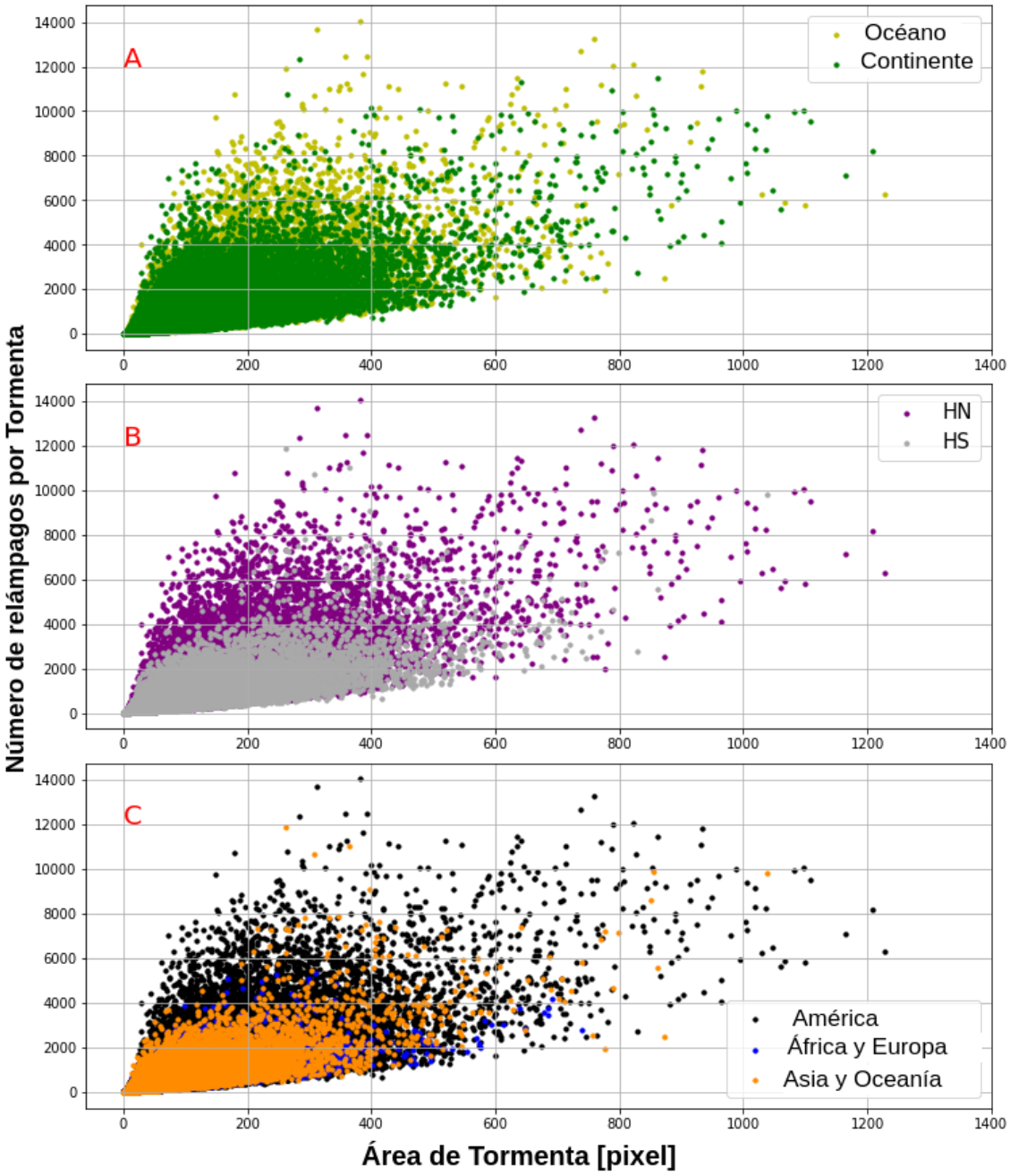


Figura 15: Diagrama de dispersión entre número de relámpagos y el área de cada tormenta eléctrica para las diferentes regiones del planeta. A) Océano - continente; B) HN - HS; C) América, África - Europa y Asia - Oceanía.

superioridad de tormentas de gran extensión en comparación con las regiones oceánicas. Sin embargo, encontramos que la tormenta de mayor extensión es oceánica, cuya área es de 1229

píxeles, equivalente a 151 904.4 km². Si consideramos una extensión circular, seria una tormenta de radio igual a 220 km. Por otra parte, también observamos que las tormentas con mayor actividad de relámpagos intensos (mayor corriente eléctrica) se encuentran en gran parte en las regiones oceánicas y en menor proporción en las regiones continentales. Donde la tormenta con más relámpagos fue oceánica, con 14 052 relámpagos. En general, podemos decir que la formación de tormentas extensas es más frecuente en las regiones continentales que en las regiones oceánicas. Donde la mayor parte de los relámpagos más intensos se originan en las tormentas oceánicas y menor parte en las tormentas continentales. En total logramos identificar 7 945 932 tormentas continentales y 6 815 126 tormentas oceánicas.

La Figura 15B muestra la distribución de tormentas del HN y el HS. En este caso podemos observar claramente que la mayoría de las tormentas de gran extensión y las tormentas con más relámpagos intensos se encuentran en el HN. Donde en total encontramos 8 709 024 tormentas en el HN y 6 052 034 en el HS. En la Figura 15C observamos que las tormentas eléctricas americanas muestran un dominio tanto en extensión como en el número de relámpagos respecto a las otras regiones continentales. En la región de Asia y Oceanía son poco comunes las tormentas de gran extensión y las tormentas con gran número de relámpagos. Mientras que en la región África y Europa las tormentas eléctricas no alcanzan tamaños muy extensos como en las otras regiones, siendo la región con tormentas que producen pocos relámpagos eléctricamente intensos. Según nuestros cálculos, del total de tormentas, 6 078 918 corresponde a América, 5 273 163 a Asia y Oceanía, y 3 408 977 a África y Europa.

Una forma de observar y mejorar nuestro entendimiento de la distribución de tormentas eléctricas según su tamaño y sus relámpagos producidos, es a través de mapas que muestren sus ubicaciones. La Figura 16 muestra mapas de tormentas divididas en función de su área. La Figura 16B nos muestra las tormentas cuyas áreas están entre 1 a 10 píxeles. Este tipo de tormentas son las más pequeñas encontradas según nuestro método, están distribuidas en todo

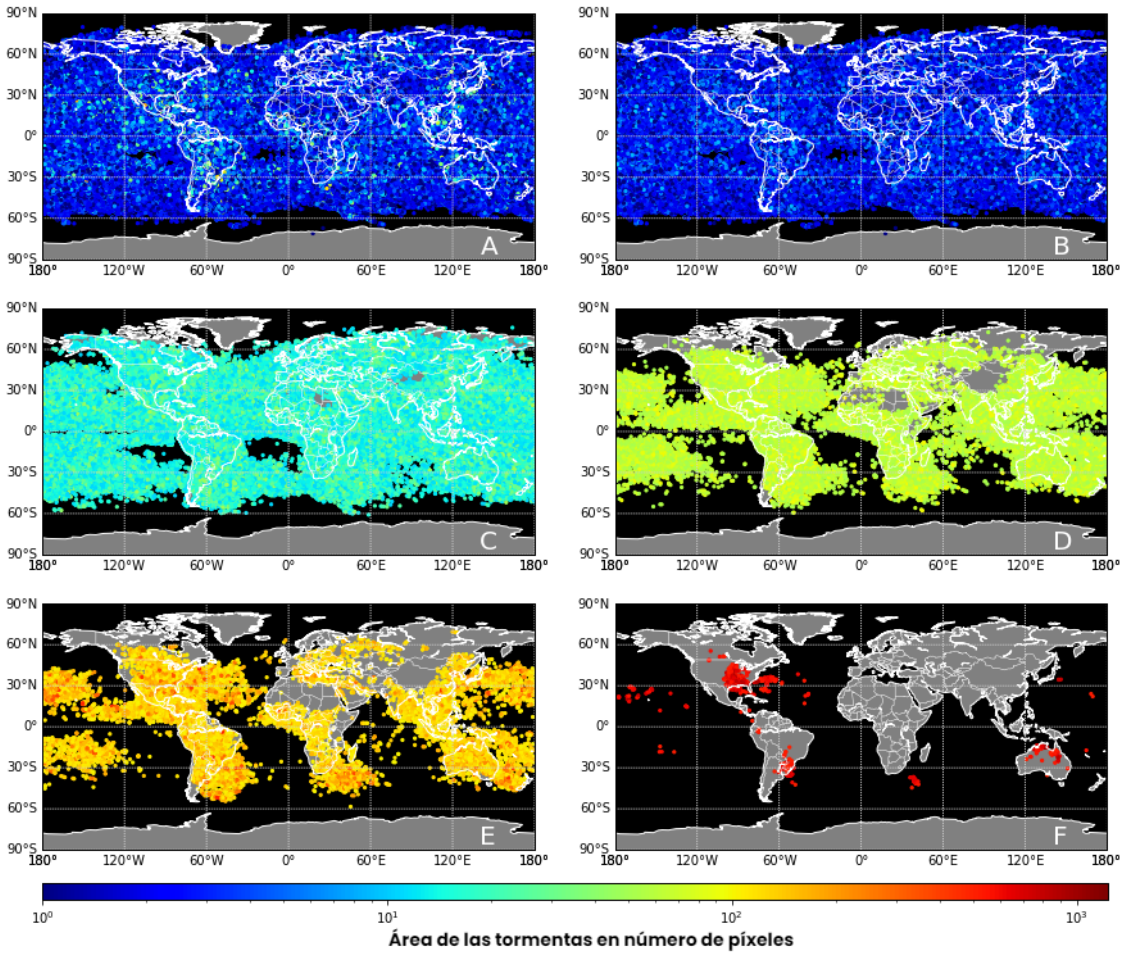


Figura 16: Mapas de distribución de las tormentas eléctricas de acuerdo a su extensión. A) Todas las tormentas; B) tormentas con 1 a 10 píxeles; C) con 11 a 50 píxeles; D) con 51 a 100 píxeles; E) con 101 a 500 píxeles; F) con 501 a 1229 píxeles.

el planeta, son las más comunes y representas el 86,48 % de todas las tormentas. En las Figuras 16C y 16D tenemos a las tormentas entre 11 a 50 píxeles y 51 a 100 píxeles de área y están distribuidos en todo el planeta. Son tormentas medianas y representan el 12,24 % y 0,955 % de las tormentas globales respectivamente. La Figura 16E muestra las tormentas con áreas entre 101 a 500 píxeles y representan el 0,32 % del total de tormentas. Son tormentas de gran extensión y están asociados principalmente a tiempos severos. Por último, tenemos la Figura 16F, el cual nos muestra las tormentas entre 501 a 1229 píxeles de extensión. Estas tormentas representan

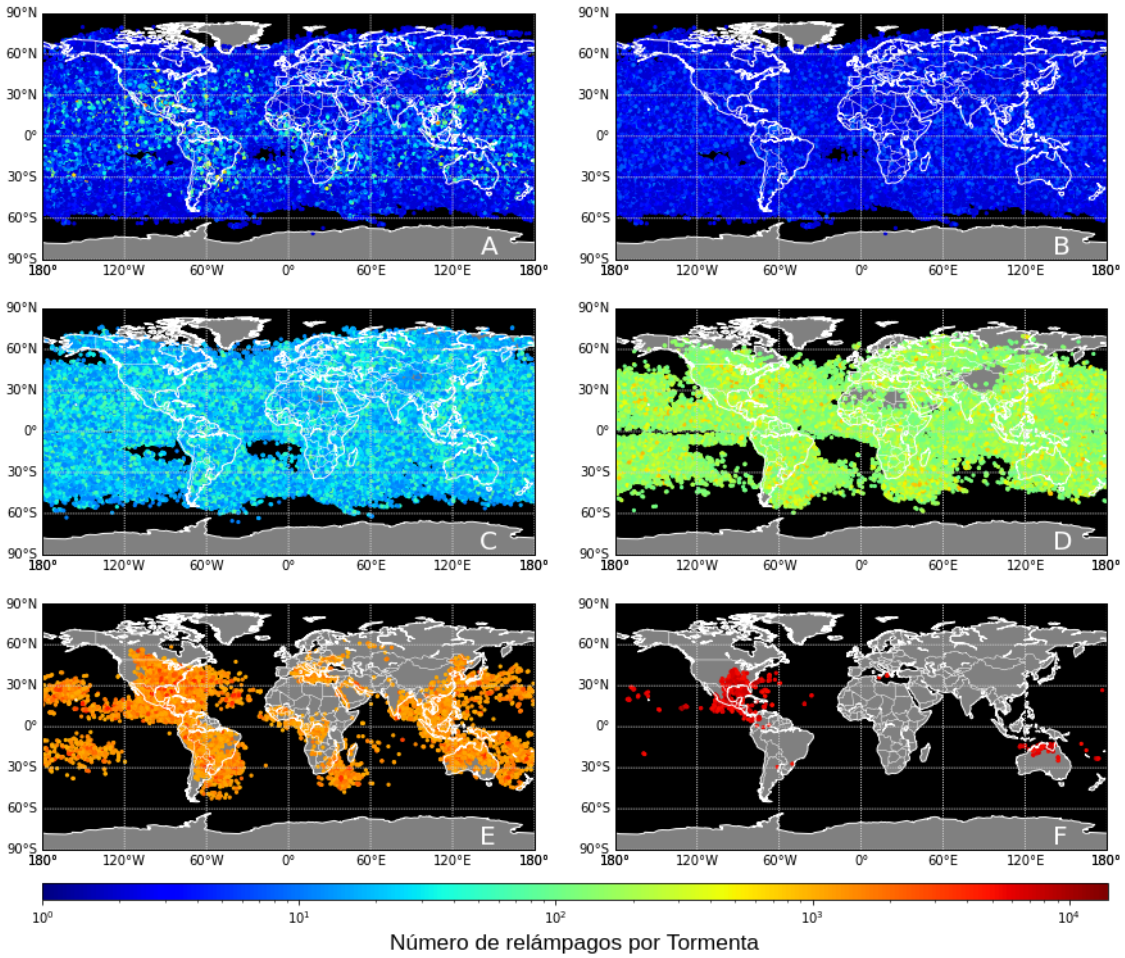


Figura 17: Mapas de distribución de tormentas eléctricas de acuerdo al número de relámpagos. A) Todas la tormentas; B) tormentas con 2 a 10 relámpagos; C) con 11 a 100 relámpagos; D) con 101 a 1000 relámpagos; E) con 1001 a 5000 relámpagos; F) con 5001 a 14052 relámpagos.

