



UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

# EL EMPLEO Y VALIDEZ DE LAS REDES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ELÉCTRICAS COMO FUENTE DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA EN ESPAÑA

Florencio Rey

Grau de Geografia. Treball final de Grau.

Tutora: Dra. M<sup>a</sup> Carmen Moreno

Curs 2018 - 2019

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.</b> ....	<b>4</b> -
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b> -
1.1. Motivación y tema de estudio .....	5 -
1.2. Objetivos .....	5 -
1.3. Metodología .....	6 -
<b>2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA</b> .....	<b>7</b> -
2.1. Historia .....	7 -
2.2 La electricidad atmosférica en la ciencia moderna .....	8 -
<b>3. CARACTERÍSTICAS DE UNA TORMENTA</b> .....	<b>10</b> -
3.1. El rayo.....	10 -
3.2. El trueno .....	12 -
3.3. Tipos de descargas eléctricas .....	13 -
3.3.1. Descargas nube-tierra .....	13 -
3.3.2. Descargas nube-nube .....	14 -
3.3.3. Descargas intra-nube.....	14 -
3.4. Proceso de descarga eléctrica atmosférica .....	15 -
<b>4. REDES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ELÉCTRICAS</b> .....	<b>17</b> -
4.1. Detectores de descargas eléctricas.....	17 -
4.2. Técnicas de geolocalización de las descargas eléctricas .....	18 -
4.2.1. Sistema TOA .....	18 -
4.2.2. Sistema DF .....	19 -
4.2.3. Ventajas del sistema TOA frente al DF .....	20 -
4.3. Rendimientos de las redes de detección .....	21 -
4.3.1. Eficiencia de detección ( <i>Detection Efficiency, DE</i> ).....	21 -
4.3.2. Eficiencia de localización ( <i>Location Accuracy, LA</i> ).....	21 -
<b>5. REDES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ELÉCTRICAS EN ESPAÑA</b> .....	<b>22</b> -
5.1. La red REDRA de AEMET .....	23 -
5.2. La red XDDE del Servei Meteorològic de Catalunya .....	24 -
5.3. La red de Detección de Descargas Eléctricas de MeteoGalicia .....	25 -
5.4. La red de Detección de Descargas Eléctricas de Euskalmet .....	26 -
5.5. La red de Detección de Descargas Eléctricas de Earth Networks .....	26 -
<b>6. CLIMATOLOGÍA DE TORMENTAS EN ESPAÑA.</b> .....	<b>29</b> -
6.2. Densidad de descargas eléctricas en la Península Ibérica, Baleares y Canarias.....	29 -
6.3. Días de tormenta en España.....	31 -
<b>7. METODOLOGÍA DE DETECCIÓN DE DEPÓSITOS GEOLÓGICOS A TRAVÉS DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS</b> .....	<b>33</b> -
7.1. Propiedades de los depósitos geológicos y su relación con las descargas eléctricas-	34 -
7.2. Resistencia y resistividad de los depósitos geológicos. Corrientes telúricas y actividad eléctrica atmosférica .....	36 -

<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>- 38 -</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>- 39 -</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura eléctrica de una nube de tormenta, de acuerdo con el modelo tripolar (Fuente: adaptado de Encyclopaedia Britannica, 1999).....	- 12 -
Figura 2. Génesis de una descarga negativa (Fuente: Uman, 1987) .....	- 16 -
Figura 3. Esquema de funcionamiento básico de un sistema TOA (Fuente: Heckman y Liu, 2010) .....	- 19 -
Figura 4. Mapa con la distribución de los detectores de los rayos SSDE / AEMET de las redes española (azul), portuguesa (amarillo) y francesa (rosa) (Fuente: AEMET) .....	- 23 -
Figura 5. Disposición de los sensores de la XDDE y estimación teórica de la eficiencia de detección de la misma red (Fuente: MeteoCat).....	- 24 -
Figura 6. Disposición de los sensores de la red de detección de descargas eléctricas de MeteoGalicia (Fuente: MeteoGalicia) .....	- 25 -
Figura 7. Capacidad de detección (%) de descargas Nube–Tierra de la red ENTLN en España y Portugal (Fuente: Earth Networks Inc.).....	- 26 -
Figura 8. Capacidad de detección (%) de descargas Nube–Nube de la red ENTLN en España y Portugal (Fuente: Earth Networks Inc.).....	- 27 -
Figura 9. Eficiencia de localización (m) de descargas Nube–Tierra de la red ENTLN en España y Portugal (Fuente: Earth Networks Inc.).....	- 27 -
Figura 10. Mapa de densidad de descargas eléctricas (descargas / Km <sup>2</sup> ) en la Península Ibérica y Baleares. Fuente: Núñez et al., 2018 .....	- 30 -
Figura 11. Mapa de densidad de descargas eléctricas (descargas / Km <sup>2</sup> ) en el archipiélago canario. Fuente: Núñez et al., 2018 .....	- 31 -
Figura 12. Mapa del promedio de días de tormenta al año en la Península Ibérica y Baleares. Fuente: Núñez et al., 2018 .....	- 32 -
Figura 13. Modelo teórico sobre la influencia de los depósitos geológicos en la localización de las descargas eléctricas propuesto por Nelson (Fuente: Nelson, 2017).....	- 35 -
Figura 14. Modelo de resistencia combinada atmosférica (R1) y de subsuelo (R2) para el condensador atmosférico que produce las descargas eléctricas (Fuente: Nelson, 2017) -	36

-

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación y tema de estudio

Mi vida profesional ha girado en torno a la meteorología y la climatología aplicadas a distintos campos, especialmente al de la comunicación meteorológica / climática y la meteorología profesional. Por ello he tenido la oportunidad de poder trabajar con diversas fuentes de información geográfica: datos meteorológicos, climáticos, poblacionales o geofísicos, todas ellas de naturaleza siempre bien distinta.

Desde hace diez años trabajo en el campo del seguimiento global y en tiempo real de las descargas eléctricas en la troposfera ligadas a la actividad convectiva, una actividad de teledetección atmosférica con estaciones en superficie que presta un notable servicio a la comunidad científica a la hora de determinar la evolución de la actividad convectiva a escala local, regional y global.

Gracias al contacto con diversos investigadores he descubierto que existe una potencial ligazón entre la actividad atmosférica eléctrica total y la disposición de depósitos geológicos en el subsuelo. Creo que este tema es de gran interés y puede constituir una hipótesis de trabajo que contemple la posibilidad de convertir una fuente de información meteorológica disponible en tiempo real, a cualquier escala y con una sólida base climática, en una potencial y eficaz herramienta de prospección geológica.

## 1.2. Objetivos

El objetivo fundamental de este trabajo es el de establecer la validez de los datos de detección de descargas eléctricas atmosféricas totales (nube/nube y nube/tierra) como fuente fiable de información geofísica.

Un objetivo secundario será el de establecer la potencial utilización de dicha fuente de información geofísica para la prospección de depósitos subterráneos de agua en regiones áridas y semiáridas.

Como hipótesis principal de trabajo se plantea que la recurrencia de las descargas eléctricas sobre una determinada zona geográfica pueda estar relacionada con la estructura geológica del subsuelo. Varios modelos conceptuales han sido propuestos para, fundamentalmente, la prospección indirecta de depósitos de combustibles fósiles. En concreto, el modelo conceptual escogido es el que considera el sistema atmósfera – tierra como un oscilador de relajación, en el que la carga del mismo va aumentando con el tiempo. Cuando la diferencia de potencial entre ambas partes del oscilador alcanza un nivel determinado se produce la descarga. Gracias a las precisas redes de observación disponibles se pueden conocer los detalles de cada una de las descargas individualmente (hora de la descarga, polaridad, intensidad, resolución espacial de las descargas nube tierra, altitud de las descargas nube-nube...) Así, la resistividad y permitividad de los depósitos subterráneos puede ser inferida.

Para el caso particular de las aguas subterráneas, existen escasas referencias a los depósitos de agua subterráneos, a pesar de que las características fisicoquímicas del elemento podrían favorecer un modelo conceptual que las relacione de manera más estrecha con la actividad eléctrica atmosférica.

### 1.3. Metodología

Este TFG se basa en la descripción de las bases de datos de descargas eléctricas atmosféricas disponibles, de sus características comunes y de su potencial uso en la prospección de depósitos subterráneos, en especial, los de agua freática. El desarrollo de nuevos métodos de detección de descargas eléctricas totales (nube-nube y nube tierra) desde los años sesenta del pasado siglo ha desembocado (en especial en los últimos diez años) en la generación de una importante base de datos global, regional y local basada en redes de detección fiables, altamente precisas y poco costosas.

Gracias a esos avances, las bases de datos sobre actividad eléctrica atmosférica pueden ser consideradas como un nuevo parámetro capaz de aportar información precisa acerca del clima global / regional. Basten como ejemplo las climatologías que sobre la actividad tormentosa han sido publicadas en nuestro país (Pérez y Zancajo, 2004; AEMET, 2019).

Existen escasas referencias sobre los depósitos de agua subterráneos, a pesar de que las características fisicoquímicas del elemento podrían favorecer un modelo conceptual que las relacione de manera más estrecha con la actividad eléctrica atmosférica.

El fin último del trabajo, como se ha mencionado con anterioridad en los objetivos propuestos, es del de establecer la validez de los datos procedentes de las redes de observación de descargas atmosféricas totales como fuente de información geofísica. Para establecer dicho vínculo se describirán las técnicas estadísticas más adecuadas para tratar de determinar un procedimiento operativo que se base en los datos geofísicos clásicos (naturaleza de los materiales) y los procedentes de las bases de datos de descargas eléctricas totales.

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA

### 2.1. Historia

A lo largo de la historia de las civilizaciones, las representaciones artísticas del rayo son numerosas y lo describen como un elemento castigador, temible, enviado por los dioses. La mitología clásica griega lo representa como un destello atmosférico de orígenes sobrenaturales: la expresión de la ira de las deidades. Los griegos temían el rayo enviado por Zeus, quien en su representación clásica aparece con uno de ellos en su mano.

En las culturas nórdicas la referencia a los rayos es continua y fundamental. Para los vikingos, el rayo nace con Thor, cuando su martillo golpea un yunque mientras dirige

su carro a través de las nubes. En las civilizaciones orientales, las primeras estatuas conocidas de Buda lo muestran cargando un rayo con flechas en cada extremo. Las tribus indias en América del Norte creían que los relámpagos se debían a las brillantes plumas de un ave mística cuyas alas batientes producían el sonido de un trueno.

