



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA
NACIONAL**

**APROXIMACIÓN AL CONCEPTO DE POTENCIAL ELÉCTRICO A PARTIR DEL
FENÓMENO DE FORMACIÓN DEL RAYO EN LA TORMENTA ELÉCTRICA**

**PRESENTADO POR:
JORGE IVÁN HERNÁNDEZ LOAIZA**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BOGOTÁ D.C. 2021**

**APROXIMACIÓN AL CONCEPTO DE POTENCIAL ELÉCTRICO A PARTIR DEL
FENÓMENO DE FORMACIÓN DEL RAYO EN LA TORMENTA ELÉCTRICA**

**PRESENTADO POR:
JORGE IVÁN HERNÁNDEZ LOAIZA**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN
FÍSICA**

**ASESOR:
GIOVANNY SIERRA VARGAS**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BOGOTÁ D.C. 2021**

Dedicatoria

A mis abuelos, Benjamín Hernández y Transito Hernández quienes, desde su poca formación escolar, sabían el valor del estudio.

A mis padres, Emílse Loaiza y Jorge Hernández quienes me brindaron su amor y su apoyo incondicional, fuente de inspiración en esta labor que decidí para mi vida.

A mis hermanos Diego Hernández y Alexis Hernández que han sido mis compañeros de vida y una razón más para seguir mis sueños.

Agradecimientos

Agradezco a mi querida Alma Mater, la Universidad Pedagógica Nacional por abrirme las puertas del conocimiento.

A mi compañero Andrés Ospina quien se convirtió en un hermano en este trayecto de mi formación académica.

A mi compañera Nataly Padilla quien me brindó su entusiasmo en la realización de este trabajo.

A mis compañeras de estudio Alejandra Lozano y María del mar Duarte quienes me brindaron sus consejos y aportes en la realización de este trabajo y por los momentos de alegría en la universidad.

A mi pareja Lilitiana Torralba que ha sido testigo de mis alegrías y altibajos de este proceso, quien se ha ganado todo mi amor y respeto por la gran mujer que es.

A mis compañeros de trabajo Alejandro Castillo y Yuliet Lombana por esas charlas que estimulan mi crecimiento personal.

En física las palabras y las fórmulas están conectadas con el mundo real.

Richard Feynman

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
PROBLEMÁTICA	3
OBJETIVOS DEL TRABAJO	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
JUSTIFICACIÓN	6
ANTECEDENTES	7
METODOLOGÍA	10
CAPÍTULO II	12
MARCO TEÓRICO	12
Atmosfera terrestre	12
Tormenta eléctrica	13
Nubes de tormenta	14
Producción de rayos	16
CAPÍTULO III	20
DESCRIPCIÓN DE LOS FENÓMENOS ELECTROSTÁTICOS REALIZADOS POR JAMES CLERK MAXWELL	20
Electrificación por fricción	22
Electrificación por inducción	23

EL POTENCIAL ELÉCTRICO DESDE LA PERSPECTIVA DE ACCIÓN A	
DISTANCIA _____	25
EL POTENCIAL ELÉCTRICO DESDE LA PERSPECTIVA DE CAMPOS _____	27
CAPÍTULO IV _____	30
EL POTENCIAL ELÉCTRICO EN LAS TORMENTAS ELÉCTRICAS _____	30
Carga eléctrica de la tierra _____	30
Grado de electrificación Nube-Tierra _____	36
CAPÍTULO V _____	41
CONCLUSIONES _____	41
Bibliografía _____	44

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ZONAS TÉRMICA TERRESTRE -----	13
FIGURA 2: ETAPA INICIAL DE UNA TORMENTA ELÉCTRICA -----	14
FIGURA 3: NUBE CUMULONIMBOS -----	15
FIGURA 4: ETAPAS DE FORMACIÓN DE LA NUBE CUMULONIMBOS -----	16
FIGURA 5: ESTRUCTURA IDEALIZADA DE LA CONFIGURACIÓN ELECTRÓNICA DE UNA NUBE DE TORMENTA -----	17
FIGURA 6: DESCARGA LÍDER DE UN RAYO -----	18
FIGURA 7: DESCARGA ELÉCTRICA -----	19
FIGURA 8: EXPERIMENTO PROPUESTO POR J. C. MAXWELL. -----	24
FIGURA 9: EXPERIMENTO PROPUESTO POR J.C. MAXWELL -----	24
FIGURA 10: POLARIZACIÓN DE LA PARTE INFERIOR DE LA NUBE Y LA SUPERFICIE TERRESTRE -----	32
FIGURA 11: LÍNEAS DE CAMPO GENERADAS POR CARGAS. -----	32
FIGURA 12: CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL -----	35
FIGURA 13: DESCARGAS ELÉCTRICAS FORMADAS POR NUBES DE TORMENTA -----	35
FIGURA 14: POLARIZACIÓN DE UNA NUBE DE TORMENTA -----	37

INTRODUCCIÓN

En el planeta tierra, dependiendo de la zona a la cual se haga referencia, se encuentran diferentes fenómenos naturales atmosféricos, uno de estos es la tormenta eléctrica, que se caracteriza por la formación de nubes con carga eléctrica y la presencia de rayos durante una tormenta eléctrica están presentes varios fenómenos como la lluvia, el granizo y las descargas eléctricas entre otros, que son de análisis en el ámbito científico, como la electrificación de las nubes y la superficie terrestre.

Para el caso de Colombia, el monitoreo de la actividad atmosférica ha tomado mayor relevancia, a consecuencia de que los rayos son los causantes de más del 60% de las salidas (apagones) del sistema eléctrico en el país y aún más, es un fenómeno que puede interferir con la vida de los seres vivos (SIERRA TAMARA & ESCOBAR MORALES, 2004), también, se encuentra que la Universidad Nacional de Colombia lidera investigaciones en el campo de la meteorología que tiene como objetivo principal mejorar la comprensión de los procesos atmosféricos relacionados con el tiempo y el clima, en especial aquellos más relevantes para la región ecuatorial donde se presenta mayor actividad atmosférica en el planeta.

Así, en el estudio de estos fenómenos se requiere reconocer y vincular diferentes conceptos fundamentales de disciplinas como la química y la física, que permiten ampliar explicaciones en torno a su desarrollo y funcionamiento, como también establecer un pronóstico, dando la oportunidad de acondicionamientos preventivos para el acontecimiento de estos fenómenos atmosféricos.

Además, en la descripción física de los fenómenos eléctricos de una tormenta, se involucran conceptos que incluyen los libros de texto de física, siendo uno de estos conceptos el de potencial eléctrico, para el cual se abordan dos puntos de vista para realizar su explicación, desde acción a distancia o perspectiva de campos, sin establecer una diferenciación de las dos miradas y llevándolo al aula, como también no se realiza una relación con el fenómeno de las tormentas eléctricas.

Como lo resalta Ayala (2006) *"los conceptos son, ante todo, formas de mirar el mundo que, al ser organizadores de la experiencia, determinan aspectos del mundo que son mirados"*, de esta

manera es importante hacer una vinculación conceptual de un fenómeno natural con los conceptos científicos abordados en los cursos de física que permitan aproximar a una explicación del cómo se forman, por lo que en el presente trabajo de grado, se plantea realizar una aproximación al concepto de potencial eléctrico partiendo del fenómeno de formación del rayo en una tormenta eléctrica.