una fracción muy pequeña, el 0,005 % del total de tormentas. Son las tormentas más peligrosas que existen en el planeta, y que por su gran extensión, podemos decir que corresponden a los SCM, lineas de turbonada, ciclones tropicales o extra tropicales. Este tipo de fenómenos se pueden observar con mayor frecuencia en Australia, Océano Pacifico, Océano Índico (Sur de África), América del Sur (Brasil, Paraguay, Uruguay, Argentina y el Atlántico Sur en las costas de Brasil) y América del Norte (EEUU, golfo de México y el Atlántico Norte en las costas de EEUU).

En la Figura 17 se presentan mapas de tormentas en función del número de relámpagos. La Figura 17B muestra las tormentas eléctricas que produjeron entre 2 a 10 relámpagos. Este tipo de tormentas están distribuidos en todo el globo, son las maś comunes. Pues, representan el 70,912 % del total de tormentas identificadas. Las Figuras 17C y 17D corresponden a las tormentas eléctricas cuyo número de relámpagos están entre 11 a 100 y 101 a 1000, respectivamente. Estas tormentas están presente en las diferentes regiones del planeta y representan el 24,28 % y el 4,575 % de las tormentas. La Figura 17E muestra la distribución de tormentas con un gran número de relámpagos, entre 1001 a 5000 relámpagos, tienen mayor presencia en las regiones de Asia y Oceanía, América y el Océano Pacifico. También en menor proporción en el centro y sur de África, y en el Mar Mediterráneo. Estas tormentas representan el 0,0227 % del total de tormentas. Por último tenemos la Figura 17F, el cual nos muestra a las tormentas eléctricamente más activas del planeta. Son tormentas con un número entre 5001 a 14052 relámpagos intensos, representan apenas el 0,007 % de las tormentas y son más frecuentes en las regiones de Australia, Centro América, México, golfo de México y gran parte del Sureste de los Estados Unidos.

4.3. Densidad de Tormentas Eléctricas en Asia y Oceanía

En esta sección presentamos una descripción general de las regiones con mayor ocurrencia de tormentas eléctricas en las tres zonas continentales, Asia-Oceanía, África-Europa y América. Para este análisis mejoramos la resolución espacial de los mapas de densidad de tormentas a una escala de aproximadamente 0.1°x0.1°(120 km²) para las tres regiones analizadas. Donde los píxeles de color rojo en cada mapa, nos indican regiones con valores entre 50 a 100 tormentas eléctricas acumulados durante los dos años, lo cual equivale a un promedio de 25 a 50 tormentas eléctricas por año. Mientras que los píxeles naranja contienes de 20 a 50 tormentas, equivalente entre 10 a 25 tormentas eléctricas por año; al color verde - amarillo le corresponde de 10 a 20

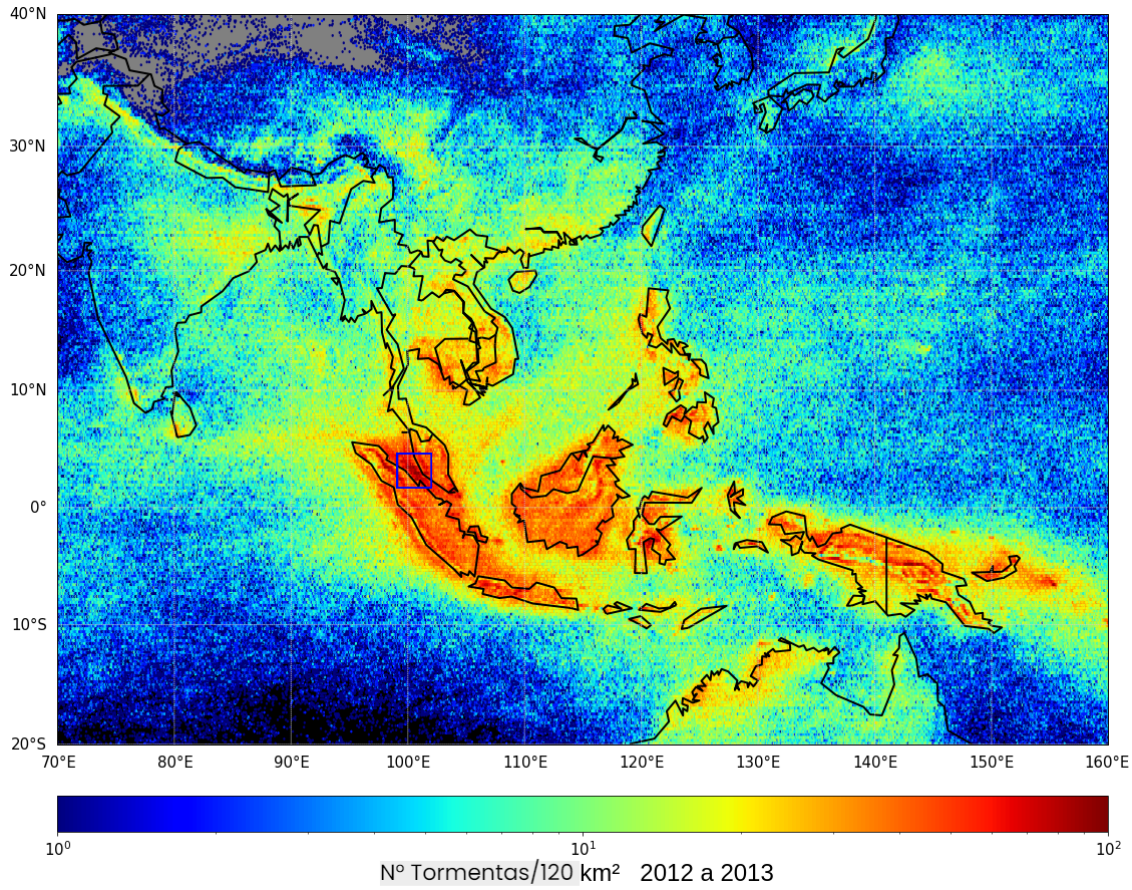


Figura 18: Densidad de tormentas eléctricas en la región de Asia - Oceanía. El cuadrado de color azul encierra una de las regiones de mayor densidad de tormentas en el planeta (El Estrecho de Malaca).

tormentas, equivalente entre 5 a 10 tormentas por año; de 4 a 10 al color celeste, equivalente entre 2 a 5 tormentas por año, y de 1 a 4 al color azul, equivalente entre 1 a 2 tormentas eléctricas por año.

La Figura 18 muestra los lugares de mayor densidad de tormentas eléctricas en Asia y Oceanía. De acuerdo a nuestras estimaciones, la región de mayor densidad se encuentran en el estrecho de Malaca (con alrededor de 50 tormentas/año.120 km²) principalmente sobre las costas de Malasia, Singapur y la Isla de Sumatra (Indonesia). Las regiones de Brúnei, Papua Nueva Guinea, la isla de New Britain, las islas Salomón y gran parte de las islas de Indonesia, también

presentan alta concentración de tormentas eléctricas, alrededor de 25 a 50 tormentas/año.120 km². Otras regiones entre 25 a 50 tormentas/año.120 km² se pueden observar en algunas provincias del sur de Tailandia (Chachoengsao, Chon Buri, Rayong, Chanthaburi, Trat y la capital Bangkok), el noroeste de Camboya (Koh Kong), algunas provincias del sur de Laos (Bolikhamxai, Vientián y Champasak), Vietnam (provincias de Quang Nam y Binh Phuoc) y Filipinas (Zamboanga Sibugay en la isla de Mindanao).

Otras regiones, entre 10 a 25 tormentas/año.120 km², se encuentran en gran parte del litoral de la región norte de Australia próximo a las ciudades de Darwin y Derby, y gran parte de los parques nacionales (Kakadu, Garig Gunak Barlu, etc) y en las islas Tiwi. Otra región similar lo encontramos al sur de China, en gran parte de las provincias de Cantón, Hainan y en la región autónoma de Guangxi.

Una región importante de formación de tormentas eléctricas, la podemos encontrar en la envolvente a lo largo de la gran elevación de la cordillera del Himalaya (Nepal, Bangladesh, India, Pakistan) y la gran meseta Tibetana. Donde se forman, en promedio, entre 5 a 10 tormentas/año.120 km².

4.4. Densidad de Tormentas Eléctricas en África y Europa

En la Figura 19 se muestran las regiones de mayor densidad de tormentas eléctricas en África y Europa. Uno de los principales focos de mayor densidad de tormentas eléctricas en el planeta, se encuentra en la región de África Central, específicamente en la República Democrática del Congo, en el área comprendida entre Butembo, Kinigi y Mwenga cerca del Parque Nacional de Maiko, la Reserva Nacional de Itombwe y la cadena montañosa de Itombwe, ubicado cerca de la costa Noroeste del lago Tanganica. Esta concentración de tormentas se extiende en gran parte por las provincias de Kivu del norte (región de Butembo y Walikale) y Kivu del sur (region de Shabunda y Kabare), cerca de la frontera con Ruanda. Donde en promedio ocurren

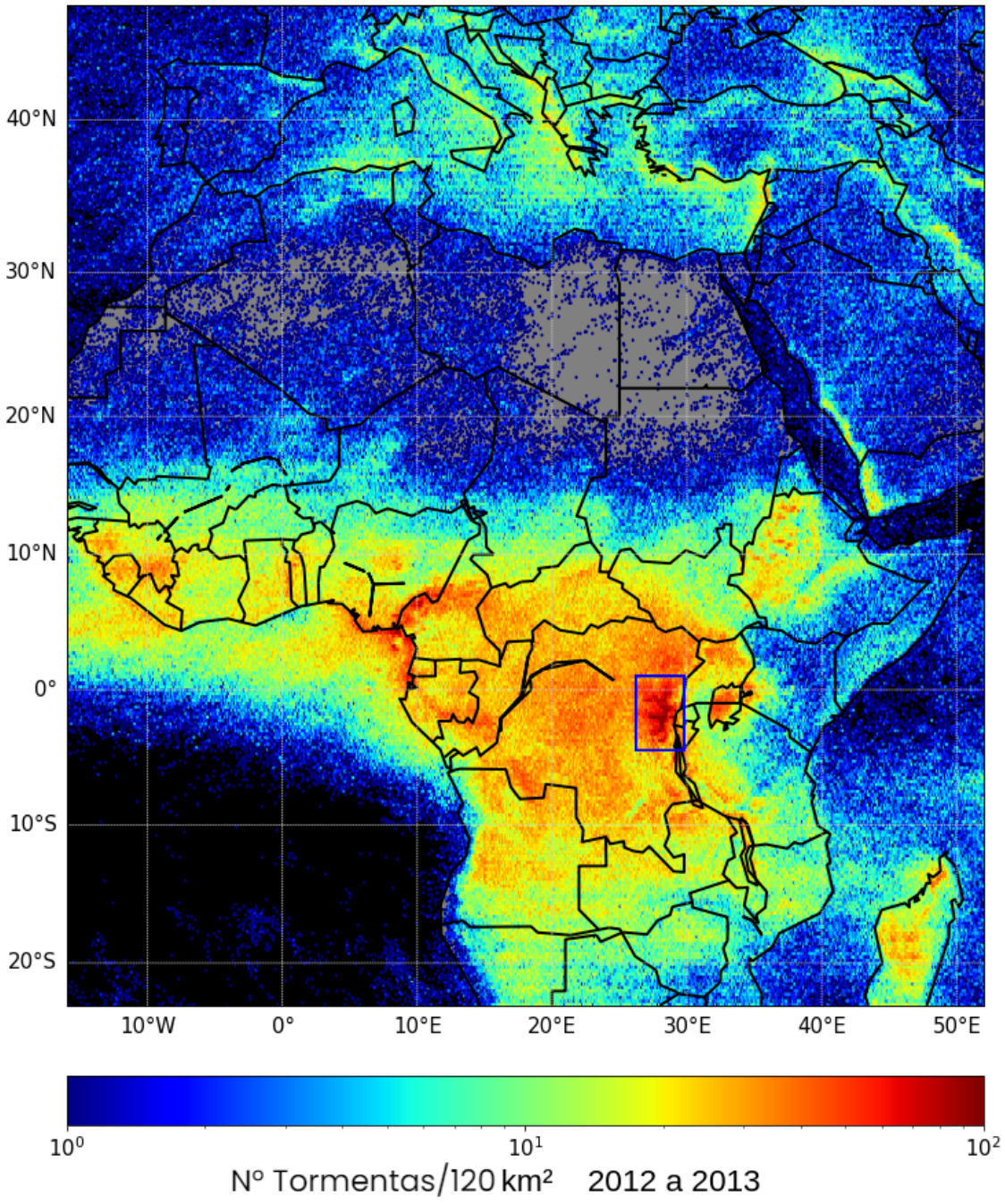


Figura 19: Densidad de tormentas eléctricas en la región de África - Europa. El rectángulo de color azul encierra una de las regiones de mayor densidad de tormentas en el planeta (La República Democrática del Congo).

alrededor de 50 tormentas/año.120 km².