Más allá de las representaciones mitológicas del rayo asociadas a deidades de las culturas clásicas, casi todas las civilizaciones antiguas aprendieron a convivir de manera práctica con las descargas eléctricas, bien evitándolas como medida de protección, bien como un indicio para la localización de depósitos de metales.

## 2.2 La electricidad atmosférica en la ciencia moderna

Benjamin Franklin fue el primer científico que llevó a cabo un estudio sistemático sobre la electricidad atmosférica durante la segunda mitad del siglo XVIII. Antes de dicha investigación, la ciencia eléctrica se había ido desarrollando muy lentamente, aunque se había conseguido que las cargas positivas y negativas pudieran ser separadas en un laboratorio como el que disponía Franklin (Viemeister, 2013). Era ya un hecho conocido que determinados instrumentos de laboratorio podían, al frotar dos de ellos fabricados con diferentes materiales, almacenar las cargas en condensadores primitivos llamados 'jarrones de Leyden' a partir de los cuales se podrían generar y observar chispas.

Aunque otros científicos habían descrito previamente la similitud entre las chispas de los jarrones de Leyden y los rayos, Benjamin Franklin fue el primero en diseñar un modelo teórico y un experimento para demostrar, de manera concluyente, la naturaleza eléctrica de los rayos. Sus numerosos ensayos demostraron que las nubes están cargadas eléctricamente, de lo que se deduce que los rayos deben tener, a su vez, un origen eléctrico.

El experimento de laboratorio con el que Franklin demostró el origen eléctrico del rayo consiste en colocar un observador de pie sobre un soporte conductor eléctrico a la vez que sostiene una barra de hierro con una mano para así intentar atraer una descarga eléctrica desde la nube hacia la otra mano y el suelo. Si se considera que las nubes

están cargadas eléctricamente, las chispas saltarían entre la barra de hierro y el soporte. Para llevar a la práctica esta experiencia en un entorno real, Franklin propuso sustituir al observador por un cable conductor aislado recubierto de cera.

El experimento en condiciones atmosféricas reales fue realizado con éxito por primera vez por Thomas François D'Alibard en Francia, en mayo de 1752 cuando observó que las chispas saltaban de la barra de hierro al soporte eléctrico durante una tormenta. Poco después, en julio de 1753, G. W. Richmann, un físico sueco que trabajó en la corte del Zar de Rusia, demostró de la misma manera que las nubes de tormenta contienen carga eléctrica, pero falleció alcanzado por una descarga eléctrica cuando trataba de emular el experimento de Franklin a campo abierto.

Para evitar los riesgos asociados a la primera versión de su experimento fuera del laboratorio, Franklin propuso una manera más adecuada de probar su hipótesis mediante el uso de una cometa. En este nuevo ensayo la cometa sustituye a la barra de hierro, ya que podía alcanzar una mayor elevación y podía desplazarse a voluntad del científico, quien la manejaría de manera segura gracias a un hilo aislante. Así, durante una tormenta eléctrica en Pensilvania, en el otoño de 1752, Franklin hizo volar una cometa cerca de la base de un cumulonimbo (Golde, 1977). Franklin observó por primera vez cómo una llave atada a un cabo al final de la cometa producía pequeñas descargas eléctricas visibles, demostrando así que la nube de tormenta generaba la corriente eléctrica suficiente para generar las chispas en la llave.

Además de demostrar que las tormentas generan electricidad, al medir el signo de la carga inducida a través de la cometa, Franklin pudo inferir que la parte inferior de la tormenta estaba, generalmente, cargada de manera negativa.

Tras las experiencias de Franklin los avances en el conocimiento de la electricidad atmosférica fueron lentos y escasos hasta finales del siglo XIX, cuando la fotografía y las herramientas espectroscópicas pudieron ser aplicadas en nuevos experimentos. El ensayo más importante de la época fue realizado por el científico austriaco Friederich Pockels entre 1897 y 1900. Pockels realizó mediciones de la corriente de rayos en Alemania analizando el campo magnético inducido por el rayo para estimar los valores

reales. El experimento de Pockels es la base de los actuales detectores de rayos basados en la variación de campo magnético.

Numerosos experimentos científicos utilizaron fotografías de alta resolución temporal –con la conocida y limitada capacidad tecnológica de finales del siglo XIX- para identificar los rayos individuales (descargas ‘lead’ o ‘conductores’) que finalmente forman una descarga nube-tierra.

La investigación del rayo y las descargas eléctricas en la época moderna parte del trabajo del físico C.T.R. Wilson, quien, basándose en las experiencias de Pockels, fue el primero en utilizar mediciones de campo eléctrico para estimar la estructura de las cargas en una tormenta eléctrica típica. Wilson ganó el Premio Nobel por la invención de la Cámara de Nubes.

La investigación sobre la actividad eléctrica atmosférica global continuó a un ritmo constante, pero sin grandes avances hasta finales de la década de 1960, cuando se vio impulsada por la carrera armamentística y espacial en el marco de la guerra fría. Los rayos constituyen una amenaza y un peligro para las estaciones de lanzamiento de vehículos espaciales y misiles balísticos, así como para los componentes electrónicos de estado sólido utilizados en las computadoras y otros dispositivos de posicionamiento y guía de las aeronaves tripuladas o de los misiles. Gracias a dicho impulso, la tecnología disponible para el estudio y seguimiento de la actividad eléctrica atmosférica condujo a la creación de las actuales redes de medición en tiempo real que ofrecen una información muy precisa de la actividad eléctrica en la troposfera.

### 3. CARACTERÍSTICAS DE UNA TORMENTA

#### 3.1. El rayo

El proceso de formación de un rayo forma parte del circuito eléctrico atmosférico global. La atmósfera en su conjunto se ioniza por la acción de la radiación solar, de la radiación cósmica o bien de la radiación natural con origen en el propio planeta. La

distribución de los iones se realiza de manera heterogénea y esa es la causa de la aparición de una elevada concentración en la ionosfera. A la vez, tres cuartas partes del planeta están cubiertos por agua. Los iones disueltos facilitan la conducción eléctrica en superficie. Por consiguiente, la atmósfera junto con la superficie terrestre forma un gigantesco condensador esférico. La corriente eléctrica generada, en ausencia de fenómenos meteorológicos adversos, fluye de la ionosfera a la superficie terrestre y transporta cargas muy pequeñas (2 pA/m). Es la 'corriente eléctrica de buen tiempo'.

Visto lo anterior, y de acuerdo con la física elemental del condensador, parece razonable pensar que existe un mecanismo encargado de mantener la diferencia de potencial entre las placas del condensador esférico. Ese es el papel que juegan las tormentas en la troposfera. De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial, un rayo es 'una descarga brusca de electricidad atmosférica que se manifiesta por un resplandor breve (relámpago) y por un ruido seco o estruendo (trueno) (OMM, 2019). En consecuencia, el rayo se origina en el interior de las tormentas que tienen lugar en la troposfera.

Existen varios modelos de electrificación para las nubes de tormenta, aunque el más aceptado es el modelo tripolar (Williams, 1989). A medida que las partículas que constituyen el cumulonimbo crecen por agregación e interactúan, algunas se cargan eléctricamente debido a las colisiones directas entre ellas. Las partículas más pequeñas tienden a adquirir carga positiva, mientras que las partículas de mayor tamaño adquieren carga negativa. Las partículas de diferente tamaño tienen a concentrarse en distintas áreas de la nube con una distribución que atiende a la disposición de las corrientes convectivas, ascendentes y descendentes, y a la gravedad.

La parte superior de la nube adquiere una carga positiva neta (puesto que las partículas de menor tamaño y peso tienden a ascender hacia la parte superior de la nube). Esta zona cargada positivamente corresponde a una isoterma aproximada de -40°C. De manera análoga aparece en la parte central de la nube una zona cargada negativamente, donde la temperatura es de aproximadamente -15°C. Finalmente, la base de la nube se carga de manera positiva, en una zona donde la temperatura se

mueve en el entorno de los 0°C. La Figura 1 muestra la estructura eléctrica tripolar de una nube de tormenta.

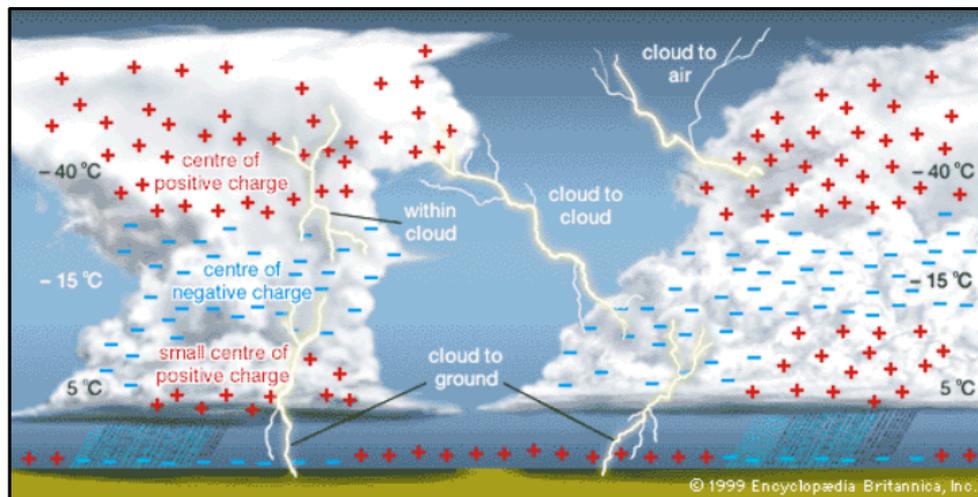


Figura 1. Estructura eléctrica de una nube de tormenta, de acuerdo con el modelo tripolar (Fuente: adaptado de Encyclopaedia Britannica, 1999).

La separación de carga produce un potencial eléctrico enorme tanto dentro de la nube como entre la nube y la superficie terrestre. Se estima que el potencial eléctrico generado puede ascender a millones de voltios en una única nube de tormenta.

En un determinado momento la resistencia eléctrica del aire se rompe y da lugar al destello que conocemos como rayo. El rayo es una descarga eléctrica en forma de plasma entre las regiones positiva inferior de la nube de tormenta y negativa de la superficie terrestre.

