

Universidad de Oviedo

FACULTAD DE CIENCIAS



Descargas Eléctricas en Fenómenos Atmosféricos

Pablo Suárez Blanco

Dirigido por:

Aurelio Hierro Rodríguez

Joaquín González-Nuevo González

Grado en Física

Trabajo de Fin de Grado

Curso 2024-2025

A Aurelio, por inculcarme valores científicos y soportarme durante tantas horas.

A Joaquín y a Laura, a quienes deseo mucha fuerza.

A mi familia, por apoyar mis sueños.

A mis amigos, por acompañarme siempre.

Índice general

1. Preámbulo	5
1.1. Introducción	5
1.2. Conceptos Clave	6
1.3. Cronología y Estado del Arte	8
1.3.1. Primeras teorías: Explicaciones religiosas y filosóficas	8
1.3.2. Benjamin Franklin: La naturaleza eléctrica de los rayos	8
1.3.3. Wilson y Simpson: Primeros modelos atmosféricos	9
1.3.4. Marshall: Efecto Seebeck y choques para explicar las tormentas	10
1.3.5. Actualidad: Teorías insuficientes	11
2. Revisión sobre Tormentas	12
2.1. Microfísica de las Tormentas	15
2.1.1. Teoría Triboeléctrica de Meteoros	15
2.1.2. Inconsistencias en la Teoría Triboeléctrica	17
2.1.3. Teorías Alternativas	18
Ionización inducida por rayos cósmicos	18
Influencia de los flujos de aire y turbulencias	18
Emisión de radiación gamma y electrones relativistas	19
2.2. Formación y Fases de las Tormentas Eléctricas	19
2.3. Clasificación de las Tormentas	21
2.3.1. Tormentas de celda simple	21
2.3.2. Tormentas multicelulares	22
2.3.3. Superceldas	22
2.3.4. Tormentas tropicales	23
2.3.5. Tormentas sucias	23
2.4. Clasificación del Cumulonimbo	24
2.4.1. Nubes Accesorias	25
2.5. El Circuito Global	26
2.6. La Resonancia de Schumann	29
3. Descargas Eléctricas en la Atmósfera	33
3.1. Formación del Rayo y Ruptura Dieléctrica	33

3.1.1.	Ruptura Dieléctrica del Aire	33
3.1.2.	Guía escalonada	35
3.2.	Tipos de Descargas Eléctricas en la Atmósfera	36
3.2.1.	Descargas intra-nube (IC)	36
3.2.2.	Descargas nube-tierra (CG)	37
3.2.3.	Descargas nube-nube (CC)	38
3.2.4.	Descargas de la atmósfera superior (TLEs - Transient Luminous Events)	38
3.3.	Impacto en Sociedad e Infraestructura	41
4.	Metodología experimental	44
4.1.	Determinación del Perfil de Frecuencias emitido por el Pulso EM de un Rayo	44
4.1.1.	Introducción	44
4.1.2.	Dispositivo experimental	44
4.1.3.	Procedimiento	46
4.1.4.	Generación de Rayos Sintéticos	50
Aplicación de filtro pasa-banda	53	
4.1.5.	Función de Transferencia de la Antena	54
4.1.6.	Resultados	56
Día de Referencia: 18 de Marzo de 2025 (Condiciones Estables en el Norte Peninsular)	56	
Día de Tormenta: 20 de Marzo de 2025 (Actividad Eléctrica sobre Peña Ubiña)	60	
4.1.7.	Conclusiones	66
5.	Conclusiones	70
	Bibliografía	72
6.	Anexo	75
6.1.	Acceso a Código Fuente y Datos Experimentales	75
6.2.	Planteamiento del Experimento para la Determinación de la Carga de una gota de Lluvia	76
6.2.1.	Introducción	76
6.2.2.	Consideraciones previas	77
6.2.3.	Dispositivo experimental	77
6.2.4.	Conclusión	78

Capítulo 1

Preámbulo

1.1. Introducción

Las tormentas son fenómenos meteorológicos intensos que generan rayos, fuertes precipitaciones, ráfagas de viento y, en ocasiones, tornados. Aunque representan un peligro considerable para la seguridad humana y la infraestructura, también han motivado el desarrollo de mitos y símbolos en diversas culturas. Estos relatos reflejan la búsqueda de respuestas ante un fenómeno que, en su momento, no podía explicarse de otro modo, marcando el comienzo del conocimiento científico que hoy nos permite comprenderlos.

A pesar de los avances en la investigación atmosférica, las descargas eléctricas continúan siendo un campo de estudio abierto, con muchas preguntas sin resolver sobre su formación y dinámica. Estos eventos desempeñan un papel crucial en el equilibrio eléctrico de la atmósfera y tienen importantes implicaciones en la meteorología, la aviación, las telecomunicaciones y la seguridad estructural. La acumulación de carga en las nubes de tormenta, el proceso de ionización del aire y la propagación del canal de descarga son aspectos que aún generan debate dentro de la comunidad científica, lo que hace necesario seguir investigando sus mecanismos físicos.

Este trabajo tiene como objetivo principal analizar experimentalmente la formación y propagación de las descargas eléctricas en la atmósfera.

Desde un punto de vista teórico, analizaremos los modelos y teorías propuestas a lo largo de los años por distintos investigadores para explicar la formación, propagación y estructura de las descargas eléctricas en la atmósfera, prestando especial atención a los mecanismos de ionización, la ruptura dieléctrica del aire y la evolución del campo eléctrico en las nubes de tormenta. Asimismo, se compararán estos modelos con observaciones experimentales para evaluar su validez y aplicabilidad en la predicción de estos fenómenos.

A nivel experimental, nos centraremos en la medición del LEMP (*Lightning ElectroMagnetic Pulse*) emitido por una descarga y la caracterización de los parámetros físicos involucrados. Para ello, se han llevado a cabo mediciones utilizando una antena de televisión y un osciloscopio.

Se ha dividido este estudio en distintos capítulos por temática. Primero, se presenta de manera

cronológica como han ido surgiendo las teorías y modelos a lo largo del tiempo. A continuación, estudiaremos la tormenta desde un punto de vista meteorológico, estudiando los procesos de separación de cargas desde un punto de vista microfísico, así como la formación desde un punto de vista meteorológico a escala sinóptica y su clasificación. Posteriormente, nos centramos en las propias descargas eléctricas de la atmósfera, especialmente en el rayo, por su mayor presencia e impacto. El *Capítulo 4*, se centra en la parte experimental, consistente en caracterizar el perfil de frecuencias del rayo. A modo de conclusión, hay un capítulo que recoge la información y resultados más importantes. Finalmente, en el anexo se incluye el código utilizado para programar el dispositivo experimental y el consecuente análisis de datos, así como acceso a los ficheros de datos recogidos en los experimentos.

A pesar de ser un fenómeno meteorológico tan cotidiano, el conocimiento sobre las tormentas eléctricas y su dinámica sigue siendo limitado. Esto se debe, en gran parte, a la dificultad de recrear estas condiciones extremas en un entorno de laboratorio controlado. Las tormentas, especialmente aquellas asociadas a las descargas eléctricas, son fenómenos altamente complejos, que involucran interacciones entre varios factores como la temperatura, la humedad, los campos eléctricos y las propiedades del aire, lo que hace extremadamente desafiante su modelado y estudio en condiciones artificiales.

Sin embargo, su impacto tanto a nivel social como científico es innegable. Las tormentas eléctricas no solo representan un riesgo significativo para la seguridad humana, generando daños materiales, incendios y accidentes, sino que también tienen una influencia crucial en los patrones climáticos y la distribución de energía en la atmósfera terrestre. En este contexto, resulta fundamental seguir avanzando en la comprensión de estos fenómenos, ya que cualquier mejora en el conocimiento y modelado de las descargas eléctricas podría contribuir a la mejora de las predicciones meteorológicas, la reducción de riesgos y la optimización de la gestión de recursos naturales y energía.

A través de este trabajo, se busca caracterizar el pulso electromagnético producido por el rayo y sus parámetros y tratar de explicarlos en base a fenómenos conocidos en la Física de la Atmósfera, mientras se aprenden distintas técnicas y procedimientos fundamentales para cualquier investigación, como la automatización, control y análisis automático de datos que pertenece a la rama de *Data Science*. Este avance no solo es crucial para la ciencia atmosférica, sino también para la sociedad, ya que las aplicaciones prácticas derivadas de una mejor comprensión de las tormentas eléctricas podrían tener un impacto directo en la seguridad y bienestar de las personas.

1.2. Conceptos Clave

A continuación, se definen algunos conceptos fundamentales para la comprensión de las descargas eléctricas en la atmósfera:

- **Rayo:** Descarga eléctrica de gran intensidad que se produce entre nubes o entre una nube y la superficie terrestre.

- **Trueno:** Sonido producido por la rápida expansión del aire al ser calentado por la energía liberada durante un rayo.
- **Relámpago:** Destello luminoso que acompaña al rayo, observable desde grandes distancias. A veces se usa como sinónimo de rayo, aunque técnicamente se refiere solo a la luz.
- **Tormenta eléctrica:** Fenómeno meteorológico caracterizado por la presencia de cumulonimbos que generan descargas eléctricas, acompañadas generalmente de precipitaciones y viento.
- **Cumulonimbo:** Nube de gran desarrollo vertical, asociada a tormentas intensas. Su forma es típicamente parecida a un yunque, debido a la expansión horizontal de la nube en la capa superior, donde encuentra la tropopausa, que es la transición entre la troposfera y la estratosfera. Esta capa superior se ensancha formando una "cima" o pico, que puede extenderse varios kilómetros en dirección horizontal. El cumulonimbo puede alcanzar alturas superiores a los 10 km, y es responsable de fenómenos meteorológicos severos, como rayos, lluvias intensas, vientos fuertes y granizo.
- **Frente frío:** Es una masa de aire frío que avanza hacia una masa de aire cálido, desplazándola hacia arriba. Este tipo de frente se caracteriza por un brusco descenso de la temperatura y un cambio en la dirección del viento. Los frentes fríos suelen estar asociados con tormentas intensas y precipitaciones debido al rápido ascenso del aire cálido que es desplazado por el aire frío. La zona de contacto entre ambas masas de aire se presenta como una línea frontal que puede producir un cambio de temperatura de varios grados en poco tiempo.
- **Frente cálido:** Se da cuando una masa de aire cálido avanza sobre una masa de aire frío, ascendiendo suavemente sobre ella. Este tipo de frente es más gradual que el frente frío y se caracteriza por un aumento de temperatura y humedad en la región afectada. Los frentes cálidos suelen generar nubes estratificadas y lluvias suaves y continuas, aunque en ocasiones pueden estar acompañados de tormentas si las condiciones atmosféricas son propicias.
- **Frente ocluido:** Se forma cuando un frente frío alcanza a un frente cálido, desplazando al aire cálido hacia arriba y produciendo una combinación de las características de ambos frentes. El aire cálido es forzado a ascender entre las masas de aire frío, lo que provoca la formación de nubes y precipitaciones. Los frentes ocluidos pueden generar lluvias prolongadas, tormentas y a veces condiciones meteorológicas más severas, dependiendo de la intensidad de la oclusión.
- **Mesociclón:** Es una región de circulación en espiral de gran escala dentro de una tormenta convectiva, como un cumulonimbo. El mesociclón tiene un patrón de rotación ciclónica, es decir, en sentido contrario a las agujas del reloj en el hemisferio norte, y se forma debido a la interacción de vientos horizontales con las corrientes ascendentes dentro de la tormenta. Los mesociclones son fundamentales en la formación de tornados, ya que pueden generar una

concentración de vorticidad en su interior, lo que facilita el desarrollo de estas estructuras de gran intensidad. Su presencia es un indicador clave en la predicción de tornados y otros fenómenos meteorológicos severos.

1.3. Cronología y Estado del Arte

Se revisarán estudios previos relevantes y los modelos desarrollados por distintos investigadores a lo largo de la historia para contextualizar esta investigación.

1.3.1. Primeras teorías: Explicaciones religiosas y filosóficas

En gran parte de las mitologías, como la griega, romana, hindú o china, entre muchas otras, los rayos se atribuyen a poderes divinos.

Aristóteles plantea en su obra '*Meteorológica*' que los rayos son el resultado de movimientos y choques de vapores húmedos y secos en las nubes. Estos vapores, al chocar violentamente, generan calor (fuego), producen luz (el rayo) y sonido (el trueno).

Si bien estas explicaciones no son científicas, fueron la primera forma en que la humanidad trató de comprender estos fenómenos. Con el tiempo, el avance de la ciencia permitió entender que los rayos son descargas eléctricas generadas por la acumulación de carga en las nubes.

1.3.2. Benjamin Franklin: La naturaleza eléctrica de los rayos

Benjamin Franklin fue el primero en demostrar experimentalmente que los rayos son un fenómeno eléctrico. En 1752, llevó a cabo su famoso experimento de la cometa, en el que utilizó una cometa de seda, un hilo de cáñamo y una llave metálica para atraer la electricidad de una tormenta.

El experimento consistió en hacer volar la cometa durante una tormenta eléctrica, permitiendo que el hilo de cáñamo, que se humedecía con la lluvia, actuara como conductor. Franklin observó que la llave metálica atada al hilo comenzaba a acumular carga eléctrica y, al acercar su mano, notó la presencia de chispas, similares a las que se generaban en los experimentos electrostáticos de la época. Este resultado confirmó su hipótesis de que los rayos eran descargas eléctricas naturales y no manifestaciones sobrenaturales, como se creía en aquel entonces.

A raíz de este descubrimiento, Franklin diseñó el pararrayos, un dispositivo que permite canalizar la electricidad de un rayo de manera segura hacia el suelo, protegiendo edificaciones y estructuras de incendios o daños causados por impactos directos. Su trabajo sentó las bases para el estudio de la electricidad atmosférica y abrió el camino para futuras investigaciones sobre la electrificación de las tormentas. [1]

1.3.3. Wilson y Simpson: Primeros modelos atmosféricos

C.T.R. Wilson y G.C. Simpson fueron pioneros en el estudio de las tormentas eléctricas y las descargas atmosféricas. Sus investigaciones sentaron las bases para los modelos modernos de la carga eléctrica en las nubes. Las visiones de ambos científicos no encajaban y crearon controversia en el campo a principios del siglo XX. [1]

Ambos modelos parten del hecho de que existe un campo eléctrico natural en la Tierra debido a la ionosfera. Los fotones energéticos provenientes del Sol ionizan los átomos en la ionosfera, liberando electrones que, debido a su alta movilidad, escapan de esta capa. Como resultado, la ionosfera adquiere una carga neta positiva en comparación con la superficie terrestre, generando un campo eléctrico cuyas líneas de fuerza se extienden desde la ionosfera hasta el suelo.

Wilson propuso un modelo dipolar para las tormentas eléctricas, sugiriendo que las nubes de tormenta presentan dos regiones de carga opuesta, de manera similar a un dipolo eléctrico. En su modelo, las cargas positivas se acumulan en la parte superior de la nube, mientras que las cargas negativas se concentran en la parte inferior. Además, el campo eléctrico de la ionosfera atrae cargas negativas desde la Tierra en regiones de buen tiempo. Sin embargo, en zonas de mal tiempo, la ausencia de estas cargas negativas en la superficie terrestre hace que esta quede cargada positivamente. Como consecuencia, la superficie terrestre se carga más positivamente que la ionosfera, generando un campo eléctrico en dirección opuesta, lo que cierra el circuito eléctrico atmosférico.

La teoría de la corona de Wilson también desempeña un papel importante en la electrificación atmosférica. Según esta teoría, los objetos puntiagudos en la superficie terrestre emiten corrientes de iones hacia arriba, un fenómeno conocido como "descargas de corona", cuando se encuentran bajo nubes cargadas eléctricamente. Estas corrientes de iones contribuyen a mantener el campo eléctrico global al equilibrar la carga negativa de la Tierra con la atmósfera. [1]

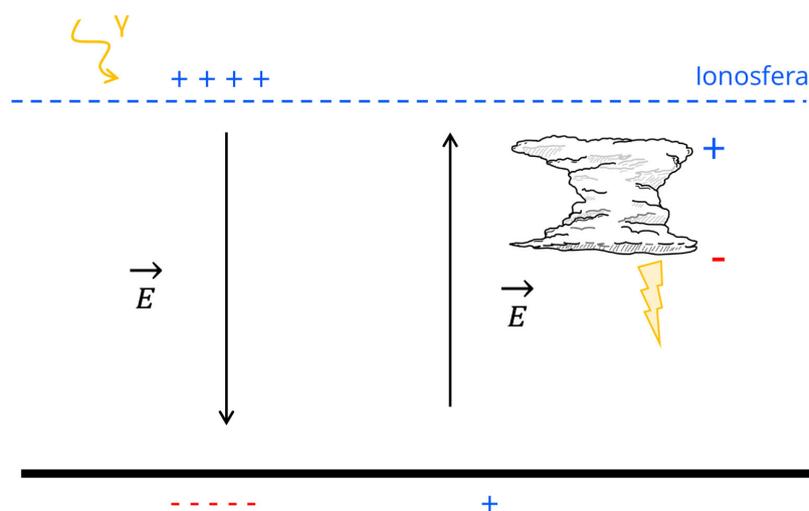


Figura 1.1: Modelo de Wilson con un circuito global provocado por el campo de la ionosfera

Por su parte, Simpson también apoyó la idea de un modelo dipolar, aunque con una diferencia clave en la distribución de las cargas dentro de la nube. En su modelo, la carga negativa se concentraba en la parte superior de la nube y la carga positiva en la parte inferior. Durante sus investigaciones en la India, durante la temporada de monzones, Simpson midió que las gotas de lluvia tenían carga positiva. Esto contradecía el modelo de Wilson, ya que en este la base de la nube estaba cargada negativamente.

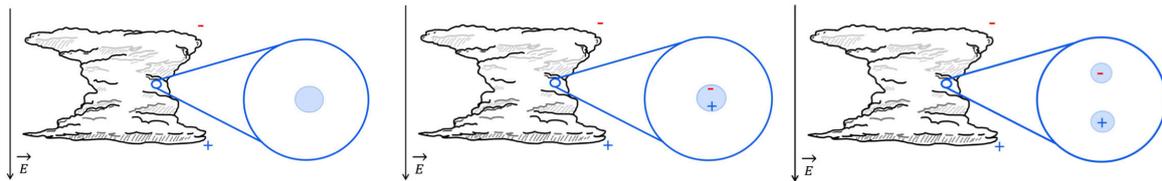


Figura 1.2: Ilustración del proceso de ruptura de gotas desarrollado por Simpson

Por ello, desarrolló la teoría de la ruptura de gotas, que explica cómo la electrificación de las nubes ocurre a través de la fragmentación de gotas de agua. Según esta teoría, cuando las gotas grandes de agua dentro de la nube se rompen, las partículas resultantes se separan con cargas opuestas. Siguiendo el campo eléctrico de la ionosfera, estas cargas se redistribuyen en la nube, con las cargas positivas concentrándose en la parte inferior y las negativas en la parte superior. Este proceso de separación de cargas contribuye a la electrificación de las nubes y al eventual desarrollo de descargas eléctricas, como los rayos. [1]

1.3.4. Marshall: Efecto Seebeck y choques para explicar las tormentas

Las teorías iniciales propuestas por Wilson y Simpson han sido descartadas debido a inconsistencias en la explicación de la electrificación dentro de las nubes de tormenta. Estudios posteriores han demostrado que los mecanismos no son suficientes para explicar las intensidades de campo eléctrico observadas en las tormentas, ya que el campo eléctrico no es suficiente para realizar un movimiento de cargas tan exagerado en el caso de Wilson, ni para romper las gotas en el caso de Simpson [2].

Las tormentas se generan por corrientes ascendentes de aire caliente desde la superficie terrestre, las cuales transportan vapor de agua hacia niveles más altos de la atmósfera. Dentro de la nube, coexisten distintas fases del agua: vapor de agua, cristales de hielo con estructura hexagonal y agua sobre-enfriada que formará partículas denominadas graupel, un tipo de granizo blando sin una estructura interna bien definida [2].

B. Vonnegut y J.S. Marshall propusieron un modelo alternativo basado en la interacción entre el graupel y los cristales de hielo. En este modelo, tanto los cristales como el graupel actúan como núcleos de condensación, pero la mayor área superficial de los cristales favorece una mayor condensación de agua. Este proceso genera un gradiente térmico significativo en estas estructuras, con diferencias de temperatura de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ o más desde el centro a la superficies,

dando lugar a una separación de cargas debida al efecto termoeléctrico Seebeck [3], en el que profundizaremos en el siguiente capítulo.

El proceso de separación de cargas ocurre cuando las partículas chocan entre sí. En estos choques, los cristales de hielo transfieren agua al graupel para equilibrar las tensiones superficiales, y con esta transferencia, también se redistribuye carga eléctrica. Debido a su mayor peso, el graupel tiende a descender, acumulando carga negativa en la base de la nube, mientras que los cristales de hielo ascienden con las corrientes convectivas, transportando carga positiva hacia las regiones superiores de la nube. Este mecanismo proporciona una explicación más precisa de la polarización eléctrica en las nubes de tormenta, refutando las teorías previas de Wilson y Simpson y estableciendo un marco teórico más sólido para comprender la electrificación atmosférica.



Figura 1.3: Modelo de Marshall: Teoría Triboeléctrica para explicar la separación de cargas en nubes. De izquierda a derecha: 1) Graupel y cristales de hielo. 2) Los meteoros condensan agua a su alrededor, más cantidad en el cristal por su mayor área. 3) Separación de cargas por efecto Seebeck. 4) transferencia de carga por choques

1.3.5. Actualidad: Teorías insuficientes

Los resultados experimentales no encajan con las hipótesis del modelo. Los campos eléctricos generados por la separación del graupel y de los cristales de hielo son 10 veces más pequeños que la rigidez dieléctrica (i.e. valor límite de la intensidad del campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad aislante y pasa a ser conductor.) del aire, que es de 3 MV/m a 1 atm, por lo que los rayos no deberían ser posibles. [4]

Esta investigación implica que el modelo está incompleto y se proponen algunas alternativas que no parecen convencer del todo por la dificultad de su observación, que es el principal problema que se plantea en este proyecto. Se discutirán físicamente las teorías propuestas para extraer conclusiones.

La teoría que más apoyo presenta está relacionada con la acción de los rayos cósmicos (propuesta por A. V. Gurevich [5]). Mantiene que partículas altamente energéticas de rayos cósmicos pueden generar una ruptura que provoque campos eléctricos más intensos, aunque no está contrastado.

También se propuso que pequeñas gotas de agua se separen con carga opuesta dentro de la gota grande, formando pequeños dipolos dentro de la nube, que en su conjunto creen un campo eléctrico suficiente para la ruptura dieléctrica, aunque en el artículo se menciona que para ello se necesitaría un campo eléctrico de 500 kV/m mientras que se observa uno de 300 kV/m. [4]

Capítulo 2

Revisión sobre Tormentas

En este capítulo, se estudiará la macroescala de la tormenta. Para el estudio de las descargas atmosféricas, es necesario conocer su matriz. Las características fundamentales para el estudio de las tormentas son la presión y la temperatura, así como la humedad y otra serie de factores externos que podrían ser orográficos e incluso biológicos y sociales, ya que los núcleos de condensación (polen, contaminantes, etc.) pueden afectar a la formación de nubes.

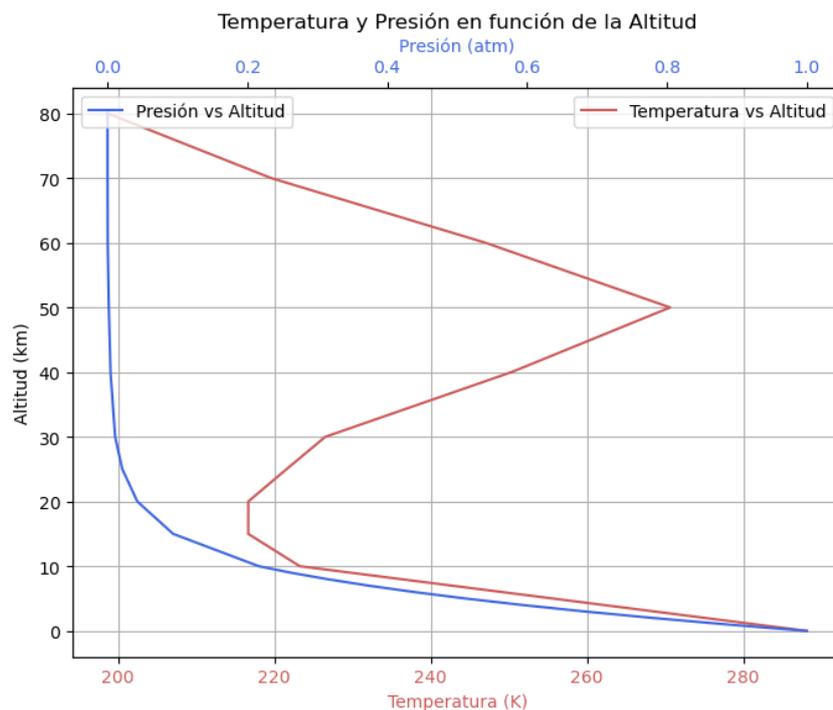


Figura 2.1: Presión (atm) y Temperatura (K) media según la altura (km)

Presión y temperatura son magnitudes que se pueden medir experimentalmente. Matemáticamente, también se puede suponer una caída exponencial de la presión con la altura, asumiendo gases ideales, que es una aproximación válida en la Física de la Atmósfera, ya que las interacciones entre las moléculas son despreciables frente a su energía cinética. Así, siguiendo la siguiente

relación, que es una aproximación para un caso isoterma:

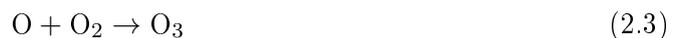
$$P = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{gMh}{RT}\right) \quad (2.1)$$

donde:

- P_0 es la presión a nivel de la superficie (1 atm).
- g es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s).
- M es la masa molar del gas (0,02896968 kg/mol para el aire).
- R es la constante de los gases (8,31432 J/Kmol).