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA

La investigación en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias naturales señala la importancia que posee el reconocimiento de las ideas previas o preconcepciones que tienen los estudiantes antes y después de recibir la enseñanza formal sobre un tema en cuestión (Periago & Bohigas, 2005). Estas consideraciones frente a las ideas previas permiten al docente reconocer y establecer un punto de partida para el abordaje de la temática expuesta en clase, donde el estudiante interactúa en su primera aproximación con la teoría a partir de sus propias lentes interpretativas construidas en las experiencias sensibles (a través de los sentidos) de la vida cotidiana, es decir: a partir de la interacción que tiene con el entorno en el cual se encuentra involucrado y la construcción de las explicaciones a los fenómenos físicos que le rodea (Moreira & Greca, 2003). Sin embargo, Periago & Bohigas, afirman, que la dificultad en ampliar o reestructurar la comprensión de los contenidos de enseñanza no radica en la existencia de ideas previas en el estudiante ni en la lectura que el docente realice acerca de estas, sino en la permanencia de dichas preconcepciones aún después de realizadas las respectivas orientaciones y explicaciones frente a un fenómeno o situación particular.

En relación al último planteamiento, es de resaltar que, lastimosamente, aunque el docente otorgue un papel fundamental a la valoración de las preconcepciones del estudiante, no existe una garantía de que el estudiante, desarrolle nuevas ideas frente al tema o amplíe y reestructure su conocimiento previo del fenómeno natural estudiado, esto convierte esta situación – a juicio del investigador- en un problema representativo para la enseñanza y aprendizaje de las ciencias naturales, quizá esta problemática es responsable de la falta de interés, sino rechazo, de muchos estudiantes por el aprendizaje de las ciencias y además obstaculiza el cumplimiento de objetivos como el enriquecimiento de las experiencias en el estudiante en su formación como sujeto crítico y su capacidad de resolver problemas concretos atendiendo las necesidades de la sociedad al utilizar sus competencias y conocimientos científicos y tecnológicos (Fernández, Gil Pérez, Valdés y Vilches, 2005) frente a lo anterior, es necesario abordar esta situación desde diversas perspectivas, tales como, la participación activa y constructiva del estudiante, el aprendizaje como

una actividad social y el aprendizaje a través del uso de actividades significativas (Vosniadou, 2006), este último factor se abordará en los siguientes párrafos.

Diversos aspectos (ciencia significativa, influyente, teórica y práctica) que definen la enseñanza de la física desde diferentes campos de acción, han perdido sentido en el aula al prestar más atención a las actividades que involucran la resolución de problemas a través de razonamientos matemáticos formales (Porras & Reyes, 2019), dejando de lado el abordaje de situaciones en las cuales el estudiante se sienta familiarizado con el tema a través de sus propias experiencias, permitiendo no solo una mayor interiorización del contenido sino, además, la construcción de explicaciones frente a cómo ocurren los fenómenos naturales que han experimentado a lo largo de su vida; como lo son la lluvia, los rayos, la formación de las nubes, las tormentas eléctricas, entre otros.

Por lo anterior, se considera necesario establecer relaciones dinámicas entre este tipo de fenómenos cotidianos y los conceptos fundamentales que son llevados al aula para su respectivo estudio, de tal forma que se posibilite opciones que permitan superar situaciones como las planteadas anteriormente en el contexto de la enseñanza y aprendizaje de la física, a razón de esto, se plantea para el presente trabajo de grado una serie de elementos conceptuales que permitan al estudiante establecer una base teórica para la construcción de una explicación del concepto de potencial eléctrico a través del estudio del fenómeno de la formación del rayo en tormentas eléctricas.

Es necesario aclarar, que, aunque se reconoce que para alcanzar una amplia comprensión del fenómeno meteorológico de las tormentas eléctricas se requiere reconocer y vincular diferentes conceptos fundamentales de disciplinas como la química y la física, abordar todos y cada uno de estos conceptos en un aula de clase requiere de un extenso estudio en el control de variables, lo cual por su grado de complejidad imposibilita la construcción de una única explicación de este fenómeno meteorológico.

En consecuencia, el presente trabajo de grado tuvo como propósito dar respuesta a la pregunta desencadenante que orientó esta investigación:

¿QUÉ ELEMENTOS CONCEPTUALES DEL FENÓMENO DE LA FORMACIÓN DEL RAYO EN TORMENTAS ELÉCTRICAS PERMITEN UNA APROXIMACIÓN AL CONCEPTO DE POTENCIAL ELÉCTRICO?

OBJETIVOS DEL TRABAJO

Objetivo general

Establecer una aproximación al concepto de potencial eléctrico a partir de elementos conceptuales del fenómeno de la formación del rayo en la tormenta eléctrica.

Objetivos específicos

- Analizar los fenómenos electrostáticos presentes en una tormenta eléctrica a partir de una caracterización de los elementos conceptuales que la componen.
- Examinar el potencial eléctrico a partir de una revisión de corte conceptual en el tratado de electricidad y magnetismo de James Clerk Maxwell.
- Esbozar una aproximación del concepto de potencial eléctrico para la formación del rayo en el fenómeno de la tormenta eléctrica a partir de la conceptualización realizada.

JUSTIFICACIÓN

En el desarrollo de la práctica pedagógica en el colegio María Montessori, las clases de física eran realizadas bajo la metodología del aprendizaje basado en problemas, es decir, todos aquellos conceptos o temas que se encuentran en los libros de texto de física se llevaban a una situación particular que el estudiante encuentre en su entorno o en su vida cotidiana, de esta manera interioriza los conceptos con mejor claridad y entendimiento para dar soluciones a diferentes situaciones de su entorno. Durante las sesiones de clase correspondientes a la asignatura de electromagnetismo se partió de dos libros de texto que también son utilizados en el primer curso de electromagnetismo de la Universidad Pedagógica Nacional, uno de ellos es el libro de física universitaria titulado Sears F. W., Zemansky M. W. Young H. D. Freedman R. A. Física Universitaria, Vol. II, Pearson-Addison Wesley, México, (2005), este orientó el desarrollo de la formalización matemática de ejemplos propuestos y, el segundo libro de texto fue el Hewitt, P. G. (1995). Física Conceptual. USA: Addison-Wesley Iberoamericana, que ayudó en la comprensión conceptual de situaciones concretas utilizadas por el docente hacia los estudiantes. En ese orden de ideas, relacionar el contenido de los libros de texto de física con las situaciones que viven los estudiantes día a día pretendió mejorar la comprensión de esta disciplina (física) así como el funcionamiento de su entorno y la naturaleza misma.

En el contexto geográfico inmediato en el que se plantea este trabajo de grado, Colombia se encuentra ubicado en la zona tropical sobre el ecuador, donde se presenta la mayor actividad eléctrica atmosférica del mundo (Torres Sánchez, 1991), estas condiciones son propicias para invitar al estudiante a relacionarse con el rayo mediante el fenómeno de la tormenta eléctrica, y esto verse fortalecido con la introducción de conceptos físicos que amplíen la comprensión, acoplado así lo mencionado por el Ministerio de Educación Nacional de que “las generaciones que estamos formando no se limiten a acumular conocimiento, sino que aprendan lo que es pertinente para su vida y puedan aplicarlos a solucionar problemas nuevos en situaciones cotidianas”.

Cabe resaltar la importancia que desde las aulas se fomenten espacios adicionales para la discusión en torno a los fenómenos naturales se evidencia en lo mencionado por Catalá & Chamizo (2010), quienes afirman que en ciencias se debe *"apostar a una educación que logre disminuir la evidente desvinculación entre lo que se aprende (escuela), la producción de*

conocimiento (investigación) y su aplicación (industria y sociedad) (...) y aprovechar el conocimiento para hacer frente a las necesidades de la sociedad actual”, por lo que para el presente trabajo de grado, se pretende hacer énfasis en el fenómeno del rayo en la formación de la tormenta eléctrica, con el fin que los estudiantes tengan una experiencia sensible con su entorno, y además, haya un acercamiento a la comprensión desde la conceptualización física del potencial eléctrico.