### 3.2. El trueno

El sonido que genera una descarga eléctrica entre un cumulonimbo y la superficie terrestre se produce alrededor del canal de descarga del propio rayo, en toda su longitud. El canal de descarga es el conducto por el que circula la corriente eléctrica entre la nube y el suelo, en forma de plasma de electrones. A medida que la capa de aire en contacto con el canal de descarga se calienta al paso del flujo de plasma, la temperatura del aire en la zona en contacto con el canal llega a alcanzar los 20.000°C (3 veces la temperatura de la superficie del Sol) (Uman, 1986). Este súbito

calentamiento comprime extraordinariamente el aire que envuelve el canal y lo hace estallar. La explosión produce una onda de choque, que a su vez se transforma en una onda acústica a medida que se propaga al alejarse del canal de descarga del rayo: el trueno.

Aunque el destello lumínico y el trueno resultante se producen esencialmente al mismo tiempo, la luz viaja a 320.000 km/s, casi un millón de veces la velocidad del sonido. El sonido viaja a una velocidad de 330 m/s en la atmósfera. Así, el destello se puede observar mucho antes de que se escuche el trueno.

### 3.3. Tipos de descargas eléctricas

#### 3.3.1. Descargas nube-tierra

Las descargas nube-tierra son la forma más evidente, dañina y peligrosa de la actividad eléctrica atmosférica, aunque no la más común. La mayor parte de la investigación sobre electricidad atmosférica se basa en el estudio de este tipo de descargas y, hasta el momento, es el tipo mejor descrito. Como se ha expuesto en el apartado anterior, la parte inferior de la nube acumula una mayor cantidad de partículas cargadas negativamente. Así, los rayos nube-tierra que tienen su origen en dicha zona de la nube transportan carga negativa a la superficie. Son las *descargas de polaridad negativa*. A su vez, una descarga con origen en la superficie de la tierra conduce carga positiva a la base de la nube y se la conoce como *descarga de polaridad positiva*.

Existe un menor número de descargas que llevan carga positiva a la nube. La proporción entre descargas positivas y negativas en cualquier tormenta es de aproximadamente 1:10. Las descargas de polaridad positiva a menudo ocurren durante la etapa de disipación de una tormenta y son, en su gran mayoría, las descargas de mayor intensidad y las potencialmente más dañinas. Desde un punto de vista estacional, las descargas de polaridad positiva son más frecuentes en las situaciones convectivas invernales y primaverales (Heckman y Liu, 2010).

### 3.3.2. Descargas nube-nube

Las descargas entre nubes, como su nombre indica, se producen entre zonas de acumulación de carga de dos nubes diferentes. La descarga se produce en el espacio de aire claro que existe entre ellas. Son de intensidad sensiblemente menor que las descargas intra-nube.

### 3.3.3. Descargas intra-nube

Las descargas intra-nube son el tipo más común de descarga atmosférica y se producen entre zonas con carga opuesta dentro de la misma nube. El proceso a ojos de un observador externo se manifiesta como un destello difuso parpadeante. Sin embargo, en ocasiones dicho destello puede rebasar el límite de la nube y un canal brillante, parecido al de una descarga nube a tierra, puede ser visible a considerable distancia.

La proporción de descargas nube-tierra e intra-nube varía significativamente entre situaciones convectivas diferentes e incluso en el mismo episodio. Los cumulonimbos con mayor desarrollo vertical suelen producir descargas intra-nube casi de manera exclusiva. Algunos estudios sugieren que el número de descargas eléctricas intra-nube depende de la latitud. De acuerdo con los mismos, en latitudes tropicales y ecuatoriales los núcleos convectivos generan un mayor número de descargas nube-nube, mientras que las tormentas de latitudes altas generan un mayor número de descargas nube-tierra. Otros autores sugieren que la altura de la cima del cumulonimbo es una variable más importante que la latitud (Barry y Chorley, 2010).

De todas formas, todavía no se ha podido describir de manera definitiva por qué una descarga permanece dentro de una nube o llega a tierra. Una explicación plausible apunta a que una descarga se propaga en dirección a la superficie cuando el gradiente del campo eléctrico en las regiones más bajas de la nube es más intenso en la dirección a la superficie terrestre.

Dependiendo de la altitud que alcance la nube y de los cambios en la intensidad del campo eléctrico entre la nube y la Tierra, la descarga se mantiene dentro de la nube o hace contacto directo con la Tierra. Si la intensidad de campo eléctrico es más alta en las regiones más bajas de la nube, puede ocurrir un destello hacia abajo desde la nube a la Tierra.

#### 3.4. Proceso de descarga eléctrica atmosférica

El modelo teórico propuesto por la mayoría de investigaciones sobre electricidad atmosférica es, todavía, aproximado (Uman, 1987). Dicho modelo teórico toma como referencia una región en la que la presencia de cumulonimbos sea significativa. En ella pueden medirse fuertes campos eléctricos y diferencias de potencial de millones de voltios entre la base de la nube y la superficie. En un momento determinado, cuando el campo eléctrico es lo suficientemente intenso, el aire que separa la base del cumulonimbo y la superficie pierde su capacidad resistora. Dentro de la nube se produce un proceso de ruptura (*preliminary breakdown*) que desencadena la formación de la denominada guía escalonada (*stepped leader, SL*) que formará uno o varios canales. Uno de ellos evoluciona claramente hacia la superficie de la Tierra. Cuando la SL adelantada se aproxima a la superficie de la Tierra se forman una o más guías ascendentes (*upward leaders, UL*) que suben al encuentro de la SL. Al encuentro entre la SL y la UL se le denomina acoplamiento o *attachment* y suele ocurrir a decenas de metros de altura (si el rayo es descendente) o centenares de metros (si es ascendente). El acoplamiento es la primera fase de la descarga de retorno (*return stroke, RS*) la cual neutraliza la carga transportada por la SL. En algunas ocasiones se forma una segunda guía descendente (*dart leader*) que se ramifica cerca del suelo y origina múltiples descargas en la superficie. La Figura 2 muestra gráficamente el modelo descrito y en una serie cronológica típica de escala inferior al segundo.

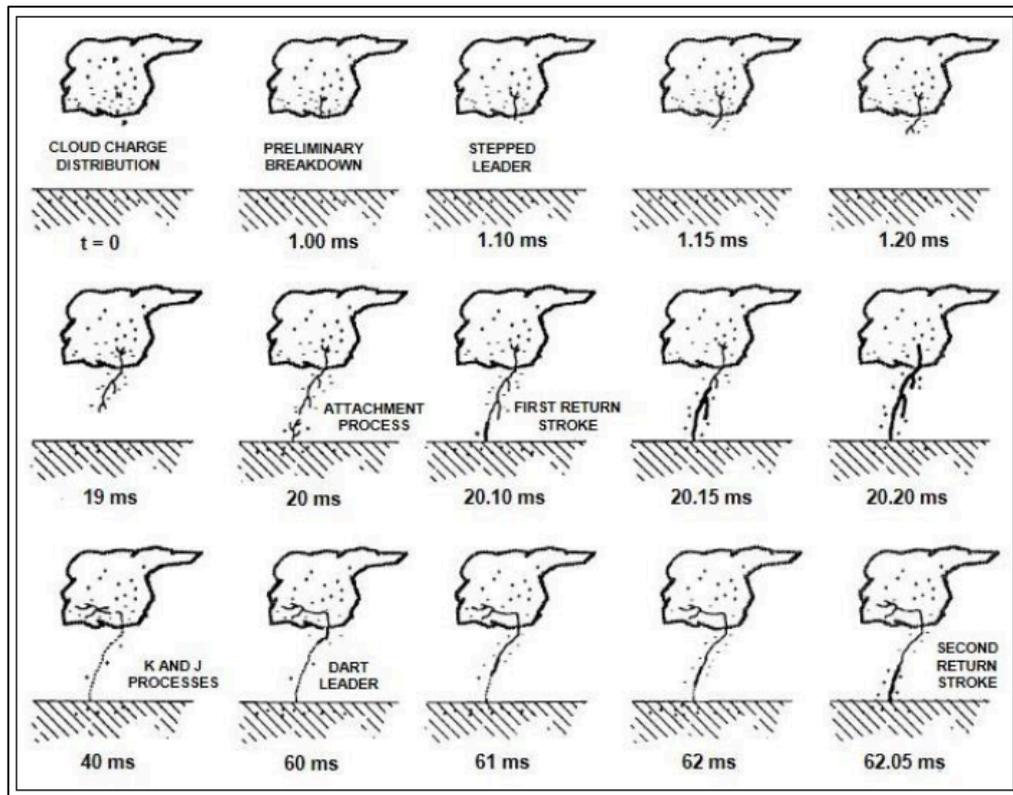


Figura 2. Génesis de una descarga negativa (Fuente: Uman, 1987)

## 4. REDES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ELÉCTRICAS

### 4.1. Detectores de descargas eléctricas

La mayoría de los métodos geofísicos en uso actualmente por los servicios meteorológicos no son más que evoluciones de tecnologías y conceptos que se remontan a la Segunda Guerra Mundial. Los instrumentos de medición, los métodos de análisis y proceso, así como los sistemas de control de calidad de los datos procedentes de las redes de observación de descargas eléctricas han experimentado mejoras tecnológicas espectaculares, en especial en los últimos 15 años, pero la ciencia subyacente sigue siendo la misma: medir los cambios del campo electromagnético y analizar los pulsos electromagnéticos que emiten las descargas eléctricas.

Con el fin de detectar y localizar, de la manera más precisa posible, las descargas eléctricas atmosféricas se utilizan sistemas basados en detectores instalados en la superficie terrestre o bien en plataformas de observación a bordo de satélites. Esta última tecnología es relativamente moderna y se encuentra en fase de experimentación. Los resultados obtenidos tanto por EUMETSAT como por NOAA son esperanzadores, pero todavía se encuentran lejos de ofrecer la resolución espacial y temporal de los ubicados en la superficie terrestre.

Los sistemas terrestres comúnmente utilizados por los servicios meteorológicos de todo el mundo están constituidos por redes de detectores terrestres (al menos cinco) que detectan señales en el espectro radioeléctrico desde muy baja frecuencia (LF) hasta frecuencias ultra-altas (UHF). Cada sensor mide la señal electromagnética producida por una descarga eléctrica y envía la información captada al procesador central, donde, mediante un algoritmo complejo de triangulación, se estima la localización del rayo, su polaridad, intensidad y su tipo.

Dependiendo de la ubicación de los sensores de la red terrestre pueden diferenciarse cuatro tipos fundamentales de redes de detección (Nag et al., 2015):

- Sensores muy próximos. Separados centenares de metros, analizan muy altas frecuencias, entre 30 y 300 MHz y son utilizados en aeropuertos y centrales nucleares.
- Sensores próximos. Separados por decenas de kilómetros, operan en la banda de VHF entre los 30 y los 300 MHz.
- Sensores de media distancia. Están instalados a distancias de entre 150 y 500 km, con análisis de frecuencia entre 3 y 300 KHz.
- Sensores distantes. Separados por centenares o miles de kilómetros, operan VLF y LF de 3 a 300 KHz.