Estudiamos también las capas de la atmósfera. La atmósfera terrestre está estructurada en capas con propiedades físicas y químicas diferenciadas. Su electrificación es un factor clave en la generación de fenómenos como tormentas eléctricas y descargas atmosféricas [6, 7].

- **Troposfera:** Es la capa más baja (0-12 km) y donde ocurren los fenómenos meteorológicos. Contiene aproximadamente el 75 % de la masa atmosférica y alberga una alta concentración de vapor de agua. La electrificación de tormentas ocurre en esta capa debido a la separación de cargas en las nubes cumulonimbus, generando intensos campos eléctricos. Las descargas eléctricas (rayos) ocurren cuando el campo eléctrico excede el umbral dieléctrico del aire, ionizando el gas y formando un canal conductor de plasma.
- **Estratosfera:** Entre 12 y 50 km de altitud, contiene la capa de ozono, donde ocurren reacciones fotoquímicas esenciales:



Estas reacciones protegen la biosfera de la radiación ultravioleta. La electrificación es mínima debido a la baja densidad del aire y la ausencia de convección significativa.

- **Mesosfera:** Se extiende de 50 a 85 km. Es la región donde ocurren los fenómenos luminosos transitorios como los sprites y los elves, asociados con tormentas en la troposfera. En esta capa, la ionización ocurre debido a la interacción con radiación ultravioleta extrema y partículas energéticas del viento solar.
- **Termosfera:** Entre 85 y 600 km, su temperatura aumenta significativamente debido a la absorción de radiación solar extrema (rayos X y UV). La alta ionización produce una alta conductividad eléctrica, facilitando la propagación de ondas electromagnéticas (reflexión de señales de radio de onda corta).
- **Ionosfera:** Superpone parcialmente la mesosfera y termosfera (50-1000 km) y se divide en regiones D, E y F según su densidad de electrones libres. La ionización es inducida por

fotones UV y rayos X solares:



La presencia de las capas más bajas y su altitud están muy condicionadas por la hora del día, la actividad solar, la estación, etc.

El perfil vertical de la temperatura en la atmósfera terrestre está fuertemente condicionado por la interacción entre la radiación solar y los componentes atmosféricos. A medida que la radiación atraviesa las diferentes altitudes, ciertos gases y partículas (como vapor de agua, dióxido de carbono o aerosoles) absorben y dispersan selectivamente distintas longitudes de onda, como se ve en la figura 2.2. Este proceso, junto con la emisión térmica y la dinámica atmosférica (convección y expansión adiabática), explica la forma típica de la curva de temperatura y la disminución progresiva de la presión con la altura.

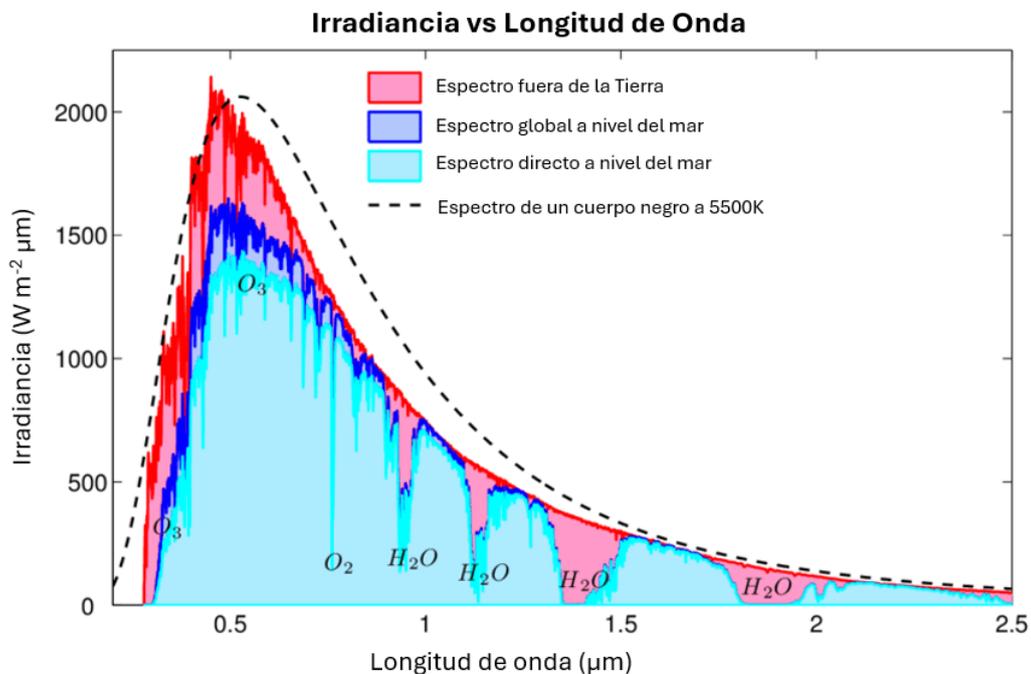


Figura 2.2: Espectro de irradiancia solar. Traducido de: [8]

Las regiones donde se absorbe con mayor intensidad la radiación solar pueden mostrar inversiones térmicas o menores gradientes de enfriamiento. La inversión térmica que se ve en la figura 2.1, alrededor de los 50 km de altitud está directamente relacionada con la absorción de radiación ultravioleta (UV) por parte de los componentes atmosféricos, principalmente el ozono (O_3). Esta región, conocida como la estratopausa, marca la transición entre la estratosfera (donde la temperatura aumenta con la altitud) y la mesosfera (donde vuelve a descender).

2.1. Microfísica de las Tormentas

Según lo expuesto en la cronología, el mecanismo más ampliamente aceptado para la electrificación de las tormentas es la teoría triboeléctrica de los meteoros en la nube [4]. Esta formulación proporciona un marco coherente para describir la dinámica de carga dentro del sistema, aunque con limitaciones que estudiaremos en profundidad.

2.1.1. Teoría Triboeléctrica de Meteoros

Dentro de la nube coexisten vapor de agua, hielo y agua líquida sobreenfriada¹. Cuando el agua sobre-enfriada encuentra un núcleo de cristalización, esta se congela rápidamente y sin estructura interna definida, formando un granizo amorfo llamado graupel. Los cristales de hielo, sin embargo, tienen patrones hexagonales muy característicos. El vapor de agua se condensará alrededor de ambos meteoros, pero más cantidad alrededor del cristal de hielo, ya que su superficie es mayor.

En este contexto, es fundamental considerar el **proceso de Bergeron**. Este describe el crecimiento diferencial de los cristales de hielo y las gotas de agua sobreenfriada en nubes mixtas. Debido a que la presión de vapor de saturación sobre el hielo es menor que sobre el agua líquida a la misma temperatura, el vapor de agua tenderá a depositarse preferentemente sobre los cristales de hielo. Como consecuencia, los cristales crecen por deposición directa de vapor, mientras que las gotas de agua se evaporan lentamente para reponer el vapor perdido. Este mecanismo permite que los cristales de hielo aumenten de tamaño. Este proceso es esencial para entender la evolución de las nubes de desarrollo vertical, como las nubes de tormenta, el *cumulonimbus*.

Al tener unos núcleos tan fríos y una corteza a mayor temperatura, interviene ahora el efecto Seebeck [3]. Este, es un fenómeno termoeléctrico en el cual una diferencia de temperatura en un material conductor o semiconductor genera una diferencia de potencial eléctrico, lo que induce una corriente. Matemáticamente, el voltaje V generado por el efecto Seebeck se expresa como:

$$V = \int_{T_1}^{T_2} S(T) dT \quad (2.6)$$

donde:

- $S(T)$ es el coeficiente Seebeck del material.
- T_1 y T_2 son las temperaturas en dos puntos del material.

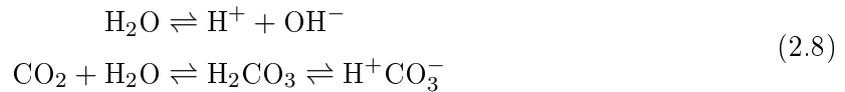
En el caso del agua, el coeficiente Seebeck depende tanto de la presión como la temperatura, pero solo es apreciable con cambios de cientos de bares y de grados, entonces para calcular el potencial generado, aproximaremos el coeficiente Seebeck como constante [3]. Así, sustituyendo en la ecuación 2.7:

¹Se refiere al agua en estado líquido a temperaturas inferiores a 0 °C, sin congelarse debido a la ausencia de núcleos de cristalización.

$$V \approx S \cdot \Delta T \approx -10^{-3}V/K \cdot 10K = -10^{-2}V \quad (2.7)$$

El signo negativo indica que la corteza (T_2), está a menor potencial que el interior del meteoro (T_1), es decir, se acumula carga negativa en el exterior, como se esperaba.

El efecto Seebeck estrictamente se aplica a metales y semiconductores, pero su principio físico fundamental (movilidad de cargas en gradientes térmicos) puede extenderse a soluciones iónicas como el agua en las nubes. Dentro del agua, se producen reacciones de auto-ionización², disolución de gases atmosféricos, algunos de los cuales forman iones en solución o por radiación cósmica que llega a la atmósfera ionizando moléculas de aire y agua, generando pares de iones:



Lo que explica la aparición de dichas cargas, que se distribuirán en forma de corona alrededor de la corteza de ambos meteoros.

Posteriormente, ambos meteoros chocarán dentro de la nube, ya que tienen una alta movilidad debida a corrientes de aire convectivas. Cuando un graupel choca con un cristal de hielo, la tensión de la corteza líquida de ambos tiende a equipararse, es decir, hay un flujo de agua líquida cargada desde el cristal al graupel. El cristal tiene más superficie para un mismo volumen, es menos denso que el graupel, por lo que tiende a subir a las partes superiores de la nube mientras que el graupel cae por gravedad hacia la base, generando la estructura dipolar de la nube.

Sin embargo, saber que meteoro carga una cantidad mayor de agua depende de las condiciones externas. De hecho, en la parte más baja de la nube, donde las temperaturas son relativamente más elevadas (ver figura 2.1), los cristales de hielo son más pequeños y, por tanto, a su alrededor se condensa menos agua, provocando el efecto contrario y creando cristales de hielo muy ligeros negativamente cargados que subirán y un graupel positivo en la parte más baja de la nube, creando una estructura tripolar positiva en los extremos y negativa en el centro de la nube, como se puede ver en la figura 2.3. Este fenómeno es lo que explica por qué Simpson midió cargas positivas en la lluvia.

²El agua se auto-ioniza por su capacidad de actuar como ácido o base, su naturaleza anfiprótica, como resultado de interacciones entre las propias moléculas. A unos -10°C la constante de ionización en el equilibrio $K_w \approx 10^{-15} \text{ mol}^2/\text{L}^2$, lo que quiere decir que las concentraciones de iones serán $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] = \sqrt{K_w} \approx 10^{-8} \text{ M}$

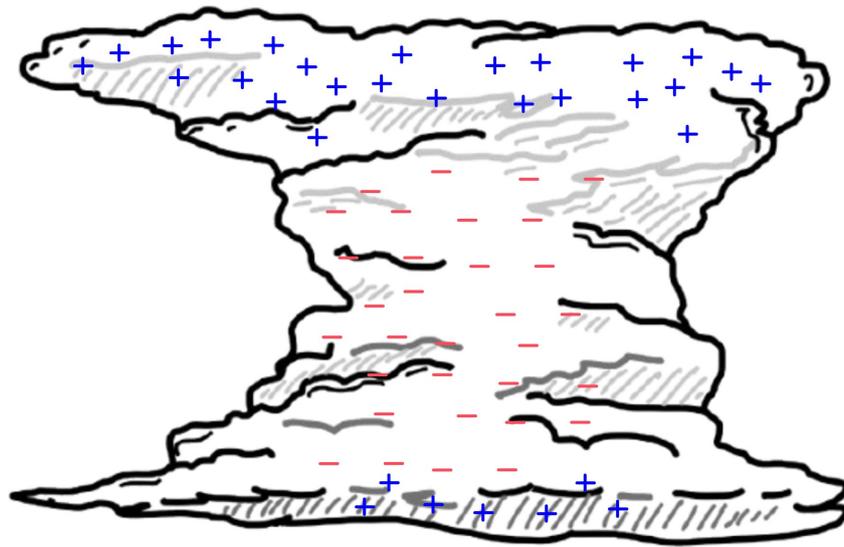


Figura 2.3: Representación de la separación de cargas en una nube de tormenta, siguiendo la estructura tripolar, que explica las medidas de lluvia cargada positivamente Simpson en la India. Dependiendo de la magnitud de la tormenta, capa más baja de cargas positivas no siempre está presente de manera significativa

Cuando la diferencia de carga entre la parte inferior y media de la nube es suficientemente elevada, el campo eléctrico debería ser lo suficientemente elevado para romper la rigidez dieléctrica de aire entre la zona negativa y positiva inferior, iniciando un efecto cascada de ionización de electrones. Estudiaremos este proceso y las descargas en el siguiente capítulo.

2.1.2. Inconsistencias en la Teoría Triboeléctrica

Si bien esta teoría parece resolver el problema expuesto, se ha demostrado que el campo eléctrico creado por la separación de carga de meteoros no es suficiente para romper el dieléctrico del aire por un orden de magnitud [4]. Vamos a hacer un cálculo poco sofisticado, con unos valores realistas pero no exactos.

En una nube se esperan unos 10^{20} meteoros, en un volumen de $10^{12} m^3$ (Cilindro con base de radio 25 km y 15 km de altura). Además supondremos que la nube actúa como un condensador separado por un dieléctrico, el aire con un 100 % de humedad ($\epsilon_r = 1,006$).

Para estimar el número de choques, se utilizan en las expresiones del Volumen V del *Berkeley Physics Course*, sobre Física Estadística [9] para estimar el tiempo promedio entre choques.

$$\tau = \frac{1}{n\sigma\bar{v}} = \frac{1}{n\pi d^2\bar{v}} \approx 0,00032 s/choque \Rightarrow f_{choque} = 1/\tau = 3125 s^{-1} \quad (2.9)$$

Con n la densidad numérica de partículas, σ la sección eficaz de colisión, \bar{v} , la velocidad media de las partículas y d su diámetro. Por otro lado, según Jayaratne (1983) la transferencia de carga sigue la siguiente relación, determinada experimentalmente:

$$q_{trans} = \alpha \cdot m \approx 10^{-4} C/kg \cdot 10^{-16} kg = 10^{-20} C/choque \quad (2.10)$$

Siendo m la masa de un meteoro estimado como una esfera de radio de $1 \mu m$ de agua y α un coeficiente experimental de cuanta carga se transfiere por unidad de masa.

Multiplicando por el número de choques en 1 hora (desarrollo de una tormenta) para todas las partículas, se habrá generado una separación de cargas de aproximadamente $Q = \frac{f_{choque} t n}{q_{trans}} \approx 10^3 C$. En el modelo del condensador, la nube sería análoga a dos placas cilíndricas de área $(25 km)^2 \cdot \pi = 2 \cdot 10^9 m^2$, por lo que la densidad de carga superficial será $\sigma \approx 10^{-6} C/m^2$. El campo eléctrico:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r} \approx 10^5 V/m \quad (2.11)$$

Para superar la rigidez dieléctrica del aire necesitamos, por lo menos, unos $10^6 V/m$ (Para saber más ver figura 3.1). Aunque nuestro cálculo no sea muy preciso, obtenemos el mismo resultado que Saunders ([2]). Hay una discrepancia de un orden de magnitud para iniciar la rotura del dieléctrico, por lo que el modelo está incompleto.

2.1.3. Teorías Alternativas

Aunque la teoría triboeléctrica está comprobada, todavía falta un elemento desencadenante o una consideración adicional que inicie el proceso de rotura de dieléctrico. Asumiendo el modelo de Townsend (Ver *Capítulo 3* para mas información), solo se necesitan unos pocos átomos ionizados, cuyos e^- choquen contra otros átomos, generando un efecto cascada de ionización.

Ionización inducida por rayos cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas de alta energía, principalmente protones y núcleos de átomos, que provienen del espacio. Cuando estas partículas ingresan a la atmósfera terrestre, chocan con moléculas del aire y generan lluvias de partículas secundarias, incluyendo electrones, positrones y muones. Estas partículas podrían empezar a ionizar los átomos, favorecidos por el campo eléctrico teorizado por el modelo triboeléctrico. Además, la ionización resultante podría contribuir a la iniciación de descargas eléctricas mediante el mecanismo de avalancha de electrones en ruptura ("*runaway breakdown*"), facilitando la formación de rayos.

Influencia de los flujos de aire y turbulencias

Las corrientes ascendentes dentro de una nube de tormenta transportan partículas de hielo y gotas de agua a diferentes alturas, promoviendo la separación de cargas. La turbulencia en la nube puede redistribuir estas cargas de manera más compleja de lo que predice el modelo triboeléctrico clásico. En algunos casos, la estructura de la nube puede generar capas alternas de carga positiva y negativa, incrementando los gradientes de potencial eléctrico y facilitando la formación de descargas. Además, en tormentas severas, se han observado configuraciones inusuales de carga,

como acumulaciones demasiado grandes de carga positiva cerca de la base de la nube, que pueden generar rayos de polaridad inversa.

Emisión de radiación gamma y electrones relativistas

Las tormentas eléctricas pueden emitir pulsos de radiación gamma de alta energía, conocidos como destellos de rayos gamma terrestres (TGFs). Estos destellos son extremadamente breves (del orden de milisegundos) y se han detectado desde satélites en órbita baja, como el *Fermi Gamma-ray Space Telescope*. Se cree que los TGFs están relacionados con el proceso de *avalancha de electrones en ruptura* (*runaway electron avalanche*), el cual ocurre en presencia de campos eléctricos intensos dentro de la nube.

El mecanismo se inicia cuando electrones libres en la atmósfera son acelerados por el fuerte campo eléctrico de la tormenta hasta alcanzar velocidades cercanas a la de la luz. Estos electrones relativistas pueden colisionar con moléculas de aire, liberando más electrones en un efecto en cascada. Como resultado, los electrones que son frenados por las colisiones emiten radiación gamma a través del mecanismo de frenado (*bremsstrahlung*).

Los TGFs podrían desempeñar un papel en la iniciación de los rayos al generar grandes cantidades de electrones de alta energía, los cuales pueden ionizar el aire y reducir la resistencia del medio a la propagación de una descarga eléctrica. En algunos casos, se ha observado que estos destellos ocurren justo antes o al mismo tiempo que un rayo, lo que sugiere que podrían influir en su formación. Además, se ha propuesto que los rayos gamma generados en este proceso pueden inducir reacciones nucleares en la atmósfera, produciendo neutrones y positrones, lo que añade una dimensión adicional a la interacción entre tormentas eléctricas y procesos de alta energía en la atmósfera terrestre.

2.2. Formación y Fases de las Tormentas Eléctricas

Los tres factores esenciales para la formación de tormentas eléctricas son la humedad, inestabilidad atmosférica y un mecanismo de levantamiento, ya que crean las condiciones necesarias para el desarrollo de nubes de tipo cumulonimbus, que son las responsables de las descargas eléctricas.

La humedad es fundamental porque proporciona el vapor de agua que, al condensarse en la atmósfera, libera calor latente, lo que potencia las corrientes ascendentes dentro de la nube. Sin suficiente humedad, el aire no podrá generar nubes lo suficientemente desarrolladas para producir una tormenta.

La inestabilidad ocurre cuando el aire más cálido y menos denso en la superficie tiene tendencia a ascender porque es más ligero que el aire frío en capas superiores. Para medir la inestabilidad se usa el Índice de CAPE (Convective Available Potential Energy): cuanto mayor sea el CAPE, más fuerte será la convección y, por lo tanto, mayor probabilidad de tormentas intensas. Un CAPE superior a 1000 J/kg indica condiciones favorables para tormentas fuertes.

Además, un mecanismo de levantamiento puede ayudar a la formación de la tormenta, en caso de que la atmósfera no sea lo suficientemente inestable para hacerlo subir. Hay tres mecanismos de levantamiento principales:

1. **Convección:** Ocurre cuando el calentamiento del suelo calienta el aire en contacto con él, haciéndolo menos denso y forzándolo a subir. Si el aire asciende lo suficiente y alcanza su nivel de condensación, se forman nubes convectivas.
2. **Frentes atmosféricos:** Un frente es la frontera entre dos masas de aire con diferentes temperaturas y densidades.
 - a) En un frente frío, el aire frío denso empuja al aire cálido hacia arriba rápidamente, favoreciendo tormentas.
 - b) En un frente cálido, el aire caliente asciende de manera más gradual sobre el aire frío, generando como mucho, lluvias poco intensas, normalmente.
 - c) En un frente ocluido, el gradiente térmico entre el aire frío y caliente es muy acusado, dando lugar a una atmósfera muy inestable, favoreciendo tormentas intensas.
3. **Forzamiento orográfico:** Si el aire húmedo se encuentra con una montaña o una elevación en el terreno, se verá obligado a ascender. A medida que sube, se enfría y condensa, formando nubes. Esto puede ayudar a la formación de nubes de tormenta, aunque se pueden desarrollar otro tipo de nubes no propicias a precipitación, como los cúmulos sin desarrollo vertical, o incluso nieblas.

Las tormentas eléctricas pasan por tres fases principales a lo largo de su ciclo de vida: desarrollo, madurez y disipación. Cada fase está determinada por la dinámica de las corrientes de aire dentro de la nube y los procesos físicos asociados.

En la **fase de desarrollo**, el aire cálido y húmedo asciende³ debido a los mecanismos de levantamiento. A medida que el aire asciende, se expande y se enfría, provocando la condensación del vapor de agua y la formación de nubes de tipo *Cumulus congestus*, la posible predecesora de un *Cumulonimbus*, que es una nube de desarrollo vertical que todavía no produce precipitaciones, como se puede ver en la figura 2.4. En esta etapa predominan las corrientes ascendentes y no se presentan precipitaciones ni actividad eléctrica significativa, ya que las gotas de agua aún son demasiado pequeñas para caer y los procesos de electrificación no han alcanzado su punto crítico.

Durante la **fase de madurez**, la tormenta alcanza su máxima intensidad. Se producen simultáneamente corrientes ascendentes y descendentes: mientras el aire cálido sigue elevándose y alimentando la nube, las gotas de agua y partículas de hielo crecen y caen al suelo debido a la gravedad, generando precipitaciones en forma de lluvia o granizo. Este movimiento descendente arrastra aire frío, lo que puede provocar ráfagas de viento intensas. Además, la colisión entre

³El aire ascendente se expande porque la presión atmosférica disminuye con la altitud. Al expandirse, realiza trabajo contra su entorno y, al no intercambiar calor con él (proceso adiabático), su energía interna disminuye, lo que provoca un enfriamiento. Este efecto, conocido como enfriamiento adiabático, es clave en la formación de nubes y tormentas.

partículas de hielo dentro de la nube genera separación de cargas, lo que conduce a la formación de rayos. En esta fase, las tormentas pueden presentar fenómenos severos como granizadas, ráfagas descendentes e incluso tornados en condiciones favorables.

Finalmente, en la **fase de disipación**, las corrientes descendentes se vuelven dominantes y cortan el flujo de aire cálido ascendente que mantenía la tormenta. Como resultado, la actividad convectiva disminuye, las nubes comienzan a dispersarse y la intensidad de las precipitaciones se reduce gradualmente hasta cesar. La actividad eléctrica también decrece y, en muchos casos, el paso de la tormenta deja tras de sí una brisa fría generada por el aire descendente. Esta fase marca el final del ciclo de la tormenta, que puede haber durado desde unos minutos hasta varias horas dependiendo de la estructura del sistema.