ANTECEDENTES

Los antecedentes consultados reúnen los elementos de corte conceptual para la realización de este trabajo de grado que permiten comprender el fenómeno de formación del rayo. A continuación, se presenta un artículo de investigación de la Universidad Distrital Francisco José De Caldas, un trabajo de grado de la Universidad Nacional de Colombia y dos tesis de maestría de la Universidad Nacional de Colombia.

Una investigación que fue realizada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y publicada en la revista científica de la misma en el año 2010:

- **Porras González Yina Marcela Y Reyes Roncancio Jaime Duván, (2010): *Enseñanza de la Física Basada en el Fenómeno del Rayo Eléctrico.***

En este artículo se tuvo como objetivo analizar las explicaciones sobre el fenómeno del rayo eléctrico de los estudiantes del grado undécimo del Colegio Liceo Santa Paula de Bogotá, partiendo de una secuencia de actividades fundamentada en la enseñanza basada en fenómenos. Consistió en dos fases; en la primera, un análisis de contenido para examinar cómo el fenómeno del rayo eléctrico es considerado en los libros escolares de Física, y en la segunda fase se realizó el diseño y la aplicación de una secuencia de actividades que tuvo presente la metodología del Aprendizaje Basado en Fenómenos donde se destacó el aprendizaje colaborativo, auténtico y holístico, involucrando la recolección de información teniendo como punto de partida una historieta conceptual contextualizada, que movilizó a los estudiantes al estudio del fenómeno del rayo eléctrico, así como, las explicaciones aportadas en torno al fenómeno. Las conclusiones de la investigación a las que se llegaron indican que el fenómeno del rayo eléctrico no es estudiado a

profundidad en los libros de texto consultados, sino que se limita a nombrarse en problemas, preguntas y datos históricos.

Esta investigación permitió identificar los conceptos utilizados en la formulación de problemas en los textos de física, abriendo un interrogante a cuál es el papel del fenómeno en dichos textos ya que no son objeto de estudio directamente en la explicación de conceptos, así, la investigación prioriza al fenómeno en la explicación de conceptos que permiten entender los principios físicos del rayo.

- **Trabajo de grado del departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional titulado: caracterización de los fenómenos electrostáticos desde una perspectiva de campos de Andrea Estefanía Ulloa Cataño y David Alexander Paque Burgos del año 2014.**

Este trabajo toma importancia en la realización de esta monografía ya que abarca de una manera simple y grafica el concepto de potencial eléctrico desde las experiencias descritas por Maxwell y Faraday acerca de los fenómenos electrostáticos (inducción, conducción y fricción), que aportaron los conceptos que serán de utilidad en la explicación del fenómeno de las tormentas eléctricas, además que su metodología se fundamenta en el estudio de diferentes referentes teóricos, y en las diferentes propuestas realizadas por autores involucrados en el campo del electromagnetismo, para poder llegar a un análisis reflexivo acerca de cómo se concibe las diversas caracterizaciones de los fenómenos electrostáticos, donde toman al potencial eléctrico como el estado de electrificación que posee un sistema o cuerpo desde la teoría de campos.

Así, este trabajo de grado abre las puertas conceptualmente a como se caracterizan los fenómenos electrostáticos, lo que nos servirá para llevarlos a una situación concreta: el fenómeno de las tormentas eléctricas.

El siguiente trabajo es una investigación de maestría de la Universidad Nacional De Colombia, titulado:

- **Evaluación del riesgo por rayos para Colombia por Audrey Soley Cruz Bernal del año 2019.**

El cual es de importancia porque plantea una problemática que se vive constantemente en el territorio colombiano debido al fenómeno de las tormentas eléctricas, pues el autor presenta una serie de riesgos a causa de los rayos y sus efectos en el medio ambiente y a nivel social, donde realiza una breve descripción de este fenómeno, mencionando que Colombia es una de las regiones con mayor actividad de rayos en el mundo, lo cual se refleja en un considerable número de muertos y heridos, y se asocia con la existencia de riesgo para la población en general donde se evalúa y analiza el riesgo en seres humanos causado por rayos teniendo en cuenta las condiciones climatológicas y geográficas de Colombia, la actividad de rayos en el país y la información obtenida a partir de diversas fuentes (gubernamentales y privadas).

Así esta investigación aporta elementos importantes en cuanto a la formación de un rayo, los tipos de nube que los producen, y las condiciones atmosféricas que permiten la formación de estos fenómenos.

Otro trabajo que aporta elementos importantes es una tesis de maestría titulada:

- **Aplicaciones de la teoría de la distancia Debye al estudio del circuito eléctrico global de Claudia Lucía Cortés en el año 2014.**

En este trabajo se presenta las bases teóricas que fundamentan esta monografía, partiendo de una explicación de las divisiones de la atmosfera terrestre como también el autor menciona que son los rayos los principales generadores del circuito y mantienen una diferencia de potencial entre la superficie de la tierra y la ionósfera (circuito eléctrico global), como también, da unas generalidades sobre el rayo: el fenómeno físico y las etapas.

En ese orden, este trabajo aborda una temática muy clara, dando explicación a los temas tratados en ella, pero no se centra en la explicación de conceptos, como lo es el potencial eléctrico,

lo asocia directamente al fenómeno del rayo, así, tomando estos elementos del trabajo, se realizará una explicación del fenómeno de las tormentas eléctricas por medio del concepto.

METODOLOGÍA

La metodología que permitió el desarrollo de este trabajo de grado es un proceso investigativo de corte conceptual, que permite reunir los diferentes elementos conceptuales de la electrostática involucrados en la formación del rayo en una tormenta eléctrica, que fueron tomados de los diferentes referentes bibliográficos mostrados en los antecedentes que permitieron estructurar y establecer una conexión con el concepto de potencial eléctrico descrito por James Clerk Maxwell a partir de una serie de experimentos secuenciales expuestos en su tratado de electricidad y magnetismo, y los tres libros de texto de física universitaria: (Paul G. Hewitt (2007). *Física conceptual. Décima edición.* YOUNG, HUGH D. y ROGER A. FREEDMAN (2009). *Física universitaria, con física moderna volumen 2. Decimosegunda edición.* GIANCOLI, DOUGLAS C. (2009). *Física para ciencias e ingeniería con física moderna. Cuarta edición.*)

Teniendo en cuenta lo anterior, la ruta que guiará el desarrollo de este trabajo de grado se abordará en 3 fases, las cuales permitirán reunir los diferentes criterios para la realización de esta.