A la clasificación propuesta por Nag cabe añadir la de sensores mixtos, dotados con tecnología capaz de operar en bandas de baja y muy baja frecuencia a la vez que con parte del espectro radioeléctrico de alta frecuencia (rango de operación de entre 3 KHz y 12 MHz).

## 4.2. Técnicas de geolocalización de las descargas eléctricas

Una vez que la señal detectada por los sensores llega a la unidad central de proceso (sea ésta un servidor físico o un sistema *'cloud-computing'*), se somete a un algoritmo cuya función es la de precisar la ubicación de una descarga mediante dos métodos diferenciados: la triangulación (tecnología Time Of Arrival o TOA) o la técnica radiogonométrica (Radio Direction Finder, DF).

### 4.2.1. Sistema TOA

La propagación de la señal electromagnética generada por el rayo se produce a la velocidad de la luz y en todas direcciones. Por consiguiente, los elementos que componen una red TOA detectan en instantes diferentes dicha señal, dependiendo de la distancia entre el rayo y el sensor (Heckman y Liu, 2010). Tomando el tiempo de desfase entre la detección para cada uno de los sensores el sistema define un conjunto de hipérbolas de posibles ubicaciones que, finalmente, acerca la posición estimada de

la descarga con un rango de error de entre centenares de metros y varios kilómetros, dependiendo del número de sensores instalados en la región (Fig. 3).

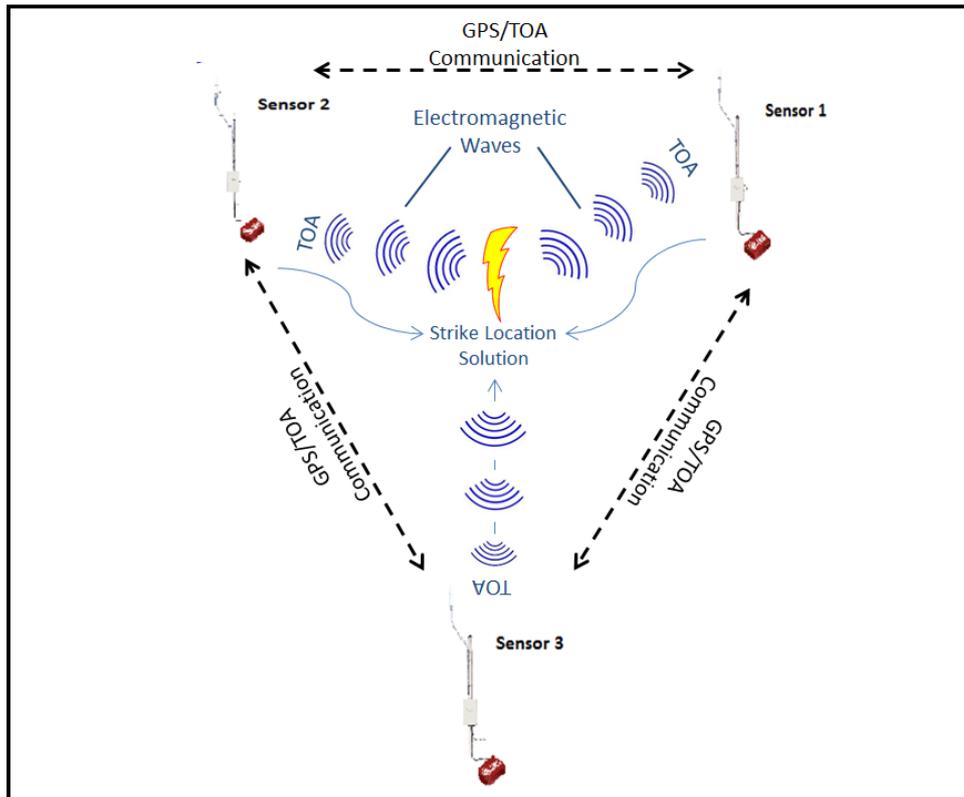


Figura 3. Esquema de funcionamiento básico de un sistema TOA (Fuente: Heckman y Liu, 2010)

Esta técnica de estimación de la posición de una descarga requiere una perfecta sincronización del reloj que alimenta a los sensores, una precisa localización GPS de cada sensor en el momento de la descarga (lo que abre la puerta a que el sensor sea móvil) así como un riguroso proceso de la señal procedente de cada uno de los sensores para así evitar los falsos positivos.

#### 4.2.2. Sistema DF

Los sistemas que emplean esta tecnología requieren dos antenas de escucha electromagnética de cuadro colocadas vertical y ortogonalmente entre sí, orientadas norte-sur y este-oeste (Krider et al., 1976). Otra antena colocada horizontalmente determina la polaridad de la descarga. El campo magnético generado por el rayo induce una corriente detectada en las antenas de radio. El voltaje medio de la descarga está asociado a la fuerza del campo magnético generado mediante el coseno del ángulo entre el cuadro de la antena y la dirección del rayo. Comparando los voltajes de

las dos antenas se puede determinar una dirección para el rayo y la tercera antena resuelve la ambigüedad sobre el sentido.

#### 4.2.3. Ventajas del sistema TOA frente al DF

De acuerdo con Heckman y Liu (2010), se ha dedicado un esfuerzo sustancial para optimizar los sistemas TOA con elementos DF, utilizando elementos de detección basados en ferritas especiales y obtener así una respuesta de frecuencia mucho más potente en los rangos de frecuencia ELF a HF. No obstante, el esfuerzo invertido no produjo resultados alentadores. Los investigadores descubrieron que el uso de sistemas DF inducía errores de ubicación mucho más grandes que los errores de ubicación asociados a las técnicas TOA. Los errores de ubicación de los detectores DF se demostraron tan importantes que incluirlos en la localización de las descargas empeoró sustancialmente el resultado. Además, el envío de los paquetes de información generados por los detectores DF a través de una conexión de datos hasta el servidor principal consumió un ancho de banda notable.

En los años 70 del pasado siglo el uso de detectores DF con banda ancha representó un gran avance antes del desarrollo y despliegue del sistema GPS. De hecho, los sistemas TOA implementados en el período 1975-1985, antes del GPS, tenían problemas importantes de precisión cronológica. Sin embargo, con las capacidades actuales de sincronización y ubicación del GPS, la metodología TOA se ha vuelto cada vez más precisa. Por lo tanto, se puede asegurar que el uso de sistemas TOA redundará en las siguientes ventajas:

- Precisión cronológica muy superior
- Eliminación de ruido inducido sobre el sensor gracias a un hardware más sencillo, eficiente y silencioso
- Posibilidad de utilización de sensores multibanda en un único dispositivo para poder observar descargas en baja y muy baja frecuencia (descargas nube-tierra) y descargas en alta y muy alta frecuencia (descargas nube-nube).

### 4.3. Rendimientos de las redes de detección

La eficacia de una red de detección de descargas eléctricas viene determinada por su capacidad de detectar, localizar y precisar información sobre cada una de las descargas detectadas. Los factores fundamentales que determinan el rendimiento de una red son: la eficiencia de detección (*Detection Efficiency, DE*) y la eficiencia de localización (*Location Accuracy, LA*).

#### 4.3.1. Eficiencia de detección (*Detection Efficiency, DE*)

Se trata de la capacidad de la red de detectar descargas eléctricas, ya sean nube-nube (IC) como nube-tierra (CG). Se expresa como un porcentaje de las descargas registradas por el sistema frente a las que se estima que realmente se han producido. Los valores mínimos típicos que presentan las redes de detección operativa son superiores al 85% para los impactos CG y superiores al 60% para las descargas IC.

#### 4.3.2. Eficiencia de localización (*Location Accuracy, LA*)

Este parámetro indica la bondad de la localización geográfica de la descarga detectada y se expresa en metros. Hay numerosos factores que inciden sobre la LA de una red de detección, incluso para una misma región y una misma red, como pueden ser los errores asociados a los propios elementos de detección o la dispersión de la señal en los márgenes de la red. Se considera que, de manera operativa, las redes de detección profesional difícilmente pueden ofrecer una LA inferior a los 500 metros, salvo en algunas regiones del mundo (costa este de los Estados Unidos, Centroeuropa) donde la concentración de detectores es muy elevada y pueden considerarse realistas valores de LA inferiores a los 400 metros.

## 5. REDES DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ELÉCTRICAS EN ESPAÑA

El número de servicios meteorológicos públicos en España (cuatro a fecha de la redacción de este TFG) junto a la actividad privada en el sector ha propiciado una multiplicidad de fuentes de datos sobre la actividad eléctrica única en el ámbito europeo. Hoy conviven en España cinco redes de observación en tiempo real de descargas eléctricas atmosféricas. Son las pertenecientes a AEMET (REDRA), MeteoGalicia, Euskalmet, MeteoCat (XDDE) y Earth Networks (ENTLN, de carácter privado).

Las características técnicas de cada una de las redes de observación existentes en el país inducen un rasgo de complementariedad, a mi juicio muy positivo, en las bases de datos históricas disponibles. Así, para gran parte del territorio nacional, es posible disponer de series históricas de, al menos, diez años de antigüedad. Los datos, procedentes de las cinco redes de observación que operan en España, cubren el espectro radioeléctrico desde la muy baja frecuencia hasta los pulsos que en muy alta frecuencia generan las descargas nube-nube. Hoy en día ningún otro país europeo – probablemente ningún otro en el mundo- dispone de tal volumen de información de calidad, susceptible de ser analizada científicamente. España es, potencialmente, uno de los mejores países del mundo para llevar a cabo investigaciones relacionadas con la actividad eléctrica atmosférica.

Sin embargo, la fragmentación, compartimentación y exceso de celo en la custodia de los datos procedentes de las redes de observación públicas y privadas complica el escenario para la puesta en marcha de las actividades científicas señaladas. Por ejemplo, no existe un repositorio nacional que unifique los datos procedentes de todas y cada una de las redes disponibles, así como tampoco de las de regiones vecinas como Portugal, Marruecos o el sur de Francia. No existe una normativa o, en su defecto, un comité científico de coordinación que haga posible una mínima estandarización de las bases de datos disponibles para su posterior uso público y científico.

### 5.1. La red REDRA de AEMET

La red de detección de rayos (REDRA, por el acrónimo de Red Española de Detección de RAYos) de AEMET es la red pública de mayor cobertura. Está compuesta por tres subsistemas encargados respectivamente de la detección de descargas eléctricas (SDDE, Sistema de Detección de Descargas Eléctricas), el control de los equipos, el análisis y localización de sus medidas (SCAL, Sistema de Control, Análisis y Localización) y la explotación de estos datos en los terminales de trabajo de los usuarios finales, normalmente instalados en los centros de pronóstico de AEMET.