Otras regiones de alta concentración de tormentas eléctricas se pueden observar en las siguientes áreas: casi todo el territorio de la República Democrática del Congo, en la región norte de Uganda, próximo a las ciudades de Gulo y Lira; el área sobre el lago Victoria entre las regiones limítrofes de Uganda, Tanzania y Kenia; la región suroeste de Sudan del Sur, en los estados de Ecuatoria Occidental (ciudades de Yambio, Maridi y Tambura), Ecuatoria Central (ciudades de Yuba y Yei) y Ecuatoria Oriental (ciudad de Torit y la Reserva de Caza Kidepo); gran parte del territorio de la República Centroafricana, principalmente en la región oeste en las prefecturas de Nana-Mambéré y Ouham-Pendé; en Camerún tenemos en la region norte (provincia de Adamaoua), la región oeste (provincias de Nor-Oeste y Sur-Oeste) y la región limítrofe con el Océano Atlántico (a lo largo del golfo de Guinea). En todas estas regiones mencionadas se pueden encontrar en promedio entre 25 a 50 tormentas/año.120 km².

Otras regiones mostradas en la Figura 19 con importante presencia de tormentas eléctricas (entre 10 a 25 tormentas/año.120 km²), se encuentran en la parte sur de Europa y en el Asia occidental, principalmente en todo el área del Mar Mediterráneo y a lo largo de las costas limítrofes como: la costa oeste de Italia (las ciudades de Génova, Roma y Napoles), Grecia (Epirus, Peloponeso y las Islas Jónicas), Turquía (Esmirna y Antalya), Siria (Latakia y Tartús), Líbano (Trípoli y Beirut) e Israel (Tel Aviv). En la parte sur tenemos, a la cadena montañosa de Sarawat, que corre paralela a la costa occidental de la península arábiga a través de Arabia Saudita y Yemen desde la frontera de Jordania en el norte, hasta el golfo de Adén en el sur. Otra región con una importante presencia de tormentas se observan en la parte oeste del Mar Negro en el limite con Georgia a lo largo de la Cordillera del Cáucaso. Mientras que algo similar se observa a lo largo de la cadena montañosa de Zagros, que se extiende desde la frontera entre Turquía, Irak e Irán hasta el centro-sur de este último país en el estrecho de Ormuz en el golfo Pérsico.

4.5. Densidad de Tormentas Eléctricas en América

América representa la región con mayor promedio del número de tormentas eléctricas a nivel global en comparación a las regiones de África-Europa y Asia-Oceanía. La Figura 20 muestra las regiones con mayor densidad de tormentas eléctricas en la región de América. Los puntos de mayor concentración de tormentas se pueden observar en la zona norte de la Cordillera de los Andes, principalmente, al norte de Colombia (departamentos del Cauca, Valle del Cauca, Choco, Antioquia, Santander, Norte de santander y Cesar) y en toda la cuenca del Lago Maracaibo en Venezuela. En estas regiones en promedio se observan alrededor de 50 tormentas/año.120 km². Una gran acumulación de tormentas eléctricas, se pueden observar en gran parte de la región de Panamá y las regiones limítrofes con el Océano Pacífico y el Océano Atlántico, desde Colombia hasta Costa Rica. También, en gran parte de Centroamérica como: la Reserva Biológica Miskitos en Nicaragua; la reserva de la biosfera del río Plátano en Honduras; El Salvador; Bélice y Guatemala, extendiéndose hasta el norte de México a través de la cordillera de Sierra Madre del Sur, la cordillera Neovolcánica, la cordillera Sierra Madre Occidental y Sierra Madre Oriental en México, encontrándose en promedio entre 25 a 50 tormentas/año.120 km². Otros puntos similares de gran concentración de tormentas eléctricas se pueden observar a lo largo de la Cordillera de los Andes, como: la zona interandina de Ecuador (limite entre los Andes y la Selva); el relieve andino del Perú determinado por el paso de la Cordillera de los Andes formada por 3 cadenas montañosas (Occidental, Central y Oriental) principalmente en las regiones de La Libertad, Huánuco, Pasco, Junín, Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, Cusco y Puno (cuenca del Lago Titicaca en la frontera con Bolivia); la zona sierra de Bolivia (departamentos de La Paz, Oruro, Cochabamba y Potosí) hasta el norte de Argentina en las provincias de Jujuy y Salta; la Amazonia o Selva Amazónica juntamente con los estados de Mato Grosso y Tocantins en Brasil, contribuyen también significativamente en la densidad de tormentas eléctricas con un promedio entre 25 a 50 tormentas/año.120 km².

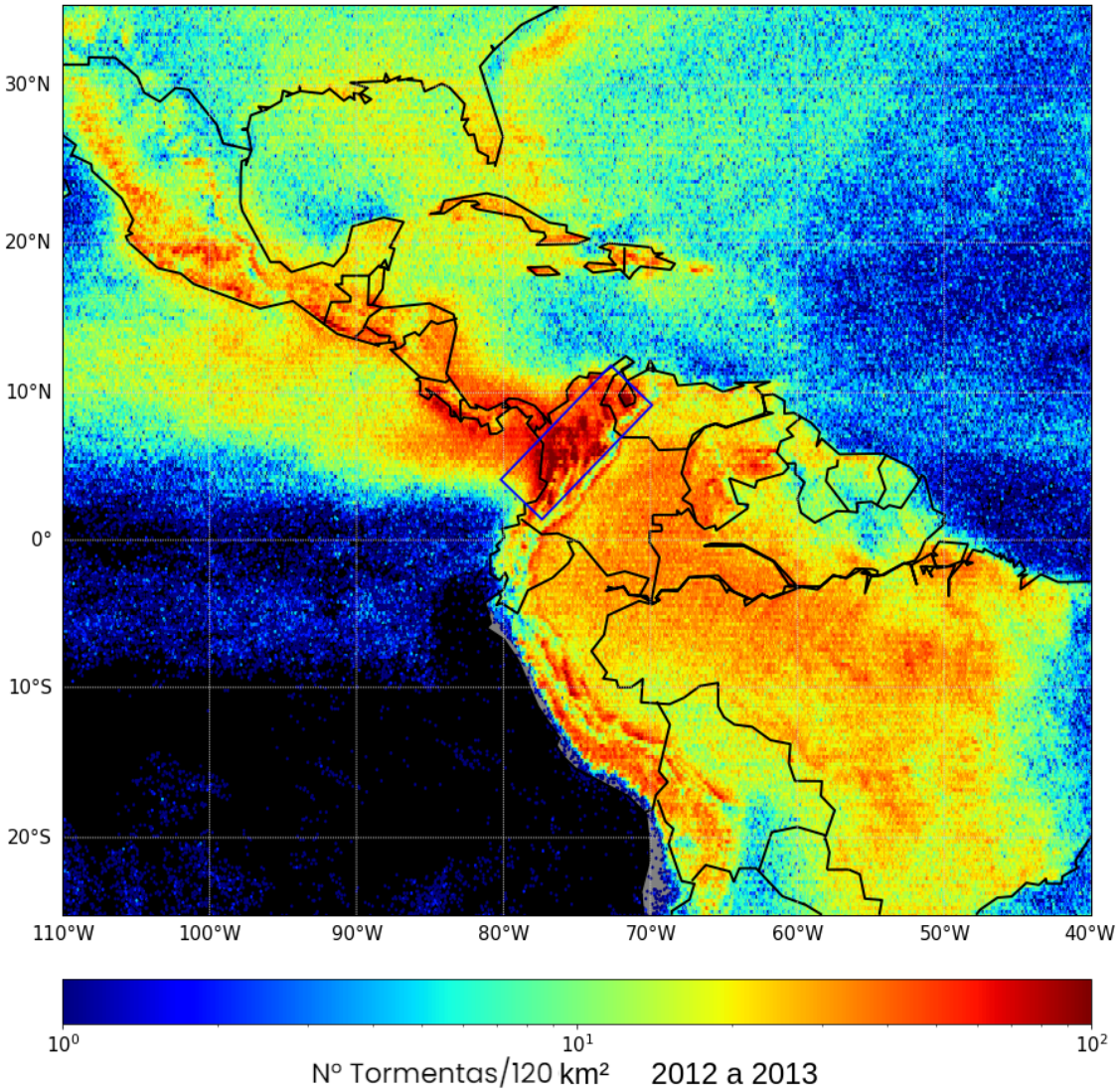


Figura 20: Densidad de tormentas eléctricas en la región de América. El rectángulo de color azul encierra una de las regiones de mayor densidad de tormentas en el planeta (El Norte de Colombia y el Lago Maracaibo en Venezuela).

De forma general, podemos decir que existen regiones en el mundo, que son focos de formación de tormentas eléctricas. Uno de ellos son las cadenas montañosas que crean condiciones favorables para el desarrollo de tormentas eléctricas, prueba de ello tenemos: la cordillera del Himalaya en Asia; la cadena montañosa de Sarawat (península arábiga, entre Asia y África); la cordillera del Cáucaso (en el límite de Asia-Europa); los Alpes suizos; la cadena montañosa de

Zagros(Irak e Irán); las cordilleras de Sierra Madre y Neovolcánica en México, y la Cordillera de los Andes en Sudamérica. Donde se forman en promedio entre 5 a 50 tormentas/año.120 km². Luego tenemos las grandes masas de agua continentales como los lagos y mares, que son regiones de gran concentración de tormentas, por ejemplo: El Mar Mediterráneo (entre Europa y África), el Lago Victoria (Uganda, Tanzania y Kenia); el Lago Titicaca (entre Perú y Bolívia), y el Lago Maracaibo en Venezuela, el cual es considerado como la region con mayor incidencia de rayos a nivel mundial. Las regiones oceánicas también contribuyen significativamente en el número de tormentas eléctricas, principalmente las regiones donde se propagan las corrientes marinas cálidas.

Uno de los procesos de formación de tormentas en las regiones montañosas puede ser debido al levantamiento orográfico, esto ocurre cuando una masa de aire caliente y húmedo alcanza una montaña, esta se desvía hacia arriba por la ladera de la montaña creando inestabilidad en la atmósfera. A medida que la masa de aire se eleva, ésta se enfría hasta alcanzar el nivel de condensación favoreciendo la formación de nubes, precipitación y tormentas eléctricas (Napoli, Crespi, Ragone, Maugeri, y Pasquero, 2019). Los procesos responsables de la iniciación, el desarrollo y la propagación de las tormentas eléctricas en los lagos no se conocen del todo bien. Sin embargo su formación puede estar influenciado por la interacción de masas de aire frío y cálido. La diferencia de temperatura entre el lago y el aire sobre la superficie hace que las brisas se desarrollen y soplen hacia el lago. Cuando las masas de aire impulsadas por el viento convergen sobre el lago, éstas se elevan en el proceso de convección que desencadena las tormentas eléctricas. Estudios de Woodhams y cols. (2019) en el Lago Victoria, mostraron que una atmósfera húmeda y con alto CAPE puede ser un factor importante para desencadenar una tormenta. Donde los cambios diarios de la variabilidad de la humedad y la circulación a escala local de los vientos son claves para pronosticar tormentas sobre los lagos.