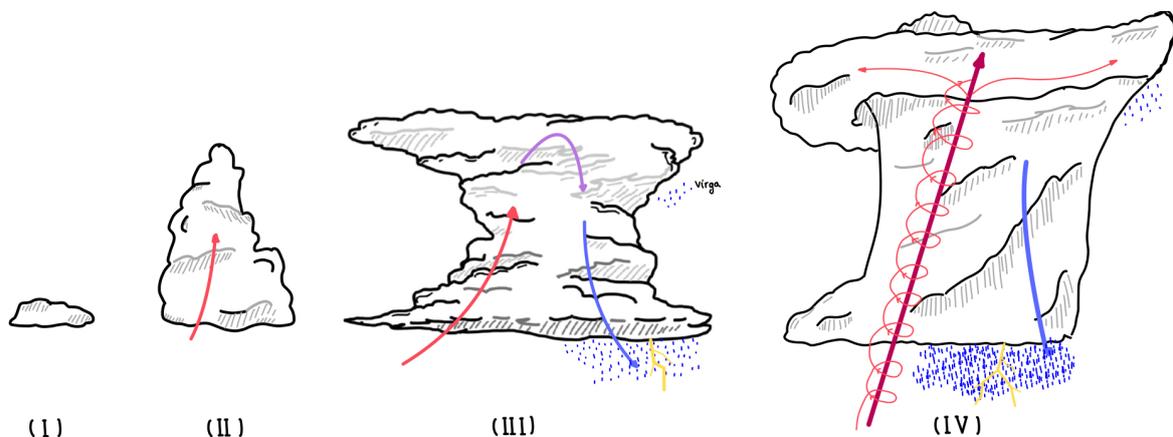


Figura 2.4: Ciclo de vida de una nube de tormenta. I. Cúmulo, II. Cumulus Congestus, III. Cumulonimbus, IV. Supercelda

2.3. Clasificación de las Tormentas

Las tormentas pueden clasificarse en función de su organización, duración y la dinámica interna de los sistemas convectivos. En términos generales, el estudio se centrará en cinco tipos principales: celdas simples, multicelda, supercelda, tormentas tropicales y tormentas sucias. Sin embargo, se reconocen más tipos como las tormentas heladas o las tormentas de arena, que no presentan la separación de cargas necesaria para producir descargas eléctricas.

2.3.1. Tormentas de celda simple

Las tormentas de celda simple, o tormentas de evolución unicelular, se caracterizan por su breve ciclo de vida, típicamente inferior a una hora. Estas tormentas presentan una única corriente ascendente y descendente y siguen el esquema clásico de tres etapas: fase de desarrollo, fase de madurez y fase de disipación. Suelen originarse en ambientes con baja cizalladura del viento⁴,

⁴La cizalladura del viento es la variación espacial del vector viento con respecto a la altura o a la distancia horizontal. Se expresa como el gradiente del viento y puede involucrar cambios en la velocidad, la dirección, o ambos, promoviendo la inestabilidad atmosférica.

lo que impide una organización significativa. Aunque estas tormentas pueden generar precipitaciones intensas y descargas eléctricas, rara vez producen fenómenos severos. Son comunes en regiones templadas durante el verano, cuando el calentamiento diurno provoca la convección atmosférica, como podría ser en Asturias.

2.3.2. Tormentas multicelulares

Las tormentas multicelulares consisten en conglomerados de celdas convectivas en diferentes etapas de desarrollo. A diferencia de las tormentas unicelulares, estas presentan una mayor duración y pueden generar eventos meteorológicos más intensos, como vientos fuertes en superficie, granizo y lluvias torrenciales. Su estructura está influenciada por la cizalladura vertical del viento, lo que permite que nuevas celdas se formen en la periferia del sistema mientras las celdas más antiguas se disipan. Dentro de esta categoría, los sistemas convectivos de mesoescala (de decenas a miles de kilómetros) son un subtipo particularmente relevante, pudiendo abarcar cientos de kilómetros y perdurar por varias horas. Son frecuentes en regiones de latitudes medias, especialmente en primavera y verano, cuando los frentes fríos interactúan con masas de aire cálido e inestable.

2.3.3. Superceldas

Las superceldas (ver Figura 2.5) constituyen el tipo más organizado y peligroso de tormenta eléctrica. Se definen por la presencia de un mesociclón, una región de vorticidad ciclónica en niveles medios y bajos de la troposfera. Este mesociclón es el resultado de la interacción entre la corriente ascendente intensa y la cizalladura vertical del viento, permitiendo que la tormenta adquiera un carácter rotacional. Las superceldas pueden subdividirse en superceldas clásicas, de baja precipitación (LP) y de alta precipitación (HP). Entre los fenómenos severos asociados a las superceldas se incluyen tornados, granizo de gran tamaño y ráfagas de viento extremadamente intensas. Su estructura interna permite una longevidad significativamente mayor en comparación con otros tipos de tormentas, a menudo superando varias horas de duración. Estas tormentas son más comunes en las Grandes Llanuras de Estados Unidos, Argentina y Australia, especialmente durante la primavera y el inicio del verano, cuando las condiciones de fuerte cizalladura vertical y aire cálido y húmedo favorecen su desarrollo.

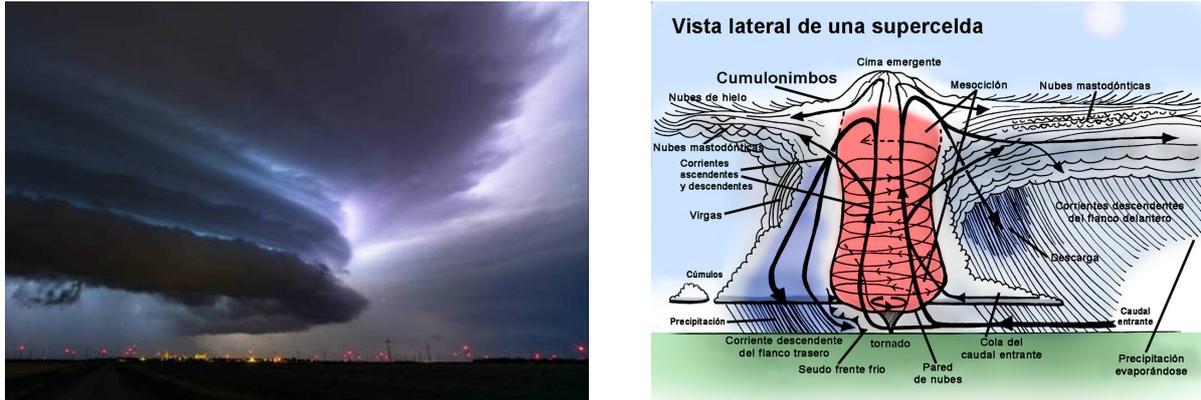


Figura 2.5: A la izquierda: fotografía de una supercelda real (imagen de [10]). A la derecha: esquema de la estructura interna de una supercelda (imagen de [11]).

2.3.4. Tormentas tropicales

Las tormentas tropicales son sistemas convectivos organizados que se forman en océanos tropicales y subtropicales (agua caliente que "alimenta" la tormenta), caracterizados por una circulación ciclónica cerrada y vientos sostenidos de entre 63 y 118 km/h. Cuando estos sistemas alcanzan vientos superiores a 118 km/h, evolucionan a huracanes, tifones o ciclones tropicales, dependiendo de la región del mundo en la que se desarrollen. Su formación está fuertemente influenciada por la temperatura del océano, la inestabilidad atmosférica y la baja cizalladura del viento en niveles superiores. A diferencia de las tormentas de celda simple, multicelulares y superceldas, las tormentas tropicales pueden persistir durante días o incluso semanas y cubrir extensas áreas geográficas. Estos sistemas pueden generar lluvias torrenciales, marejadas ciclónicas y vientos destructivos, representando una gran amenaza para las zonas costeras. Son más frecuentes en los océanos Atlántico, Pacífico e Índico, con temporadas de mayor actividad entre junio y noviembre en el hemisferio norte y entre noviembre y abril en el hemisferio sur.

2.3.5. Tormentas sucias

Las tormentas sucias ocurren en nubes cargadas de ceniza, gases y partículas sólidas. Pueden ser tormentas de fuego: las nubes Pyrocumulonimbus (PyroCb) son sistemas convectivos de alta energía que se generan como resultado de la intensa liberación de calor durante incendios forestales de gran magnitud o bombardeos. El mecanismo de formación de estas nubes se basa en la elevación violenta de aire caliente cargado de aerosoles, humo y partículas sólidas, que ascienden rápidamente debido a la convección forzada. Las PyroCb se caracterizan por su capacidad de generar descargas eléctricas debido a la separación de cargas producida por la colisión entre partículas de humo y ceniza con los meteoros atmosféricos, lo que crea un fuerte campo eléctrico capaz de generar rayos.

En cuanto a las tormentas volcánicas, el proceso es similar. Las nubes cumulonimbus volcánicas (Volcanic Cb) son estructuras convectivas originadas por procesos eruptivos volcánicos altamente energéticos. Durante una erupción, la liberación súbita de magma, gases y material

piroclástico a temperaturas extremas genera columnas eruptivas que, al interactuar con la atmósfera, desarrollan fuertes corrientes ascendentes.

Estas columnas de aire caliente transportan vapor de agua, ceniza y gases volcánicos como dióxido de azufre (SO_2), que pueden condensarse y formar nubes cumulonimbus con gradientes térmicos muy acusados. La separación de cargas dentro de estas nubes ocurre por la fricción entre partículas de ceniza, siguiendo la teoría triboeléctrica, favoreciendo la generación de rayos.



Figura 2.6: Tormenta volcánica en el volcán de Colima (México). Imagen de: [12]

2.4. Clasificación del Cumulonimbo

El cumulonimbo (*Cumulonimbus*, abreviado como Cb), como ya se ha indicado, representa el estadio más desarrollado del ciclo de evolución convectiva de las nubes del tipo cúmulo. Esta nube se caracteriza por su gran desarrollo vertical, extendiéndose desde niveles bajos de la troposfera hasta la tropopausa, y es responsable de fenómenos meteorológicos severos.

Según la *International Cloud Atlas* de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2017) [13], el cumulonimbo se clasifica en dos especies principales, según el grado de evolución de su parte superior:

Cumulonimbus calvus (Cb calvus)

Es la forma habitual del cumulonimbo, en la cual la cima conserva una apariencia abultada y redondeada, similar a la de un cúmulo congestus, pero con indicios de transición hacia una estructura más fibrosa.

Indica la presencia de fuertes corrientes ascendentes, aunque aún no se observa un desarrollo glaciar significativo, es decir, las precipitaciones suelen ser lluvia.



Figura 2.7: Cumulonimbus calvus junto a cúmulos congestus. Fuente: [14]

Cumulonimbus capillatus (Cb cap)

La cima adopta una morfología fibrosa debido a la presencia predominante de cristales de hielo, lo que implica que la nube ha alcanzado niveles altos de la troposfera, por lo que las precipitaciones pueden ser en forma de lluvia, nieve o granizo, en general muy intensos.

Este tipo de cumulonimbo puede desarrollar la típica extensión superior en forma de yunque y se denomina **Cumulonimbus capillatus incus (Cb cap incus)** (latín para "yunque").



Figura 2.8: Cumulonimbus capillatus con yunque bien desarrollado. Fuente: [15]

2.4.1. Nubes Accesorias

Los cumulonimbos pueden presentar diversas formaciones asociadas, denominadas *nubes accesorias* (Figura 2.9), porque parecen "adornar" el cumulonimbo, que pueden indicar la fase, intensidad o predicción de precipitaciones. Entre estas se encuentran:

- **Mamma:** formaciones en forma de bolsas colgantes en la base del yunque, asociadas a turbulencia y actividad convectiva residual, generalmente cuando la tormenta está en su máxima intensidad o acaba de pasar.
- **Arcus:** Nubes en forma de arco que suelen preceder al cumulonimbo, asociadas al frente de ráfagas de una corriente descendente. Anuncian a células tormentosas severas y organizadas.
- **Pileus:** Nube lisa en forma de capucha que se forma por encima de un cúmulo en fuerte desarrollo vertical, indicando ascensos muy intensos, y suele indicar una posible evolución hacia tormentas.
- **Velum:** Delgadas capas horizontales que rodean al cumulonimbo durante sus primeras fases, formadas por condensación a partir del aire desplazado verticalmente. Suele indicar lluvias prolongadas

La identificación y clasificación precisa de estas especies y formaciones asociadas resulta fundamental para el análisis de la dinámica convectiva y la predicción de eventos meteorológicos severos.

**Mamma****Velum****Pileus****Arcus**

Figura 2.9: Tipos de nubes accesorias: Mamma [16], Velum [17], Pileus [18], Arcus [19].

2.5. El Circuito Global

El circuito eléctrico global es un sistema planetario que describe el flujo continuo de corriente eléctrica entre la superficie terrestre y la ionosfera, mediado por la conductividad atmosférica y las descargas eléctricas generadas por tormentas. Este circuito se mantiene gracias a la diferencia de potencial existente entre la ionosfera, que presenta un potencial aproximado de $V_i \approx +250$ kV, y la superficie terrestre, que se encuentra a potencial de referencia (0 V) [20, 1]. En la Figura 2.10 se encuentra representado esquemáticamente el circuito eléctrico global.

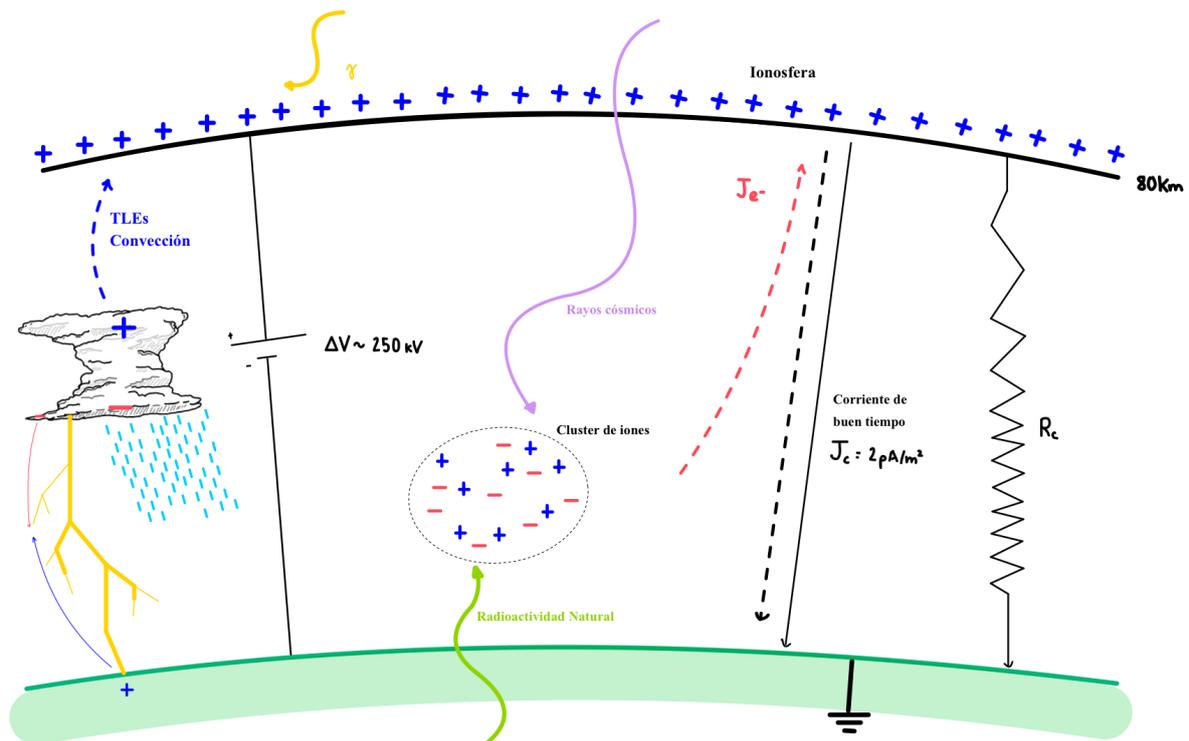


Figura 2.10: Representación del circuito global. Aunque el aire no sea conductor, la radiactividad natural y los rayos cósmicos ionizan partículas presentes en la atmósfera, permitiendo el desplazamiento de cargas libres, en forma de corrientes eléctricas.

Las descargas eléctricas atmosféricas, como los rayos, juegan un papel fundamental en este sistema, ya que constituyen la principal fuente de carga que sostiene el potencial de la ionosfera. Las tormentas eléctricas actúan como generadores naturales, transfiriendo carga negativa hacia la superficie y carga positiva hacia la ionosfera mediante procesos de separación de carga dentro de las nubes cumulonimbos. Como resultado, las regiones tormentosas inyectan una corriente al sistema, estimada globalmente en aproximadamente 1000 A en cualquier instante dado [20].

Además de las tormentas, existen diversas fuentes adicionales de ionización atmosférica:

- Rayos cósmicos galácticos (GCRs) que generan pares de iones a través de ionización secundaria.
- Partículas energéticas solares (SEPs) y precipitación de electrones relativistas (REP), que afectan especialmente las regiones polares (por el campo magnético terrestre, que los envía a estas latitudes, formando auroras).
- Radiactividad natural proveniente de la desintegración de isótopos radiactivos y del gas radón, ionizando las capas bajas de la atmósfera.

Estos procesos permiten mantener una conductividad eléctrica suficiente para que fluya una corriente de retorno denominada corriente de conducción de buen tiempo J_c , desde la ionosfera

hacia la superficie. En condiciones de buen tiempo, la densidad de corriente típica es del orden de $J_c \approx 2 \text{ pA/m}^2$ [1].

Wilson fue el primero en plantear las ecuaciones de este campo eléctrico. El circuito global se describe mediante la ley de Ohm para un medio continuo, donde la corriente de conducción $J_c(z)$ depende de la conductividad atmosférica $\sigma(z)$ y del campo eléctrico $E(z)$ a cada altura z :

$$J_c(z) = \sigma(z)E(z) \quad (2.12)$$

En ausencia de fuentes o sumideros de corriente, la corriente de conducción permanece constante con la altura:

$$\frac{dJ_c}{dz} = 0 \quad (2.13)$$

El campo eléctrico vertical está relacionado con la diferencia de potencial entre la superficie y la ionosfera mediante:

$$V_i = \int_0^{z_i} E(z) dz \quad (2.14)$$

donde z_i es la altura de la ionosfera ($z_i \approx 60 - 100 \text{ km}$).

La resistencia total R_c de la columna atmosférica se calcula como:

$$R_c = \int_0^{z_i} \frac{1}{\sigma(z)} dz \quad (2.15)$$

La corriente total del circuito global está dada entonces por:

$$I_c = \frac{V_i}{R_c} \quad (2.16)$$

Los valores típicos de estas magnitudes son:

- Potencial de la ionosfera: $V_i \approx 250 \text{ kV}$
- Resistencia total de la atmósfera: $R_c \approx 200 \Omega$
- Corriente total del circuito: $I_c \approx 1000 - 2000 \text{ A}$
- Densidad de corriente de buen tiempo: $J_c \approx 1 - 3 \text{ pA/m}^2$
- Campo eléctrico cerca de la superficie: $E(0) \approx 100 - 150 \text{ V/m}$

Las descargas eléctricas atmosféricas, incluyendo rayos intranube, nube-tierra y nube-ionosfera, son esenciales para el mantenimiento del potencial ionosférico y el equilibrio del circuito global. Estas descargas no solo redistribuyen carga localmente, sino que también transfieren carga hacia capas superiores de la atmósfera, restableciendo continuamente el campo eléctrico global [21].

En ausencia de tormentas, la ionosfera perdería carga progresivamente debido a las corrientes de conducción y recombinación de iones, lo que conduciría a una rápida disipación del campo eléctrico atmosférico.

El circuito eléctrico global constituye un sistema fundamental dentro de la electrodinámica atmosférica, siendo responsable del mantenimiento continuo del campo eléctrico terrestre y de la distribución de cargas entre la superficie y la ionosfera. Este sistema no solo se mantiene en un estado cuasi-estacionario mediante un delicado equilibrio entre procesos de carga y descarga, sino que también desempeña un papel crucial en fenómenos biológicos y ecológicos.

Además de su importancia física, este circuito ha influido en la evolución de cientos de especies. Por ejemplo, algunas especies de araña utilizan el fenómeno de *ballooning*, donde aprovechan las fuerzas electrostáticas del campo eléctrico atmosférico para predecir tormentas y desplazarse por el aire usando tela eléctricamente cargada, desplazándose a zonas en calma [22]. Así, el circuito eléctrico global no solo regula procesos atmosféricos, sino que también impacta el comportamiento biológico y la dinámica de la biosfera [20].

Aunque el circuito eléctrico global ha sido estudiado desde las investigaciones de Wilson, actualmente se reconoce que este sistema es considerablemente más complejo de lo que se pensaba originalmente. A diferencia del modelo clásico, en el que las tormentas eran consideradas las únicas fuentes principales de carga hacia la ionosfera, hoy se sabe que las descargas eléctricas en la atmósfera superior, conocidas como Eventos Luminosos Transitorios (TLEs, estudiadas en el siguiente capítulo), también juegan un papel relevante en la dinámica del circuito.

Entre estos fenómenos destacan los Gigantic Jets, que actúan como rayos invertidos, transfiriendo carga desde las nubes directamente hacia la ionosfera. Estas descargas, que conectan regiones altas de las tormentas con la ionosfera, contribuyen de manera significativa a la transferencia de carga, alterando localmente el campo eléctrico global y evidenciando la existencia de mecanismos adicionales que deben ser considerados para una descripción completa del sistema. Por tanto, el circuito eléctrico global sigue siendo objeto de investigación activa, especialmente en lo relativo a la interacción entre los procesos de baja atmósfera y los fenómenos de la mesosfera y termosfera. El circuito global es, por tanto, un campo abierto todavía a estudiar y comprender.

2.6. La Resonancia de Schumann

La Resonancia Schumann constituye un fenómeno electromagnético natural que se manifiesta en la cavidad formada entre la superficie terrestre y la ionosfera. Se trata de una serie de modos estacionarios de ondas electromagnéticas de muy baja frecuencia (ELF, *Extremely Low Frequency*; $3 - 30 \text{ kHz}$) generados, en su mayoría, por la actividad eléctrica atmosférica, especialmente por descargas de rayos [23, 24].

El fenómeno fue predicho teóricamente por Winfried Otto Schumann en 1952, al resolver la ecuación de onda para una cavidad esférica limitada por dos conductores: la Tierra y la ionosfera. Las condiciones de frontera permiten obtener las frecuencias propias de esta cavidad resonante, que están dadas, en su forma aproximada⁵, por la siguiente ecuación [25]:

⁵Se asimila el grosor de la cavidad (60 – 100 km) como muy pequeño comparado con el radio terrestre ($\sim 6371 \text{ km}$), y por tanto se toma el radio de la superficie de la Tierra como la base para los modos esféricos.

$$f_n \approx \frac{c}{2\pi R} \sqrt{n(n+1)} \quad (2.17)$$

donde:

- f_n es la frecuencia del modo n (en Hz),
- c es la velocidad de la luz en el vacío,
- R es el radio medio de la Tierra ($\approx 6,371 \times 10^6$ m),
- n es el número entero correspondiente al modo resonante.

No obstante, la ecuación 2.17 supone que la ionosfera actúa como una frontera perfectamente conductora y sin espesor, lo cual constituye una idealización. En realidad, la ionosfera posee una conductividad finita que varía con la altitud, así como un espesor variable que depende de factores como temperatura, estación del año, hora del día, entre otros. Estas características influyen en la propagación de las ondas electromagnéticas y modifican las frecuencias resonantes reales, explicando las discrepancias del orden del 20 % con respecto a las predicciones teóricas.

Debido a estos errores de aproximadamente el 20 %, se busca un modelo que realice menos aproximaciones. La NASA [26] propone un modelo que sí considera la altura de la ionosfera (h) y usa un valor medio de la conductividad en la atmósfera (σ), usando frecuencias complejas:

$$f_n = \frac{c}{2\pi R} \sqrt{n(n+1) \frac{1 - \frac{h}{R}}{\epsilon_r (1 + i \frac{\sigma}{\epsilon_r \epsilon_0 2\pi f_n})}} \quad (2.18)$$

Se puede simplificar con $A = \frac{c}{2\pi R} = 7,48 \text{ s}^{-1}$; $B(n) = 0,98 \cdot n(n+1)$ y $C(\sigma) = \frac{\sigma}{\epsilon_r \epsilon_0 2\pi} = 179,64 \text{ SFm}^{-1}$ para $\sigma = 10^{-8} \text{ S/m}$. Así, recolocando la ecuación en forma de una ecuación de segundo grado:

$$f_n^2 + iCf_n - A^2B = 0 \Rightarrow f_n = \frac{-iC \pm \sqrt{-C^2 + 4A^2B}}{2} = + \frac{\sqrt{-C^2 + 4A^2B}}{2} - i \frac{C}{2} \quad (2.19)$$

Tomamos la solución positiva, ya que la parte real corresponde a la frecuencia de oscilación, y es la parte imaginaria, que está relacionada con la amortiguación de la señal.

De esta manera, se puede realizar una tabla que compare los valores experimentales promedio medidos por Space Observing System [27], que los monitorea diariamente y compararlos con los modelos teóricos propuestos, para comparar la validez de las aproximaciones.

Cuadro 2.1: Comparación entre frecuencias experimentales, y los dos modelos, la aproximación y el complejo de las resonancias de Schumann (modos $n = 1$ a $n = 7$)

Modo n	f_n^{obs} [Hz]	$f_n^{\text{simple}} \pm \delta f_n$ [Hz]	Δf [%]	f_n^{comp} [Hz]	Δf_n^{comp} [%]
1	7.83	$10,59 \pm 0,04$	35 %	$10,46 \pm 0,02$	34 %
2	14.3	$18,35 \pm 0,06$	28 %	$18,14 \pm 0,03$	27 %
3	20.8	$25,94 \pm 0,09$	25 %	$25,66 \pm 0,05$	23 %
4	27.3	$33,5 \pm 0,1$	23 %	$33,13 \pm 0,07$	21 %
5	33.8	$41,0 \pm 0,1$	21 %	$40,57 \pm 0,09$	20 %
6	39.9	$48,5 \pm 0,2$	22 %	$48,0 \pm 0,1$	20 %
7	45.9	$56,0 \pm 0,2$	22 %	$55,4 \pm 0,1$	21 %

Y realizamos una representación gráfica para observar las tasas de cambio entre los distintos valores.