El SDDE está formado por veinte equipos detectores de descargas eléctricas distribuidos por el territorio peninsular y los archipiélagos balear y canario (Fig. 4). Estos detectores captan, analizan y discriminan la radiación electromagnética generada en las descargas eléctricas atmosféricas ocurridas dentro de su alcance. El SCAL recibe los datos, localiza en el espacio y en el tiempo las descargas y determina sus características físicas, permite el control y configuración de los equipos detectores, etc.

Además de los equipos de la red de AEMET, REDRA recibe datos de una red de cuatro equipos de detección de Portugal, para cubrir de forma óptima toda la Península Ibérica y los mares circundantes. Asimismo, en virtud de un acuerdo de cooperación con el Servicio Meteorológico francés, AEMET también recibe información proveniente de diez equipos de la red francesa, que cubren el sector sur francés (Fig. 4).

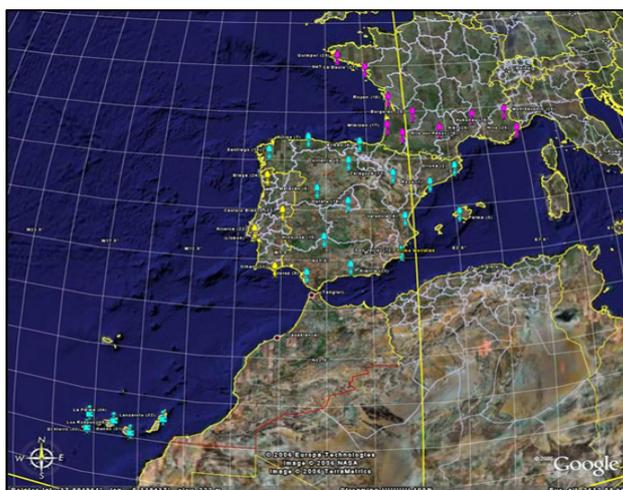


Figura 4. Mapa con la distribución de los detectores de los rayos SSDE / AEMET de las redes española (azul), portuguesa (amarillo) y francesa (rosa) (Fuente: AEMET)

## 5.2. La red XDDE del Servei Meteorològic de Catalunya

El Servei Meteorològic de Catalunya cuenta desde abril de 2003 con su Xarxa de Detecció de Descàrregues Elèctriques Atmosfèriques (XDDE) que permite la detección en tiempo real de las descargas en un área geográfica próxima a Cataluña (Fig. 5).

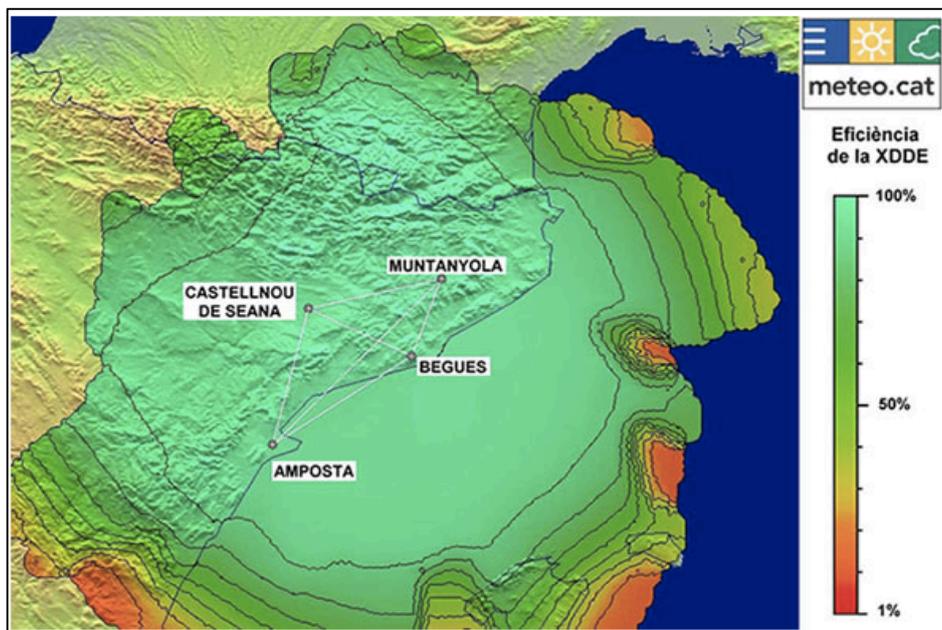


Figura 5. Disposición de los sensores de la XDDE y estimación teórica de la eficiencia de detección de la misma red (Fuente: MeteoCat)

La XDDE se compone de cuatro detectores modelo LS8000 de la casa Vaisala con capacidad de detección nube-nube / nube-tierra. Están compuestos de tres sensores diferentes: una antena con cinco dipolos que trabaja el rango VHF, una antena de campo eléctrico para la banda LF y un receptor GPS. La antena de VHF detecta las descargas nube-nube. Si dicha descarga finalmente se propaga hacia la superficie, la antena LF detecta y caracteriza la señal como descarga nube-tierra. Los cuatro sensores están sincronizados con un receptor GPS con el fin de poder asignar a cada registro de descarga un tiempo cronológico de recepción con una precisión de nanosegundos.

Los registros de cada detector se envían en tiempo real al procesador central, que se ocupa de integrar los datos y de discriminar la señal que corresponde a las descargas del potencial ruido (o falsos positivos). Un algoritmo basado en la técnica TOA (Time of Arrival) (Betz et al., 2009) que corre en el mismo procesador central de datos calcula la localización geográfica de cada descarga. Dicha técnica utiliza la diferencia de fase de

la señal detectada por el conjunto de antenas con el fin de determinar el azimut en el que se encuentra la fuente emisora con respecto a cada uno de los detectores. Este método requiere un mínimo de tres detectores que midan el azimut de cada una de las descargas para poderla localizar por triangulación con una precisión que resulte operativa. A su vez, los registros de la antena de campo eléctrico permiten estimar las características fundamentales de cada descarga como la polaridad o el pico de corriente.

### 5.3. La red de Detección de Descargas Eléctricas de MeteoGalicia

La red de MeteoGalicia está compuesta por cuatro detectores de rayos, uno en cada provincia de la Comunidad, situados en las localidades de Alto do Rodicio (Ourense), Castro Ribeiras de Lea (Lugo), Mabegondo (A Coruña) y Vigo Campus (Pontevedra) (Figura 6).



Figura 6. Disposición de los sensores de la red de detección de descargas eléctricas de MeteoGalicia (Fuente: MeteoGalicia)

La tecnología de detección de la red se basa en la técnica TOA y su precisión de detección promedio de la red es de 500 m. El sistema de MeteoGalicia permite detectar cuantitativamente los rayos nube-tierra con una precisión superior al 90%. Además, se pueden detectar de manera cualitativa los rayos que se producen entre las nubes con una precisión de entre un 5 y 30%. Un procesador central almacena y calibra en tiempo real los datos proporcionados por los sensores. El sistema distingue

entre rayos positivos y rayos negativos y es capaz de estimar la corriente de pico de cada una de las descargas.

#### 5.4. La red de Detección de Descargas Eléctricas de Euskalmet

La red de detección de descargas eléctricas de Euskalmet está integrada en la DAEM, la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología del Gobierno Vasco. Consta de tres subredes con cinco detectores, tres de ellos en la banda VHF y dos en LF. Todos los detectores gestionados por la DAEM han sido suministrados por la firma Vaisala y pertenecen al modelo LS8000. Además, se nutre de los datos de la red europea LINET de la que forma parte AEMET.

#### 5.5. La red de Detección de Descargas Eléctricas de Earth Networks

La ENTLN (por sus siglas en inglés Earth Networks Total Lightning Network) es la única red privada de detección de descargas eléctricas de ámbito nacional. Es propiedad de la Sociedad norteamericana Earth Networks Inc., con sede en Germantown, Maryland. Consta de 34 sensores distribuidos por la Península Ibérica (España, Portugal y Andorra), Baleares y Canarias. Las figuras 7, 8 y 9 muestran los valores de eficiencia de detección de la red ENTLN en dichas regiones.

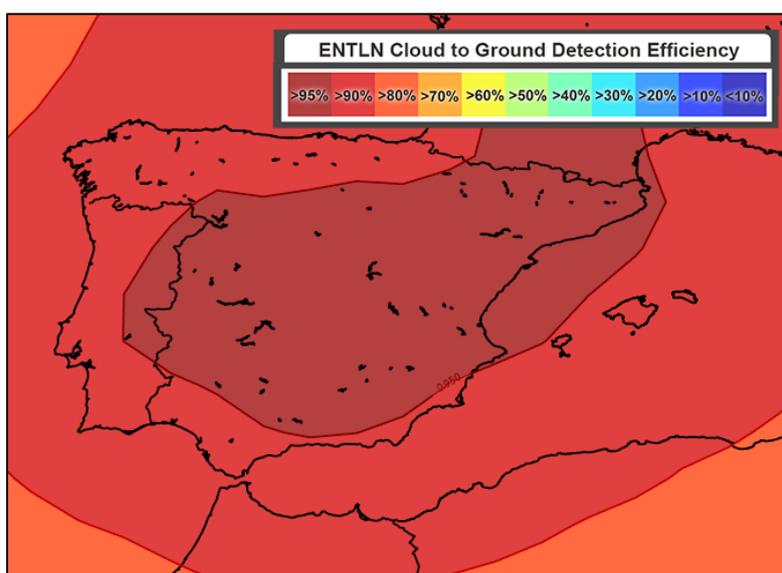


Figura 7. Capacidad de detección (%) de descargas Nube-Tierra de la red ENTLN en España y Portugal (Fuente: Earth Networks Inc.)