4.6. Cálculo de la Periodicidad de las Tormentas Eléctricas

Con la finalidad de encontrar las oscilaciones importantes de la variabilidad de las tormentas eléctricas a nivel global, para nuestro periodo de estudio (2012 a 2013), utilizamos la transformada Wavelet. La transformada Wavelet surge como la evolución de la famosa transformada de Fourier. Ya que ésta última está diseñada para aplicarse a señales periódicas, finitas y estacionarias. La diferencia entre ambas transformadas se debe a que la transformada de Fourier descompone una señal compleja o una serie temporal en sus funciones base, que son ondas de la forma seno y coseno con diferentes frecuencias. En cambio, la transformada Wavelet opera descomponiendo una señal en versiones desplazadas y escalonadas de una Wavelet conocida como Wavelet madre. Existen diferentes tipos de Wavelet madre, una de ellas es la función MORLET, que es una función compleja dividida en una parte real y otra imaginara, siendo útil para analizar la fase y el modulo de la señal descompuesta, siendo la más adecuada para el estudio y análisis de señales producidas u obtenidas de fenómenos o eventos físicos, como es nuestro caso. La transformada Wavelet es una herramienta que nos permite encontrar tanto los modos dominantes de oscilaciones, como su variación en el tiempo (Torrence y Compo, 1998).

Para este estudio utilizamos el paquete **waveletfunctions** desarrollado en python y disponible en **URL**: `https://paos.colorado.edu/research/wavelets/`. Para aplicar la transformada Wavelet en nuestro conjunto de datos, fue necesario verificar que tuvieran intervalos de tiempo contantes entre cada punto de los datos. Para nuestro caso estos intervalos fueron de una hora entre cada punto. Después de finalizar esta verificación, aplicamos la transformada Wavelet discreta a nuestra sucesión temporal, utilizando la herramienta **waveletfunctions**, que utiliza la wavelet de MORLET como su función base analizadora.

Una ves aplicado la transformada Wavelet se obtiene el espectro de potencia y el espectro global. En el espectro de potencia, la región sombreada delimitada por una línea negra es conocida como el cono de influencia (COI). Este COI nos permite delimitar los efectos de borde

que se originan al principio y al final de los datos; esto se debe a que la sucesión temporal con el cual trabajamos es finita. Por lo que, la solución a estos efectos es completar el final de la sucesión con ceros hasta alcanzar una cantidad de puntos que sea potencia de dos. Sin embargo, la introducción de ceros en la transformada implica una reducción de la amplitud cerca de los bordes de la sucesión. Por lo tanto, en un diagrama de tiempo - frecuencia, el área donde estos efectos de borde son significativos se conoce como el Cono de influencia (U). El área del espectro fuera del cono de influencia no debe utilizarse para sacar conclusiones sobre la sucesión temporal. Además, la confiabilidad dentro del cono de influencia en el espectro global de la Wavelet se define con un 95 % de confianza en los datos analizados.

Como resultado del proceso de la transformada Wavelet se obtuvo la Figura 21. La Figura 21(a) muestra la sucesión temporal de las tormentas eléctricas globales con una escala de tiempo de una hora. Esta sucesión fue construida a partir de los cálculos de tormentas eléctricas para cada hora de los 2 años de datos, y es utilizada para aplicar la transformada Wavelet. La Figura 21(b) muestra el espectro de potencia Wavelet de la serie temporal, el eje vertical representa el período (en escala de días) y el eje horizontal representa los años de estudio (2012–2013). Las áreas con contornos negros representan regiones de mayor significado estadística con un nivel de confianza del 95 %. La barra de color que va del azul al rojo es muy importante para identificar los periodos de menor a mayor intensidad. La Figura 21(c) representa el espectro global de potencia (linea azul) de nuestra sucesión temporal. La línea discontinua naranja representa la curva de confianza del 95 % del espectro global de potencia Wavelet. Las potencias por encima de esta línea se pueden considerar significativas y están sujetas a análisis.

El resultado derivado de este estudio muestra algunos posibles periodos significativos de: 0,5 días (12 horas); 1 día; 11 días; 43 días; 123 días y 200 días. Los primeros dos periodos podemos asociarlo al ciclo de día y noche de las tormentas debido al movimiento rotacional de la Tierra, moldeado por factores como el calentamiento diurno de la superficie terrestre, la

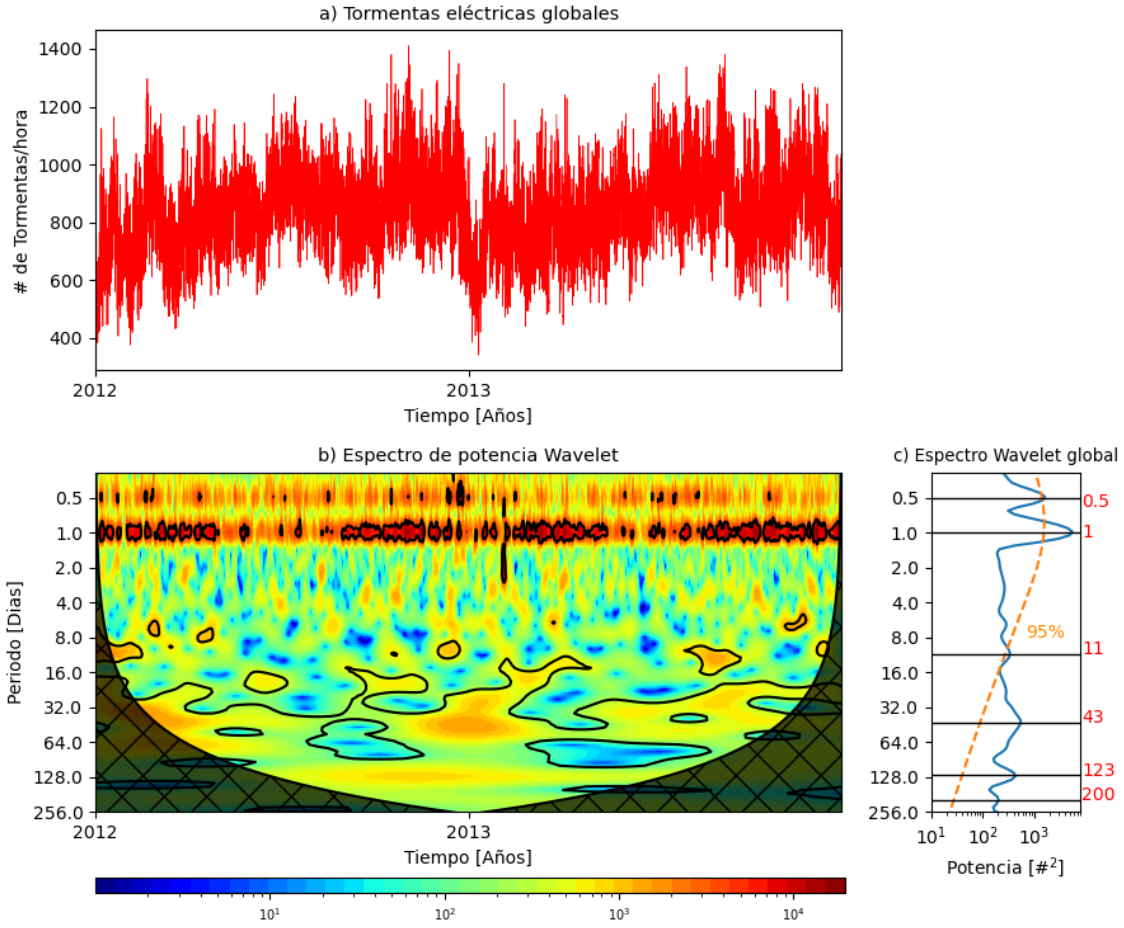


Figura 21: a) Sucesión temporal de las de tormentas eléctricas, con una resolución temporal de una hora. (b) Espectro de potencia Wavelet. La región sombreada representa el cono de influencia (COI). (c) Espectro de potencia global (línea azul). La línea discontinua naranja representa el nivel de significancia del 95 % para el espectro total.

orografía, entre otros. Además, son los mejores a tener en cuenta, ya que presentan picos más pronunciados (mayor potencia) en comparación con el resto. Mientras que los picos de 11; 43; 123 y 200 días no los consideraremos como periodos, ya que poseen menor potencia y están cerca del limite del cono de influencia. Sin embargo, no descartamos totalmente estos valores. Por lo que seria necesario analizar una mayor cantidad de datos (más años de estudio) para verificar estos resultados.

4.7. Tormentas Eléctricas en el Territorio Peruano

En esta sección presentamos un análisis general de la distribución de tormentas eléctricas ocurridas en el territorio peruano. Para este análisis, primero separamos los datos de relámpagos correspondientes a nuestro área de estudio. Luego, con la finalidad de identificar las tormentas eléctricas, aplicamos el mismo procedimiento descrito en la metodología. Donde, logramos identificar un total de 219 794 tormentas para los dos años de datos. Una vez identificadas las tormentas, calculamos el promedio por hora para diferentes escalas de tiempo; anual, estacional y mensual.

La Figura 22 presenta un promedio de la variación diurna de las tormentas eléctricas en el territorio peruano. La curva promedio anual (Figura 22A) muestra un incremento de tormentas entre las 16 UT a 23 UT alcanzando su pico de máxima actividad alrededor de las 20 UT (15 h en tiempo local) con un valor de 32 tormentas. Mientras que durante el resto del día la actividad de tormentas es mucho menor, mostrando un comportamiento casi constante entre las 00 UT y las 15 UT. Calculando el promedio anual encontramos un valor de 12 tormentas eléctricas por hora, que ocurren dentro del territorio peruano. En la Figura 22B presentamos la variación diurna estacional de tormentas eléctricas. El cual nos muestra que la época de verano (diciembre - enero - febrero) representa la estación del año con mayor actividad de tormentas eléctricas, con un promedio de 20 tormentas por hora. Mientras que la época de invierno (junio - julio - agosto) representa la estación con menor actividad de tormentas, con un promedio de 4 tormentas eléctricas por hora. Para el caso de las estaciones de otoño (marzo - abril - mayo) y primavera (setiembre - octubre - noviembre) observamos valores intermedios, con un promedio de 10 y 15 tormentas eléctricas por hora, respectivamente. Los horarios de máxima actividad de tormentas eléctricas ocurren alrededor de las 20 UT para todas las estaciones, alcanzando un valor máximo de 56 tormentas eléctricas en verano, 27 tormentas en otoño, 10 tormentas en invierno y 37 tormentas en primavera.

La Figura 22C muestra la variación diurna mensual de las tormentas eléctricas. Lo cual, de forma general podemos observar que el comportamiento diurno de las tormentas presentan muchas semejanzas en fase para todos los meses del año. Sin embargo, se observan algunas diferencias en las amplitudes, siendo más notable estas diferencias en los horarios de máxima actividad, entre las 16 UT a 23 UT. Los valores de pico para todos los meses ocurren entre las 19 UT a 21 UT (14 h a 16 h en tiempo local), siendo el mes de diciembre el de máximo pico (con 61 tormentas) y el de mejor promedio por hora (con 22 tormentas). Mientras que el mes de julio es el mes con menor actividad de tormentas eléctricas, alcanzando un pico máximo de 8 tormentas y un promedio mensual de 3 tormentas por hora.

Estos resultados muestran que las tormentas eléctricas dentro del territorio peruano ocurren con mayor frecuencia durante las horas de la tarde, disminuyendo significativamente durante la noche y la madrugada. Por otro lado, se observa que en las estaciones de verano y primavera la presencia de tormentas es más frecuente que en las estaciones de otoño e invierno, ocurriendo en verano cinco veces la cantidad de tormentas ocurridas en invierno, en promedio. Mensualmente se observa que diciembre es el mes con mayor número de tormentas, y julio el mes con menor número de tormentas eléctricas del año. Además observamos que en las diferentes escalas de tiempo, la variación diurna de las tormentas presentan comportamientos semejantes.