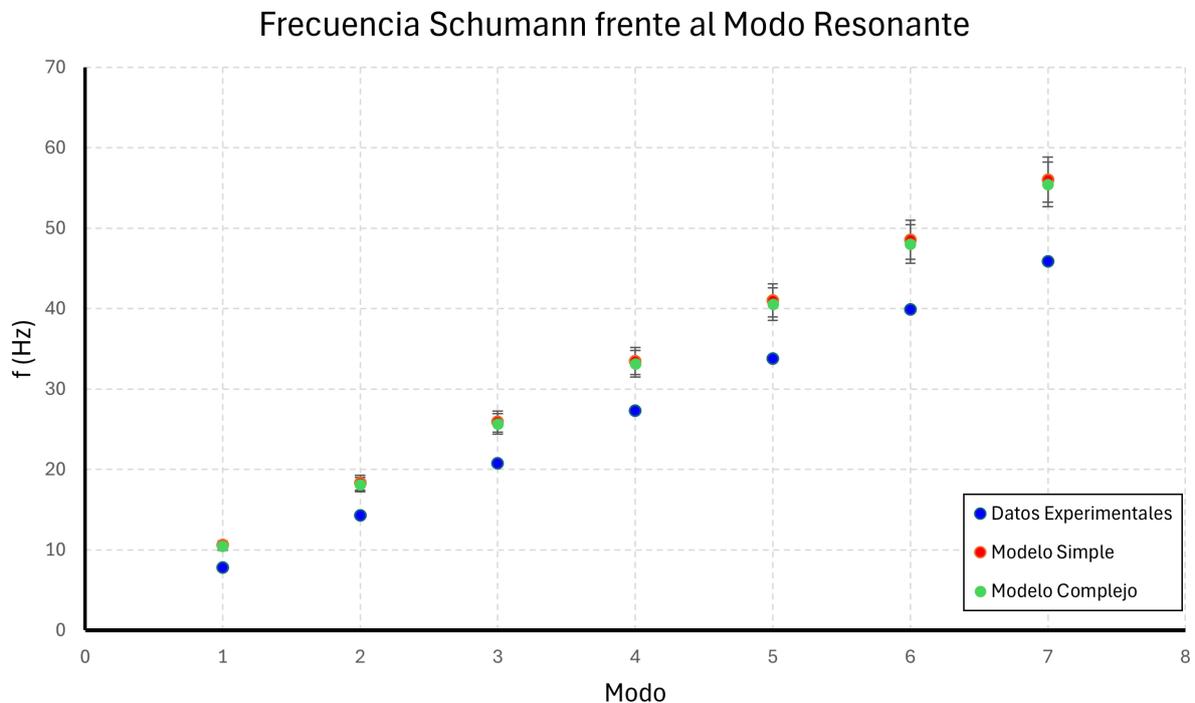


Figura 2.11: Tendencia de las autofrecuencias en función del modo de la resonancia Schumann medida experimentalmente en la realidad, y la calculada por ambos modelos descritos

Se observa que el modelo complejo proporciona resultados prácticamente equivalentes a los del modelo simple, reduciendo poco el error, un 1 % en general, aunque el modelo complejo proporciona información sobre la atenuación de la onda, lo que indica que considerar despreciable la altura de la ionosfera si era una buena aproximación. Ambos modelos comparten una limitación fundamental: la suposición de que la conductividad atmosférica es constante. Esta simplificación contribuye significativamente al desacuerdo con los valores observados. Una mejora sustancial en la precisión del modelo requeriría resolver directamente la ecuación de los armónicos esféricos a partir de las ecuaciones de Maxwell, sin recurrir a aproximaciones [25]. Sin embargo, dicho tratamiento excede el alcance de este trabajo.

Las resonancias de Schumann se han empleado como herramientas de diagnóstico remoto de la ionosfera, así como indicadores indirectos de la actividad eléctrica global, especialmente asociada a tormentas y descargas atmosféricas.

En el ámbito más especulativo, algunos estudios han sugerido posibles correlaciones entre las frecuencias de estas resonancias y determinados ritmos biológicos, como los ciclos circadianos o las ondas cerebrales. Sin embargo, tales hipótesis permanecen en entredicho dentro de la comunidad científica, debido a la falta de evidencia empírica robusta que las respalde [28].

Capítulo 3

Descargas Eléctricas en la Atmósfera

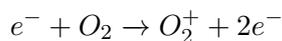
En este capítulo se presentan los fundamentos físicos y teóricos que explican la formación y propagación de las descargas eléctricas en la atmósfera. Se profundizará en conceptos clave como la ruptura dieléctrica del aire, necesaria para abrir un camino conductor de electrones que formará el rayo.

3.1. Formación del Rayo y Ruptura Dieléctrica

3.1.1. Ruptura Dieléctrica del Aire

Como todos sabemos, el aire es un aislante; la corriente no puede circular por él. Entonces, ¿cómo se explica un rayo?

En presencia de un campo eléctrico lo suficientemente grande, las moléculas del aire, principalmente O_2 y N_2 , se ionizan, liberando un electrón. A este fenómeno se le suma el efecto Townsend, Los electrones acelerados chocan contra moléculas de aire, transfiriéndoles energía. Si la energía transferida es suficiente (mayor a la energía de ionización del gas, que es $\sim 15,6 eV$ para el oxígeno), la molécula se ioniza, liberando más electrones:



Este proceso se repite en cadena, generando una avalancha electrónica que incrementa la cantidad de partículas cargadas.

La rigidez dieléctrica del aire, o campo eléctrico de ruptura E_b mide el campo que hay que aplicar para romper el aislante, depende de la presión P y la temperatura T . Se puede adaptar la Ley de Paschen, basada en un experimento con dos electrodos, a la tormenta eléctrica. Operaremos tres ecuaciones:

La Ley de Paschen, indica que el voltaje de ruptura del aire V_b entre dos electrodos es:

$$E_d = V_b/d = \frac{B \cdot P}{\ln(A \cdot Pd) - \ln(\ln(1 + 1/\gamma))} \quad (3.1)$$

donde:

- V_b es el voltaje de ruptura,
- P es la presión del aire,
- d es la distancia entre electrodos,
- A y B son constantes experimentales (para aire: $A \approx 112,5 \text{ kPa}^{-1}\text{mm}^{-1}$ y $B \approx 2737,5 \text{ V mm}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$),
- γ es el coeficiente de emisión secundaria, dependiente del material de los electrodos.

Además, vamos a suponer que el aire se comporta como un gas ideal, ya que la presión no es muy elevada y la temperatura es suficientemente alta.

$$PV = nRT \Rightarrow P = \frac{\rho RT}{M} \quad (3.2)$$

donde:

- ρ es la densidad del aire,
- R es la constante de los gases,
- M es la masa molar del aire.

Finalmente, el modelo de Townsend indica que la ionización de un gas ocurre cuando un electrón gana suficiente energía entre colisiones para ionizar una molécula. Esto se expresa como:

$$eE_b\lambda \geq W_i \quad (3.3)$$

donde:

- e es la carga del electrón,
- λ es la distancia promedio entre colisiones (camino libre medio),
- W_i es la energía de ionización del gas (aproximadamente $15,6\text{eV}$ para el aire).

Para ajustar la rigidez dieléctrica a temperaturas y presiones distintas de las condiciones normales (P_0, T_0), hemos aplicado la proporcionalidad derivada de las ecuaciones anteriores $\lambda \propto 1/n \propto P/k_bT \Rightarrow E_b \propto 1/\lambda \propto T/P$

$$E_b(P, T) = E_{b0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T}, \quad (3.4)$$

donde:

- E_{b0} es la rigidez dieléctrica en condiciones normales ($E_{b0} \approx 30 \text{ kV/cm}$ a 1 atm y 25°C),
- $P_0 = 101,3 \text{ kPa}$,
- $T_0 = 298 \text{ K}$ (25°C),

De esta manera, se puede calcular la resistencia dieléctrica frente a la presión y la temperatura, como se puede ver en la figura 3.1

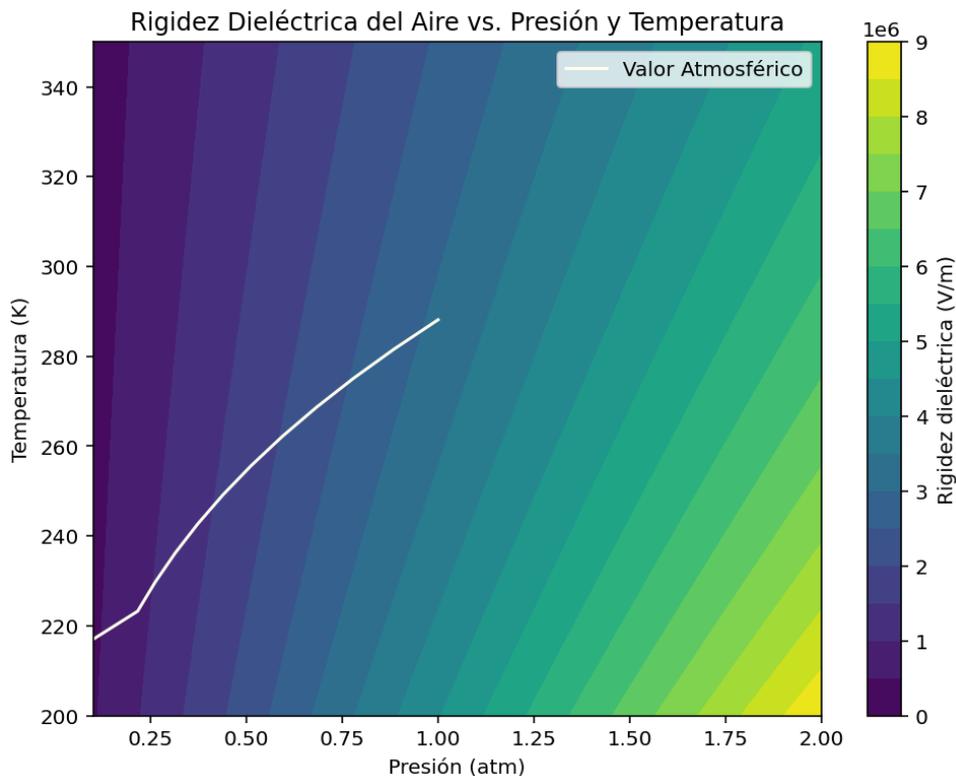


Figura 3.1: Valores de la rigidez dieléctrica del aire para los diferentes valores de presión y temperatura, En blanco, los valores de E_b del aire encontrados naturalmente en la atmósfera

Es importante conocer los valores de la ruptura dieléctrica, ya que serán la barrera a superar para la formación de las descargas eléctricas.

3.1.2. Guía escalonada

Un elemento clave en este proceso son las guías escalonadas, que son descargas eléctricas preliminares que ayudan a que el rayo se propague desde la nube hasta el suelo.

Cuando la carga negativa en la base es lo suficientemente intensa, inicia una descarga en el aire, formando pequeños caminos de ionización todavía invisibles, las guías escalonadas. Esta descarga no avanza en línea recta, sino en escalones de aproximadamente 50 metros, haciendo pausas breves antes de continuar su trayectoria, porque el líder necesita ionizar poco a poco el camino por el que avanzará. A medida que las guías escalonadas descienden, inducen la acumulación de cargas positivas en la superficie o en estructuras elevadas, facilitando la formación de una conexión entre la nube y el suelo y pudiendo, incluso pudiendo generar una guía desde el suelo, ascendiendo hacia la guía descendente. Finalmente, cuando una guía escalonada se acerca lo suficiente, una descarga ascendente positiva surge desde el suelo y se encuentra con él, permitiendo el paso de una intensa corriente eléctrica que se manifiesta como el rayo visible, representado en

la figura 3.2.

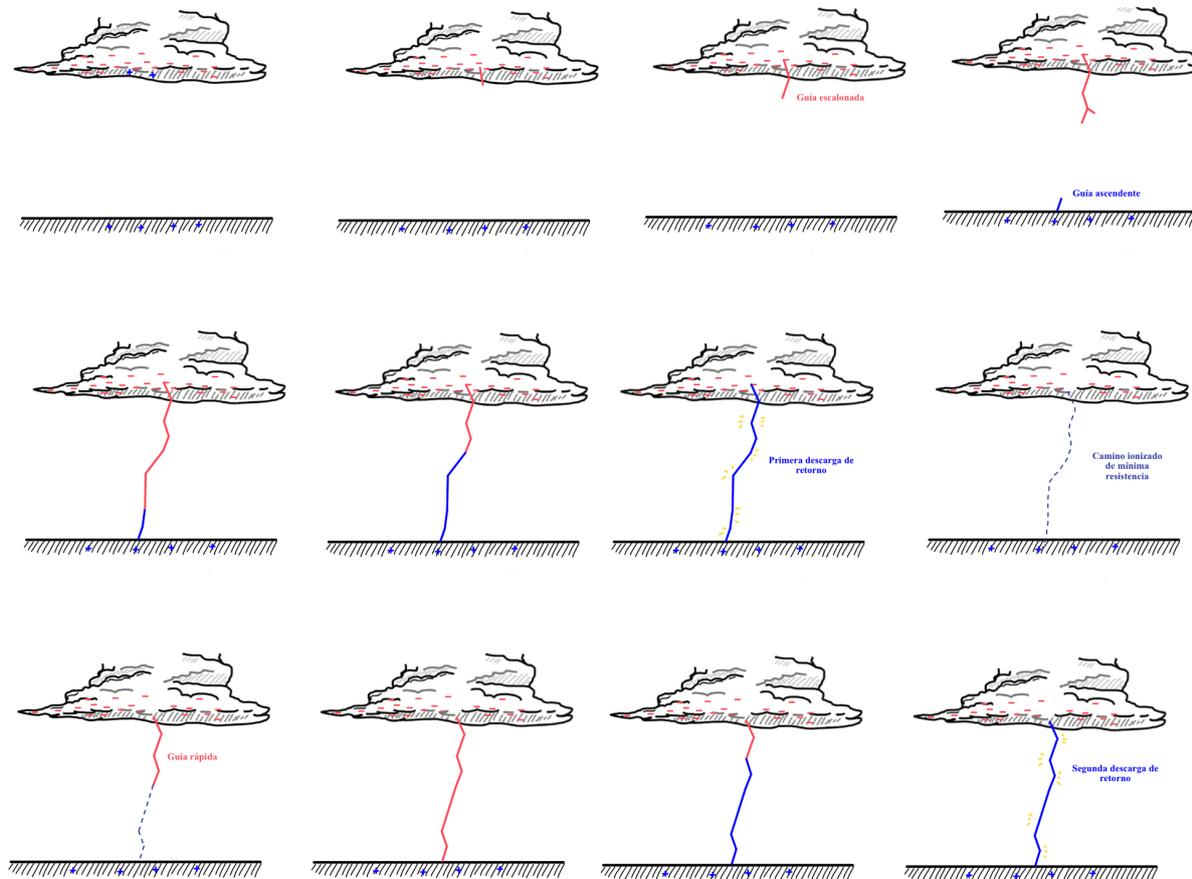


Figura 3.2: Proceso de formación del líder escalonado, así como líderes precursores

Un rayo puede alcanzar temperaturas de hasta $30,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que es aproximadamente cinco veces la temperatura de la superficie del Sol. Cuando el rayo atraviesa el medio, el aire a su alrededor se calienta de forma explosiva, por la Ley de Gases Ideales, al calentarse tan sumamente rápido, este aumento repentino de la temperatura solo puede ser compensado por un aumento de la presión, ya que es tan rápido que al aire no le da tiempo a aumentar su volumen, creando una fuerte onda de choque conocida como el trueno.

3.2. Tipos de Descargas Eléctricas en la Atmósfera

Las descargas eléctricas en la atmósfera pueden clasificarse en diferentes tipos según su trayectoria y el medio en el que ocurren. Cada una de ellas tiene características particulares y desempeña un papel fundamental en la dinámica de las tormentas eléctricas.

3.2.1. Descargas intra-nube (IC)

Las descargas intra-nube son las más comunes, representando aproximadamente el 70-80 % de todas las descargas eléctricas en la atmósfera. Ocurren dentro de una misma nube de tormenta,

cuando hay una separación de cargas entre la parte superior positiva y la parte media-negativa de la nube. Este tipo de rayo no toca el suelo y suele manifestarse como un resplandor difuso dentro de la nube. Su aparición es indicativa de una fuerte electrificación dentro de la tormenta y, en muchos casos, precede a las descargas más intensas que pueden alcanzar la superficie, aunque en sentido estricto alivia la diferencia de carga en la nube.



Figura 3.3: Ejemplo de descarga intranube, el tipo de descargas más común. Imagen: [29]

3.2.2. Descargas nube-tierra (CG)

Las descargas nube-tierra son las más espectaculares y peligrosas, ya que transfieren carga eléctrica entre la nube y el suelo, como se puede ver en la figura 3.4. Se dividen en dos categorías principales:

- Por un lado, el rayo nube-tierra negativo (-CG) es el tipo más frecuente, constituyendo cerca del 90 % de los rayos que alcanzan la superficie. Se origina en la región de carga negativa de la nube y avanza hacia el suelo mediante un mecanismo de propagación conocido como líder escalonado, que desciende en pasos sucesivos de decenas de metros. Cuando este líder se acerca lo suficiente a la superficie, induce la formación de un líder ascendente desde objetos elevados, como árboles, edificios o torres. En el momento en que ambos líderes se conectan, se produce una intensa corriente de retorno que da lugar al destello brillante característico del rayo.
- Por otro lado, el rayo nube-tierra positivo (+CG) es menos común (solo el 10 % de los casos), pero suele ser más energético y peligroso. Se origina en la parte superior de la nube de tormenta, donde se encuentra la carga positiva, y se propaga en un solo tramo continuo, sin la estructura ramificada típica del líder escalonado. Este tipo de rayo puede recorrer largas distancias horizontales antes de impactar en el suelo, lo que lo hace especialmente impredecible. Se asocia frecuentemente con tormentas intensas y sistemas convectivos organizados, como superceldas y complejos convectivos de mesoescala. Esta descarga es más común en las tormentas de invierno, mucho menos habituales, porque las nubes suelen tener menor altura y las regiones positivas de carga se encuentran más cercanas al suelo.



Figura 3.4: Descargas tierra-nube. La diferencia de carga es suficiente para romper el dieléctrico del aire desde la nube hasta la Tierra, creando un canal de aire ionizado por el que se desplaza la carga, el rayo. Imagen: [30]

3.2.3. Descargas nube-nube (CC)

Las descargas nube-nube ocurren cuando se establece una conexión eléctrica entre dos nubes de tormenta con regiones de carga opuesta. Estos rayos permiten el intercambio de carga entre diferentes sistemas nubosos y pueden desempeñar un papel en la estabilización del campo eléctrico atmosférico. Son comunes en tormentas multicelulares y sistemas convectivos de gran escala.



Figura 3.5: Ejemplo de descarga nube-nube, cuando tenemos sistemas con presencia de varias nubes, la región cargada de una de ellas puede descargar sobre la región de carga opuesta de su vecina. Imagen: [31]

3.2.4. Descargas de la atmósfera superior (TLEs - Transient Luminous Events)

Más allá de los rayos convencionales, existen descargas eléctricas que ocurren en las capas superiores de la atmósfera, como la estratósfera y la mesosfera. Estas descargas, denominadas Eventos Luminiscentes Transitorios (TLEs), incluyen varios fenómenos distintos:

Sprites (duendes rojos): Son descargas eléctricas transitorias que ocurren en la mesosfera, a altitudes de entre 50 y 90 km. Se generan como respuesta a rayos nube-tierra de polaridad

positiva (+CG) muy intensos. Los sprites suelen adoptar formas de columnas o estructuras ramificadas similares a medusas, y su duración es de apenas unos pocos milisegundos. Su color rojo característico se debe a la excitación del nitrógeno molecular en la alta atmósfera, que emite luz predominantemente en el rojo cuando retorna a su estado fundamental.



Figura 3.6: Sprite observado en la mesosfera. Su color rojo proviene de la emisión del nitrógeno excitado en la alta atmósfera. Imagen: [32]

Blue Jets (chorros azules): Son fenómenos luminosos que se originan en la parte superior de las nubes de tormenta y se propagan hacia arriba, penetrando la estratósfera y alcanzando altitudes de hasta 50 km. Se cree que están relacionados con acumulaciones de carga positiva en la región superior de la nube. Su característico color azul se debe a la excitación del nitrógeno molecular en capas más densas de la atmósfera, donde la emisión dominante ocurre en el rango azul del espectro. Los Blue Jets podrían desempeñar un papel importante en los procesos de acoplamiento eléctrico entre la troposfera y la estratósfera.

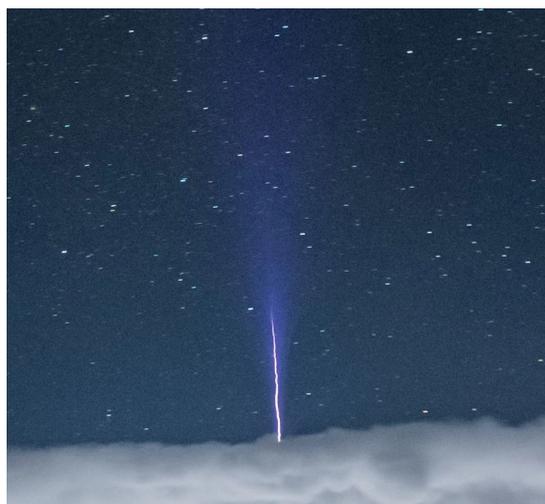


Figura 3.7: Blue Jet ascendiendo desde la cima de una nube de tormenta hacia la estratósfera. Su tonalidad azul se debe a la emisión del nitrógeno excitado en regiones más densas de la atmósfera. Imagen: [33]

Elves: Son breves destellos en forma de anillo que se expanden horizontalmente a gran velocidad en la parte baja de la ionosfera, típicamente entre los 90 y 100 km de altitud. Se generan por la interacción de potentes pulsos electromagnéticos (LEMPs) emitidos por rayos muy intensos con la ionosfera. La energía de estos pulsos excita moléculas de nitrógeno. La duración del fenómeno es extremadamente corta, del orden de milisegundos, y su diámetro puede alcanzar varios cientos de kilómetros.



Figura 3.8: Elve expandiéndose en forma de anillo luminoso en la baja ionosfera tras un pulso electromagnético generado por un rayo. Imagen: [34]

Gigantic Jets: Son descargas eléctricas transitorias que se asemejan a los Blue Jets, pero son considerablemente más energéticas y con una mayor extensión vertical. Pueden alcanzar alturas de hasta 90 km, conectando directamente la parte superior de las nubes de tormenta con la ionosfera. Se consideran una forma de “rayo invertido”, ya que transportan carga eléctrica desde la nube hacia las capas superiores de la atmósfera, posiblemente contribuyendo al equilibrio global del circuito eléctrico atmosférico. Su color puede variar entre azul y morado, dependiendo de la densidad del aire y del tipo de moléculas excitadas durante la descarga.



Figura 3.9: Gigantic Jet emergiendo desde una tormenta y extendiéndose hasta la ionosfera. Su gran energía y longitud lo distinguen de otros eventos eléctricos transitorios. Imagen: [35]

3.3. Impacto en Sociedad e Infraestructura

Aunque el impacto de las tormentas y los rayos se manifiesta en múltiples dimensiones, abarcando aspectos culturales, sociales y económicos. Según datos proporcionados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), entre 1970 y la actualidad, estos fenómenos atmosféricos han sido responsables de más de 500.000 muertes y han generado pérdidas económicas superiores a 3,82 billones de euros. En esta sección, se abordará principalmente el impacto de las tormentas y los rayos desde un enfoque físico y tecnológico, su interacción con infraestructuras y los avances tecnológicos orientados a su detección, protección y mitigación.

Los rayos, representan una amenaza significativa para las infraestructuras humanas. Este fenómeno natural, caracterizado por la liberación instantánea de una enorme cantidad de energía eléctrica, puede tener efectos devastadores si no se implementan sistemas de protección adecuados. En esta sección, se analizará en profundidad cómo los rayos afectan a las infraestructuras, desde redes eléctricas hasta edificios, y se describirán los mecanismos de protección más efectivos.

Los rayos pueden dañar las infraestructuras humanas de tres formas principales.

- **Daños Directos:** Ocurren cuando un rayo impacta directamente una estructura, como una torre de transmisión o un edificio. La corriente del rayo, que puede alcanzar valores de hasta 200 kA, genera un sobrecalentamiento instantáneo que provoca incendios, fusión de metales e incluso explosiones si la corriente atraviesa materiales conductores confinados.
- **Daños Indirectos:** Estos se producen cuando un rayo impacta cerca de una estructura, generando campos electromagnéticos transitorios (LEMP, Lightning Electromagnetic Pulse) que inducen tensiones en conductores cercanos. Estos voltajes pueden alcanzar valores de hasta 500 kV en líneas eléctricas expuestas.
- **Interferencia Electromagnética:** La radiación electromagnética generada por el rayo puede afectar las señales de comunicación en radiofrecuencia, televisión y redes de datos, causando pérdida de señal o distorsión.

Cuando un rayo impacta una línea de transmisión o una estructura cercana, genera una onda de sobretensión que se propaga a lo largo del sistema eléctrico. Esta onda se caracteriza por su alta velocidad de propagación (cercana a la velocidad de la luz) y su alta amplitud.