- **Fase 1.** A partir de los antecedentes consultados en el capítulo I, se realizará en el capítulo II una descripción general del fenómeno meteorológico de las tormentas eléctricas, como ubicación geográfica, ¿dónde hay mayor actividad atmosférica?, nubes de tormenta (cumulonimbos), descargas eléctricas conocidas como rayos y la clasificación de las capas de la atmósfera basada en la distribución de temperaturas y en función de la altura, donde el autor se centrará en dicha descripción solamente desde el punto de vista eléctrico.
- **Fase 2.** Con lo anterior, en el capítulo III se abordará el *Tratado de electricidad y magnetismo* de James Clerk Maxwell y los libros de texto de física universitaria mencionados anteriormente, que abarcan el concepto de potencial eléctrico. En el primero Maxwell hace una descripción de los fenómenos eléctricos: electrificación por contacto, electrificación por fricción y electrificación por inducción, estableciendo a su vez que el

medio es quien permite las interacciones entre los objetos electrificados, siendo esta la perspectiva de campos, así, de los tres fenómenos de electrificación solo se tomaron dos: la electrificación por fricción, que brinda una explicación teórica de la electrificación al interior de la nube, y la electrificación por inducción, que brinda elementos conceptuales que permiten una aproximación al concepto de potencial eléctrico estableciendo una relación con el fenómeno de la formación del rayo en tormentas. Es necesario mencionar que se tomaron estos tres textos específicamente porque han sido de uso por parte del autor en los cursos de electromagnetismo de la Universidad Pedagógica Nacional, en los cuales se aborda el concepto de potencial eléctrico parte desde la caracterización de la carga y la formalización matemática en la interacción de los objetos cargados, partiendo del trabajo que realiza una carga para mover (atraer o repelar) otra según la distancia de separación, esta perspectiva es lo que se conoce como acción a distancia.

- **Fase 3.** Siendo así que, en el capítulo IV se establece una relación que permita una aproximación al concepto de potencial eléctrico a partir de la identificación de los elementos conceptuales de la electrostática involucrados en el fenómeno de formación de rayos en la interacción entre la nube cumulonimbos y la superficie terrestre, con los libros de texto de física seleccionados, conociendo las dos perspectivas: acción a distancia o perspectiva de campos que explican la interacción entre objetos cargados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

A continuación, se realiza una caracterización del fenómeno meteorológico de las tormentas eléctricas, exponiendo en primera instancia el medio donde este fenómeno se forma, seguido especificar qué es una tormenta eléctrica y el tipo de nube que la conforma siendo estas las generadoras de las descargas eléctricas.

Atmosfera terrestre

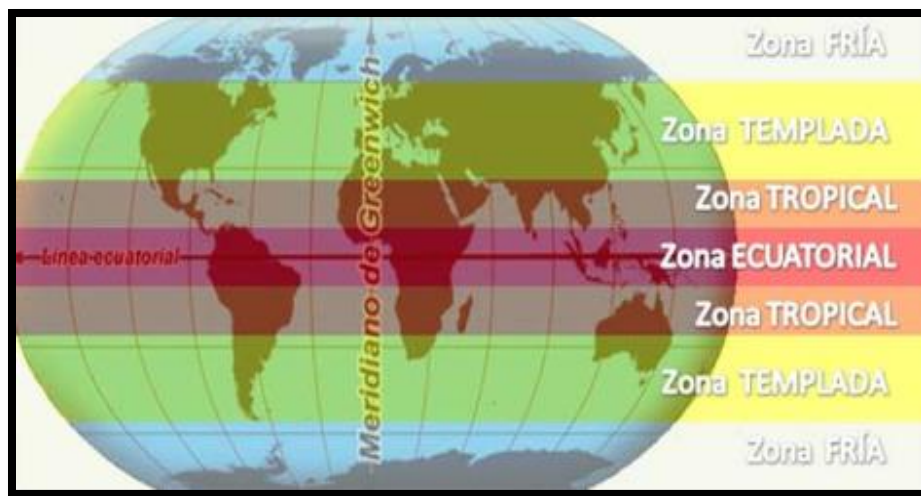
La atmósfera terrestre es una capa de gas que rodea toda la superficie de la Tierra y es un factor fundamental que posibilita el surgimiento de la vida en el planeta, sin la existencia de esta se desencadenarían grandes cambios de temperatura en la superficie.

La compresibilidad, como propiedad fundamental de los gases en conjunto con el efecto de la gravedad terrestre genera que aproximadamente el 80% de toda la masa de la atmosfera se encuentra en una región denominada troposfera, esta posee una concentración porcentual de los siguientes elementos un 78.05% Nitrógeno (N₂), 20.946% Oxígeno (O₂), 0.934% Argón (Ar), 0.0314% Dióxido de Carbono (CO₂), 0.00182% Neón (Ne) y 0.00052% Helio (He), así como polvo en suspensión y otros gases menos representativos (Kr, H₂, CO, CH₄, O₃, Xe, NH₃, NO₂), este conjunto de gases en su mayoría poseen una composición constante y se extienden desde la superficie de la tierra (0 km) hasta una altitud aproximada de 20 km sobre el ecuador y en los polos una altitud de 6 km, donde se presenta una relación de temperatura con la altura descendiendo a razón de aproximadamente $6,5 \frac{^{\circ}C}{km}$ hasta un mínimo de -73°C.

Tormenta eléctrica

Las tormentas eléctricas son un fenómeno natural meteorológico cuya característica principal es la formación de nubes con carga eléctrica, que generan un fenómeno de descarga conocido como el rayo, cabe resaltar que, estos fenómenos se pueden generar en cualquier lugar del planeta tierra, pero tiene una mayor ocurrencia sobre la zona ecuatorial y tropical (figura 1), donde hay mayor actividad troposférica debido a la incidencia directa (perpendicular a la superficie) de la radiación solar, provocando así, un movimiento de masas de aire caliente y frío.

Figura 1: Zonas térmica terrestre



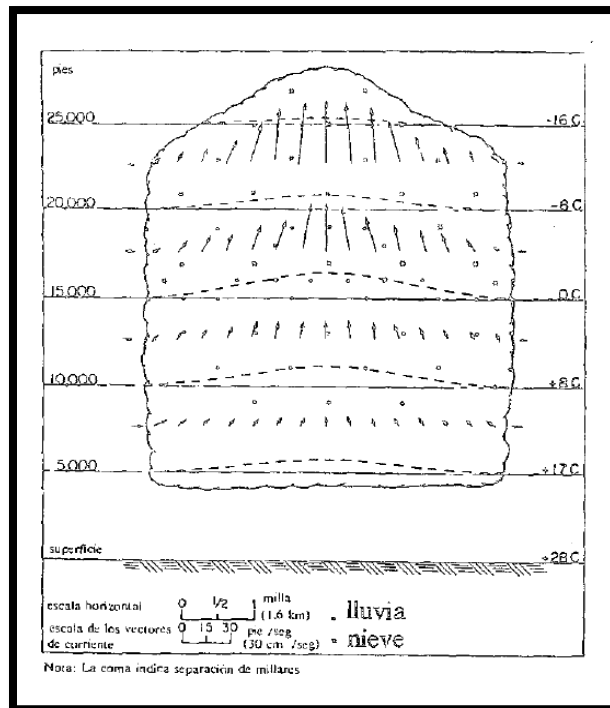
Tomado de: Slideshare (2012) <https://es.slideshare.net/RIVSANTOS/zonas-trmicas-9231720>

Este movimiento de masas de aire (figura 2), sucede cuando un volumen determinado de aire húmedo es calentado por la superficie de la tierra y se eleva rápidamente ya que es más liviano que el aire frío, generando un proceso convectivo gracias al movimiento de masas de aire, creando fuertes corrientes de aire ascendente, a medida que el aire sube, la presión baja y el volumen de aire húmedo se expande adiabáticamente¹ por lo tanto, el volumen de vapor de agua se enfría condensa, estas gotas de agua y cristales de hielo se acumulan aproximadamente a una altura de 10 km sobre la superficie terrestre en una región de la troposfera que son arrastradas por las corrientes

¹ No saldría ni entraría calor porque en las grandes dimensiones que estamos considerando, no hay tiempo de que haya mucho flujo de calor.

de aire dando comienzo a la formación de la nube de tormenta o nube cumulonimbos (Feynman & Leighton, 1964).