La Figura 23 muestra un mapa de densidad de las tormentas eléctricas en el territorio peruano para el periodo de 2012 a 2013. Donde, la barra de colores indica el nivel de concentración de las tormentas eléctricas en un área de 120 km^2. En ese sentido podemos observar que a lo largo de la costa peruana, la presencia de tormentas eléctricas es muy escaso, teniendo a algunas regiones con una o dos tormentas por año. Mientras que en las regiones de los Andes y la selva se observa una mayor concentración de tormentas eléctricas, alcanzando valores de hasta 40 tormentas por año. La distribución de tormentas en la región de la selva es aproximadamente homogénea en toda su extensión. Mientras que en la región de los Andes la distribución de

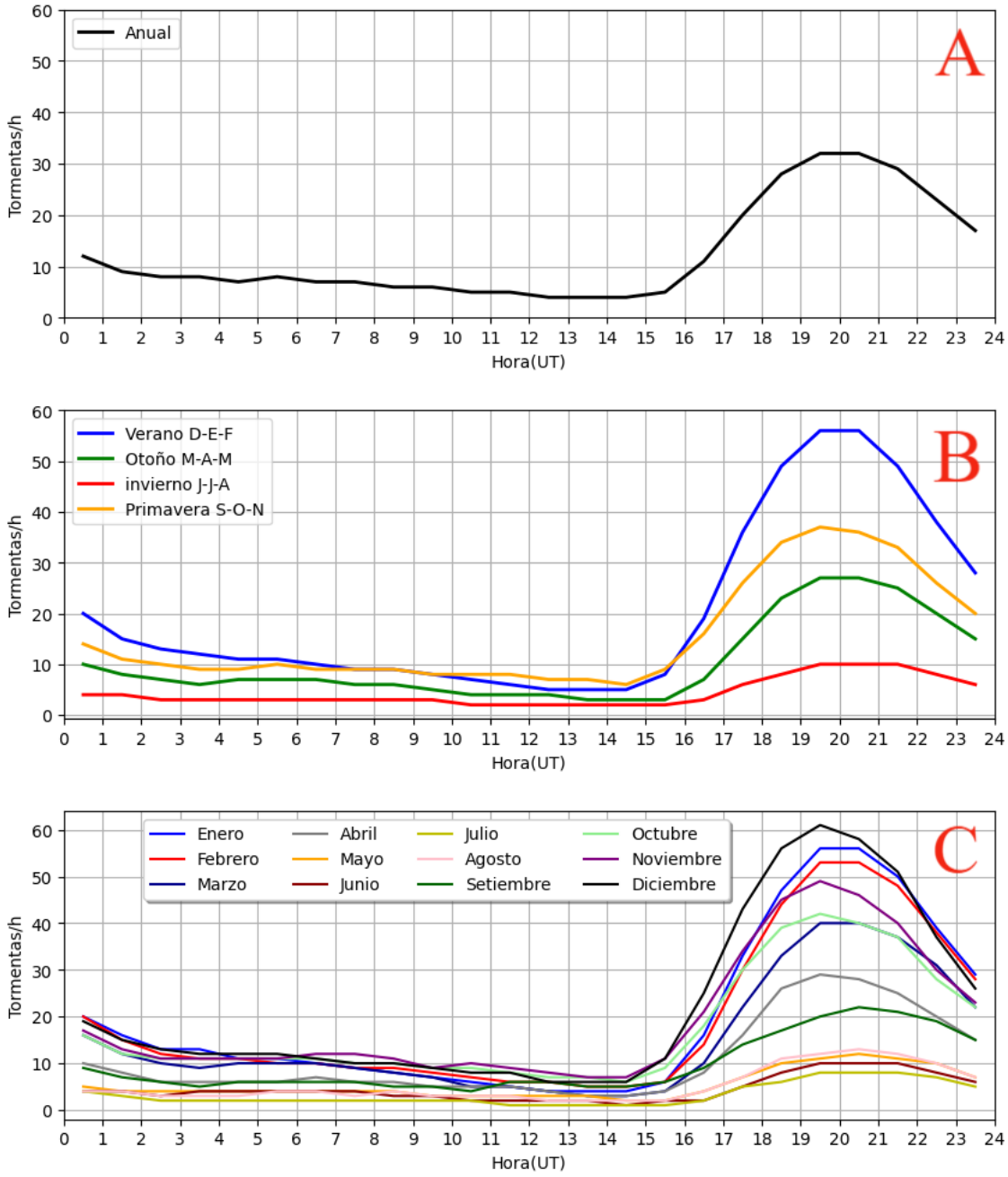


Figura 22: Promedio de la variación diurna de las tormentas eléctricas para las diferentes escalas temporales: A) Anual; B) Estacional; C) Mensual.

tormentas es muy variable, teniendo a algunas regiones con mayor densidad de tormentas que otras. La mayor parte de estas tormentas se forman a lo largo de la Cordillera de los Andes,

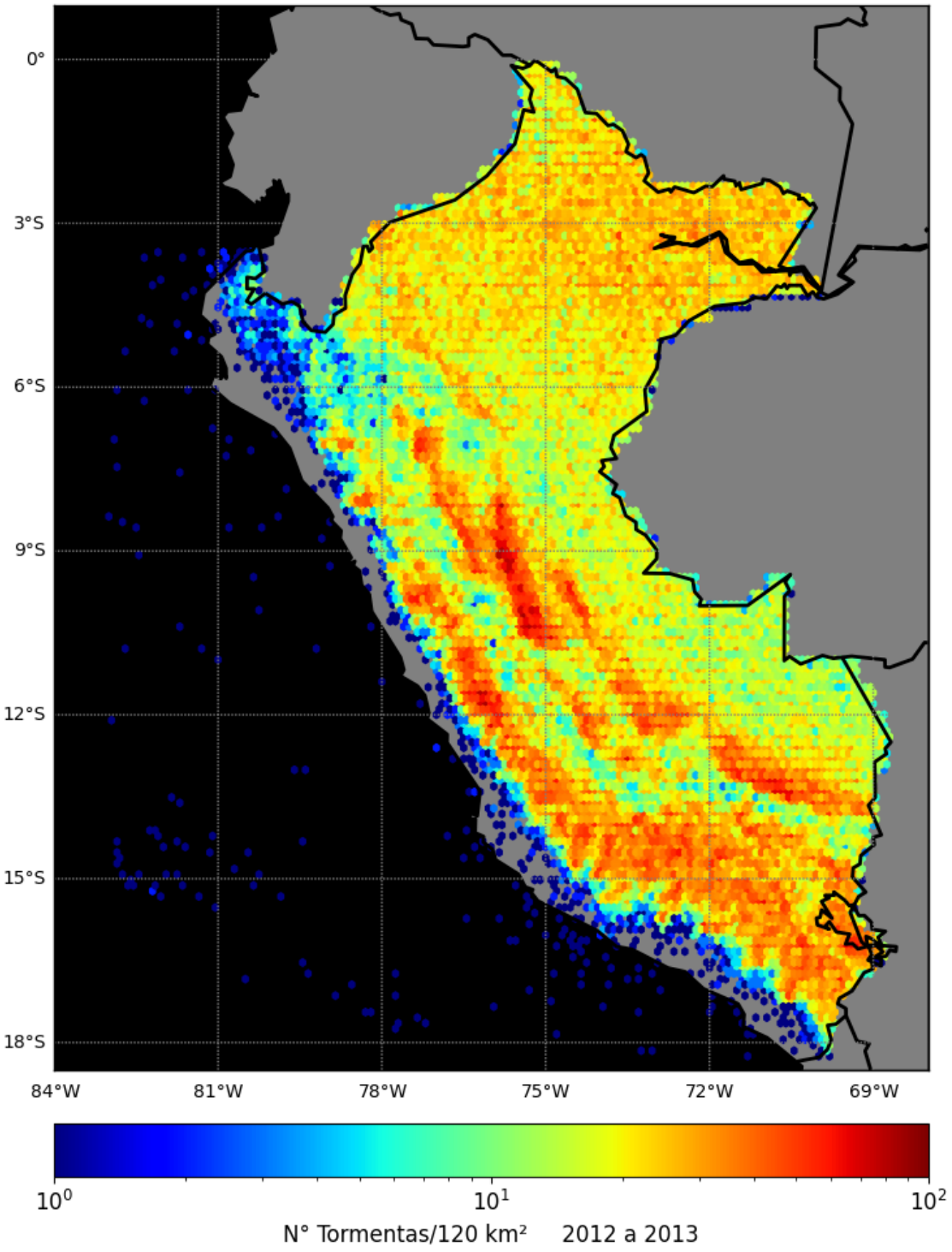


Figura 23: Densidad de tormentas eléctricas en el territorio peruano.

principalmente en las regiones centro y sur del Perú, extendiéndose hasta el Lago Titicaca.

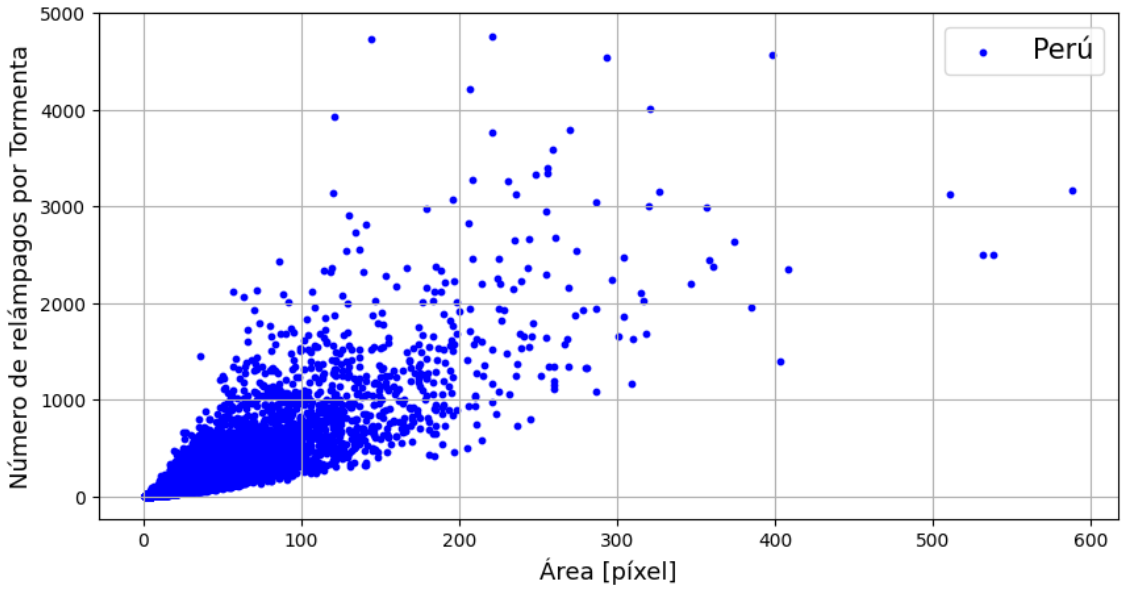


Figura 24: Diagrama de dispersión entre el número de relámpagos y el área de cada tormenta en el territorio peruano.

La Figura 24 muestra un gráfico de dispersión entre el número de relámpagos y la extensión de cada tormenta. Estos resultados indican que el 86,5 % de las tormentas eléctricas poseen entre 1 a 10 píxeles de área; el 12,2 % entre 11 a 50 píxeles; el 1 % entre 51 a 100 píxeles y el 0,3 % mayores a los 100 píxeles de área. En relación al número de relámpagos, encontramos que el 71,2 % de las tormentas tienen entre 2 a 10 relámpagos; el 24,6 % entre 11 a 100 relámpagos; el 4 % entre 101 a 1000 y el 0,2 % mayores a los 1000 relámpagos. Además, se observó que gran parte de las tormentas de mayor extensión se forman en la región de la selva, mientras que la mayoría de las tormentas con más relámpagos se forman en la región de los Andes. Por ejemplo: la tormenta de mayor extensión encontrada tuvo un área total 588 píxeles, el cual corresponde a una extensión de 70 560 km² y fue ubicado en el departamento de Loreto (Latitud: -3,43 y Longitud: -75,66) alrededor de las 13 horas en tiempo local, produciendo en total 3169 relámpagos. Por otro lado, la tormenta con mayor número de relámpagos tuvo un total de 4762

relámpagos detectados y fue una tormenta de 221 píxeles (26520 km²) de área localizado en el departamento de Huánuco (Latitud: -9,37 y Longitud: -75,54) alrededor de las 22 horas en tiempo local.

Capítulo 5

Conclusiones

En el presente trabajo de investigación, utilizamos datos de WWLLN para identificar los grupos de tormentas eléctricas a nivel global mediante una metodología de agrupamiento. Como resultado, estimamos y analizamos la distribución global de tormentas eléctricas en diferentes escalas espaciales y temporales. Por lo tanto, en base a nuestros resultados concluimos lo siguiente:

- Logramos identificar un total 14 761 057 tormentas eléctricas para los dos años de estudio. Esto indica un promedio de 14 tormentas eléctricas activas por minuto distribuidas en todo planeta.

- El promedio anual de las variaciones diurnas muestran que las regiones continentales aportan el 54 % de las tormentas eléctricas globales y las regiones oceánicas el 46 %. Además, durante $\sim$7 horas continuas del día, el planeta es dominado por las tormentas eléctricas de origen oceánico (Figura 13A).

- La proporción de rayos mostrados en Christian y cols. (2003) y la proporción de tormentas en océanos y continentes de este trabajo, nos permite concluir que las tormentas continentales producen más rayos que las tormentas oceánicas.

- Las variaciones diurnas muestran que, en todo momento del día existen más tormentas eléctricas en el HN que en el HS. Donde, en promedio, el HN contribuye con el 59 % de las tormentas y el HS con el 41 %. Por otro lado, en las regiones continentales encontramos que América representa la región con mayor número de tormentas eléctricas en el mundo, contribuyendo con el 41 %, seguido de Asia y Oceanía con el 36 %. Por último a África y Europa con el 23 % de las tormentas.

- La relación entre la extensión y el número de relámpagos de las tormentas, muestra una distribución casi homogénea entre océanos y continentes, teniendo en ambas regiones tormentas de gran extensión con alta producción de relámpagos.

- El HN posee la mayoría de las tormentas de gran extensión, ademas de las tormentas con más relámpagos intensos en comparación con el HS.