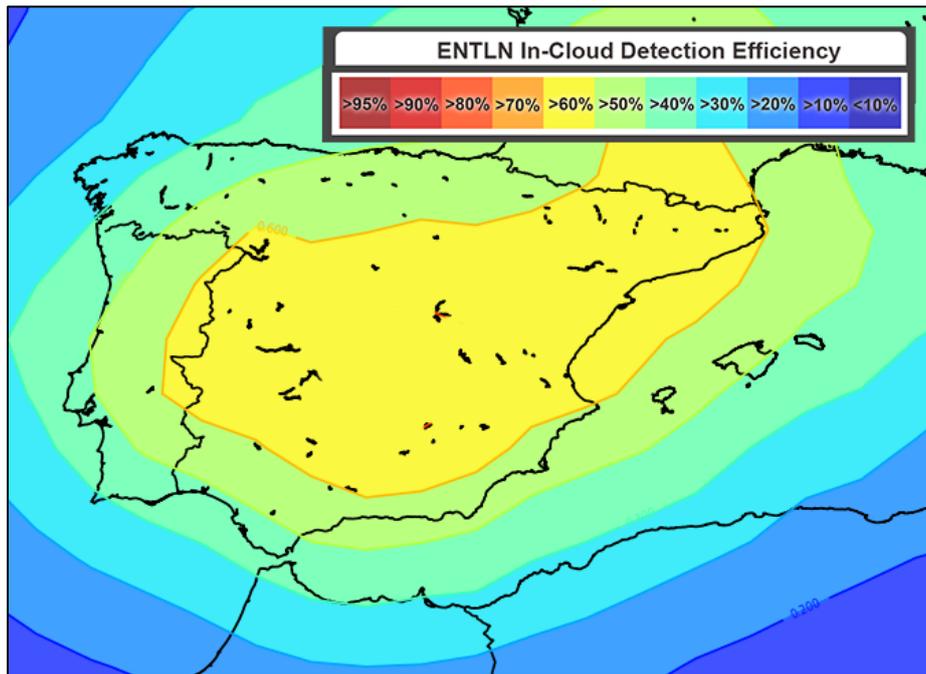


Figura 8. Capacidad de detección (%) de descargas Nube–Nube de la red ENTLN en España y Portugal (Fuente: Earth Networks Inc.)

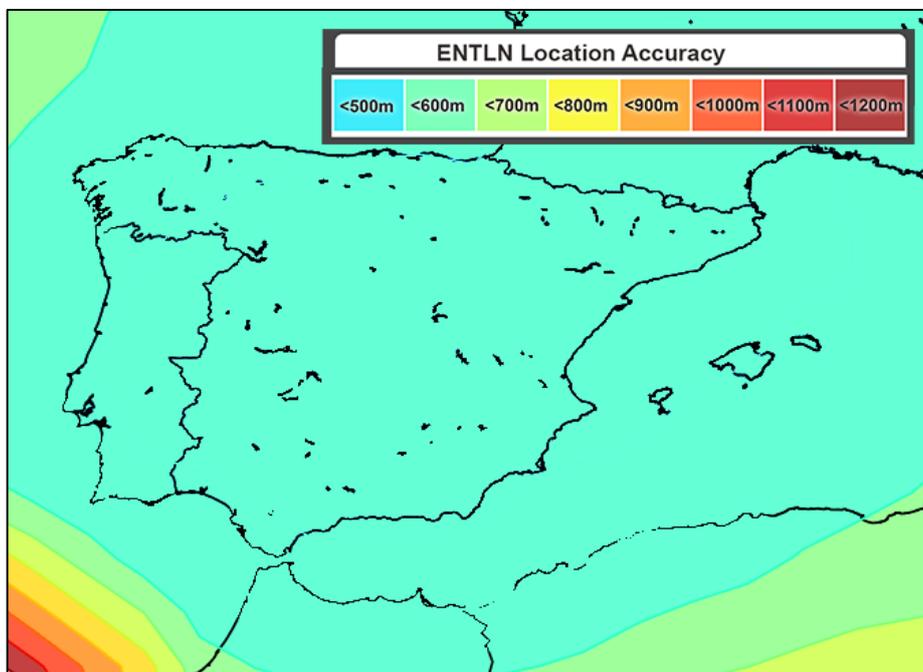


Figura 9. Eficiencia de localización (m) de descargas Nube–Tierra de la red ENTLN en España y Portugal (Fuente: Earth Networks Inc.)

El procedimiento de detección, precisión de la ubicación y visualización de la ENTLS se basa en la tecnología TOA. Los pulsos de energía electromagnética emitidos por las descargas son detectados por los sensores de la ENTLS junto con su ubicación GPS y la hora en la que cada sensor detectó cada descarga. La información recolectada por los sensores se transmite al Sistema Central de Procesamiento y Gestión en la nube. La ENTLS utiliza una combinación, como se ha señalado, de 20 sensores para localizar cada descarga (Heckman y Liu, 2014).

El Sistema Central de Procesamiento y Gestión (SCPG) es el encargado de discriminar la información recibida y almacenarla según los siguientes parámetros:

- Descargas nube-tierra
- Descargas nube-nube
- Falsos positivos
- Ruido procedente de fuentes de emisión electromagnética (torres de transformación alta – media tensión, catenarias de ferrocarril...)

Cada descarga registrada es almacenada en el SCPG y contiene los siguientes campos descriptivos:

- Polaridad de la descarga (NT)
- Intensidad de la descarga (en Amperios, NT y NN)
- Localización Lat, Lon (NT y NN)
- Hora de registro (en Año, mes, día y HH:MM:SS)
- Altitud de la descarga (NN)

La ENTLN es la única red en España capaz de discriminar con una precisión superior al 98% las descargas NT y las NN. Su capacidad de detección para estas últimas se sitúa por encima del 60% en un 75% del territorio y es superior al 40% en el 100% del mismo.

La ENTLN se sirve, a su vez, de los datos procedentes de los sensores operados por Earth Networks en Italia, Francia, Marruecos, Mauritania, Azores y Madeira para asegurar la consistencia de los registros en las áreas marginales de la Península, Baleares y Canarias. La ENTLN dispone de un banco de datos accesible a través de una API en formato ASCII y/o binario con registros disponibles desde 2009.

## 6. CLIMATOLOGÍA DE TORMENTAS EN ESPAÑA.

Como se indicó en apartado anterior, la disponibilidad de una densa red de sensores de detección de descargas eléctricas en España permite la elaboración de informes climáticos que, por primera vez, muestran con gran precisión la distribución espacial y temporal de las tormentas y las descargas eléctricas nube-tierra en la Península Ibérica.

Hasta finales de 2018, las técnicas empleadas para la caracterización de las tormentas en España se basaban en los informes de observación directa proporcionados por los observadores de la red básica de observación de AEMET. La aparición del primer informe sobre la *Climatología de las Tormentas de España* (Núñez et al., 2018) supone una aportación sustancial por su enfoque metodológico. Por primera vez se confecciona una climatología de tormentas en España, Portugal y Andorra que se basa exclusivamente en las observaciones recogidas por la red REDRA de AEMET (descrita en el punto 5.1.)

El área de estudio seleccionada por los autores comprende la totalidad de la Península Ibérica y sus áreas marítimas colindantes, el sur de Francia, el norte de Marruecos y Argelia, así como las Islas Canarias. El periodo de estudio abarca desde el año 2007 al año 2016.

### 6.2. Densidad de descargas eléctricas en la Península Ibérica, Baleares y Canarias.

Entre las conclusiones más destacables del estudio cabe resaltar el marcado carácter mediterráneo de la actividad eléctrica. Como se puede comprobar en la Figura 10, la densidad de descargas más elevada en la Península Ibérica corresponde al sur del Sistema Ibérico. En concreto, en las comarcas de Gúdar/Javalambre (Teruel), Alto

Maestrazgo, Alcaatén y Alto Mijares (Castellón) la densidad de descargas eléctricas por kilómetro cuadrado es superior a 5 por kilómetro cuadrado y año (Fig. 10).

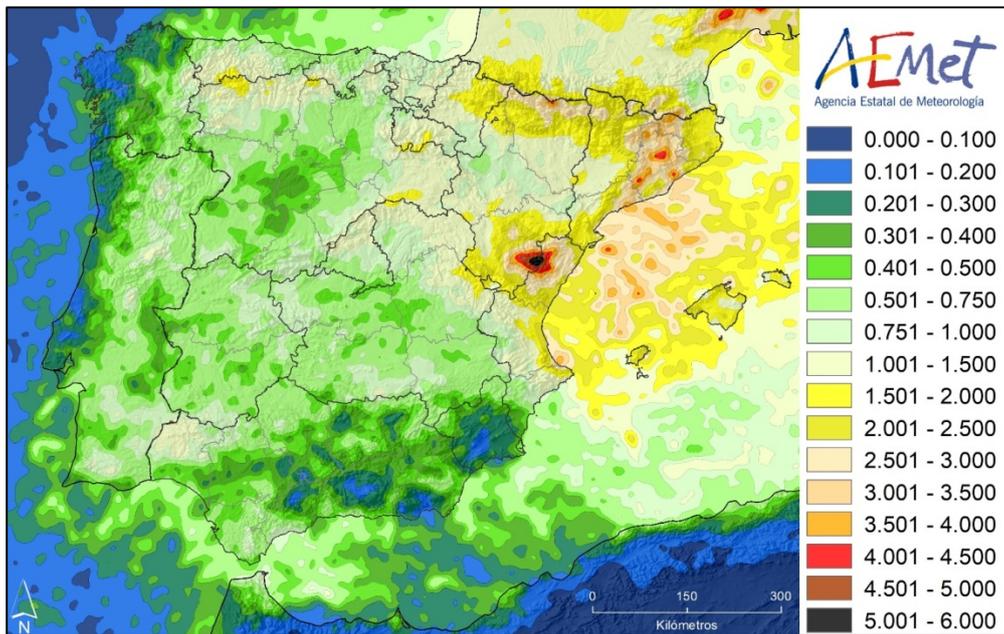


Figura 10. Mapa de densidad de descargas eléctricas (descargas / Km<sup>2</sup> / año) en la Península Ibérica y Baleares (Fuente: Núñez et al., 2018).

El cuadrante nororiental de la Península Ibérica junto a las Islas Baleares ofrece valores de densidad de descargas medios y altos (de entre 1,5 y 4 descargas/Km<sup>2</sup>/año) en especial en áreas montañosas. Es destacable la notable densidad de descargas que presentan las zonas marítimas, en ausencia de relieve, entre la costa de Barcelona, Tarragona, Castellón y el norte de Baleares, con máximos secundarios que alcanzan las 4 descargas/km<sup>2</sup>/año.

En el caso de Canarias, las densidades más elevadas se miden en las islas de mayor relieve, en la mitad occidental del archipiélago. En conjunto, como muestra la Figura 11, los valores son discretos en comparación con los del cuadrante nororiental de la Península Ibérica. Una vez más cabe destacar la presencia de máximos de densidad de descarga en zonas marítimas desprovistas de cualquier relieve insular, al norte de Gran Canaria y Tenerife en la Figura 11.