Figura 2: *Etapa inicial de una tormenta eléctrica*



Tomada de: Lecturas de física de Feynman vol. II: electromagnetismo y materia (Feynman & Leighton, 1964)

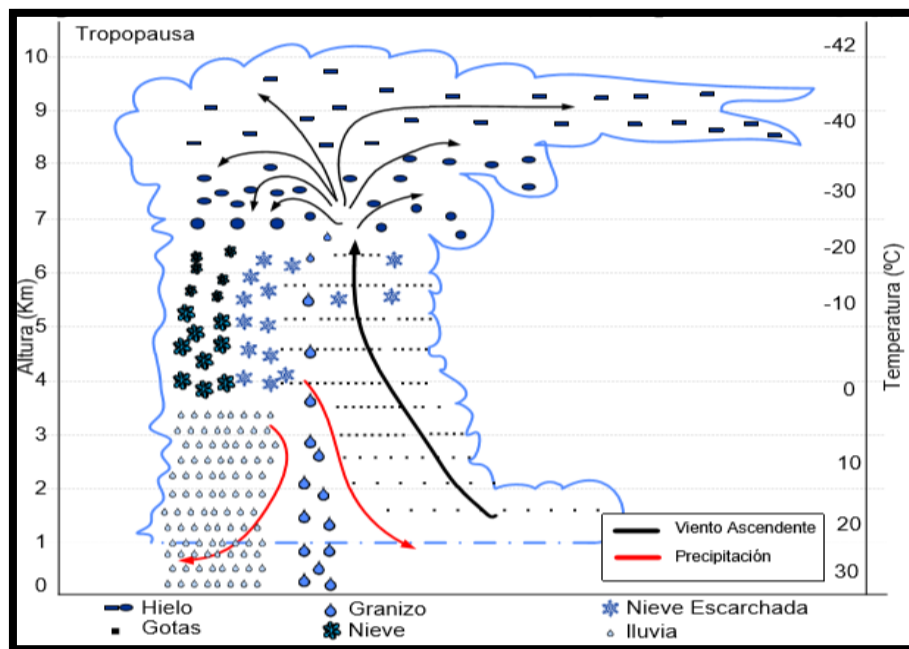
Nubes de tormenta

Las nubes de tormenta llamadas cumulonimbos (figura 3) se forman en la troposfera a 2 km sobre la superficie terrestre donde la temperatura es un poco mayor a los 0°C (punto de congelamiento del agua) y se extiende hasta una altitud de 20 km y están compuestas principalmente de agua en estado gaseoso y cristales de hielo, cuando se presenta mayor cantidad de vapor de agua en algún punto de la troposfera, es decir, que hay una sobresaturación de vapor de agua en esa zona local de la atmósfera y debido al movimiento de masas de aire caliente y aire frío; el aire caliente al ser más liviano tiende a subir y el aire frío al ser más denso y pesado tiende a bajar, en el ascenso, la masa de vapor de agua se expande y se enfría, dando así a la formación de

la nube, en el interior de este tipo de nubes coexistan de manera simultánea agua en los tres estados: vapor, líquido y sólido. (Garzón, 2015).

Debido a la colisión entre granizos y cristales de hielo se puede explicar la separación de carga eléctrica, es decir, estos elementos son los principales mecanismos por el cual la nube obtiene su carga eléctrica, pero solo es una hipótesis teórica (Garzón, 2015), así, este tipo de nube dada su dinámica al interior, son las generadoras de las descargas eléctricas durante una tormenta eléctrica.

Figura 3: *Nube cumulonimbos*



Tomado de: Localización de Tormentas eléctricas usando redes de sensores puntuales de campo electrostático. medellin. colombia (Villa, 2015)

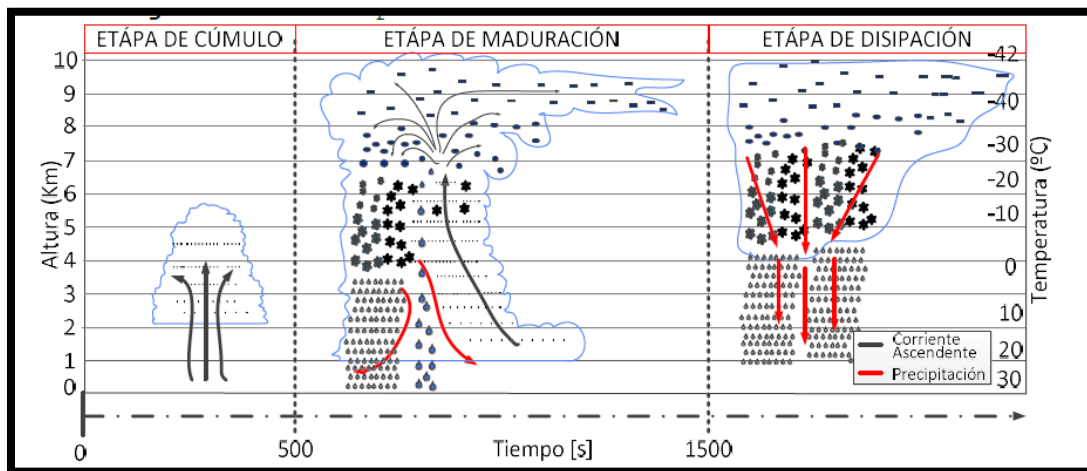
Las tormentas eléctricas tienen un ciclo de vida, el cual ha sido tomado a través de observación experimental (visual, campo eléctrico) del fenómeno de la tormenta como se describe a continuación (figura 4). Cabe mencionar que no es posible determinar un tiempo característico de duración de una tormenta eléctrica debido a que en ella intervienen varios factores en la atmósfera durante la formación (Villa, 2015).

Cúmulo: En esta etapa comienza la formación de cúmulos, existe una corriente de aire ascendente, el vapor de agua se condensa debido a los cambios de temperatura en la atmosfera, la cual desciende con la altura.

Maduración: En esta etapa, en el interior de la nube el movimiento de masas de aire cálido y frio debido a las fuerzas de empuje y gravedad, el agua condensada forma cristales de hielo chocando así con otros de tal manera que a causa de diferentes mecanismos de electrificación (fricción, contacto e inducción) adquieren carga, donde se presentan algunas precipitaciones de descarga eléctrica entre nube-nube y nube-tierra.

Disipación: En esta etapa desaparece la corriente de aire ascendente, se detiene la formación de centros de carga, la nube neutraliza su carga eléctrica mediante descargas nube-nube y nube-tierra.

Figura 4: *Etapas de formación de la nube cumulonimbos*



Tomado de: Localización de Tormentas eléctricas usando redes de sensores puntuales de campo electrostático. medellin. Colombia. (Villa, 2015)

Producción de rayos

Aunque no es posible dar una explicación exacta sobre cómo se producen los rayos (Garzón, 2015), ya que, los mecanismos mediante los cuales las nubes adquieren carga eléctrica, ha sido un

problema el cual no ha tenido una solución concluyente, es posible por lo menos comprender en parte el origen de la electricidad atmosférica. Con lo anterior, se puede decir que los mecanismos de adquisición de carga están ligados a la carga transferida en la formación las partículas de hielo que conforman la nube o su interacción entre sí o con fuentes de campo eléctrico; las cargas positivas y negativas se separan debido a los choques y/o fricción entre cristales de hielo y granizo en el interior de la nube, dando así que en la nube se tenga algún tipo de organización o polarización de las cargas, donde las cargas positivas predominan en la parte superior de la nube y las cargas negativas en la parte inferior de la nube, por su parte, en la superficie terrestre las cargas positivas son las que predominan, como se observa en la figura 5.