- América posee una mayor diversificación de tormentas eléctricas, conteniendo la mayoría de las tormentas más extensas y con más relámpagos. En Asia y Oceanía, también, se observan tormentas de gran extensión y con muchos relámpagos, pero en menor proporción que en América. Mientras que, en África y Europa, la mayoría de las tormentas son de extensión mediana a pequeña y con menos relámpagos que América, Asia y Oceanía.

- EEUU, Golfo de México, Brasil, Australia, el Océano Pacifico y Atlántico, son algunos de los principales puntos donde se observan tormentas de gran extensión y con numerosos relámpagos.

- Las regiones de mayor densidad de tormentas en el planeta se encuentran dentro de la franja del Ecuador, regiones como: El estrecho de Malaca (entre Malasia, Indonesia y Singapur); La República Democrática del Congo (el área comprendida entre Butembo, Kinigi y Mwenga), el Lago de Maracaibo en Venezuela y el noroeste de Colombia (de-

partamentos de Chocó y Antioquia), son regiones, donde ocurren en promedio 50 tormentas/año.120 km².

- Las tormentas eléctricas presentan un periodo dominante de 1 día, correspondiente al ciclo diurno (día y noche) generado por la rotación de la Tierra. Este periodo está asociado al calentamiento diurno de la superficie por la radiación solar, generando grandes cantidades de vapor de agua, que es un ingrediente básico para la formación de las tormentas eléctricas.

- Anualmente dentro del territorio peruano ocurren en promedio 12 tormentas eléctricas por hora. Mientras que estacionalmente, observamos que la época de verano presenta el mejor promedio con 20 tormentas por hora, y la época invierno el promedio más bajo, con 4 tormentas por hora.

Estudiar la distribución global de tormentas eléctricas ha sido y es un desafío constante en el área de las ciencias atmosféricas, principalmente debido al número reducido de instrumentos que los detecten. Sin embargo, utilizando datos globales de rayos y un método de agrupamiento adecuado, fue posible identificar espacialmente y temporalmente las tormentas eléctricas. Esto demuestra claramente la gran capacidad que tiene WWLLN para detectar tormentas eléctricas a pesar de tener una baja eficiencia en la detección de rayos.

Referencias

Abarca, S. F., Corbosiero, K. L., y Galarneau Jr., T. J. (2010). An evaluation of the worldwide lightning location network (wwlln) using the national lightning detection network (nldn) as ground truth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *115*(D18). doi: https://doi.org/10.1029/2009JD013411

Ahrens, C. (2008). *Meteorology today* (9ed ed.). Brooks Cole.

Ahrens, R., C. Donald; Henson. (2018;2019). *Meteorology today: Introductory weather climate and environment: An introduction to weather, climate and the environment* (Twelfth edition ed.). Cengage Learning.

Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J., y Christian, H. J. (2016). Where are the lightning hotspots on earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, *97*(11), 2051 - 2068. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00193.1

Betz, H. D., Schumann, U., y Laroche, P. (2008). *Lightning: Principles, instruments and applications: Review of modern lightning research* (1.ª ed.). Springer.

Blumen, W. (2003). Fronts. En J. R. Holton (Ed.), *Encyclopedia of atmospheric sciences* (p. 805-813). Academic Press. doi: https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00039-7

Brooks, H. (2011, 12). Severe thunderstorms and climate change. *Atmospheric Research*, *123*, 129–138. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.04.002

Bullock, J. A., Haddow, G. D., y Coppola, D. P. (2021). Chapter 3 - hazards. En J. A. Bullock,

G. D. Haddow, y D. P. Coppola (Eds.), *Introduction to homeland security (sixth edition)* (Sixth Edition ed., p. 81-140). Butterworth-Heinemann. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817137-0.00003-1

Ccopa, J. A., Tacza, J., Raulin, J.-P., y Morales, C. A. (2021). Estimation of thunderstorms occurrence from lightning cluster recorded by WWLLN and its comparison with the 'universal' carnegie curve. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *221*, 105682. doi: https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105682

Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Boccippio, D. J., Boeck, W. L., Buechler, D. E., Driscoll, K. T., ... Stewart, M. F. (2003). Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *108*(D1), ACL 4-1-ACL 4-15. doi: https://doi.org/10.1029/2002JD002347

Cummins, K. L., y Murphy, M. (2009). An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the u.s. nldn. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *51*, 499-518.

Cushman-Roisin, B., y Beckers, J.-M. (2011). Chapter 15 - Dynamics of stratified rotating flows. En *Introduction to geophysical fluid dynamics* (Vol. 101, p. 473-520). Academic Press. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-088759-0.00015-8

Doswell, C. (2015). Mesoscale meteorology | severe storms. , 361-368. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00366-2

Dowden, R., Brundell, J., y Rodger, C. (2002). Vlf lightning location by time of group arrival (toga) at multiple sites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *64*, 817-830.

Dowden, R., Holzworth, R., Rodger, C., Lichtenberger, J., Thomson, N., Jacobson, A., ... Zhao, Y. (2008, 11). World-wide lightning location using vlf propagation in the earth-ionosphere waveguide. *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, *50*, 40 - 60. doi:

10.1109/MAP.2008.4674710

Hastenrath, S. (2015). Tropical meteorology and climate | tropical climates. En (p. 170-176). Academic Press. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00416-3

Hirata, H., y Nonaka, M. (2021). Impacts of strong warm ocean currents on development of extratropical cyclones through the warm and cold conveyor belts: A review. En (p. 267-293). doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818156-0.00014-9

Houze, R. A. (1993). *Cloud dynamics*. Elsevier, Academic Press.

Hutchins, M. L., Holzworth, R. H., y Brundell, J. B. (2014). Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *119*(1), 620-629. doi: 10.1002/2013JA019593

Hutchins, M. L., Holzworth, R. H., Brundell, J. B., y Rodger, C. J. (2012). Relative detection efficiency of the world wide lightning location network. *Radio Science*, *47*(6). doi: https://doi.org/10.1029/2012RS005049

Joly, A. (2015). Synoptic meteorology | extratropical cyclones. En *Encyclopedia of atmospheric sciences (second edition)* (p. 304-336). Academic Press. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00128-6

Kazadi Mukenga Bantu, A., Kigotsi, J., Keto, F., y Ndontoni, A. (2018, 03). Estimation of detection efficiency of the world wide lightning location network in the democratic republic of Congo basin using lightning imaging sensor (lis) as reference. *Physics and Astronomy International Journal*, *2*, 110 - 116. doi: 10.15406/paij.2018.02.00071

Krider, E. P. (2020, 10). Thunderstorm.

Lay, E., Rodger, C., Holzworth, R., y Dowden, R. (2005, 01). Introduction to the world wide lightning location network (wwlln).

Mallick, S., Rakov, V., Ngin, T., Gamerota, W., Pilkey, J., Hill, J., ... Holzworth, R. (2014, 05). Evaluation of the WWLLN performance characteristics using rocket-triggered lightning

data..

Mazur, V. (2016). *Principles of lightning physics* (1.ª ed.). IOP Publishing.

Mezuman, K., Price, C., y Galanti, E. (2014, 12). On the spatial and temporal distribution of global thunderstorm cells. *Environmental Research Letters*, *9*. doi: 10.1088/1748-9326/9/12/124023

Moncrieff, M. W., y Miller, M. J. (1976). The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *102*(432), 373-394. doi: https://doi.org/10.1002/qj.49710243208

Monkam, D. (2002). Convective available potential energy (cape) in northern africa and tropical atlantic and study of its connections with rainfall in central and west africa during summer 1985. *Atmospheric Research*, *62*(1), 125-147. doi: https://doi.org/10.1016/S0169-8095(02)00006-6

Napoli, A., Crespi, A., Ragone, F., Maugeri, M., y Pasquero, C. (2019, septiembre). Variability of orographic enhancement of precipitation in the Alpine region. *Scientific Reports*, *9*, 13352. doi: 10.1038/s41598-019-49974-5

Nicholson, S. E. (2009, junio). A revised picture of the structure of the "monsoon" and land ITCZ over West Africa. *Climate Dynamics*, *32*(7-8), 1155-1171. doi: 10.1007/s00382-008-0514-3

Price, C. (2009). Thunderstorms, lightning and climate change. , 521–535. doi: 10.1007/978-1-4020-9079-0_24

Price, C., y Asfur, M. (2006, 02). Can lightning observations be used as an indicator of upper-tropospheric water vapor variability? *Bulletin of the American Meteorological Society*, *87*, 291-298. doi: 10.1175/BAMS-87-3-291

Rakov, V., y Uman, M. (2014). *Lightning: Physics and effects*. Cambridge University Press.

Rodger, C. J., Brundell, J. B., Holzworth, R. H., y Lay, E. H. (2009). Growing detection

efficiency of the world wide lightning location network. *AIP Conference Proceedings*, *1118*(1), 15-20. doi: 10.1063/1.3137706

Rädler, A., Groenemeijer, P., Pistotnik, G., Sausen, R., y Faust, E. (2015, 11). Identification of favorable environments for thunderstorms in reanalysis data. *Meteorologische Zeitschrift*, *26*. doi: 10.1127/metz/2016/0754

Schefczyk, L., y Heinemann, G. (2017, 10). Climate change impact on thunderstorms: Analysis of thunderstorm indices using high-resolution regional climate simulations. *Meteorologische Zeitschrift*, *26*(4), 409-419. doi: 10.1127/metz/2017/0749

Schumacher, R. S., y Rasmussen, K. L. (2020, junio). The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems. *Nature Reviews Earth and Environment*, *1*(6), 300-314. doi: 10.1038/s43017-020-0057-7

Torrence, C., y Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *79*(1), 61 - 78. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2

Trapp, R. (2003). Thunderstorms, severe. , 735-749. doi: https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00685-2

Vernon Cooray, a. (2015). *An introduction to lightning*. Springer Netherlands.

Waliser, D., y Jiang, X. (2015). Tropical meteorology and climate | Intertropical Convergence Zone. En *Encyclopedia of atmospheric sciences (second edition)* (Second Edition ed., p. 121-131). Academic Press. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00417-5

Wanta, R. C. (1951). Sferics. En T. F. Malone (Ed.), *Compendium of meteorology: Prepared under the direction of the committee on the compendium of meteorology* (pp. 1297–1300). American Meteorological Society. doi: 10.1007/978-1-940033-70-9_106

Whitford, W. G., y Duval, B. D. (2020). Chapter 1 - conceptual framework, paradigms, and

models. En *Ecology of desert systems (second edition)* (Second Edition ed., p. 1-20). Academic Press. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815055-9.00001-1

Williams, E., y Stanfill, S. (2002). The physical origin of the land–ocean contrast in lightning activity. *Comptes Rendus Physique*, *3*(10), 1277-1292. doi: https://doi.org/10.1016/S1631-0705(02)01407-X

Woodhams, B. J., Birch, C. E., Marsham, J. H., Lane, T. P., Bain, C. L., y Webster, S. (2019). Identifying key controls on storm formation over the lake victoria basin. *Monthly Weather Review*, *147*(9), 3365 - 3390. doi: 10.1175/MWR-D-19-0069.1

Apéndice A

Cuadros de Datos de Tormentas Eléctricas

Cuadro 2: Relación entre el número de relámpagos y el número de tormentas. Por ejemplo: Encontramos 1054 tormentas eléctricas que produjeron entre 5001 a 14052 relámpagos detectados por WWLLN.

N° de Relámpagos	**N° de Tormentas**
[2:10]	10 467 381 (70,911 %)
[11:100]	3 583 722 (24,28 %)
[101:1000]	675 334 (4,575 %)
[1001:5000]	33 567 (0,227 %)
[5001:14052]	1 054 (0,007 %)

Cuadro 3: Relación entre el número de píxeles(área) y el número de tormentas. Por ejemplo: Encontramos 546 tormentas eléctricas con áreas entre 501 a 1229 píxeles.

Área(N° de píxeles)	**N° de Tormentas**
[1:10]	12 765 247 (86,48 %)
[11:50]	1 806 863 (12,24 %)
[51:100]	141 013 (0,956 %)
[101:500]	47 389 (0,32 %)
[501:1229]	546 (0,004 %)

Cuadro 4: Número de tormentas eléctricas por hora para las diferentes regiones del planeta.