El tipo de daño más probable asociado a las descargas atmosféricas es el daño indirecto, derivado principalmente de la inducción de campos electromagnéticos transitorios. A diferencia de los impactos directos, para los cuales existen múltiples sistemas de protección estandarizados, como los pararrayos y las mallas de puesta a tierra, la mitigación de los efectos del LEMP plantea desafíos significativos. Esto se debe a la capacidad de los campos electromagnéticos para inducir tensiones peligrosas en conductores cercanos, incluso sin contacto físico directo.

Matemáticamente, la magnitud del voltaje inducido se puede estimar mediante la Ley de Faraday:

$$V = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.5)$$

Donde Φ_B es el flujo magnético a través del área afectada. Para un rayo típico que genera un campo magnético $B = 0,1$ T a una distancia de 50 m en un intervalo temporal de 10^{-6} s, y un área expuesta de $0,5$ m², que puede corresponder a la superficie de un conductor en una línea eléctrica aérea, una bobina o cualquier circuito eléctrico, el flujo magnético inducido se puede determinar como:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = B \cdot A$$

Suponiendo un campo magnético aproximadamente constante durante la duración del pulso, y considerando que el vector campo magnético es perpendicular a la superficie expuesta, se simplifica el cálculo del flujo magnético. Esta aproximación, aunque idealizada, resulta útil para obtener estimaciones de órdenes de magnitud, proporcionando una base para el análisis preliminar sin perder rigor físico. Así, se obtiene un voltaje inducido:

$$V \approx -\frac{(0,1 \text{ T})(0,5 \text{ m}^2)}{10^{-6} \text{ s}} = -50 \text{ kV} \quad (3.6)$$

Este voltaje inducido se propaga a través de la red, pudiendo afectar equipos electrónicos sensibles y causando fallos en la infraestructura eléctrica. En Europa, los sistemas domésticos (líneas de baja tensión) están diseñados para soportar sobretensiones de 220-240 V, y los sistemas industriales (media tensión) están preparados para tolerar un máximo de 36 kV. Sin embargo, cuando las sobretensiones inducidas por fenómenos como los rayos superan estos umbrales, los equipos electrónicos y las instalaciones pueden sufrir daños irreparables. En particular, las sobretensiones transitorias (tipo LEMP) pueden inducir picos de tensión que sobrepasen la capacidad de protección estándar de los sistemas eléctricos, lo que lleva a fallos de componentes, cortocircuitos y pérdida de datos en equipos sensibles. Para mitigar estos efectos, se implementan dispositivos de protección como descargadores de sobretensión y sistemas de puesta a tierra adecuados, pero la efectividad de estos sistemas depende de la magnitud del evento y de la correcta instalación de los mismos.

Los pararrayos son dispositivos diseñados para proteger estructuras frente a impactos directos de rayos. Consisten en una varilla metálica conectada a un sistema de puesta a tierra, proporcionando una trayectoria de baja impedancia para la corriente del rayo. Sus componentes esenciales son: punta de captura, conductor descendente y sistema de tierra [36].

Los descargadores de sobretensión son dispositivos destinados a proteger sistemas eléctricos frente a sobretensiones transitorias. Funcionan desviando el exceso de energía hacia tierra, limitando la tensión aplicada a los equipos conectados [37]. Un ejemplo común son los varistores de óxido metálico (MOV), cuya resistencia disminuye drásticamente al superar un umbral de tensión, permitiendo el acceso de la sobretensión a tierra [38].

La efectividad de los pararrayos y descargadores de sobretensión depende de una conexión adecuada a tierra, garantizando una resistencia suficientemente baja para disipar la corriente del rayo sin riesgo de sobrecalentamiento. Esto se logra mediante electrodos o barras de puesta a tierra adecuadamente dimensionados y conectados [39].

Una protección efectiva frente a fenómenos atmosféricos requiere un enfoque combinado: la instalación de pararrayos para descargas directas y descargadores de sobretensión para transitorios eléctricos.

Capítulo 4

Metodología experimental

En este capítulo describiremos el estudio y análisis de diferentes experimentos que se han diseñado para estudiar las características de las descargas eléctricas en la atmósfera.

4.1. Determinación del Perfil de Frecuencias emitido por el Pulso EM de un Rayo

4.1.1. Introducción

Una magnitud fundamental para la caracterización de un rayo es pulso electromagnético generado, conocido como LEMP (Lightning ElectroMagnetic Pulse), ya estudiado. El análisis espectral del LEMP proporciona información detallada sobre la distribución energética de la radiación electromagnética emitida durante la descarga, lo cual resulta esencial para evaluar sus efectos sobre infraestructuras sensibles, como sistemas electrónicos, redes de comunicación y equipamiento aeronáutico.

Como se analizó en el capítulo anterior, el LEMP es responsable de la mayoría de los daños indirectos provocados por las tormentas, lo que acarrea pérdidas económicas significativas. Debido a su potencial destructivo, es crucial entender el LEMP y sus características, para poder implementar medidas de protección eficaces que minimicen su impacto en infraestructuras y equipos sensibles.

El objetivo de esta sección es obtener el perfil espectral asociado a una descarga eléctrica atmosférica mediante análisis de Fourier y compararlo con el espectro electromagnético medido en condiciones de buen tiempo, con el fin de identificar diferencias significativas en la distribución de frecuencias que permitan distinguir eventos de origen natural.

4.1.2. Dispositivo experimental

El dispositivo experimental (Fig. 4.1) diseñado para la detección y análisis del perfil de frecuencias del pulso electromagnético generado por rayos se compone de los siguientes elementos:

- **Osciloscopio digital Rohde&Schwarz RTM3004**, con una tasa de muestreo de hasta 5 GSa/s y un ancho de banda de 500 MHz. Esta resolución temporal permite capturar señales transitorias muy rápidas, como las asociadas al frente de onda del LEMP.
- **Antena monopolo de longitud variable (aproximadamente 1 metro)**, que actúa como sensor de campo eléctrico en el rango de frecuencias bajas. Aunque no está optimizada para la banda ELF, permite captar variaciones rápidas del campo eléctrico sin necesidad de sintonización.
- **Adaptador de acoplamiento**, que garantiza la correcta transferencia de señal entre la antena y el osciloscopio.
- **Generador de funciones programable**, utilizado para generar señales de prueba conocidas y así calibrar y validar la respuesta del sistema antes de cada sesión de adquisición.

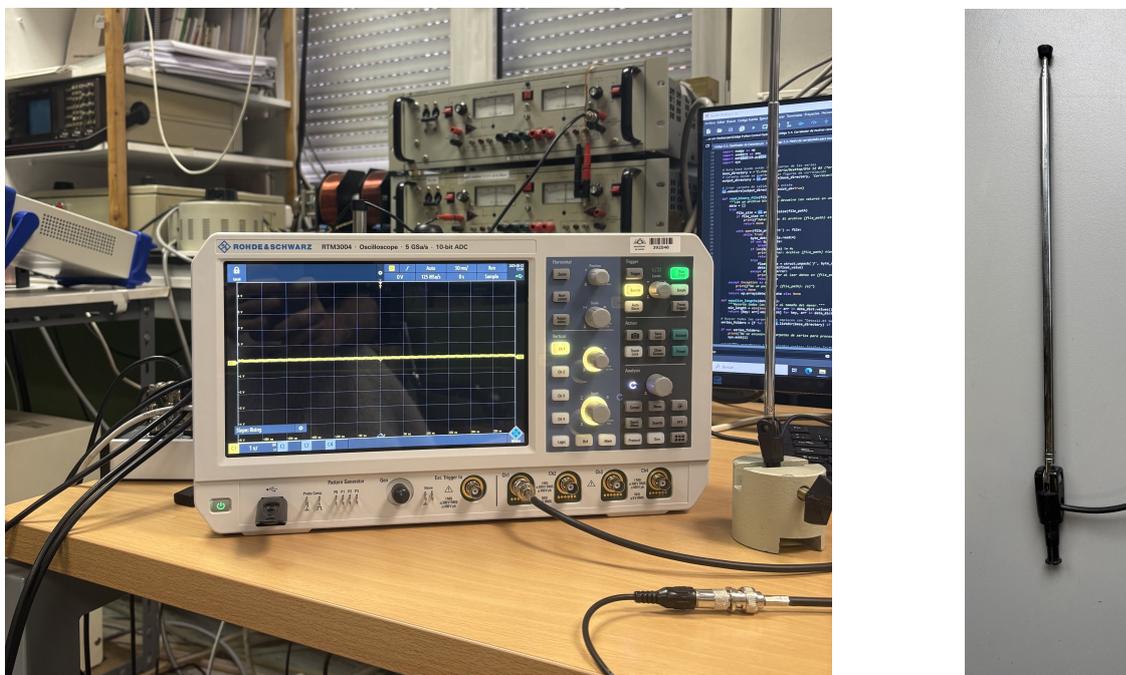


Figura 4.1: A la izquierda, montaje experimental con el osciloscopio digital para el registro de datos. A la derecha, antena monopolo vertical empleada como sensor.

Para la adquisición automatizada y el posterior análisis de los datos, tanto el osciloscopio como el generador de funciones se controlan desde un ordenador mediante interfaz de comandos, lo que permite realizar mediciones en serie y almacenar grandes volúmenes de información con precisión temporal.

El experimento se instaló en uno de los Laboratorios de Investigación de la Facultad de Ciencias (4.2), donde se dispone de acceso permanente a la instrumentación y capacidad de supervisión constante. Aunque este entorno no está libre de interferencias electromagnéticas, se consideró la opción más viable dada la imposibilidad de trasladar el sistema a un entorno

aislado. Se ha asumido esta limitación como parte del diseño experimental, y se tienen en cuenta sus efectos durante la fase de análisis de datos.



Figura 4.2: Dispositivo experimental completo en el Laboratorio de la Facultad de Ciencias

Por otro lado, para asegurarnos que el evento medido se trata de un rayo y no de ruido casual, empleamos la aplicación *Lightning Tracker & Alerts* [40], que nos permitirá conocer la hora y ubicación de la descarga .

4.1.3. Procedimiento

El objetivo principal del dispositivo experimental es registrar y caracterizar los pulsos electromagnéticos generados por descargas eléctricas atmosféricas (LEMP). Para ello, se diseñaron y evaluaron dos estrategias de adquisición de datos, cada una con sus respectivas ventajas y limitaciones.

- **Adquisición condicionada por umbral de voltaje.** En un primer intento, se desarrolló un algoritmo de control para el osciloscopio que activaba la adquisición únicamente cuando la señal superaba un umbral de voltaje previamente definido. Esta técnica, basada en la detección de eventos transitorios mediante disparo, resultaba conceptualmente eficiente al minimizar el volumen de datos almacenado y enfocarse exclusivamente en señales relevantes. Sin embargo, su aplicación práctica presentó problemas considerables: la elevada

presencia de ruido electromagnético de fondo obligó a fijar un umbral relativamente alto para evitar falsas detecciones. Como consecuencia, muchos pulsos LEMP reales, de corta duración (del orden de decenas de microsegundos) y amplitud moderada, no alcanzaban dicho umbral o no eran detectados en su totalidad, por el retraso electrónico de utilizar el propio pulso como *trigger*, lo que implicaba la pérdida de información clave. Esta limitación en la sensibilidad temporal y la fiabilidad del disparo llevó a descartar esta metodología.

- Adquisición continua con análisis posterior.** La segunda aproximación consistió en programar el osciloscopio para realizar adquisiciones de forma continua, generando series temporales de datos que posteriormente serían analizadas para detectar la presencia de señales relevantes. Este método garantiza la detección de eventos sin depender de condiciones de disparo, pero presenta una limitación importante: debido al tiempo necesario para guardar y reiniciar cada adquisición, se pierde una fracción del tiempo total de observación. A pesar de ello, esta estrategia fue adoptada por su mayor robustez y por garantizar la captura completa del pulso en los casos registrados.

El osciloscopio permite obtener una representación de la señal en el dominio temporal, es decir, voltaje en función del tiempo. Sin embargo, los fenómenos electromagnéticos como el LEMP se caracterizan mejor en el dominio espectral, ya que su información se distribuye en bandas de frecuencia específicas. Para ello, se aplicó la Transformada de Fourier discreta, que permite descomponer cada señal temporal en una combinación de componentes sinusoidales de diferentes frecuencias. Esta transformación facilita la identificación de patrones espectrales característicos de los rayos y su distinción respecto al ruido de fondo.

El flujo completo del procedimiento, desde la adquisición hasta la caracterización de la señal, se ilustra esquemáticamente en la Figura 4.3.

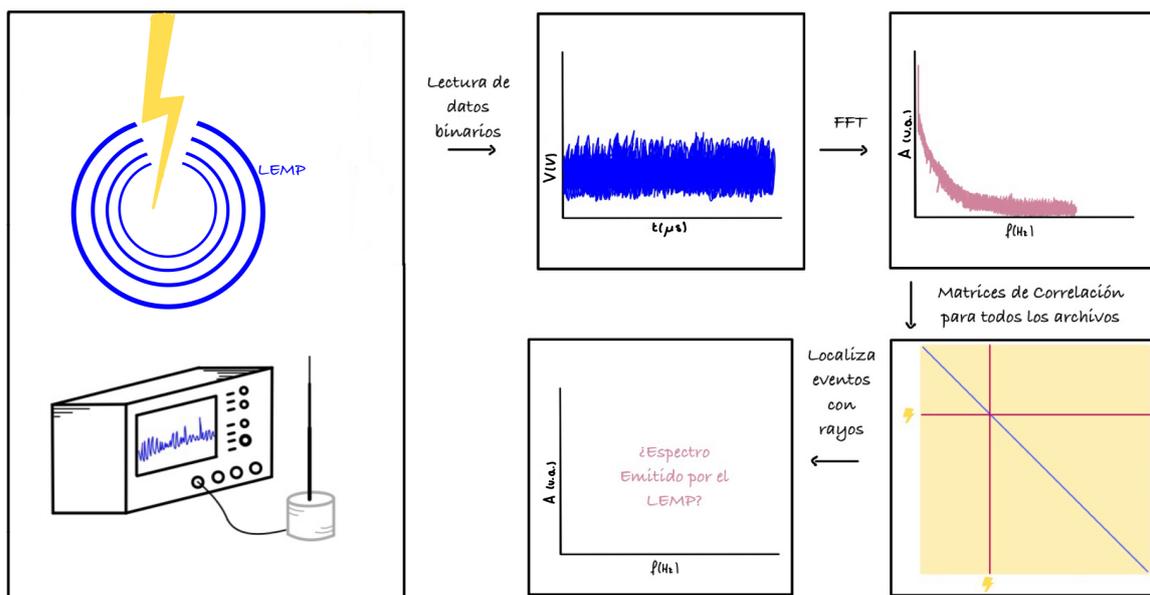


Figura 4.3: Diagrama de flujo de trabajo del procedimiento de adquisición y análisis de datos.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la adquisición continua de datos presenta limitaciones operativas. Durante el proceso de captura, el osciloscopio alterna entre periodos de medición y de refresco (procesamiento y almacenamiento de datos), lo que impone interrupciones inevitables. Experimentalmente se observó que al aumentar la ventana de integración, es decir, al extender el tiempo durante el cual el osciloscopio realiza la adquisición, disminuye el cociente entre el tiempo de refresco y el tiempo total de integración, lo cual incrementa la probabilidad de registrar un evento transitorio como un rayo.

Por otro lado, para caracterizar con mayor precisión el perfil temporal del pulso del rayo, es deseable utilizar ventanas de integración más cortas, ya que estas permiten una mayor densidad de muestreo (mayor número de puntos por unidad de tiempo), y por tanto, una mejor resolución temporal.

Se plantea entonces la necesidad de alcanzar un compromiso entre ambos factores. A partir de la bibliografía se establece que los tiempos característicos de los pulsos electromagnéticos generados por rayos son del orden de $30 \mu s$ [41].

Con base en esto, se determinó el número de archivos por minuto que podían ser adquiridos para diferentes ventanas de integración, considerando un intervalo de muestreo adecuado para registrar pulsos de tan corta duración. Dado que el osciloscopio Rohde & Schwarz RTM3004 opera con una tasa de muestreo de hasta 5 GSa/s , se obtiene un intervalo entre muestras de:

$$\delta t = \frac{1}{5 \times 10^9 \text{ samples/s}} = 0,2 \text{ ns}$$

Para una ventana de integración de $t = 500 \text{ ms}$, el número máximo teórico de puntos sería:

$$N = \frac{500 \times 10^{-3}}{0,2 \times 10^{-9}} = 2,5 \times 10^9 \text{ puntos}$$

No obstante, este valor excede con creces la capacidad de memoria del dispositivo, cuya capacidad máxima por canal es de 80 millones de puntos (80 Mpts), lo cual limita la duración efectiva de la ventana de integración si se desea mantener la resolución máxima. Esto limita la δt del osciloscopio automáticamente a $3 \mu s$, lo que implica una frecuencia de muestreo de unos 333 kHz

El teorema de Nyquist establece que, para muestrear adecuadamente una señal continua y evitar el fenómeno de *aliasing* (pérdida de información por insuficiente frecuencia de muestreo), la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima de la señal, es decir:

$$F_s \geq 2f_{max} \quad (4.1)$$

donde F_s es la frecuencia de muestreo y f_{max} es la frecuencia máxima de la señal de interés. Sin embargo, al trabajar con pulsos de voltaje, el principal reto no es solo la frecuencia máxima, sino también la duración de los pulsos. Un pulso de voltaje es una señal transitoria que varía rápidamente en el tiempo y debe ser muestreada a una tasa suficientemente alta para capturar sus transiciones.

Es necesario considerar cuántos puntos de muestreo son necesarios para reconstruir correctamente la forma temporal del pulso. Si el pulso tiene una duración característica, por ejemplo, de $30 \mu s$, es fundamental tener múltiples puntos de muestreo dentro de este intervalo para capturar sus características. Un criterio común es tomar al menos 10 puntos dentro de la duración del pulso.

Si asumimos que un pulso dura $30 \mu s$, entonces el intervalo de muestreo mínimo necesario sería:

$$\Delta t = \frac{30 \mu s}{10} = 3 \mu s$$

Lo que implica una frecuencia de muestreo mínima de:

$$F_s = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{1,5 \mu s} \approx 333 \text{ kHz}$$

Nuestro dispositivo experimental opera en el límite establecido por el teorema de Nyquist. Aunque no ofrece una frecuencia de muestreo óptima para caracterizar con máxima precisión los pulsos LEMP, su rendimiento es adecuado para capturar los eventos de interés de manera suficiente para los fines del estudio.

En la práctica, se observó que solo se registraba aproximadamente un 55 % del tiempo total disponible (calculado como el producto entre el número de archivos adquiridos por el tiempo de integración, dividido entre el tiempo total de adquisición). Esto implica que se captará, en promedio, 1 de cada 2 rayos, lo cual se considera suficiente en el contexto de una tormenta eléctrica, donde se esperan múltiples descargas.

Para identificar entre los archivos adquiridos aquellos que contienen eventos anómalos (posiblemente asociados a rayos) se empleó un análisis estadístico basado en la matriz de correlación entre espectros de frecuencia. La hipótesis de partida es que las señales correspondientes a ruido ambiental presentan un perfil espectral relativamente constante, mientras que los pulsos LEMP muestran distribuciones espectrales significativamente distintas.

En concreto, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson como métrica para cuantificar la similitud entre espectros. Este coeficiente mide la relación lineal entre dos vectores de datos y se define como:

$$r_{ij} = \frac{\text{cov}(X_i, X_j)}{\sigma_i \sigma_j}$$

donde r_{ij} representa el coeficiente de correlación entre los espectros X_i y X_j , $\text{cov}(X_i, X_j)$ es la covarianza entre ellos, y σ_i, σ_j son las desviaciones estándar correspondientes. Si dos archivos presentan espectros muy similares, su correlación será próxima a 1. En cambio, si uno de los espectros corresponde a una señal con un perfil distinto (como lo que se espera en un pulso LEMP) la correlación con el fondo será baja, acercándose a cero.

Este método permite realizar una primera clasificación de los datos en función de su semejanza estadística, y facilita la detección automática de eventos candidatos a ser analizados con mayor

detalle.

4.1.4. Generación de Rayos Sintéticos

Con el fin de comprobar la fiabilidad del sistema experimental y evaluar su capacidad para distinguir pulsos electromagnéticos reales frente al ruido de fondo, se diseñó un experimento de validación basado en la inyección controlada de señales conocidas. Para ello, se utilizó un generador de funciones arbitrarias (véase Anexo), programado para emitir una secuencia de pulsos aleatorios simulando la firma espectral característica de un rayo.

El modelo empleado reproduce el perfil temporal típico del campo eléctrico inducido por un rayo, descrito mediante una función doble exponencial de la forma:

$$y(t) = A \cdot \left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t} \right) \quad (4.2)$$

donde los parámetros se fijaron en $A = 2,5 \text{ V}$, $\alpha = 10^6 \mu\text{s}^{-1}$ y $\beta = 4 \cdot 10^5 \mu\text{s}^{-1}$. Estos valores, aunque ajustados de forma arbitraria, fueron seleccionados para aproximar la forma real del pulso electromagnético generado por un impacto de rayo. Este perfil corresponde al denominado pulso WF4, ampliamente utilizado en la industria aeronáutica como modelo estándar de descarga atmosférica (según normativa RTCA DO-160) [41], representado en la figura 4.4.

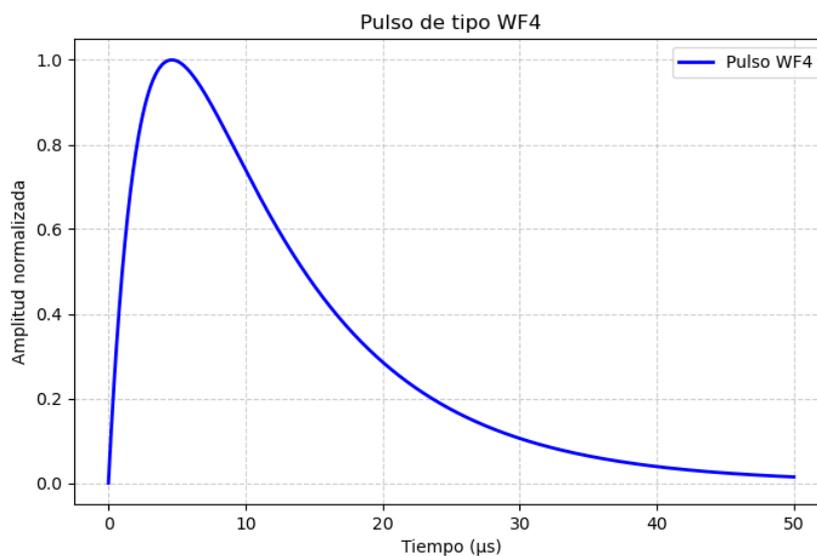


Figura 4.4: Pulso tipo WF4 empleado en aviación, utilizado como señal de referencia para la simulación de rayos. La amplitud está normalizada.

De este modo, se generan pulsos electromagnéticos utilizando la ecuación previamente mencionada. Adicionalmente, se incorpora un componente de ruido aleatorio con el fin de simular las condiciones reales de medición obtenidas por la antena (Figura 4.5). Estudiamos además su espectro de frecuencias mediante la transformada de Fourier rápida (FFT).

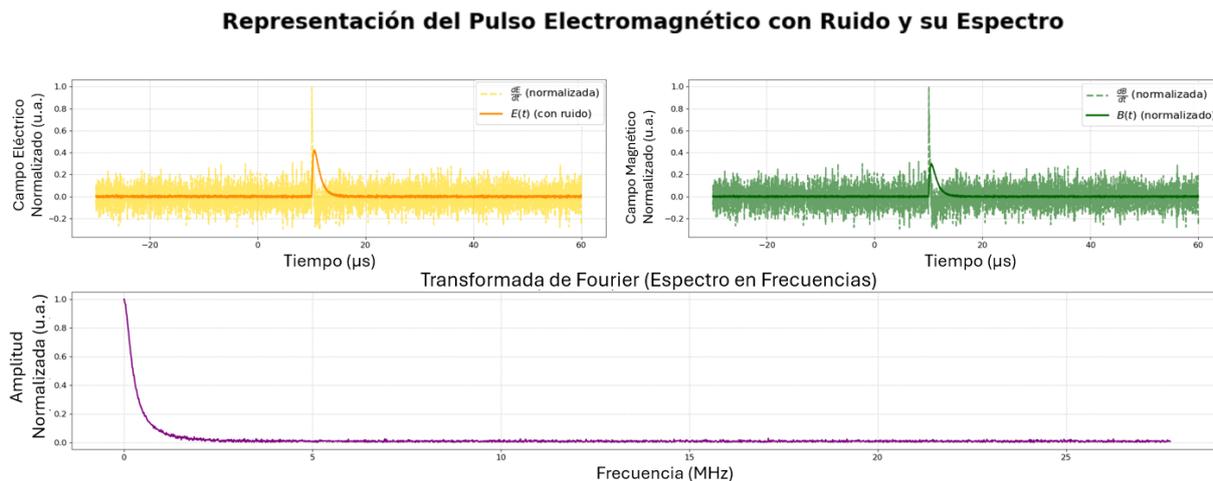


Figura 4.5: Representación del campo eléctrico y magnético del pulso WF4 y sus derivadas con ruido aleatorio, junto con su transformada de Fourier

El generador de funciones fue configurado para emitir pulsos WF4 de forma pseudoaleatoria durante intervalos de 10 segundos, evitando patrones periódicos que pudieran introducir artefactos en el análisis espectral. Estas señales fueron registradas por el osciloscopio y almacenadas en formato binario, lo que permite optimizar el tiempo de transferencia y maximizar la eficiencia del sistema durante campañas prolongadas de adquisición.