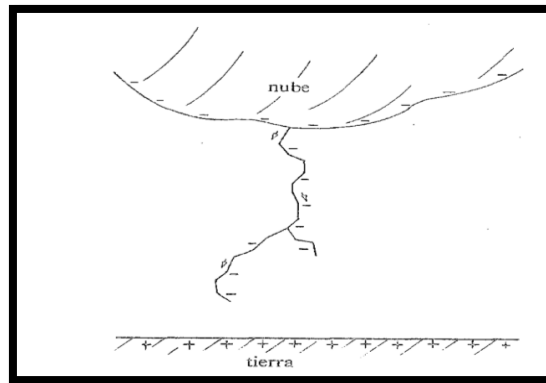
Figura 5: Estructura idealizada de la configuración electrónica de una nube de tormenta



Tomado de: Localización de Tormentas eléctricas usando redes de sensores puntuales de campo electrostático. *Medellin. Colombia (Villa, 2015).*

La formación de un rayo consta de varias etapas, en este caso, se describe el tipo de descarga en la nube con parte inferior negativa donde los electrones serán acelerados hacia la tierra con carga positiva.

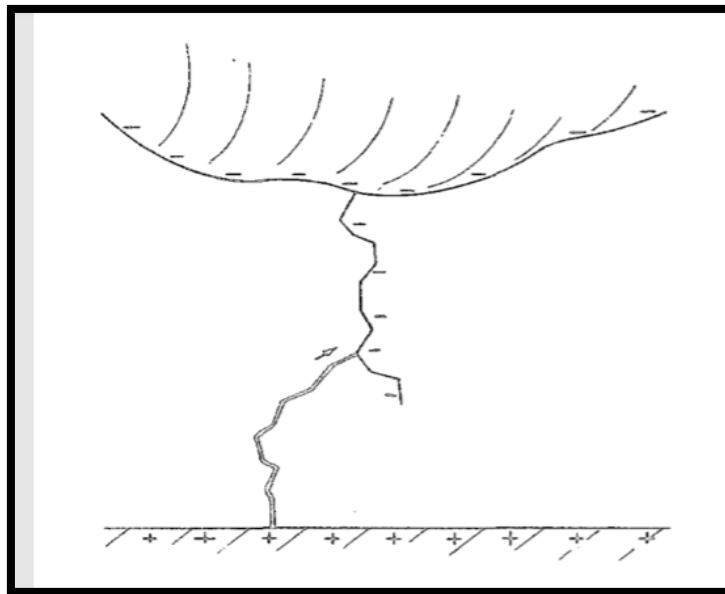
Figura 6: Descarga líder de un rayo



Tomado de: Lecturas de Feynman . En R. Feynman. Addison Wesley Longmen de Mexico, S.A de C.V (Feynman & Leighton, 1964)

Todo comienza con algo llamado “descarga líder escalonada” (Feynman & Leighton, 1964). Esta descarga líder (figura 6) se mueve en forma escalonada recorriendo distancias de 50 metros y después se detiene por intervalos de tiempo de 50 microsegundos. Este movimiento es secuencial, se mueve y se detiene por dicho tiempo, luego retoma su movimiento y se detiene, y así sucesivamente hasta que la guía toca el suelo, en este movimiento rápido y pausado de cargas negativas proveniente de la nube, se traza un camino que a su vez ioniza el aire circundante, lo cual genera que, esa columna de aire se vuelva un conductor por el camino trazado. Cuando la guía llega toca el suelo, se genera un tipo de hilo conductor por donde las cargas negativas ubicadas en la parte inferior de la nube pueden “escapar”, dando así la descarga eléctrica y es observable mediante los sentidos ya que tiene un efecto visual conocido como relámpago y otro sonoro conocido como trueno. (ver figura 7)

Figura 7: *Descarga eléctrica*



Tomado de: Lecturas de Feynman . En R. Feynman. Addison Wesley Longmen de Mexico, S.A de C.V (Feynman & Leighton, 1964)

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE LOS FENÓMENOS ELECTROSTÁTICOS REALIZADOS POR JAMES CLERK MAXWELL

Cuando se habla de electrostática, se involucran términos los cuales no son de fácil comprensión, ya que, la mayoría al no estar en la experiencia sensible, exigen un razonamiento más abstracto por parte del sujeto(estudiante), lo que posteriormente puede generar una serie de conflictos conceptuales y confusiones al momento de entrar a estudiar con más detalle los fenómenos eléctricos y magnéticos. Entonces para obtener mayor eficiencia en la enseñanza de estos fenómenos se hace necesario recurrir al análisis desde otra representación, en la que sea bastante útil la explicación de los fenómenos electrostáticos y magnéticos. Es entonces que se hace pertinente, poder relacionar los conceptos involucrados a un fenómeno que sea cotidiano al sujeto y de donde este puede observar y analizar (perteneciente al sentido común).

En ese orden de ideas, y gracias a nuestra experiencia hemos evidenciado que hay objetos que se atraen y que se repelen, como es el caso puntual, la manipulación de imanes con objetos metálicos, se hace evidente este tipo de interacción (atracción o repulsión). Y como lo menciona Maxwell² en la siguiente cita, es relevante al respecto:

*“El hecho que ciertos cuerpos, después de haber sido frotados, parecen atraer otros cuerpos, fue conocido por los antiguos. En los tiempos modernos, una gran variedad de otros fenómenos ha sido observadas, y se ha encontrado que están relacionados con esos fenómenos de atracción. Ellos han sido clasificados bajo el nombre de fenómenos **Eléctricos**, habiendo sido el ámbar, $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$, la sustancia en la cual fueron descritos por primera vez.*

Otros cuerpos, particularmente la piedra imán y piezas de hierro y acero que han sido sometidas a ciertos procesos, desde hace tiempo se ha conocido que exhiben fenómenos de

² Traducción realizada por Juan Carlos Orozco C. y María Cecilia Gramajo. Maestría en Docencia de la Física, Universidad Pedagógica Nacional

MAXWELL, James Clerk., A treatise on electricity and magnetism Vol. I. Dover Publications Inc., New York, 1954.

acción a distancia. Estos fenómenos, con otros relacionados a ellos, se encontraron diferentes de los fenómenos eléctricos y han sido clasificados bajo el nombre de fenómenos Magnéticos, siendo encontrada la piedra imán, μαγνής, en la Magnesia Tesaliana.

Estas dos clases de fenómenos, se ha encontrado también que, están relacionadas unas con otras y las relaciones entre los varios fenómenos de ambas clases, tal y como son conocidas, constituyen la ciencia del Electromagnetismo” (Maxwell, 1954).

La clasificación en la que nos centraremos es la electrificación, donde se evidencia la atracción o repulsión según sea el caso, y es lo que estudia la electrostática. Cuando se habla de electrificación, se hace referencia a aquella propiedad eléctrica que adquiere un objeto cuando es sometido a diversos métodos que modifiquen sus cualidades eléctricas, estos métodos son llamados fenómenos o tipos de electrificación. Ahora bien, para el análisis de estos fenómenos eléctricos y su caracterización se constituye desde dos perspectivas o puntos de vista desde la cual se puede dar explicación a los fenómenos eléctricos y magnéticos, dos visiones opuestas, la acción a distancia y la descripción de campos y medios continuos, como lo afirma la maestra María Mercedes Ayala³:

“En el electromagnetismo, por su parte, es posible distinguir dos perspectivas de análisis de los fenómenos que no sólo son diferentes sino opuestas. En una, la acción entre los cuerpos es interpretada como una acción directa y a distancia; todo cambio se atribuye a los cuerpos y cualquier referencia al espacio sólo se hace para definir su disposición espacial. En la otra perspectiva, la acción entre cuerpos que es percibida por los sentidos es atribuida al estado en que se encuentra el medio en el cual están inmersos (o mejor aún, del cual hacen parte); el estado del medio (o si se quiere, del espacio) y sus cambios es, ahora, el objeto de análisis. Usualmente la distinción entre estas dos perspectivas es omitida, y se pasa de una perspectiva a la otra sin hacerlo explícito, produciendo imágenes contradictorias y toda una serie de dificultades al tratar de comprender las diversas afirmaciones que se hacen sobre los fenómenos electromagnéticos” (Ayala, 2006).

³ Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades (2006).

Como se mencionó anteriormente, la interacción (atracción o repulsión) entre dos cuerpos, es debida al estado en que se encuentre el medio en el cual estén inmersos, es allí donde, desde la teoría de campos, el medio es quien posee las características eléctricas y magnéticas que permite dicha interacción. Estas nociones se le atribuyen en primera instancia a Faraday, quien argumentaba que dicha interacción era producto de lo que actualmente conocemos como las líneas de fuerza, por medio de ellas se daba cuenta de la fuerza existente en la interacción, en este caso, de los cuerpos magnéticos a distancia uno del otro. Ahora bien, la idea central de campo fue establecida por J.C Maxwell, en donde lo explica en términos de una caracterización matemática, lo representa con un formalismo matemático que permite dar descripciones del fenómeno, todo esto a partir de los avances que hizo Faraday, donde Maxwell lo menciona en su tratado de electromagnetismo:

“Por ejemplo, Faraday, en su forma de pensar, vio líneas de fuerza atravesando todo el espacio en donde los matemáticos vieron centros de fuerza atrayéndose a una distancia; Faraday vio un medio donde ellos no vieron más que distancia; Faraday buscó la sede de los fenómenos en acciones reales ocurridas en el medio, ellos estaban satisfechos con haber encontrado la sede en una fuerza de acción a una distancia impresa sobre los fluidos eléctricos” (Maxwell, 1954).

Siguiendo el pensamiento de Faraday, Maxwell en su tratado de electricidad y magnetismo realiza la descripción de los tres fenómenos de electrificación⁴ en cual dos son de interés en la realización de este trabajo de grado: la electrificación por fricción y la electrificación por inducción, ya que brindan elementos conceptuales que permiten aproximar al concepto de potencial eléctrico en el fenómeno de formación del rayo en la tormenta eléctrica.

Electrificación por fricción

En su tratado de electricidad y magnetismo Maxwell expone el primer experimento donde utiliza dos cuerpos de distinto material: vidrio y resina, los fricciona, no se mostrarán ninguna propiedad eléctrica hasta el momento, luego de ser separados se logra evidenciar un efecto visual de atracción de un cuerpo hacia otro; si se colocan dos cuerpos de la misma naturaleza que los anteriormente mencionados en la misma situación se dará cuenta de tres situaciones particulares:

⁴ Electrificación por fricción, electrificación por conducción y electrificación por inducción.

- Vidrio – Vidrio: Se repelen
- Vidrio – Resina; Se atraen
- Resina – Resina: Se repelen

Con estos tres resultados, se puede evidenciar que hay dos fenómenos de interacción: atracción y repulsión; la atracción se logra al friccionar materiales diferentes y la repulsión se logra cuando se fricciona dos materiales iguales. Se hace relevante tener en cuenta que, para evidenciar estas interacciones (atracción y repulsión) es necesario tener dos o más cuerpos electrificados, esto nos permite evidenciar si hay electrificación en un cuerpo.

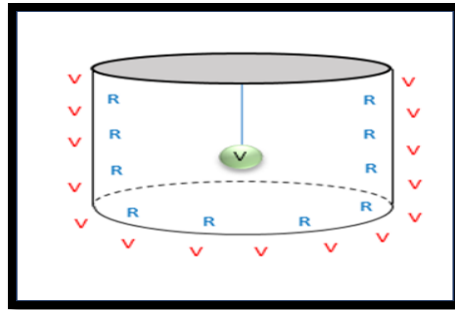
A los cuerpos que adquieren las propiedades como la del vidrio se denomina electrificación vítrea, se le atribuye el signo positivo (+); cuando el cuerpo adquiere la propiedad similar al de la resina se denomina electrificación resinosa y se le atribuye el signo negativo (-). Cabe aclarar que estas atribuciones se hicieron de manera arbitraria, como lo menciona (Maxwell, 1954):

“Es la práctica establecida de los hombres de ciencia llamar a la electrificación vítrea positiva y a la resinosa negativa. Las propiedades exactamente opuestas de las dos clases de electrificación nos justifican el indicarlas con signos opuestos, pero la aplicación del signo (+) a una clase más que a la otra debe ser considerada como un asunto de convención arbitraria, de la misma manera que es una convención en los diagramas matemáticos designar las distancias positivas hacia la mano derecha”.

Electrificación por inducción

En el segundo experimento que propone Maxwell, se utiliza un recipiente metálico abierto y suspendido por hilos de seda, se utiliza un hilo para abrir y cerrar la tapa de manera que no se tenga contacto con el recipiente, hace uso de los materiales del experimento 1 previamente electrificados y los suspende por hilos de la misma manera que el recipiente. Cabe aclarar que el recipiente no está electrificado, ahora si se introduce el vidrio ya electrificado (por fricción) y se cierra la tapa (figura 8), se logra evidenciar que la parte externa del recipiente estará electrificada vítreamente, no importa el lugar en el que se encuentre el vidrio en el interior del recipiente, una vez sacado el vidrio del recipiente se podrá evidenciar que aun seguirá teniendo la misma electrificación y la del recipiente desaparece.

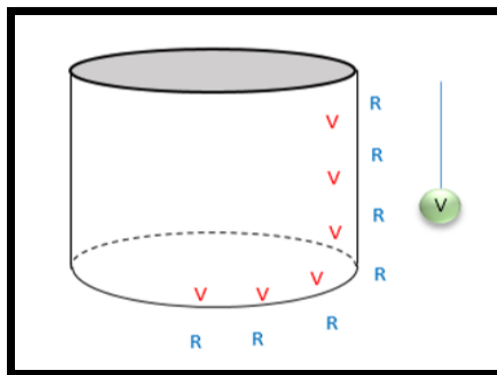
Figura 8: Experimento propuesto por J. C. Maxwell.



Tomado de: CARACTERIZACION DE LOS FENÓMENOS ELECTROSTÁTICOS DESDE UNA PERSPECTIVA DE CAMPOS. (Paque, 2014)

Ahora se ubica el vidrio en la parte externa del recipiente sin tocarlo se puede evidenciar que, la ubicación del cuerpo ya electrificado altera la superficie a la que se encuentre más cercana, lo cual esa zona del recipiente se electrificara resinosamente y la otra parte vítreamente, como se observa en la figura 9.

Figura 9: Experimento propuesto por J.C. Maxwell



Tomado de: CARACTERIZACION DE LOS FENÓMENOS ELECTROSTÁTICOS DESDE UNA PERSPECTIVA DE CAMPOS. (Paque, 2014)

La electrificación sin contacto se conoce como inducción y en el cual nos centraremos a partir de la explicación que da Maxwell en su tratado de electricidad y magnetismo, que permite dar una explicación más clara sobre el fenómeno de las tormentas eléctricas.