Hora	**Continente**	**Océano**	**HN**	**HS**	**América**	**África yEuropa**	**Asia-Oceanía**	**Global**
0	369	375	457	287	381	146	217	744
1	327	378	433	272	351	140	214	705
2	302	385	418	269	330	136	221	687
3	297	393	414	276	314	129	248	691
4	316	400	424	292	303	120	293	716
5	349	400	439	311	294	110	346	750
6	387	398	462	323	288	104	393	785
7	413	394	486	321	280	102	425	807
8	422	390	502	310	271	110	431	812
9	428	388	513	302	264	132	418	815
10	439	390	519	310	262	172	396	829
11	449	395	517	327	256	219	369	844
12	467	397	519	346	246	273	345	864
13	486	397	522	360	241	323	319	883
14	500	395	522	273	246	355	294	896
15	512	391	518	385	276	350	277	903
16	531	390	513	408	336	317	269	922
17	568	391	523	436	415	280	265	959
18	603	389	540	452	485	244	262	991
19	620	384	551	453	529	216	258	1004
20	607	379	550	436	542	192	252	986
21	559	375	536	399	516	175	243	935
22	493	375	514	354	471	164	234	868
23	425	375	485	315	421	152	225	800
Promedio	453	388	495	347	346	194	301	841

Apéndice B

Mapas de Densidad de Tormentas

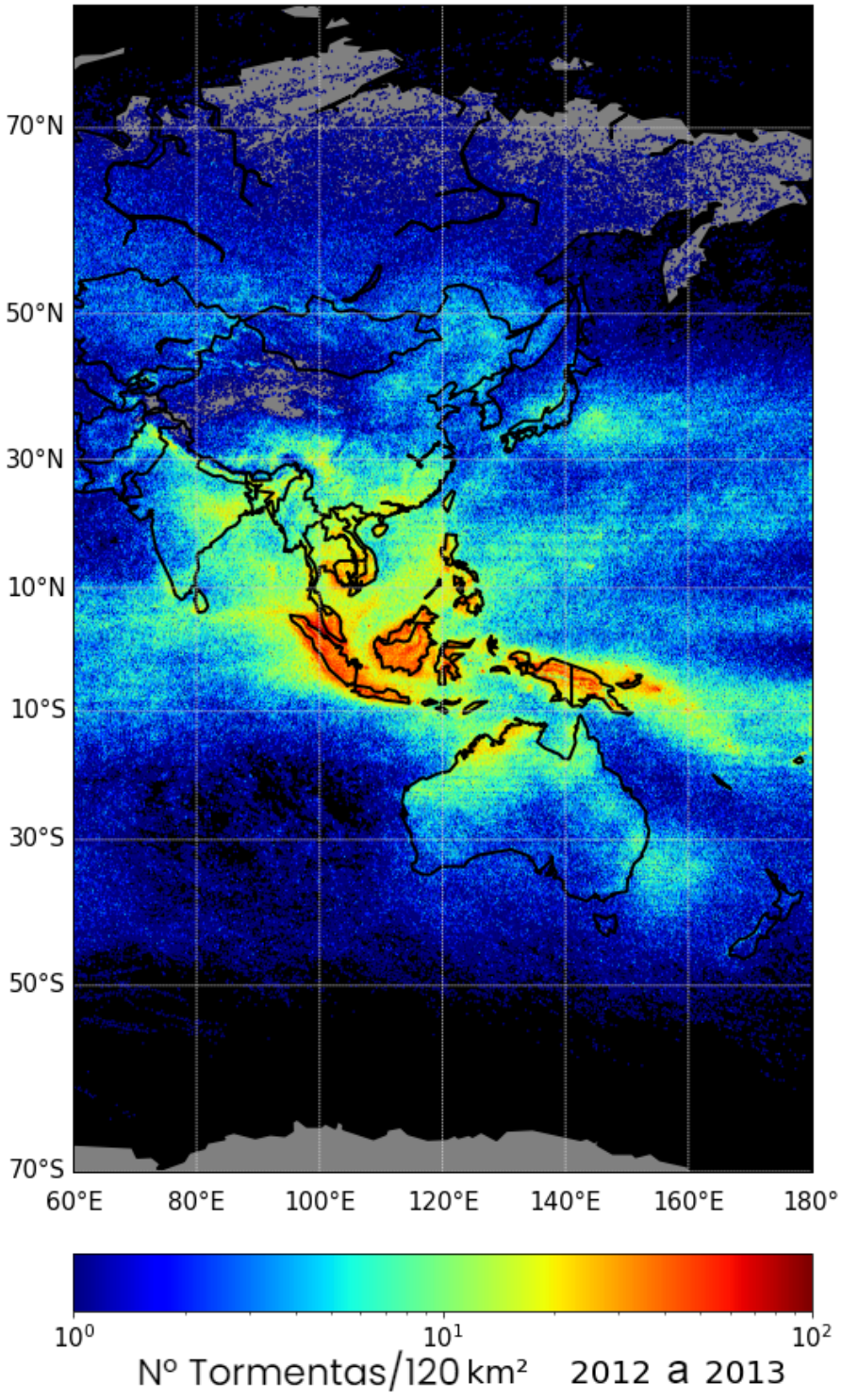


Figura 25: Mapa completo de tormentas eléctricas en Asia-Oceanía.

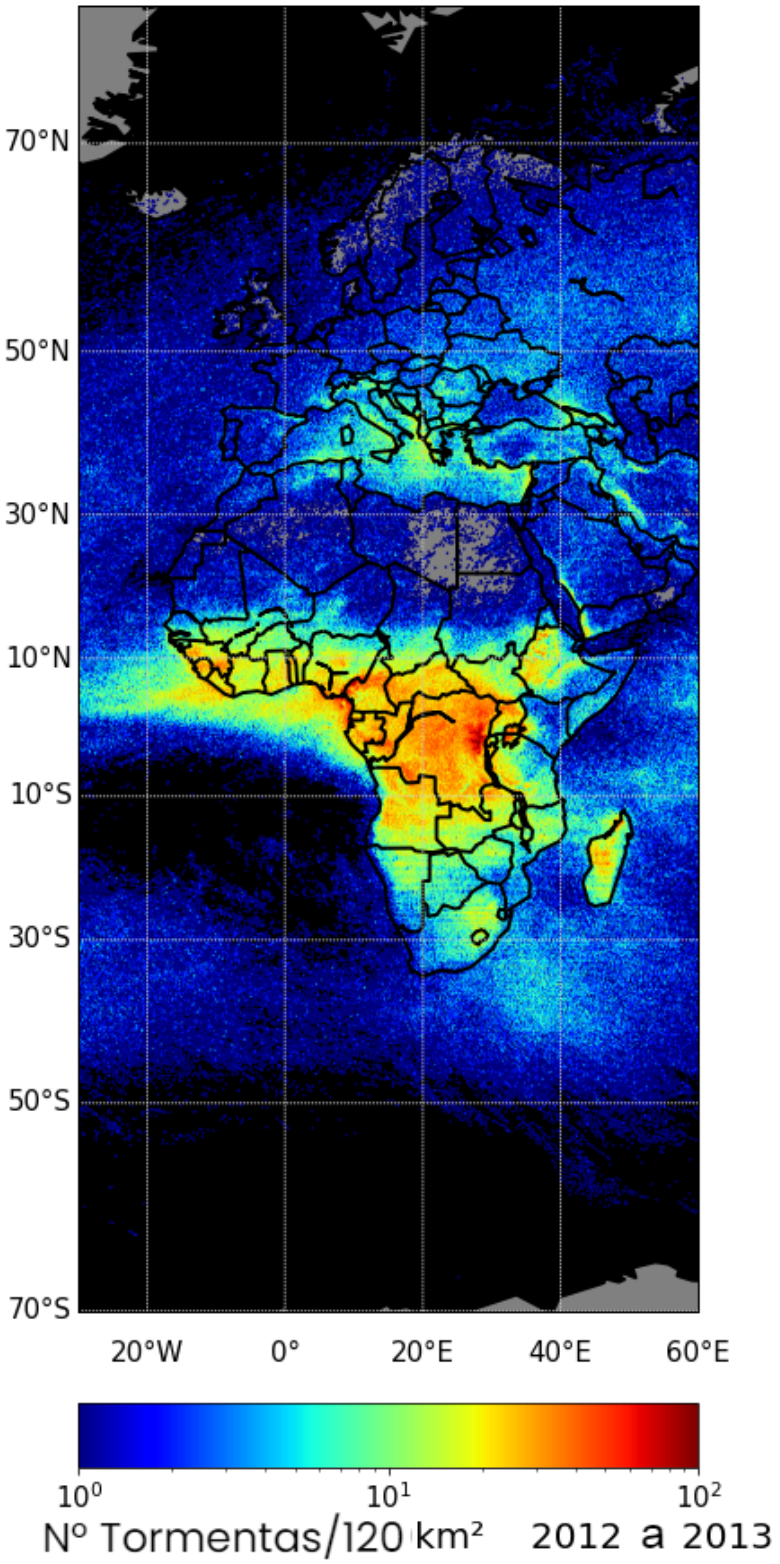


Figura 26: Mapa completo de tormentas eléctricas en África-Europa.

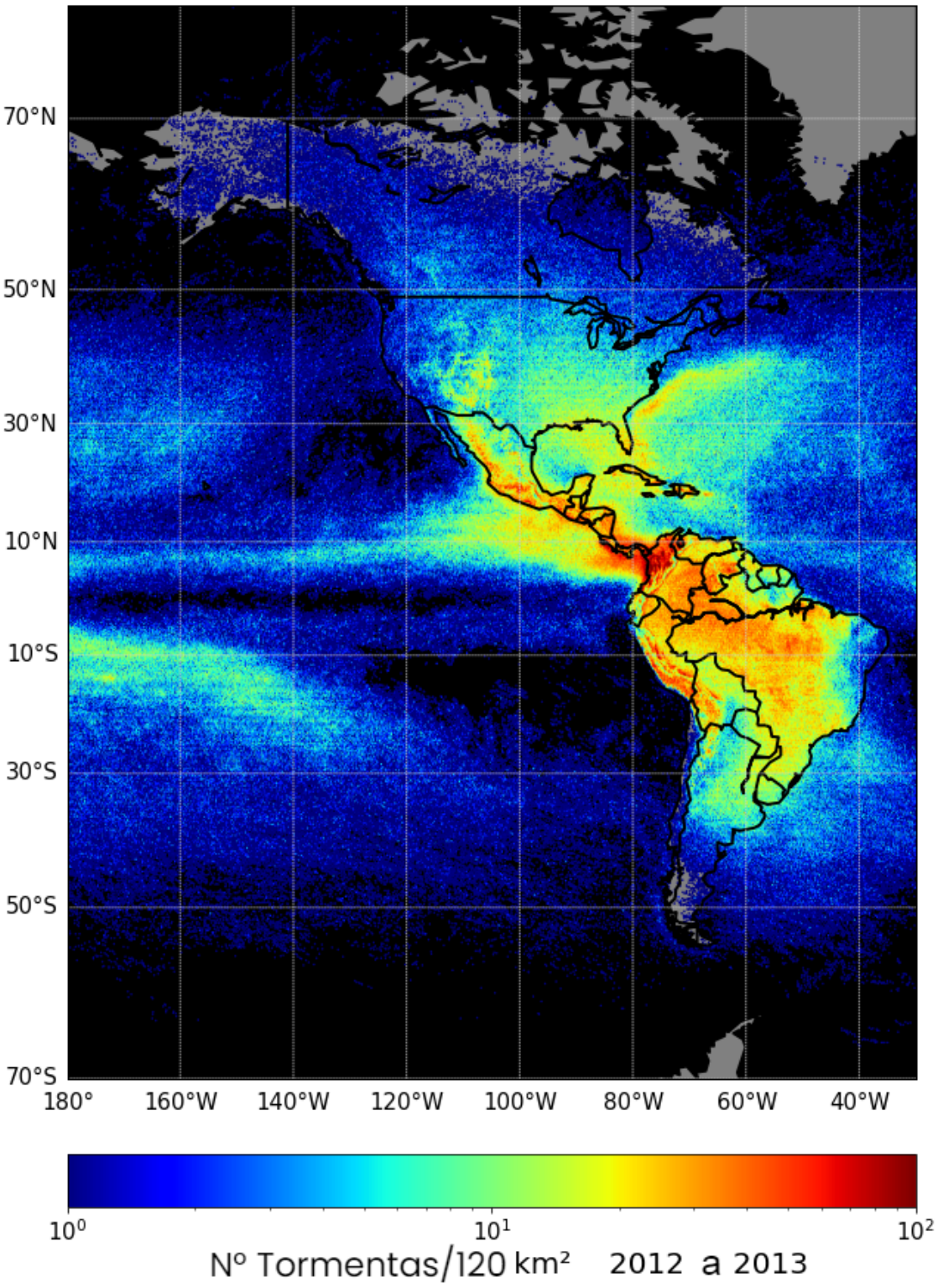


Figura 27: Mapa completo de tormentas eléctricas en América.