Una vez recopilados los datos, se aplicó el procedimiento de análisis desarrollado previamente, basado en la Transformada de Fourier y el cálculo de la correlación de Pearson entre espectros. La Figura 4.20 muestra la matriz de correlación obtenida para una secuencia de eventos, destacando claramente los pulsos inyectados como elementos con baja correlación respecto al fondo.

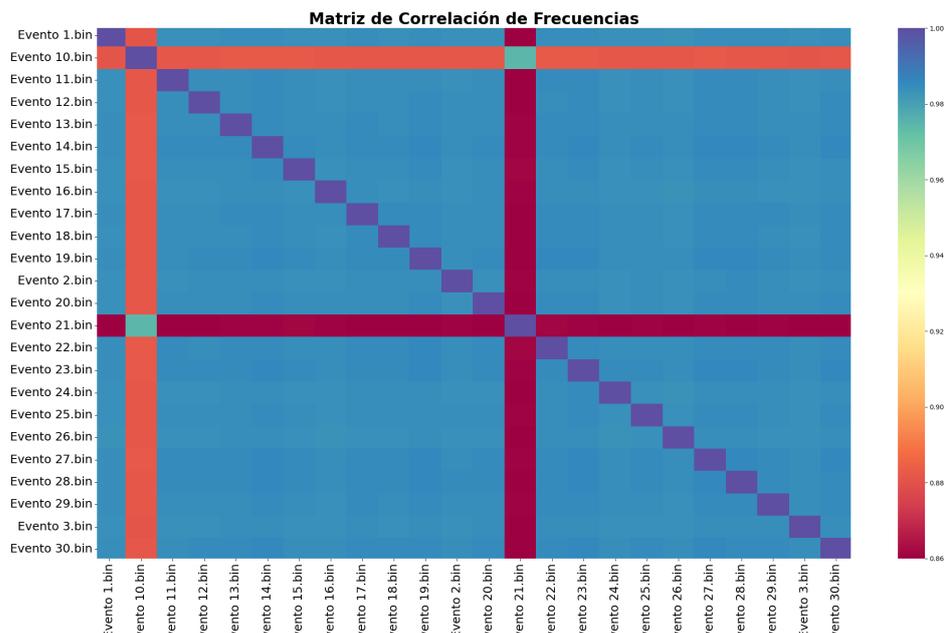


Figura 4.6: Matriz de correlación de espectros de frecuencia para una serie de eventos con pulsos WF4. Las zonas en tonos cálidos representan baja correlación (presencia de señal anómala), mientras que los tonos fríos indican alta similitud entre espectros.

Se presentan a continuación dos eventos contrastados: el evento 10, representativo del ruido de fondo, y el evento 21, correspondiente a la detección del pulso simulado. En ambas gráficas se muestra la señal temporal y su transformada espectral.

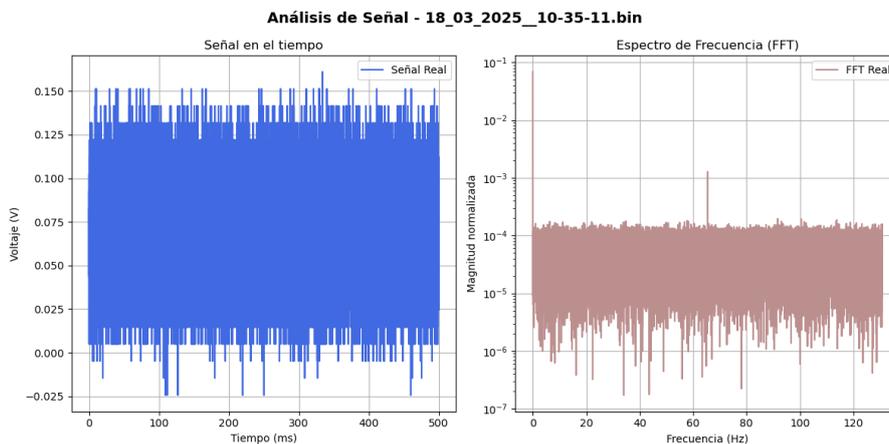


Figura 4.7: Evento 16: Señal sin actividad electromagnética relevante.

Aunque los pulsos inyectados presentan una amplitud reducida con respecto a los valores típicos de un rayo real, esta decisión fue intencionada: se buscó verificar la sensibilidad del sistema frente a señales débiles, lo que garantiza la capacidad de detección incluso ante descargas lejanas o atenuadas por el medio. En este sentido, los resultados validan la eficacia del análisis estadístico basado en correlaciones espectrales para discriminar eventos reales de fondo aleatorio.

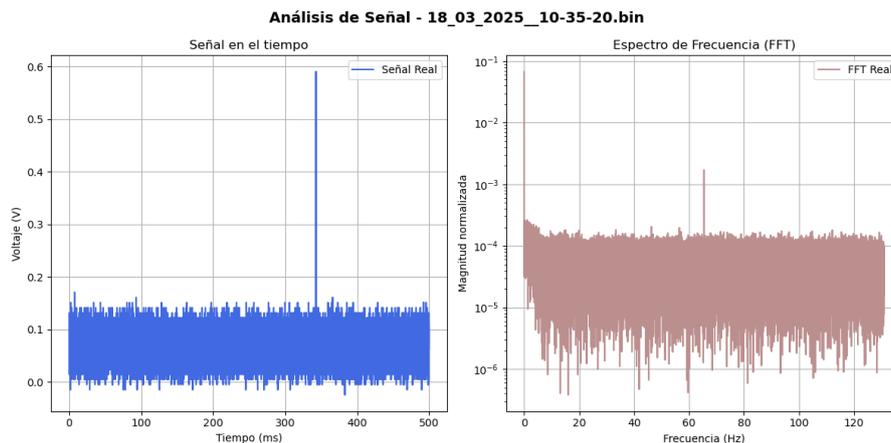


Figura 4.8: Evento 21: Detección del pulso WF4 simulado.

Aplicación de filtro pasa-banda

Para refinar el tratamiento de los datos y centrar el análisis en la región de frecuencias donde se concentra la contribución espectral de los LEMP (generalmente por debajo de los 10 kHz), se implementó un filtro pasa-banda suave. Este se define mediante la diferencia de dos funciones tangente hiperbólica:

$$H(f) = \tanh\left(\frac{f - f_{\text{low}}}{a}\right) - \tanh\left(\frac{f - f_{\text{high}}}{a}\right) \quad (4.3)$$

donde f_{low} y f_{high} definen los límites inferior y superior de la banda de interés, y el parámetro a controla la pendiente de la transición (Representado en la figura 4.9). Este enfoque evita oscilaciones asociadas a filtros de corte abrupto (efecto Gibbs¹) y facilita una interpretación más precisa del espectro.

¹El efecto Gibbs es una oscilación no deseada que aparece cerca de discontinuidades cuando se utilizan filtros abruptos en las transformadas de Fourier.

Análisis Señal y Filtro - Rayo Sintético: Evento 10.bin

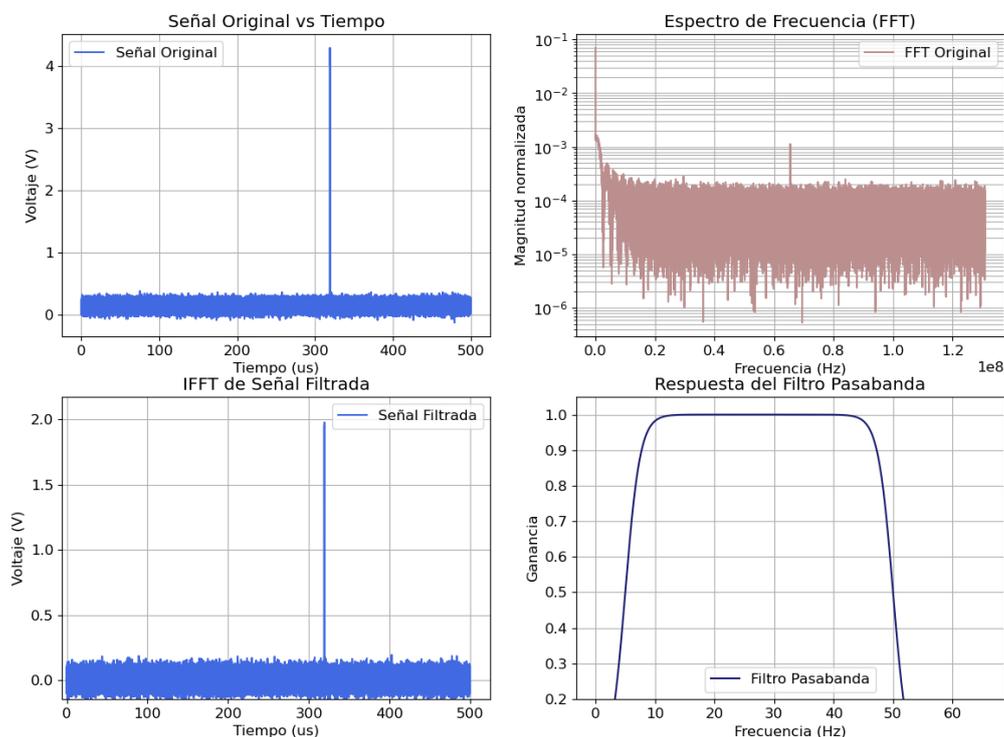


Figura 4.9: Espectro del Evento 10 de los Rayos Sintéticos tras aplicar el filtro pasa-banda. Este archivo se encuentra disponible en el anexo.

La implementación del filtro mejora la relación señal/ruido en la región de interés en casi 0,1 V, y refuerza la detección de eventos reales frente a variaciones aleatorias del fondo. Este procedimiento se integró en el flujo de análisis para futuras campañas de observación bajo condiciones atmosféricas reales.

4.1.5. Función de Transferencia de la Antena

Se verifica que el modelo teórico se ajusta adecuadamente a las observaciones experimentales: el sistema de adquisición implementado es capaz de detectar y discriminar los pulsos emitidos por el generador de funciones. No obstante, en el presente experimento se empleó un sistema de recepción inalámbrico, por lo que es necesario considerar el efecto de la antena sobre la señal medida.

En particular, debe tenerse en cuenta la función de transferencia de la antena, la cual describe la relación entre el campo electromagnético incidente (entrada) y la señal eléctrica generada en sus terminales (salida). Esta función depende de las propiedades geométricas, eléctricas y de orientación de la antena, y condiciona la respuesta en frecuencia del sistema de detección.

Es importante tener en cuenta la función de transferencia de la antena, la cual permite caracterizar su comportamiento en frecuencia. Esta se determinaría experimentalmente mediante

el uso de un generador de señales de radiofrecuencia capaz de emitir señales de forma y amplitud controladas, las cuales serían captadas por la antena receptora. La función de transferencia se define como el cociente entre la señal recibida y la señal transmitida:

$$H(f) = \frac{V_{rec}(f)}{V_{trans}(f)}$$

donde $V_{rec}(f)$ es la señal medida en la salida de la antena y $V_{trans}(f)$ es la señal conocida generada por la fuente. Sin embargo, dado que no se dispone en el laboratorio de un generador de señales de radiofrecuencia, se decidió emplear un modelo teórico de la función de transferencia basado en los parámetros geométricos, materiales y configuración de diseño de la antena, conforme a la información existente en la literatura.

La función de transferencia completa (obtenida de [42]) se puede expresar como:

$$H(f) = \eta \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2}} \cdot \left| \frac{Z_L}{Z_{in}(f) + Z_L} \right|$$

donde:

- η : Eficiencia de radiación de la antena ($0 < \eta \leq 1$), tomamos 1 para simplificar.
- Q : Factor de calidad, que define el ancho de banda de resonancia, que también tomamos el caso ideal $Q=1$.
- $f_0 = \frac{c}{2L}$: Frecuencia de resonancia de la antena.
- Z_L : Impedancia de carga (típicamente 50Ω).
- $Z_{in}(f)$: Impedancia de entrada de la antena, función de la frecuencia.

La impedancia de entrada $Z_{in}(f)$ se modela como:

$$Z_{in}(f) = R_{rad}(f) + R_{loss} + iX(f)$$

donde:

- $R_{rad}(f)$: Resistencia de radiación, depende de la frecuencia. Tomamos $R_{rad}(f) = 73 \Omega$.
- R_{loss} : Resistencia debido a pérdidas (material, superficie), que despreciamos.
- $X(f)$: Reactancia de la antena, $X(f) = 50 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)$.

Cuyos valores se obtienen del capítulo II de *Antenna Theory. Analysis and Design* [42]. Así, podemos representar dicha función de transferencia en la figura 4.10

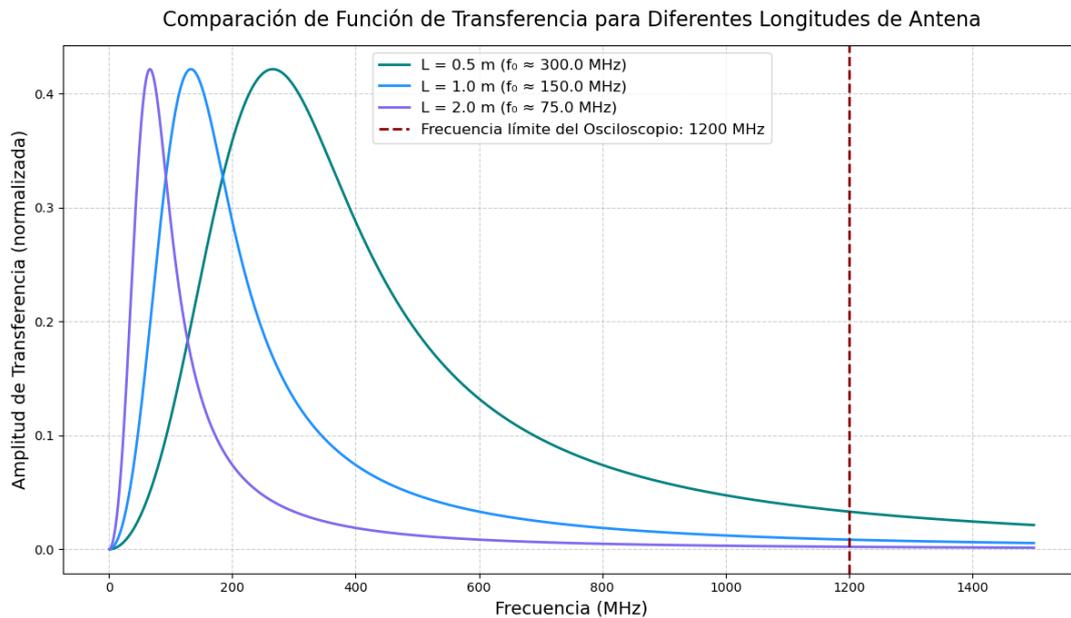


Figura 4.10: Funciones de transferencia de antenas monopolo para varias longitudes de antena

La antena de la que disponemos en el laboratorio tiene una longitud adaptable, con un máximo de un metro. para medir las bajas frecuencias con mejor precisión necesitaríamos una antena mucho mas larga u otro tipo de antena, ya que esta antena es apropiada para captar las frecuencias de radio. Usamos la antena de un metro por ser lo que tenemos disponible.

Finalmente, es fundamental configurar el osciloscopio en modo de impedancia de entrada de 50Ω , con el fin de igualar la impedancia característica del sistema de antena. Esta adaptación de impedancias es esencial para evitar desajustes que puedan provocar reflexiones parciales de la señal en el cable de transmisión, generando distorsiones y reflexiones en la onda registrada y comprometiendo el sentido físico del análisis.

La omisión de este ajuste en una fase inicial del experimento resultó en la pérdida de datos de una tormenta, lo que pone de manifiesto la importancia de una correcta adaptación de impedancias en sistemas de adquisición de señales.

4.1.6. Resultados

Día de Referencia: 18 de Marzo de 2025 (Condiciones Estables en el Norte Peninsular)

Con el objetivo de establecer una base de comparación fiable frente a futuros registros de actividad electromagnética de origen atmosférico, se seleccionó el 18 de marzo de 2025 (y la madrugada del 19) como día de referencia para la adquisición de datos. Durante este intervalo, las condiciones meteorológicas en Asturias fueron estables y sin presencia de actividad convectiva significativa, garantizando la ausencia de tormentas o descargas eléctricas. Esta elección permite caracterizar el comportamiento espectral del ruido ambiental bajo condiciones de "buen tiempo".

po", es decir, sin presencia de rayos, lo cual resulta fundamental para validar posteriormente la detección de eventos anómalos en días tormentosos.

La adquisición se llevó a cabo de forma continua desde las 14:00 del día 18 hasta las 09:00 del día 19, generando un conjunto de datos estructurado en 95 series, cada una compuesta por 512 archivos individuales (accesibles en el Anexo). Para cada una de estas series se construyó una matriz de correlación, con el fin de analizar la estabilidad estadística del espectro durante el periodo de observación.

Para facilitar la identificación de anomalías en días con actividad eléctrica, las barras de color en las matrices de correlación fueron normalizadas en función del valor mínimo del coeficiente de Pearson observado en cada serie. De este modo, en presencia de un evento destacadamente distinto, como el producido por un rayo, la zona correspondiente se representaría con un tono más cálido, facilitando su visualización.

La Figura 4.11 muestra una selección representativa de ocho matrices de correlación distribuidas a lo largo del día de referencia. En todas ellas se observa una estructura homogénea con pequeñas fluctuaciones, atribuibles a la presencia de señales electromagnéticas de origen humano o natural, tales como ruido de la red eléctrica, emisiones de radio o variaciones térmicas en el instrumental.

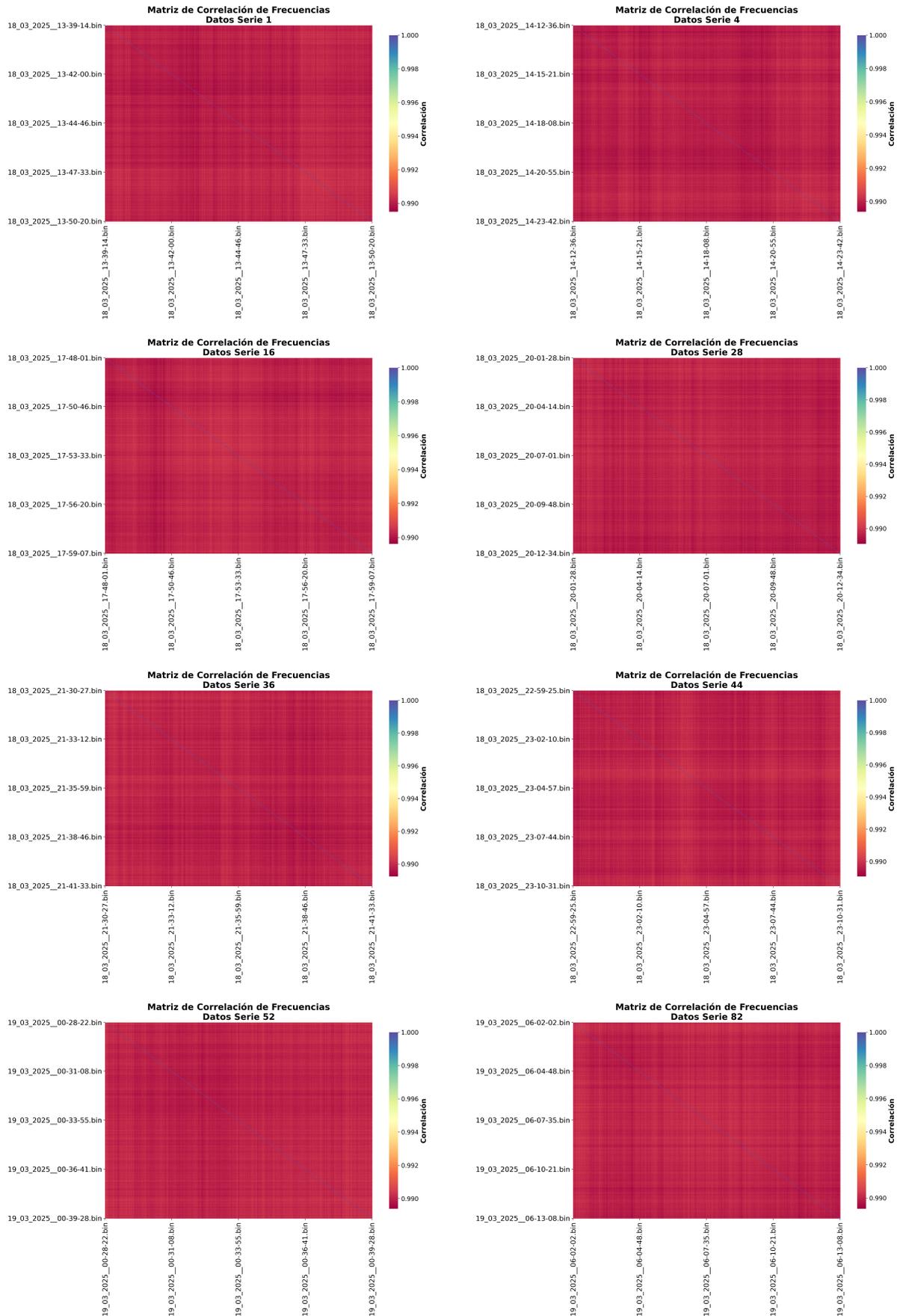


Figura 4.11: Correlación de datos del 18 de marzo.

Se analizaron también perfiles individuales de frecuencia para determinados eventos. Aplicando el filtro pasa-banda descrito en la Figura 4.9 y la función de transferencia correspondiente (véase Figura 4.10), se obtuvo la representación del voltaje en función del tiempo, así como su transformada de Fourier.

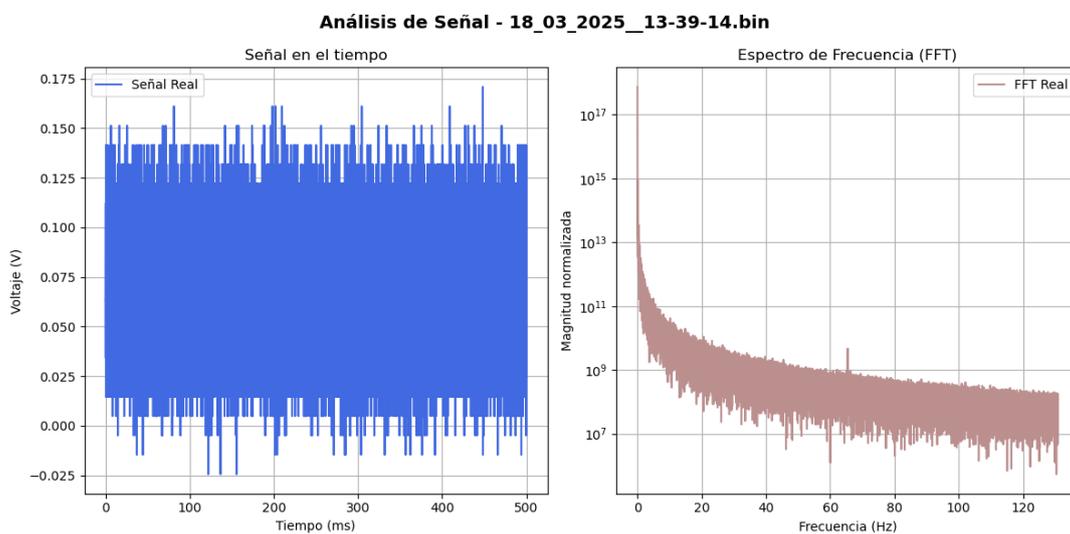


Figura 4.12: Evento del 18 de marzo a las 13:39:14. Se observa un perfil espectral sin elementos destacados.

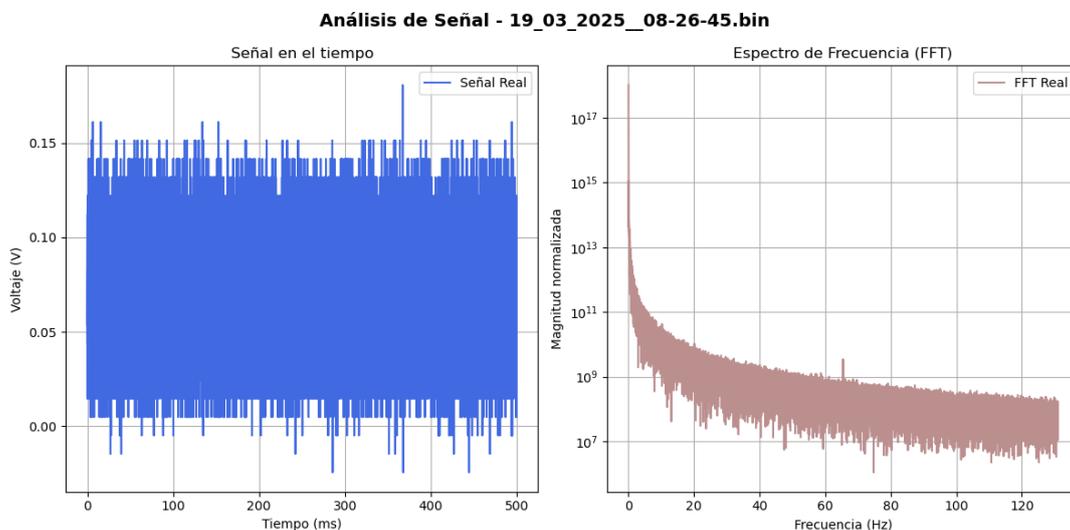


Figura 4.13: Evento del 19 de marzo a las 08:26:45. Perfil espectral consistente con ruido ambiental.