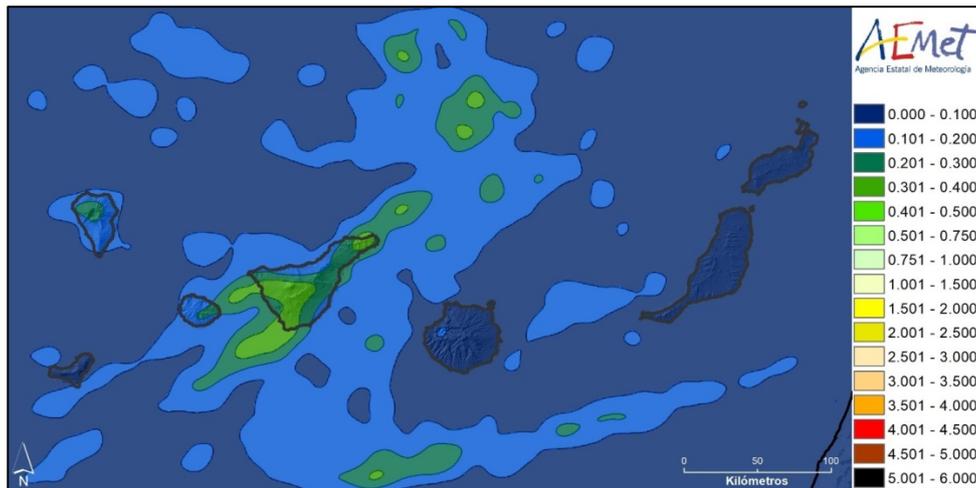


Figura 11. Mapa de densidad de descargas eléctricas (descargas / Km<sup>2</sup> / año) en el archipiélago canario (Fuente: Núñez et al., 2018)

### 6.3. Días de tormenta en España.

En el periodo de estudio, 2007-2016, la zona de más días de tormenta en la Península e Islas Baleares se encuentra al sur del macizo de Cotiella, entre las comarcas del Sobrarbe y la Ribagorza, en la provincia de Huesca. Entre la zona de Foradada del Toscar y La Fueva, en esos 10 años hubo 379 días de tormenta, con un promedio por tanto de 37.9 días de tormenta al año, pero en otros municipios de esas dos comarcas oscenses, entre Campo y Fanlo, en promedio anual se superan los 35 días de tormenta al año (Figura 12).

En otras comarcas del norte de Cataluña también hay zonas con un promedio anual superior a 35 días de tormenta al año: en la provincia de Lleida entre las comarcas del Pallars Sobirà y L'Alta Ribagorça; en el noroeste de la provincia de Girona en la comarca del Ripollès y al norte de la provincia de Barcelona, en la comarca de Osona, y en l'Alt Berguedà.

No existe, por tanto, una relación directa entre el promedio de días de tormenta anuales en las zonas de mayor actividad tormentosa en España y la densidad de descargas eléctricas observadas. El análisis conjunto de ambas variables permite obtener una idea aproximada de 'intensidad eléctrica' de las tormentas para cada región. Así, en el límite entre las comarcas de Castellón y Teruel, para un promedio de 30 días de tormenta al año, la densidad de descargas eléctricas supera las 6. Mientras,

entre el Sobrarbe y la Ribagorza, en Huesca, o en las comarcas de l'Osona y Alt Berguedà, para un promedio de casi 40 días de tormenta al año, la densidad de descargas por kilómetro cuadrado apenas alcanza un valor de 4 en el periodo 2007-2016.

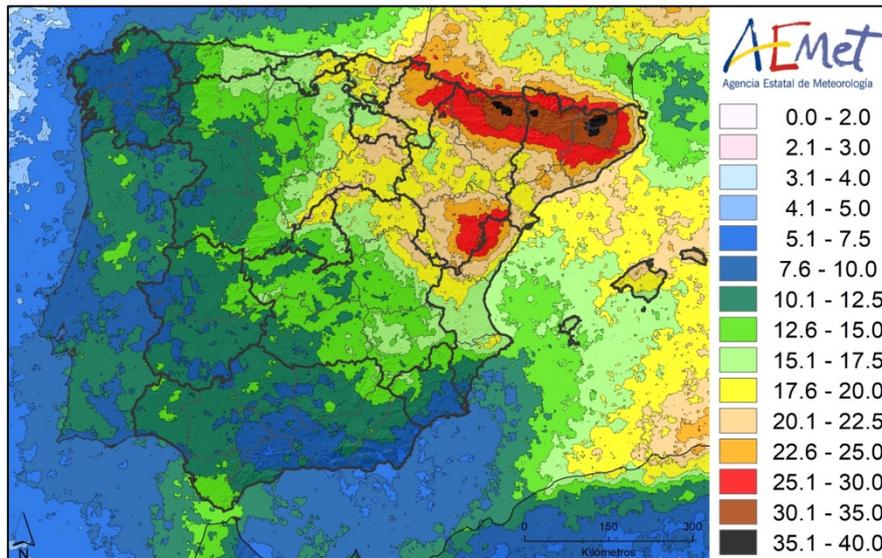


Figura 12. Mapa del promedio de días de tormenta al año en la Península Ibérica y Baleares (Fuente: Núñez et al., 2018).

Los datos presentados por el estudio, y en especial la distribución de días de tormenta anuales, rompen en cierta medida con el dipolo climático clásico de influencia mediterránea/atlántica. La actividad tormentosa en España parece concentrarse en las zonas montañosas de mayor relieve y más próximas a un mar cálido. Nótese, sin embargo, que, en la zona sureste peninsular, rodeada de sistemas montañosos como las Béticas, Penibéticas, Rif y Atlas, y donde la temperatura superficial del agua del Mediterráneo occidental alcanza sus valores más elevados, tanto el promedio de días de tormenta como la densidad de descargas nube-tierra muestran valores muy bajos.

## 7. METODOLOGÍA DE DETECCIÓN DE DEPÓSITOS GEOLÓGICOS A TRAVÉS DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS

Como se expuso en el apartado 1 de este Trabajo Fin de Grado, el objetivo clave de esta propuesta es determinar si la información derivada de las descargas eléctricas atmosféricas puede ser utilizada como una herramienta de reconocimiento geofísico para la detección de mineralización o estructuras geológicas en la Península Ibérica, en particular, depósitos de agua subterránea.

En la actualidad, y de acuerdo con una encuesta personal llevada a cabo entre organismos públicos y privados, no existe en España ninguna iniciativa científica o industrial que vincule la actividad eléctrica atmosférica y la detección de determinadas estructuras geológicas. Entre enero y junio de 2019 se pidió a varios colegas de la industria y los organismos públicos de investigación (en los niveles estatal y autonómico) que informaran de cualquier artículo o iniciativa que tuviera que ver con dicha actividad. Los resultados fueron siempre negativos. Se desconoce si en el ámbito europeo existe alguna iniciativa similar.

La disponibilidad de datos procedentes de diferentes fuentes de información para el marco geográfico de análisis propuesto (la Península Ibérica) parece ser el ideal. Como se vio en el apartado 5, coexisten en España, Portugal y Andorra por lo menos cinco redes de observación de descargas eléctricas con datos disponibles desde, al menos, cinco años atrás. La multiplicidad de dichas redes de observación podría conducir a un conflicto de homogeneidad de las series de datos disponibles, pero recordemos que los datos que recogen las redes de observación son, en su estructura esencial, compatibles entre sí (tipo de descarga, polaridad, intensidad...). Los problemas de homogeneidad que otras fuentes de observación meteorológica, como las redes de medición atmosféricas tradicionales, suelen acarrear, simplemente no existen para las de descargas eléctricas. Puede afirmarse que, bien al contrario, son complementarias.

## 7.1. Propiedades de los depósitos geológicos y su relación con las descargas eléctricas

Según se describió en el apartado 3 sobre las características de una descarga eléctrica atmosférica, el sistema superficie terrestre–troposfera puede considerarse como un condensador de grandes proporciones. Por tanto, el rayo ocurre cuando existe suficiente carga para cortocircuitar el condensador, que vuelve a cargarse una y otra vez para generar las descargas nube-tierra/nube-nube que caracterizan a una tormenta eléctrica (Flohn, 1969).

La resistencia eléctrica es la oposición al flujo de corriente eléctrica a través de un conductor. La unidad de resistencia eléctrica en el Sistema Internacional es el ohmio ( $\Omega$ ). La resistividad es la resistencia eléctrica específica de cada material. La unidad de resistividad en el S.I. es el ohmio por metro ( $\Omega \cdot m$ ).

Por tanto, la resistividad eléctrica de un material mide su capacidad para oponerse al flujo de carga eléctrica a través de ella. Un material con resistividad eléctrica alta (conductividad eléctrica baja) es un aislante eléctrico mientras que un material con resistividad eléctrica baja (conductividad eléctrica alta) es un buen conductor eléctrico.

Las últimas investigaciones acerca de la relación entre la intensidad de las descargas eléctricas y la estructura geológica del terreno ponen de manifiesto que tanto la intensidad como la localización de cada rayo nube-tierra depende de la estructura geológica del terreno donde cae (Nelson, 2017). De acuerdo con dichas investigaciones, la corriente en pico es proporcional a la altura de la nube de la que parte (o a la que llega, en el caso de las descargas positivas) cada rayo nube-tierra. Esa altura es la distancia que cada descarga debe recorrer dentro del condensador atmosférico. La teoría propuesta por Nelson asume que las estructuras geológicas que influyen en la distribución de las descargas eléctricas nube-tierra en la atmósfera se comportan a modo de espejo. Dicho modelo teórico se sintetiza gráficamente en la figura 13.

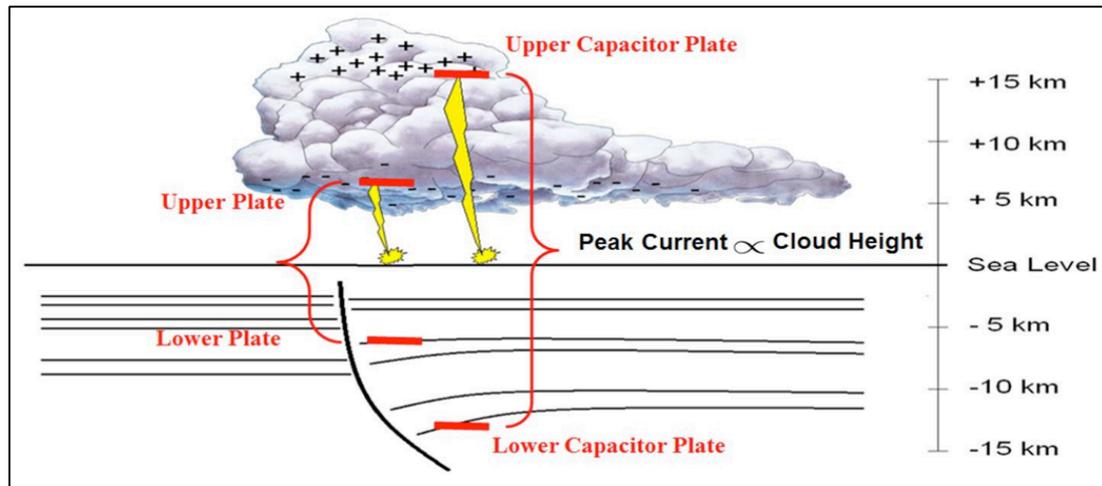


Figura 13. Modelo teórico sobre la influencia de los depósitos geológicos en la localización de las descargas eléctricas propuesto por Nelson (Fuente: Nelson, 2017).