Apéndice C

Mapas Estacionales de Densidad de Tormentas del Territorio Peruano

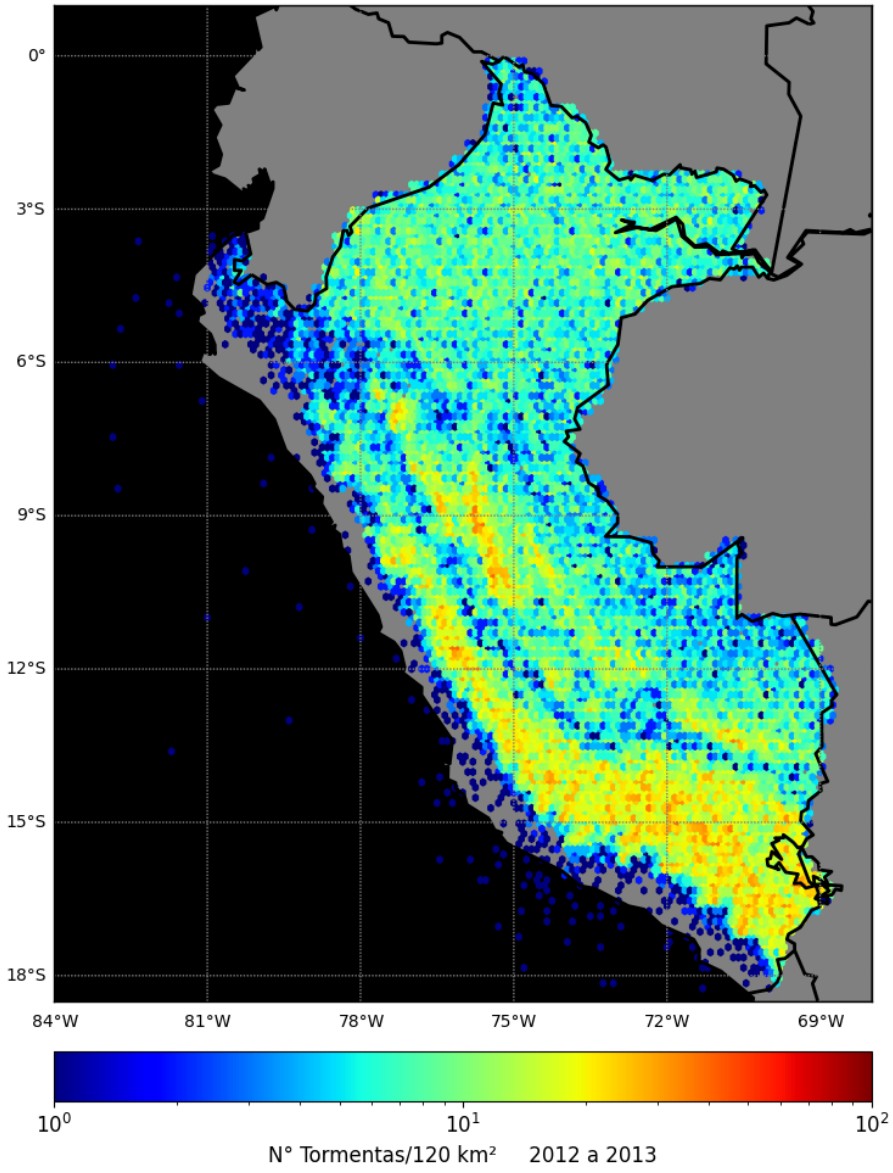


Figura 28: Densidad de tormentas eléctricas de verano (diciembre - enero - febrero).

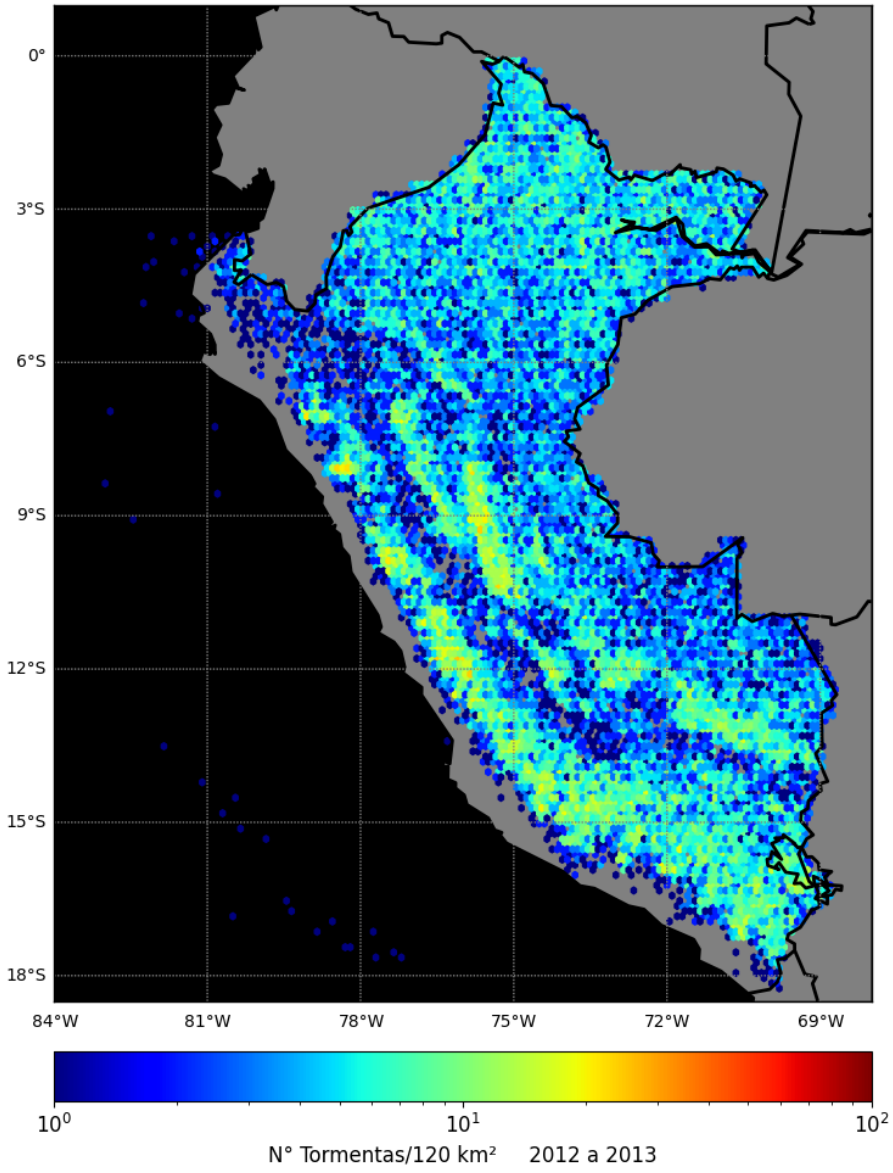


Figura 29: Densidad de tormentas eléctricas de otoño (marzo - abril - mayo).

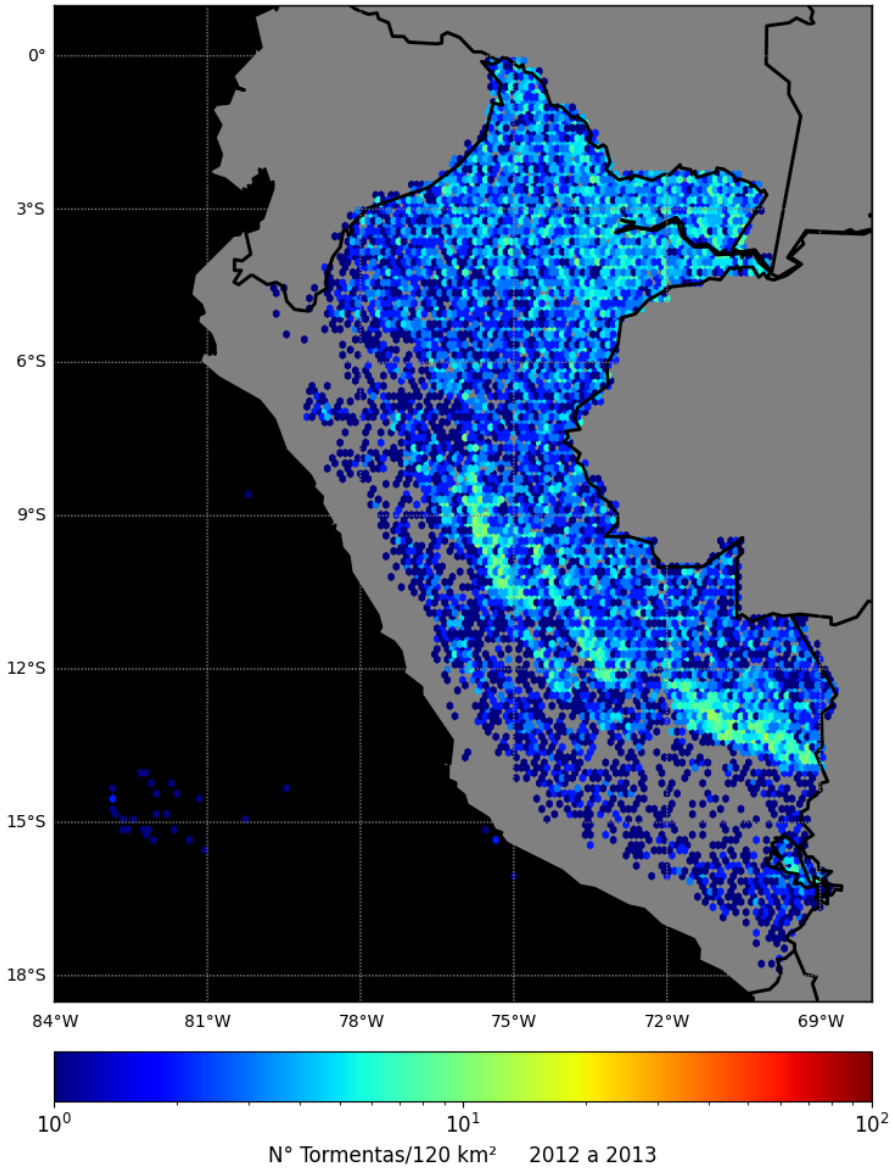


Figura 30: Densidad de tormentas eléctricas de invierno (junio - julio - agosto).

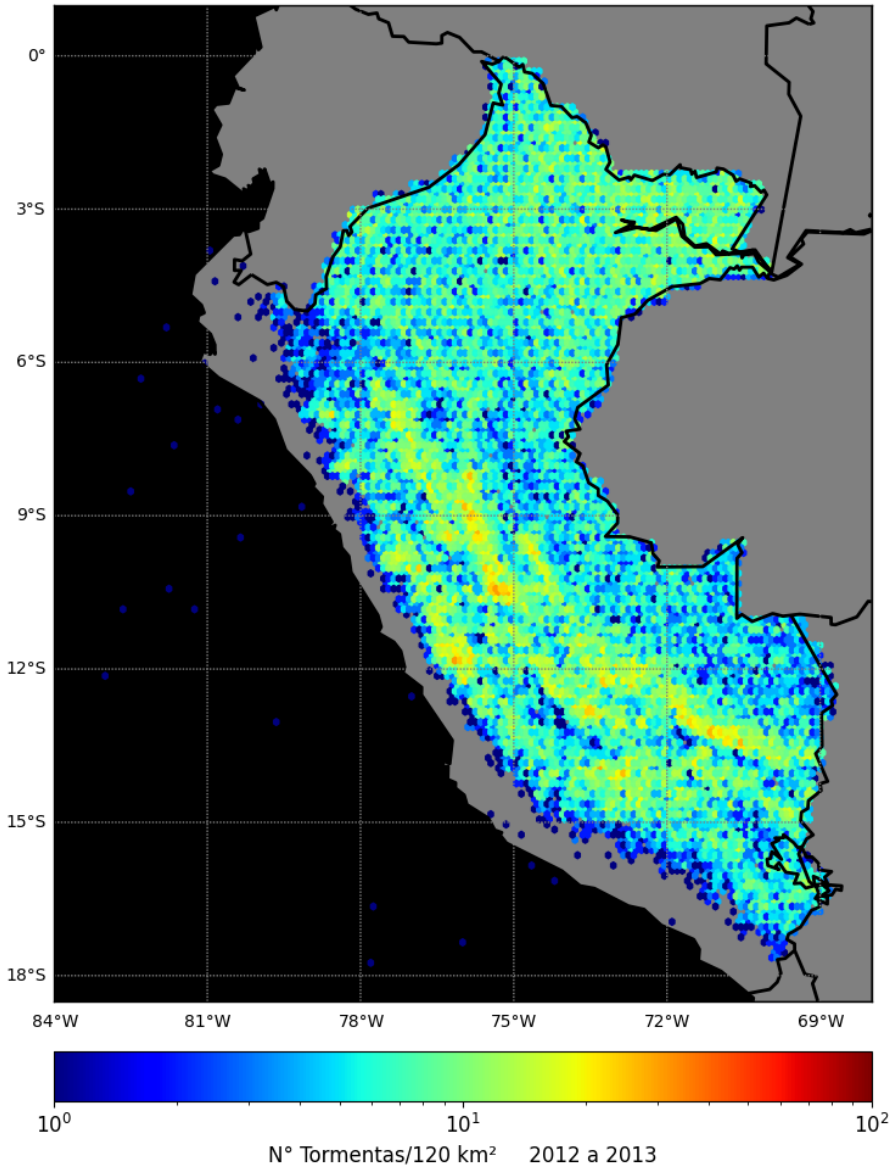


Figura 31: Densidad de tormentas eléctricas de primavera (setiembre - octubre - noviembre).