En términos generales, los perfiles espectrales correspondientes a los eventos analizados presentan una forma común, con diferencias menores atribuibles a la naturaleza estocástica del ruido ambiental. La energía se distribuye mayoritariamente en bajas frecuencias, con una caída suave hacia las componentes de mayor frecuencia. Este comportamiento es compatible con la captación de señales persistentes de baja frecuencia, posiblemente asociadas a infraestructura eléctrica o a

emisiones radioeléctricas locales.

Cabe destacar que el nivel de ruido global registrado es elevado. Esto se debe fundamentalmente a la ausencia de apantallamiento electromagnético en el sistema de adquisición, a la proximidad de fuentes de interferencia (ordenadores, cableado eléctrico, etc.), y al uso de una antena de televisión que, si bien funcional como sensor de campo eléctrico, no está optimizada para la banda ELF, donde se concentra la mayor parte de la energía del LEMP. Esta configuración introduce una respuesta espectral no uniforme y favorece la amplificación de señales no deseadas, limitando la sensibilidad del sistema en condiciones sin actividad eléctrica significativa.

El resto de los perfiles de frecuencia registrados durante la jornada del 18 de marzo se incluyen en el Anexo, junto con las gráficas correspondientes a eventos seleccionados. Asimismo, se adjuntan los archivos binarios originales generados durante la adquisición, junto con el código empleado en el análisis, con el fin de garantizar la trazabilidad completa del experimento y permitir la replicación de los resultados obtenidos.

Día de Tormenta: 20 de Marzo de 2025 (Actividad Eléctrica sobre Peña Ubiña)

Durante los días 20 y 21 de marzo de 2025 se registraron condiciones meteorológicas inestables en el centro y sur de Asturias, con precipitaciones moderadas y presencia de sistemas convectivos bien desarrollados. En particular, se identificó la formación de un cumulonimbus (probablemente *calvus*, por la localización, tipo de precipitación e intensidad) de gran extensión cubriendo buena parte del territorio asturiano, como se observa en la Figura 4.14.

Las temperaturas oscilaron entre los 12 °C y los 20 °C, acompañadas de vientos del sur con rachas máximas de hasta 45 km/h. Las condiciones atmosféricas descritas favorecieron la formación de actividad eléctrica significativa. La presencia de un potente sistema convectivo, junto con contrastes térmicos y humedad elevada, son factores propicios para el desarrollo de descargas eléctricas en la atmósfera. La medición se realizó desde el laboratorio de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Oviedo ya mencionado.



Figura 4.14: Cumulonimbus sobre Oviedo durante la tarde del 20 de marzo.

Las señales de origen atmosférico registradas en esta jornada se atribuyen a descargas producidas en las inmediaciones de Peña Ubiña, un macizo montañoso situado a unos 40 km al sureste del punto de observación. Esta distancia es compatible con la propagación de señales electromagnéticas de muy baja frecuencia, que presentan escasa atenuación en el medio terrestre y permiten la detección remota de eventos eléctricos intensos. A diferencia de las bandas de frecuencia más altas, las ondas ELF pueden propagarse eficazmente incluso a través de obstáculos geográficos, gracias a su mayor longitud de onda y menor interacción con la materia [43].

A partir del análisis de las matrices de correlación obtenidas en esta jornada, se observan

diferencias claras respecto al día de referencia. En particular, se identifican estructuras de baja correlación (zonas en rojo) en momentos coincidentes con descargas atmosféricas, lo cual valida la efectividad del método para detectar eventos puntuales a través de sus firmas espectrales.

Un caso especialmente notable se encuentra en la *Serie 4*, donde la matriz de correlación muestra franjas horizontales de alta similitud entre varios espectros consecutivos. Este patrón es indicativo de una sucesión rápida de descargas en un corto intervalo temporal. Desde el punto de vista físico, este fenómeno puede interpretarse como una serie de descargas secundarias tras la apertura de un canal ionizado, de forma consistente con el mecanismo de *guía escalonado* descrito en la Figura 3.2. Una vez establecido un canal conductor entre la nube y el suelo, es posible que se produzcan múltiples descargas consecutivas mientras la nube mantenga suficiente carga eléctrica disponible.

Estas observaciones proporcionan evidencia experimental de que el sistema es capaz de discriminar eventos atmosféricos reales frente al ruido de fondo, incluso cuando estos se producen a decenas de kilómetros del punto de medición. En la siguiente sección se detallan los perfiles espectrales correspondientes a algunos de estos eventos registrados durante la tormenta.

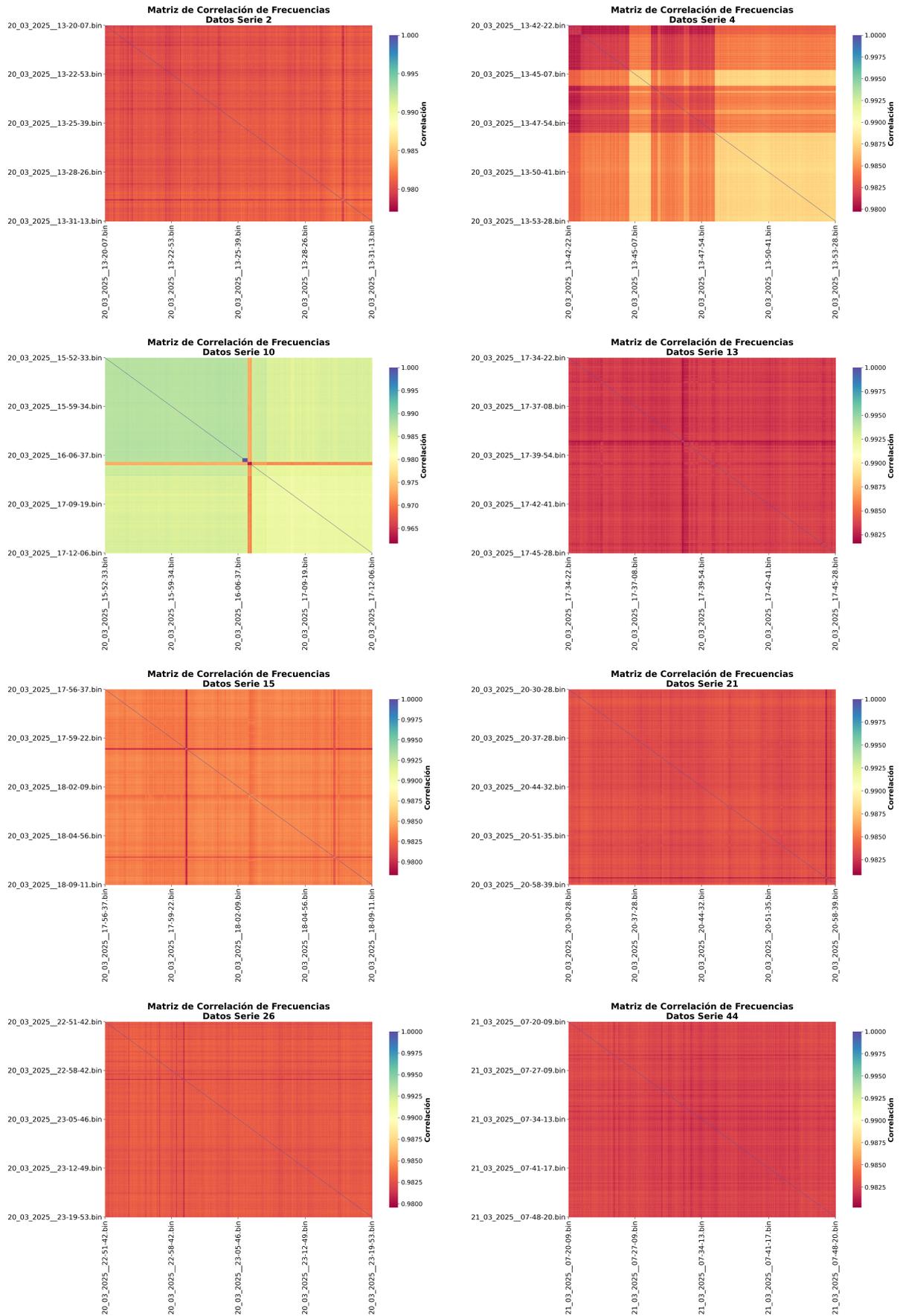


Figura 4.15: Correlación de datos del 20 de marzo (8 series escogidas por interés de los datos)

De igual manera, al caso anterior, estudiamos los perfiles de frecuencias, esta vez de los eventos interesantes por la presencia de descargas eléctricas en los mismos. Estudiaremos sobre todo los rayos encontrados en los eventos de la figura 4.15, aunque el resto de datos estarán disponibles en el anexo.

Por ejemplo, en la serie 15, en los segundos anteriores y posteriores a las 18:00 hemos captado una sucesión de descargas, debido al fenómeno del líder escalonado, que ya se ha descrito previamente.

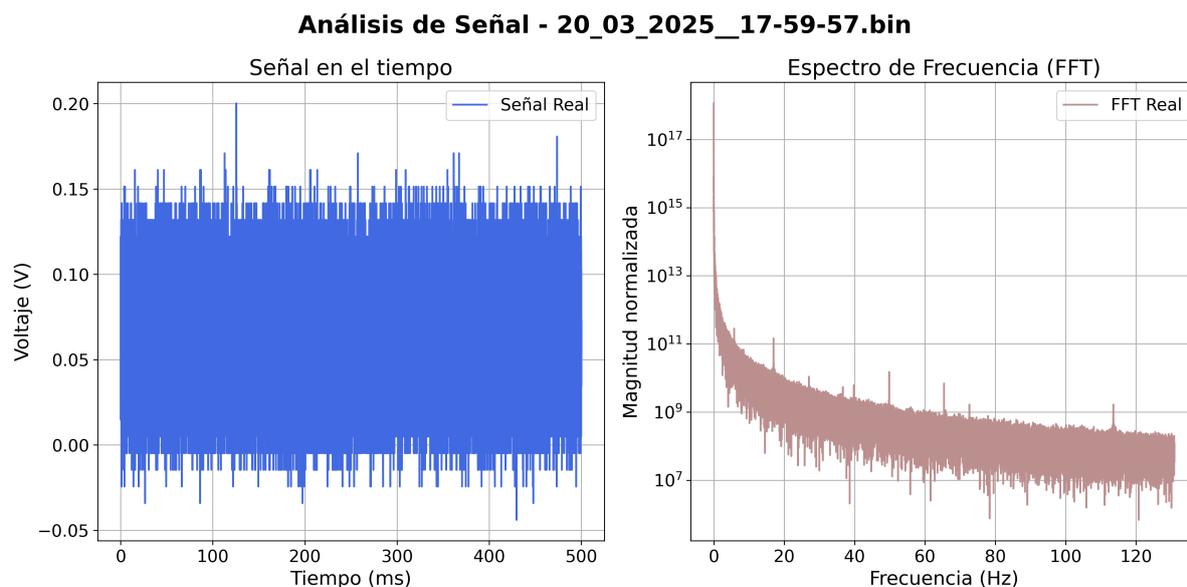


Figura 4.16: Rayo en el Evento 20_03_2025_17-59-57

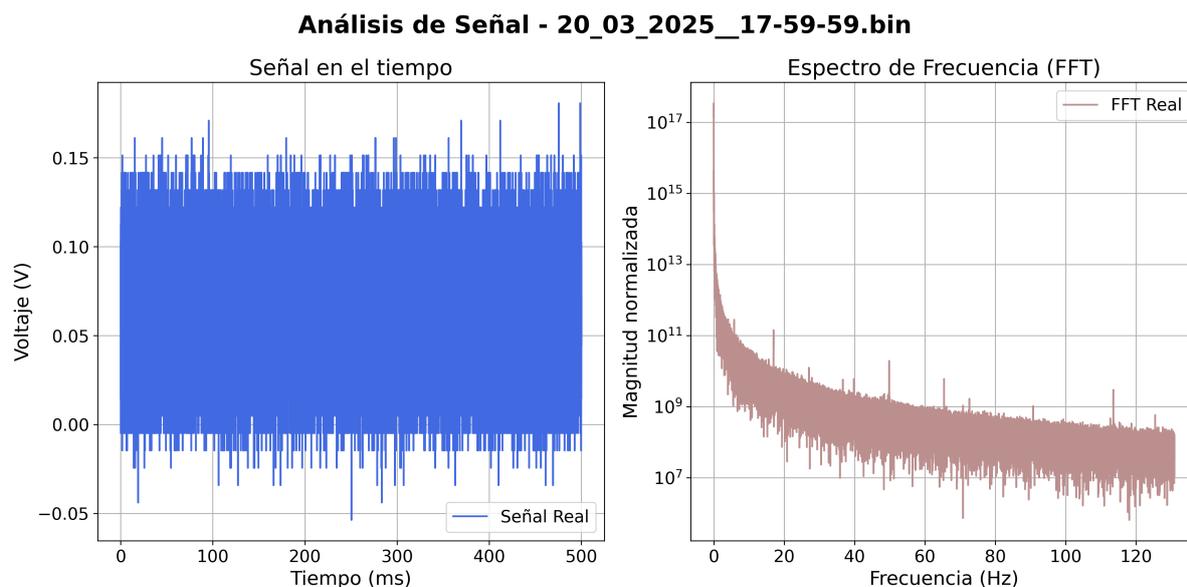


Figura 4.17: Rayo en el Evento 20_03_2025_17-59-59

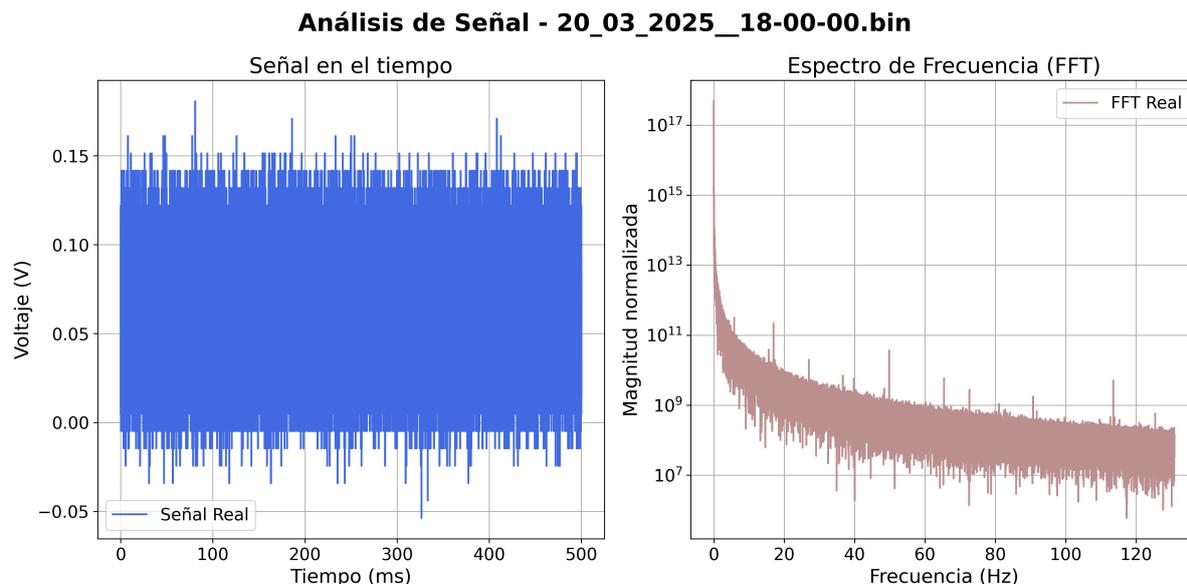


Figura 4.18: Rayo en el Evento 20_03_2025__18-00-00

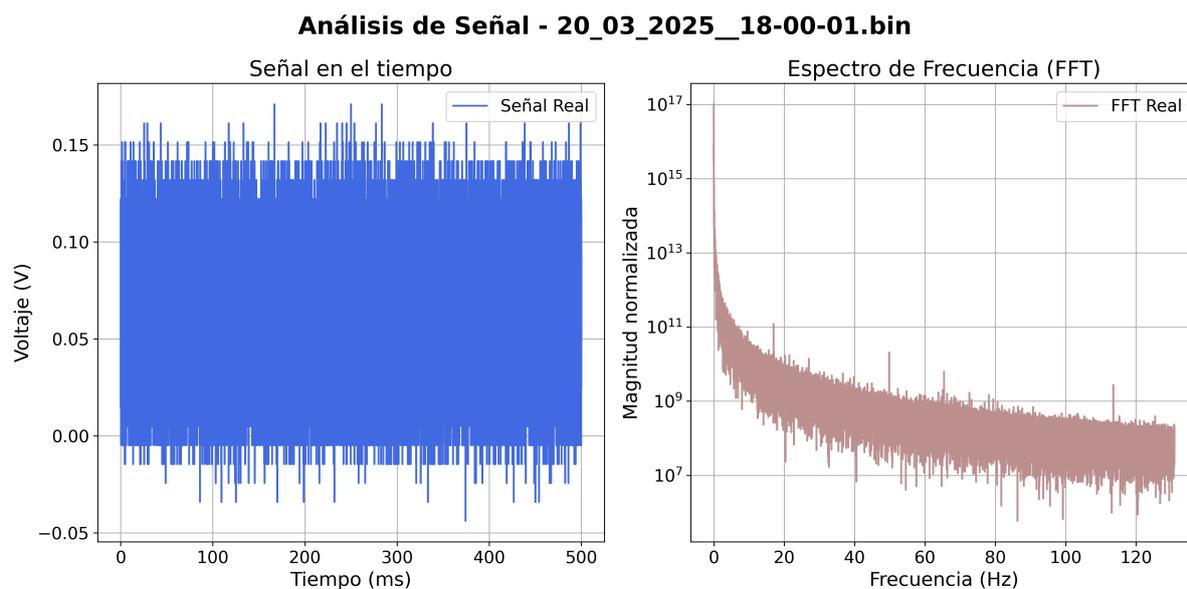


Figura 4.19: Rayo en el Evento 20_03_2025__18-00-01

Vemos que las descargas sucesivas pueden llegar a durar varios segundos. A las 14:00 del día siguiente captamos otro rayo, este sin las sucesivas descargas, ya que seguramente la nube no tuviera suficiente carga eléctrica para producir varias descargas.

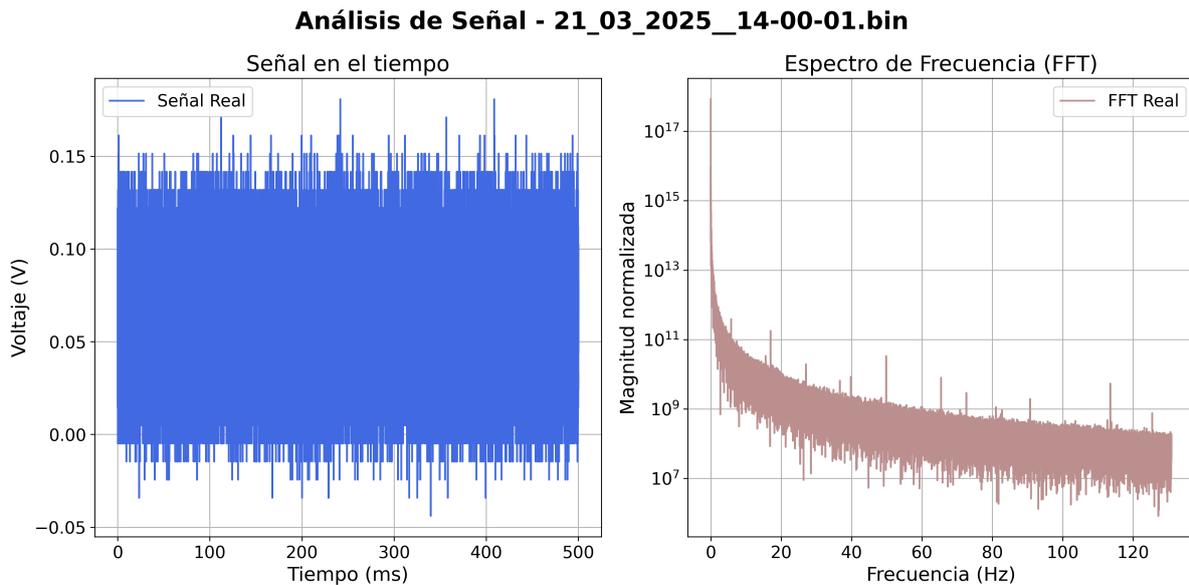


Figura 4.20: Rayo en el Evento 21_03_2025_14-00-01

Uno de los aspectos más destacados en los espectros de frecuencia registrados durante eventos de actividad eléctrica atmosférica es la presencia de picos bien definidos en la región de muy baja frecuencia. Entre las frecuencias observadas se encuentran 5.1 Hz, 15.5 Hz, 16.9 Hz, 27 Hz y 36 Hz, todas ellas dentro del rango compatible con las denominadas **resonancias de Schumann**. No obstante, dichas frecuencias no coinciden exactamente con los valores típicos reportados en la literatura [23], lo que motiva un análisis más detallado.

Las resonancias de Schumann son modos normales de oscilación electromagnética establecidos en la cavidad natural formada entre la superficie terrestre y la ionosfera. Esta cavidad actúa como una guía de onda imperfecta, en la que se excitan modos estacionarios en presencia de descargas eléctricas, principalmente rayos, a escala global. Aunque el fenómeno es continuo debido a la constante actividad tormentosa en el planeta, su intensidad puede incrementarse localmente durante eventos regionales, como el observado en Peña Ubiña.

En la siguiente tabla se comparan las frecuencias teóricas fundamentales de las resonancias de Schumann con las frecuencias medidas experimentalmente en este trabajo:

Cuadro 4.1: Comparación entre las frecuencias teóricas de las resonancias de Schumann y las frecuencias obtenidas experimentalmente para los 5 primeros modos.

Modo (n)	1	2	3	4	5
Teóricos (Hz)	7.83	14.3	20.8	27.3	33.8
Experimentales (Hz)	5.9	15.5	17.2	27.1	36.0
Error relativo	24 %	8 %	17 %	1 %	7 %

Como se puede observar, existe una correspondencia general entre las frecuencias detectadas y los modos teóricos, especialmente en el cuarto modo (27 Hz), cuya concordancia es prácticamente

exacta. Las desviaciones presentes en otros modos, sin embargo, requieren una interpretación que considere tanto efectos físicos globales como limitaciones instrumentales.

Las discrepancias observadas pueden deberse a múltiples factores, entre los que destacan:

- **Variabilidad natural de la ionosfera:** La altura y conductividad de la ionosfera varían con la hora del día, la latitud geográfica y la actividad solar. Estas variaciones modifican la geometría efectiva de la cavidad Tierra-Ionosfera, desplazando ligeramente las frecuencias de resonancia.
- **Ruido de origen humano e interferencias locales:** Algunas de las frecuencias observadas pueden estar contaminadas por armónicos de la red eléctrica (por ejemplo, 50 Hz) o por emisiones industriales, dificultando una identificación limpia de las resonancias naturales.
- **Efectos del entorno del experimento:** La presencia de estructuras metálicas cercanas al tipo de suelo pueden distorsionar la propagación de las ondas y generar modos locales que interfieren con las resonancias globales, además los dispositivos y red eléctrica pueden producir señales inesperadas.
- **Limitaciones de la antena:** La antena monopolo empleada, de aproximadamente 1 metro de longitud, no es adecuada para captar eficientemente señales en la banda ELF, cuya longitud de onda puede superar las centenas de kilómetros.

En conjunto, estos factores explican las desviaciones entre las frecuencias teóricas y experimentales. A pesar de ello, la detección de picos espectrales cercanos a los modos clásicos de la resonancia de Schumann constituye una evidencia sólida de que el sistema experimental es capaz de captar fenómenos electromagnéticos naturales a gran escala, incluso con equipamiento no especializado.

4.1.7. Conclusiones

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto tanto las capacidades como las limitaciones del sistema de medición implementado. Por un lado, la antena monopolo utilizada no ha demostrado la sensibilidad suficiente para detectar picos de voltaje en el dominio temporal asociados a la llegada directa del pulso electromagnético de un rayo. Este tipo de señal, con magnitudes típicas del orden de 1.5 V, parece quedar enmascarado por el ruido ambiente y las restricciones físicas de la antena.

Por otro lado, el análisis espectral ha demostrado ser una herramienta más robusta y efectiva. Mediante la aplicación de la Transformada de Fourier, se ha conseguido distinguir entre eventos con y sin actividad eléctrica, basándose en diferencias significativas en el espectro. En particular, se han identificado picos compatibles con las resonancias de Schumann, lo que sugiere que, a pesar de las limitaciones, el sistema experimental está registrando señales de origen natural con una componente electromagnética global.