En términos físicos, las descargas eléctricas en la atmósfera pueden asimilarse a un fluorescente gigante. En él, la corriente se genera a partir de un voltaje de entrada que fluye a través de una resistencia (la troposfera) y acumula suficiente carga para que salte una chispa en el condensador (rayo). A este modelo atmósfera/superficie terrestre se añade una resistencia adicional, la resistencia en el subsuelo entre el punto de impacto del rayo y la placa inferior del condensador, que es  $R_2$  en la Fig. 14. A  $R_2$  se la denomina *resistividad aparente* en el circuito oscilador de relajación de la descarga nube-tierra atmosférica.

Dado que se conoce el pico de corriente para cada una de las descargas eléctricas -es uno de los valores fundamentales que aportan las redes de descargas eléctricas en España descritas en el punto 5- y la resistencia del aire (que es un valor fijo estándar de aproximadamente  $2 \times 10^{15} \Omega$ ) obtenemos  $R_2$  para cada descarga. Esa será la *resistividad aparente* del volumen de depósito geológico que ha inducido el rayo y cuya profundidad máxima será idéntica a la altura de la nube a la que se generó la descarga (obtenida a partir del pico de corriente).

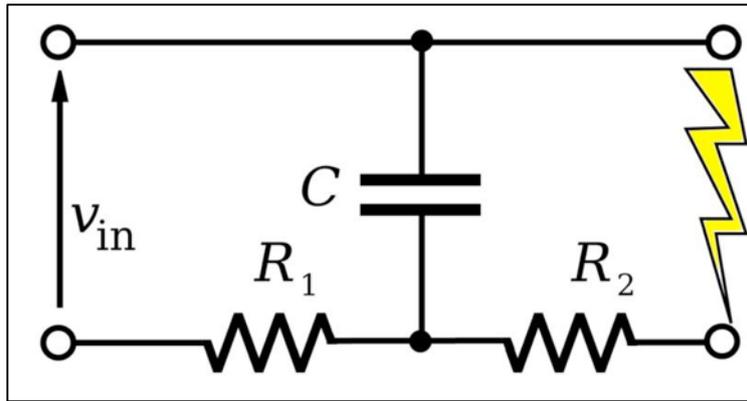


Figura 14. Modelo de resistencia combinada atmosférica ( $R_1$ ) y de subsuelo ( $R_2$ ) para el condensador atmosférico que produce las descargas eléctricas (Fuente: Nelson, 2017).

Las descargas eléctricas nube-tierra, por tanto, se agrupan según un patrón marcado por las corrientes telúricas y la estructura geológica del subsuelo menos profundo, y no por la topografía, la vegetación, las infraestructuras o por depósitos de agua a una profundidad inferior a los 100 metros (Nelson et al., 2013).

## 7.2. Resistencia y resistividad de los depósitos geológicos. Corrientes telúricas y actividad eléctrica atmosférica

La metodología científica que se sugiere para llevar a cabo los potenciales estudios que determinen la relación entre actividad eléctrica atmosférica y estructuras geológicas en la Península Ibérica pueden basarse en el principio que relaciona la estructura geológica de una región y la actividad eléctrica atmosférica que la caracteriza.

Si bien el efecto de los rayos en la superficie se limita a la profundidad del subsuelo de no más de unas decenas de metros, los 5-50 kA por descarga interactúan con los depósitos geológicos en los estratos de entre 1 y 15 kilómetros, aproximadamente.

La profundidad que alcanza el rayo principal es de entre 30 y 300 metros (donde se forma la fulgurita). A profundidades de 200 a 2.000 metros, la densidad de corriente sigue siendo alrededor del 2% del valor que el rayo mostraba en superficie. Un rayo de 20.000 A tendrá, por consiguiente, una densidad de corriente inicial de 2.000.000 A/m<sup>2</sup>. El 2% de este valor significa una densidad de corriente de 40.000 A/m<sup>2</sup>. Por lo tanto, es plausible que las corrientes de una única descarga eléctrica nube/tierra

contribuyan de manera importante a la configuración de corrientes telúricas, que han sido medidas por la exploración magnetotelúrica desde la década de 1950.

Los resultados de dichas investigaciones sugieren que el intervalo de profundidad en el que la influencia de las descargas eléctricas sobre los depósitos geológicos y su configuración electromagnética es apreciable se encuentra entre los 500 y los 10.000 metros de profundidad (Cagniard, 1953), lo que corrobora el modelo propuesto por Nelson (2017) para el condensador nube-subsuelo.

En definitiva, el análisis de la agrupación de descargas eléctricas atmosféricas y sus características físicas (en especial su intensidad) durante un período suficientemente prolongado en una región determinada puede arrojar una idea precisa sobre la configuración geofísica del subsuelo en los primeros 15.000 metros.

Este último aspecto es especialmente importante en el caso de la prospección de aguas subterráneas accesibles con los métodos de perforación actualmente disponibles, los cuales son capaces de alcanzar profundidades superiores a los 4.000 metros, mientras que los sistemas de detección por inducción de corrientes en el subsuelo apenas alcanzan unas decenas de metros.

## 8. CONCLUSIONES

La distribución espacial de las descargas eléctricas nube–tierra no atiende al sencillo ‘modelo de las puntas’ (aquel que sostiene que los rayos nube-tierra siempre descargan sobre el punto más elevado), sino que responden a un modelo de acoplamiento atmósfera–superficie terrestre equivalente al de un condensador eléctrico de enormes proporciones.

La influencia de las descargas eléctricas en la superficie de la tierra se extiende hasta los primeros 15.000 metros de profundidad. De manera análoga, la distribución de los materiales de los primeros 15.000 metros del subsuelo, su resistencia y resistividad, así como las corrientes telúricas presentes influyen en la distribución de las descargas eléctricas nube-tierra así como en sus características físicas (en especial, la intensidad del rayo).

El estudio de la distribución de descargas eléctricas y sus características físicas en una región determinada puede ser considerado como un método válido de obtención de datos geofísicos. Merece una mención especial el caso de los acuíferos profundos, depósitos de agua dulce libre (no contenida en materiales porosos), pues su resistividad aparente es muy baja, del orden de 5 a 10  $\Omega/m$ , lo que facilita el cálculo de la profundidad a la que potencialmente se encuentra.

En el caso de la Península Ibérica, la existencia de múltiples redes de detección de descargas eléctricas con décadas de datos históricos constituye una fuente inigualable para potenciales estudios que pongan en relación las características del subsuelo poco profundo, su estructura y la distribución y naturaleza de las descargas eléctricas en la región.

El análisis de la climatología de las tormentas en España sugiere que es el área nordeste de la Península Ibérica donde los potenciales estudios que puedan llevarse a cabo para tratar de establecer la existencia de depósitos subterráneos de agua no profunda (menos de 15 km de profundidad) tendrían mayor éxito, pues tanto la densidad de descargas por km<sup>2</sup> y año, así como el número de días de tormenta anuales aseguran una disponibilidad consistente de datos.

## BIBLIOGRAFÍA

Betz, H. et al. (2009). *Lightning: Principles, instruments and Applications*. Springer, Londres. 641pp.

Barry R., Chorley, R. (2010). *Atmosphere, Climate and Weather*. 9ª Edición. Routledge. Londres, UK. 724 pp.

Cagniard, L. (1953). Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics, a journal of General and Applied Geophysics*, 18(3), p.605-635, Washington, USA.

Flohn, H. (1969). *Climate and Weather*. McGraw-Hill, Londres. UK.

Golde, R.H. (1977) *Lightning: volume 1, physics of lightning*. Academic Press, Londres, UK. 496 pp.

Heckman, S. y Liu, C. (2010). The application of total lightning detection and cell tracking for severe weather prediction. Conference Paper. *WMO TECO 2010 Publication*. World Meteorological Organization. Ginebra, Suiza.

Heckman, S. y Liu, C. (2014). Earth Networks Total Lightning Network Overview. *2014 International Conference on Lightning Prediction*. Viena, Austria.

Krider et al. (1976). A gated, wideband magnetic direction finder for lightning return strokes. *Journal of Applied Meteorology*, 15(3), p.301-306, Phoenix, USA.

Nag, A. et al. (2015). Lightning Location Systems: Insights on characteristics and validation techniques. *Earth and Space Science*, 2(4), p. 65-93.

Nelson, H. (2017). Lightning Analysis for Mapping Faults and Identifying Exploration Sweetspots. *Search and Discovery Online Edition*, Artículo nº 41.987

Nelson, H.; Siebert, J. y Denham, R. (2013). Lightning Data. A New Geophysical Data Type. *Search And Discovery Online Edition*, Artículo nº 41.184

Núñez, J.A.; Mora, M. y Riesco, J. (2018). Climatología de tormentas en España. *Simposio sobre Fenómenos Meteorológicos Adversos en España*. Valencia, (Inédito).

OMM (2019). METEOTERM. *Vocabulario Meteorológico Internacional*. Organización Meteorológica Mundial. Publicación Online. Ginebra, Suiza.

Pérez, F. y Zancajo, C. (2008). La frecuencia de las tormentas eléctricas en España. *Boletín de la Asociación Meteorológica Española*, 21, p.37-44.

Uman, M.A. (1986). *All About Lightning*. Dover Publications, Inc., Nueva York. 167 pp.

Uman, M.A. (1987). *The Lightning Discharge*. Academic Press, Orlando, USA. 377 pp.

Viemeister, P.E. 2013. *The Lightning Book*. MIT Press, Cambridge, Massachussets, USA. 314 pp.

Williams, R. (1989). The Tripole Structure of Thundestorms. *Journal of Geophysical Research*, 94(D11), p.13151-13167.