Con el objetivo de mejorar la visualización y análisis de la señal, se ha construido una gráfica (Fig. 4.21) en la que se reduce significativamente el nivel de ruido de fondo. Para ello, se ha restado la media de una muestra representativa de eventos sin presencia de rayos a la media de eventos que incluyen descargas. En total, nuestro dispositivo experimental ha captado entorno a 50 archivos con rayos, todos con la presencia de estos picos que identificamos con la resonancia Schumann, y durante el día. Esto es relevante porque la capa D de la ionosfera desaparece por la noche por la falta de radiación solar. Esta señal calculada permite resaltar las características asociadas a los eventos de interés. Además, se han superpuesto los picos teóricos correspondientes a las resonancias de Schumann teóricamente aceptadas, con el fin de evaluar visualmente el grado de concordancia entre estos modos resonantes y las componentes espectrales observadas en los datos experimentales.

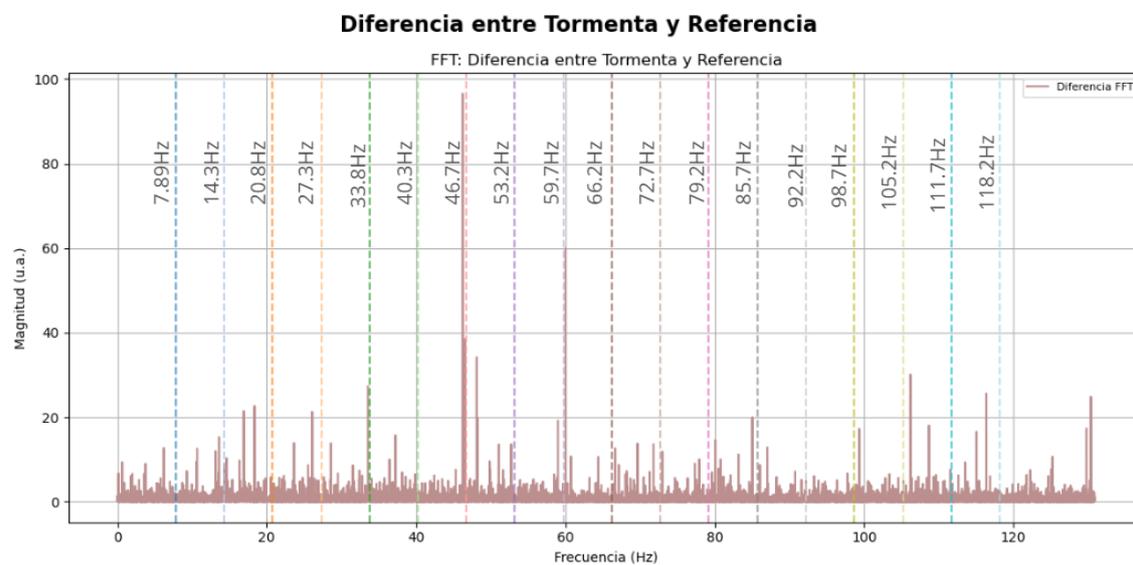


Figura 4.21: Representación gráfica de la señal diferencial obtenida al sustraer la media de eventos sin rayos a la media de eventos con descargas eléctricas junto con las líneas verticales indicando las frecuencias teóricas de dichas resonancias.

Se presenta además una gráfica comparativa 4.22 entre los valores aceptados de las frecuencias de resonancia de Schumann, los obtenidos a partir de los modelos descritos en el *Capítulo 2* y los resultados experimentales.

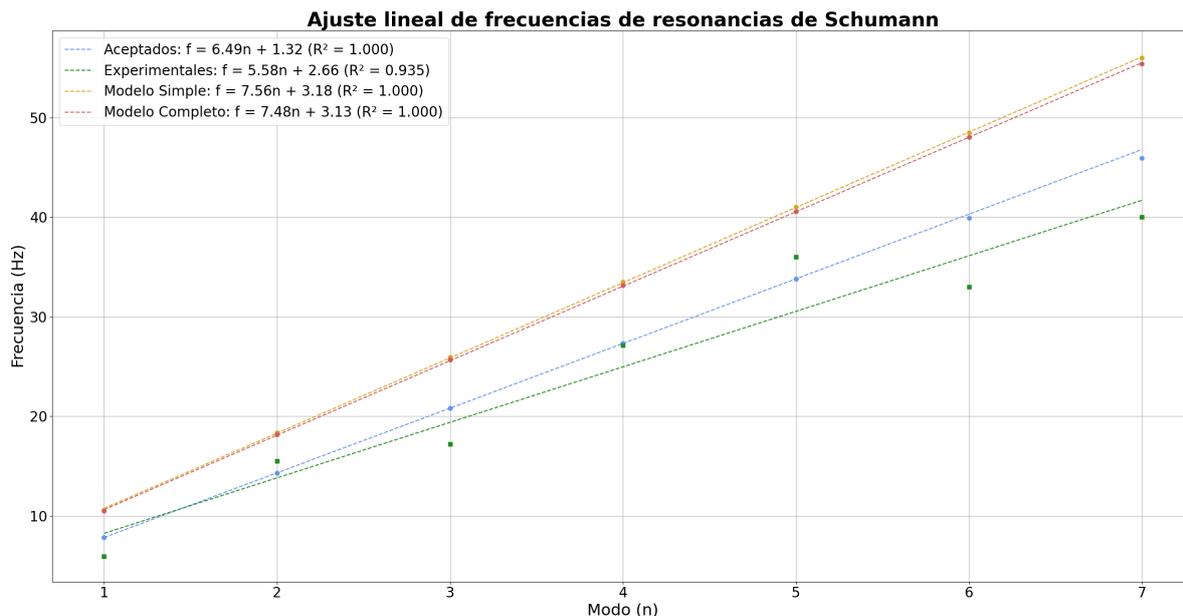


Figura 4.22: Comparación entre los resultados aceptados, el modelo teórico, el modelo complejo y los datos experimentales obtenidos.

La comparación visual presentada en ambas figuras parece que el espectro registrado corresponde a la resonancia de Schumann, dado que la coincidencia de los picos observados con los valores esperados indica que efectivamente se trata de este fenómeno. Los datos experimentales presentan una buena concordancia con un modelo lineal, como era de esperar, a pesar de ciertas desviaciones. El ajuste se considera adecuado, con un $R^2 = 0,935$.

Tal como se ha expuesto en secciones anteriores, las estimaciones presentan un margen de error aproximado del 20 %, atribuible en gran parte a la variabilidad de la altura efectiva de la ionosfera. Esta variabilidad depende de factores ya estudiados (geográficos, temporales, estacionales y meteorológicos), lo que introduce inestabilidad en las condiciones de propagación. Asimismo, se observa que las frecuencias asociadas a modos con número de orden intermedio (valores medios de n , i. e. $n = 4, \dots, 8$ aproximadamente) se detectan con mayor claridad. Esto se debe a que la antena empleada no está optimizada para la captación de frecuencias extremadamente bajas (modos con n pequeño), y esta zona está atenuada por el filtro al tener mayores errores, mientras que las frecuencias más altas (modos con n elevado) tienden a presentar menor amplitud como consecuencia de aumentar el orden resonante, y a partir del límite superior del filtro también se atenúan para eliminar ruido de frecuencias altas que interfieran en la medida.

A partir de estos resultados, se proponen las siguientes líneas de mejora para el experimento:

- **Sustitución de la antena por un sensor especializado para ELF:** Se recomienda el uso de antenas de mayor longitud o sistemas inductivos de bobina que respondan al campo magnético asociado a las ondas electromagnéticas de baja frecuencia, mucho más eficientes en este rango.
- **Reducción de pérdidas en la adquisición continua:** La actual estrategia de adquisición

sición continua conlleva la pérdida de datos durante los periodos de escritura y reinicio del osciloscopio. Una posible solución sería la sincronización de múltiples osciloscopios en paralelo, operando de forma escalonada, para cubrir sin interrupciones el intervalo de observación, y reduciendo la ventana del tiempo de integración para poder conseguir mayor resolución de voltajes.

Estas mejoras permitirían incrementar significativamente la resolución y la fiabilidad del sistema, posibilitando un estudio más completo de los fenómenos electromagnéticos atmosféricos y reforzando el valor del análisis espectral como herramienta para la detección remota de rayos y resonancias globales.

Capítulo 5

Conclusiones

El presente Trabajo de Fin de Grado ha abordado de forma teórica y experimental la naturaleza y dinámica de las descargas eléctricas en fenómenos atmosféricos, profundizando en los mecanismos físicos subyacentes y evaluando los modelos existentes. A lo largo del estudio, se ha puesto de manifiesto la complejidad de la electrificación de las nubes y la formación del rayo, así como las limitaciones actuales en la predicción y comprensión de estos procesos.

Desde un enfoque histórico y conceptual, se han revisado los modelos más representativos, desde las primeras hipótesis de Wilson y Simpson hasta la teoría triboeléctrica de Marshall y las propuestas más recientes relacionadas con los rayos cósmicos y las avalanchas electrónicas. Esta revisión ha evidenciado que, si bien existen avances significativos, ninguna teoría es capaz por sí sola de explicar completamente los valores de campo eléctrico necesarios para provocar la ruptura dieléctrica del aire. Esta revisión ha permitido evidenciar que, a pesar de los avances alcanzados, la comprensión completa de estos procesos sigue siendo un desafío científico.

A nivel experimental, se ha logrado caracterizar el perfil de frecuencias del pulso electromagnético generado por rayos, confirmando la inicialmente inesperada presencia de componentes de baja frecuencia coherentes con las resonancias de Schumann. Las mediciones muestran que las descargas presentan un espectro de frecuencias característico, que incluye componentes de baja frecuencia, permitiendo identificar patrones comunes en las señales registradas.

Como ya se estudió, estas frecuencias presentan un error de entorno al 20 % con las frecuencias aceptadas de la resonancia Schumann, pero estos valores son cambiantes, y el modelo es inexacto al suponer constante la conductividad de la atmósfera, constante el radio de la Tierra y despreciable la altura de la ionosfera, según el modelo.

En conjunto, este trabajo refuerza la idea de que el estudio de las descargas eléctricas en la atmósfera es una rama de la ciencia en constante evolución, que requiere del cruce entre modelado físico, observación meteorológica y análisis experimental. A futuro, líneas de investigación prometedoras incluyen el estudio en mayor profundidad de las emisiones gamma en tormentas, la influencia de los rayos cósmicos en la ionización inicial, y el papel de las estructuras turbulentas en la redistribución de cargas, con el objetivo de resolver el problema con el origen de las descargas eléctricas atmosféricas.

Como se ha mencionado previamente, en el anexo se ha proporcionado acceso libre a un repositorio de GitHub, donde se encuentran disponibles los códigos fuente y los archivos de datos utilizados en este trabajo. Esta disposición tiene como objetivo garantizar la transparencia, reproducibilidad y verificabilidad de los resultados obtenidos. Adicionalmente, se ha incluido el diseño propuesto para un experimento orientado a la medición de gotas de lluvia. Este planteamiento experimental representa una posible extensión del presente trabajo, permitiendo explorar nuevas líneas de investigación en el campo de la física atmosférica experimental.

Este trabajo ha permitido al autor profundizar en el estudio de diversos aspectos de la Física Atmosférica, al tiempo que ha facilitado el desarrollo de competencias técnicas transversales necesarias para cualquier tipo de investigación. A lo largo del proyecto, se han aplicado técnicas de análisis de datos experimentales, incluyendo el tratamiento de señales electromagnéticas asociadas a descargas eléctricas y la aplicación de matrices de correlación con la consecuente elección de una métrica. Asimismo, se ha adquirido experiencia en el manejo y programación de dispositivos electrónicos, como osciloscopios y generadores de funciones arbitrarias, y en la implementación de procedimientos de medición en condiciones reales.

Finalmente, se destaca la necesidad de mejorar los métodos de detección y simulación de estos eventos para avanzar tanto en la predicción meteorológica como en la seguridad frente a fenómenos extremos. Este trabajo espera haber contribuido, en su modesta medida, a ese propósito.

Bibliografía

- [1] E.R. Williams. C.t.r. wilson versus g.c. simpson: Fifty years of controversy in atmospheric electricity. *Elsevier*, 2009.
- [2] C.P.R Saunders. A review of thunderstorm electrification problem. *Journal of Applied Meteorology*, 1992.
- [3] Stefano Baroni Enrico Drigo. Seebeck coefficient of liquid water from equilibrium molecular dynamics. *SISSA*, 2023.
- [4] D. Petersen. A brief review of the problem of lightning initiation and hypothesis of initial lightning leader formation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D23):D23210, 2008.
- [5] A. V. Gurevich, G. M. Milikh, and R. Roussel-Dupré. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *University of Mississippi*, 1992.
- [6] NOAA. Layers of the atmosphere - jetstream | national weather service. <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/layers-of-atmosphere>, 2024. Accessed: 2025-05-05.
- [7] United States Environmental Protection Agency. Basic ozone layer science. <https://www.epa.gov/ozone-layer-protection/basic-ozone-layer-science>, 2024. Accessed: 2025-05-05.
- [8] ASTM International. The spectral irradiance of the sun (astm g-173-03) - international standard iso. <https://www.researchgate.net/figure/The-spectral-irradiance-of-the-sun-5ASTM-G-173-03>, 2003. Accessed: 2025-05-06.
- [9] Frederick Reif. *Física Estadística*. Reverté S.A., Barcelona, 1993.
- [10] El Destape Web. ¿qué es una tormenta supercelda?, 2024. Consultado el 30 de mayo de 2025.
- [11] Wikipedia contributors. Supercelda — wikipedia, la enciclopedia libre, 2025. Consultado el 30 de mayo de 2025.

- [12] Sergio Tapiro Velasco. Una poderosa erupción ilumina las laderas del volcán de colima en México el 13 de diciembre de 2015. <https://aiditecsystems.com/tormenta-sucia/>, 2015. Fotografía ganadora del concurso de fotografía de viajes 2017 de National Geographic.
- [13] World Meteorological Organization. *International Cloud Atlas: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors*. WMO, Geneva, Switzerland, 2017. WMO-No. 407.
- [14] World Meteorological Organization. Cumulonimbus calvus and cumulus congestus, 2017. Imagen del International Cloud Atlas.
- [15] NASA Earth Observatory. Thunderstorms over eastern kentucky, 2014. Imagen de Wikimedia Commons bajo licencia Creative Commons.
- [16] Cloud Appreciation Society. Mamma, n.d. Accessed: 2025-05-01.
- [17] Cloud Appreciation Society. Velum, n.d. Accessed: 2025-05-01.
- [18] World Meteorological Organization. Clouds accessory: Pileus, n.d. Accessed: 2025-05-01.
- [19] Cloud Appreciation Society. Arcus, n.d. Accessed: 2025-05-01.
- [20] M. J. Rycroft, S. Israelsson, and C. Price. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70:157–169, 2008.
- [21] C. T. R. Wilson. Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms. *Proceedings of the Royal Society A*, 97:555–574, 1920.
- [22] Erica L. Morley and Daniel Robert. Electric fields elicit ballooning in spiders. *Current Biology*, 28(14):2324–2330.e2, 2018.
- [23] W. O. Schumann. On the free oscillations of a conducting sphere which is surrounded by an air layer and an ionosphere shell. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 7:149–154, 1952.
- [24] A. P. Nickolaenko and M. Hayakawa. *Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity*. Springer, 2006.
- [25] M. Shapiro. Beam physics - lecture i: Schumann resonances. https://www.physics.rutgers.edu/~shapiro/504/lects/beamI_6.pdf, 2011. Accedido: 2025-04-26.
- [26] F. Simoes et al. Schumann resonance: A tool for investigating planetary atmospheric electricity and the origin and evolution of the solar system. 2012. Accessed: 2025-05-05.
- [27] Space Observing System. Space observing system – tomsk state university, 2025. Accedido el 22 de mayo de 2025.
- [28] K. A. Shafranov. Possible influences of schumann resonance on human psychophysiology. *Biophysics*, 59:804–808, 2014.

- [29] Joaquim F. P. Puente de san martín, toledo. <https://www.flickr.com/photos/joaquimfp/52262127977>, 2022. Fotografía publicada en Flickr bajo licencia CC BY-NC-SA 2.0.
- [30] MGI Uruguay. Rayos - datos interesantes, 2023. Artículo técnico sobre rayos.
- [31] Ingeniero Marino. Tecnologías de protección contra el impacto del rayo, 2023. Artículo informativo.
- [32] EarthSky. What are lightning sprites?, 2023. Fotografía y artículo.
- [33] Space Weather Archive. Blue jet lightning sighted over texas, 2022. Artículo sobre fenómeno atmosférico.
- [34] SciTech Daily. Video sobre rayos y fenómenos eléctricos, 2022. Video en YouTube.
- [35] International Gemini Observatory. Smith. Gigantic jet - imagen en wikimedia commons, 2023. Fotografía científica, Wikimedia Commons.
- [36] Protección contra los rayos, 2010.
- [37] Guía para protección de sistemas eléctricos contra sobretensiones transitorias, 2002.
- [38] M. H. Shwehdi and M. Azizur Rahman. Metal oxide varistors (movs) characteristics and applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35:1010–1018, 1999.
- [39] Prácticas recomendadas para sistemas de puesta a tierra, 2007.
- [40] JRustonApps BV. Lightning Tracker and Alerts. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.jrustonapps.lightningtracker>, February 2025. Aplicación móvil descargada en febrero de 2025.
- [41] Lukasz Natuszewski Tomasz Kossowski. Non-real-time wireless system for lightning effect measurements. *Applied Sciences*, 2021.
- [42] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, 4th edition, 2016.
- [43] Wikipedia contributors. Very low frequency — Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2024. [Online; accessed 22-May-2025].
- [44] E. E. Ávila, L. Martínez, R. Pereyra, T. Lang, W. Deierling, M. Wingo, G. Melo, and B. Medina. Measurements of size and electrical charges carried by precipitation particles during relampago field campaign. *Earth and Space Science*, 9(9):e2022EA002407, 2022.

Capítulo 6

Anexo

En este anexo se incluye una descripción del material complementario que respalda el desarrollo de este trabajo. Se presentan los códigos empleados para el análisis y procesamiento de los datos experimentales, el control de un generador de funciones variable, así como los datos captados por la antena y el osciloscopio durante los periodos de medición. Se incluye también el planteamiento de un experimento para medir la carga de las gotas de lluvia que no se pudo realizar.

6.1. Acceso a Código Fuente y Datos Experimentales

Todo el material de estudio se encuentra disponible en un repositorio de GitHub, el cual ha sido habilitado como plataforma centralizada para su consulta, descarga y posible reutilización por parte de otros investigadores.

Los códigos, escritos en Python, están subidos al repositorio por accesibilidad, así como modificación y adaptación a otros estudios, si fuera necesario. Los datos experimentales adquiridos por la antena y el osciloscopio han sido almacenados en formato binario, optimizados para su análisis posterior.

El acceso al repositorio se realiza a través del siguiente enlace:

`https://github.com/pablosb16/PSB---Descargas-electricas-en-la-atmosfera`

El repositorio está dividido en diversas carpetas, cada una con un propósito específico y un archivo *README.txt*, que resume y explica el repositorio y el trabajo. A continuación se describe el contenido y la función de cada carpeta:

- **Documentos:** En esta carpeta se encuentra el proyecto de Investigación y el póster elaborado como parte de la asignatura de *Laboratorio Avanzado*, que puede ser interesante para comprender más a fondo la metodología del trabajo y facilitar la difusión del mismo de manera visual.

- **Datos:** Aquí se almacenan los datos en formato binario correspondientes a las mediciones de voltaje versus tiempo obtenidas del osciloscopio. Se suben los archivos de rayos reales, sintéticos y algunos de buen tiempo, aunque no todos, ya que son miles de archivos que en total ocupan centenas de gigabytes.
- **Códigos:** En esta carpeta están todos los scripts y programas creados para la realización del trabajo. Cada código tiene una función específica, desde la adquisición de datos hasta el procesamiento y análisis de los mismos.
- **Figuras y Tablas:** Esta carpeta contiene los códigos de Python utilizados para recrear las gráficas y visualizaciones del informe. Además, incluye los documentos de Excel que fueron utilizados en el análisis de los datos y la creación de las tablas.
- **Notas:** Esta carpeta está destinada a contenidos que aún no están completamente definidos o que son de carácter más misceláneo. Aquí se pueden encontrar ideas preliminares, borradores, o cualquier otro material relacionado con el proyecto que no encaje en las demás categorías.

6.2. Planteamiento del Experimento para la Determinación de la Carga de una gota de Lluvia

6.2.1. Introducción

Al inicio del proyecto, se planteó la posibilidad de llevar a cabo un experimento basado en el realizado por Simpson a principios del siglo XX durante los monzones en la India, para determinar la carga de la lluvia. En aquel entonces, se utilizaban recipientes metálicos conectados a un electrómetro, un dispositivo altamente sensible capaz de medir cargas eléctricas. Cuando las gotas de lluvia caían en el colector, su carga se transfería al electrómetro, cuya desviación indicaba la cantidad de carga acumulada. Inspirados en este enfoque, se propone un experimento actualizado para analizar la carga eléctrica de las gotas de lluvia y su comportamiento en presencia de campos eléctricos.

Este experimento tiene como objetivo mejorar la comprensión sobre los mecanismos de electrificación de la lluvia y su impacto en los fenómenos atmosféricos, proporcionando datos que permitan correlacionar la carga eléctrica de las gotas de lluvia con las descargas eléctricas asociadas.

No obstante, la falta de tiempo y la ausencia de un dispositivo experimental especializado limitan y dificultaron la realización del mismo, por lo que se decidió abandonar este experimento. Por otro lado, determinar el valor promedio de la carga de las gotas de lluvia puede no ser particularmente relevante para este trabajo, ya que no se contempla un uso inmediato para dicho dato. Sin embargo, este valor podría ser de interés en el contexto de una investigación más exhaustiva, por lo que se expondrá el experimento propuesto para su futura implementación.

El experimento constaría de dos partes:

- En la **primera fase**, se haría que las gotas de lluvia atravesaran un embudo diseñado para garantizar que solo aquellas que caigan perpendicularmente pasen a una cavidad donde se dispondrá un condensador de placas plano-paralelas. En este sistema, la aplicación de un campo eléctrico permitiría observar la deflexión de las gotas debido a la fuerza de Coulomb. Una cámara de alta velocidad registraría su trayectoria para analizar los efectos de la interacción entre la carga de las gotas y el campo eléctrico aplicado.
- En la **segunda fase**, todas las gotas serían recogidas en un contenedor. Se aplicaría una diferencia de potencial para trazar la curva de intensidad frente al voltaje, obteniendo así la ordenada en el origen, la cual proporcionaría la carga neta del agua contenida en el sistema. Este análisis permitiría cuantificar la carga media transportada por las gotas de lluvia y evaluar su distribución en diferentes condiciones atmosféricas.

6.2.2. Consideraciones previas

Antes de realizar el experimento, se ha hecho un cálculo aproximado del campo eléctrico que se debe mantener entre las placas para apreciar una desviación de 1 mm.

En el eje Y suponemos que la gota alcanzó su velocidad terminal y que la cavidad es de 30 cm:

$$y = vt \Rightarrow t = \frac{0,3 \text{ m}}{6 \text{ m/s}} = 0,05 \text{ s} \quad (6.1)$$

En el eje X, el campo eléctrico es tal que $\vec{E} = E \vec{u}_x$, y suponiendo una carga eléctrica en la gota de 10 pC [44]:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q\vec{E}}{m} \quad (6.2)$$

$$\Delta x = v_{0x}t + \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2 \Rightarrow E \approx 1,5 \cdot 10^9 \text{ V/m} \quad (6.3)$$

Este valor del campo eléctrico para apreciar una desviación de un milímetro es extremadamente alto. No solo puede ser peligroso manejar un condensador tan cargado en un entorno húmedo, sino que además, como se muestra en la figura 3.1, la rigidez dieléctrica a 1 atm y 298 K, que serán aproximadamente las condiciones del experimento, es de $3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$, por lo que se rompería el dieléctrico del aire, generando un rayo entre ambas placas.

Por tanto, esta primera parte del experimento se considera inviable.

6.2.3. Dispositivo experimental

El dispositivo experimental que se utilizará para la medición de la carga de la gota de lluvia consta de los siguientes elementos:

- Un **embudo** para asegurar la caída perpendicular de las gotas de lluvia.

- Una **cámara de alta velocidad** para registrar la trayectoria de las gotas y su deflexión en el campo eléctrico.
- Un **multímetro** de alta precisión para medir la corriente desde el agua cargada a tierra.

6.2.4. Conclusión

Pese a que no se pudo llevar a cabo el experimento propuesto debido a limitaciones técnicas y de tiempo, su planteamiento ha permitido explorar de manera rigurosa los desafíos asociados a la medición de la carga eléctrica en gotas de lluvia. También se destaca la importancia del análisis preliminar, tanto teórico como de viabilidad experimental, ha evidenciado la complejidad de reproducir condiciones controladas para producir desviaciones mínimas provocadas por campos eléctricos en un entorno atmosférico real.

No obstante, la formulación del experimento ha sido útil para identificar las variables críticas implicadas en la electrificación de la lluvia y su posible vínculo con fenómenos eléctricos transitorios en la atmósfera. Esta propuesta experimental, aunque no ejecutada, constituye una base sólida para futuras investigaciones en el área, y puede ser retomada y optimizada con equipamiento más especializado en un contexto de investigación más amplio.