EL POTENCIAL ELÉCTRICO DESDE LA PERSPECTIVA DE ACCIÓN A

DISTANCIA

A continuación, se muestra algunas interpretaciones que se hacen del potencial eléctrico en algunos libros de física universitarios, cabe mencionar, que este concepto en muchos de ellos lo abordan desde la teoría de acción a distancia, donde las interacciones entre los cuerpos cargados se hacen de manera directa y a distancia, así, desde esta perspectiva los cuerpos son considerados fuentes de las acciones, siendo estos los objetos de estudio (Castillo, 2006).

Se hace uso de algunos textos de física en donde se dé una explicación clara en lo que se refiere la diferencia de potencial, para nuestro caso se optó por tomar tres textos de física universitarios. El primer texto que se aborda es física conceptual de Paul G. Hewitt, décima edición; en este texto se define el potencial eléctrico en términos de energía, el cual dice que:

Una carga tiene energía potencial eléctrica al estar ubicada en algún lugar de un campo eléctrico. Al concepto de energía potencial por unidad de carga se le llama potencial eléctrico; es decir:

$$\text{Potencial electrico} = \frac{\text{energia potencial electrica}}{\text{unidad de carga}}$$

La unidad de medida del potencial eléctrico es el volt, por lo que al potencial eléctrico se le llama con frecuencia voltaje.

En pocas palabras, el autor afirma que estos términos (el potencial y potencial eléctrico) son lo mismo en unidades de volt, de igual manera la diferencia de potencial y voltaje (diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos). El potencial eléctrico está determinado por el lugar en donde se encuentre la carga en un campo eléctrico.

Otro texto consultado es: Física para ciencias e ingeniería con física moderna de Douglas C. Giancoli, en este libro se aborda el concepto de potencial eléctrico a partir de:

La diferencia en energía potencial, $U_b - U_a$, es igual al negativo del trabajo, W_{ab} , que realiza el campo eléctrico para mover la carga desde a hasta b ; por lo mismo, la diferencia de potencial V_{ba} es:

$$V_{ba} = \Delta V = V_b - V_a = \frac{U_b - U_a}{q} = -\frac{W_{ba}}{q} \quad (1)$$

Observe que el potencial eléctrico, al igual que el campo eléctrico, no depende de nuestra carga de prueba q . V depende de las otras cargas que generan el campo, pero no de q ; q adquiere energía potencial cuando está inmersa en el potencial V debido a otras cargas. (GIANCOLI, 2009)

El siguiente texto es: Física universitaria con física moderna Sears Zemansky decimosegunda edición volumen 2. de los autores Young, Hugh D. y Roger A. Freedman. Donde se describe el potencial eléctrico de la siguiente manera:

“Así como la energía potencial gravitatoria depende de la altura de una masa sobre la superior terrestre, la energía potencial eléctrica depende de la posición que ocupa la partícula con carga en el campo eléctrico. Describiremos la energía potencial eléctrica utilizando un concepto nuevo, llamado potencial eléctrico o simplemente potencial. Es frecuente que, en el estudio de los circuitos, una diferencia de potencial entre un punto y otro reciba el nombre de voltaje. Los conceptos de potencial y voltaje son cruciales para entender la manera en que funcionan los circuitos eléctricos, y tienen aplicaciones de gran importancia en los haces de electrones que se utilizan en la radioterapia contra el cáncer, los aceleradores de partículas de alta energía y muchos otros aparatos” (YOUNG & FREEDMAN, 2009)

Este último expresa el potencial eléctrico de la misma manera que lo hace el segundo texto (GIANCOLI, 2009), pero las formulaciones matemáticas parten de que el trabajo lo muestra en términos de integrales, llegando a mismo formalismo mostrado en la ecuación (1).

De igual manera, es claro evidenciar que no se le dedica muchas páginas a la explicación de este concepto; el primer texto se aborda un aspecto más conceptual, aunque no se logra hacer algún tipo de vinculación o relación con fenómenos naturales (que se expliquen desde el electromagnetismo) en donde el estudiante tenga interacción con el entorno. En relación con el segundo y el tercero, el cual es bastante matemático, pero tienen algo en común, es que, no se aborda un aspecto físico, es decir; no se le da una aplicación o no se da una explicación a partir de una situación o fenómeno en el cual el estudiante se encuentre interaccionando, dificultando así, la

comprensión de estos, a menos que sea un estudiante con más práctica en el tema. Siendo este concepto trabajado en cursos de física en el bachillerato y en cursos de electromagnetismo universitarios, que demanda una explicación de este concepto más análoga a situaciones conocidas por el estudiante.

EL POTENCIAL ELÉCTRICO DESDE LA PERSPECTIVA DE CAMPOS

La presencia de una carga eléctrica Q situada en cualquier lugar en el espacio le otorga a esta región del espacio características atractivas o repulsivas que experimentara una nueva carga eléctrica q que sea colocada allí. Es decir, la presencia de Q modifica el espacio circundante, que se conoce como campo eléctrico E .

La carga q experimenta una fuerza eléctrica F debida a E :

$$\vec{F} = \vec{E}q \quad (2)$$

Esta fuerza eléctrica realizará un trabajo para mover la carga eléctrica de un punto A a otro B con desplazamientos cortos $d\vec{l}$ siendo el trabajo realizado dW .

$$dW = F \cdot d\vec{l} \rightarrow dW = \vec{E}q \cdot d\vec{l} \quad (3)$$

Integrando la ecuación (3) se obtiene el trabajo total realizado por el campo eléctrico E .

$$W = \int_A^B qE \cdot d\vec{l} \quad (4)$$

Pero tenemos que $d\vec{l} = dl\cos(\theta) = dr$, donde dr es el desplazamiento infinitesimal de la carga eléctrica q en dirección radial en un campo eléctrico E , donde el trabajo W no depende de la trayectoria seguida por la partícula, solo depende de la posición inicial y final, de esta manera la fuerza eléctrica es una fuerza conservativa.

$$W = \int_{r_A}^{r_B} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} dr = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) \quad (5)$$

Donde $\frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r}$ es la energía potencial (U) asociado a la carga eléctrica q a una distancia r de Q .

$$U = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (6)$$

En su tratado de electricidad y magnetismo Maxwell aborda la idea de potencial partiendo de la fuerza electromotriz tomando de referencia dos puntos A y B separados una distancia:

“Se el pequeño cuerpo que lleva la pequeña carga e se mueve desde un punto dado A a otro B a lo largo de una dada trayectoria, experimentará en cada punto de su trayecto una fuerza Re , donde R varía punto a punto de la trayectoria. Sea el trabajo total hecho sobre el cuerpo por la fuerza eléctrica total Ee , entonces E se llama la fuerza electromotriz total a lo largo de la trayectoria AB. Si la trayectoria se hace un circuito completo, y si la fuerza electromotriz total alrededor del circuito no se anula, la electricidad no puede estar en equilibrio, sino que se producirá una corriente. Por lo tanto, en electrostática la fuerza electromotriz total a lo largo de cualquier circuito cerrado debe ser cero, de tal manera que, si A y B son dos puntos del circuito, la fuerza electromotriz total desde A a B es la misma a lo largo de cualquiera de los dos caminos en los que se parte el circuito y dado que cualquiera de ellos puede ser alterado independientemente del otro, la fuerza electromotriz total desde A a B es la misma para todas las trayectorias desde A a B.

Si B se toma como punto de referencia para todos los otros puntos, entonces la fuerza electromotriz desde A a B se llama el potencial de A. Depende solo de la posición de A. En investigaciones matemáticas B se toma generalmente a una distancia infinita de los cuerpos electrificados” (Maxwell, 1954. p. 24-25).

Así, para Maxwell, el potencial eléctrico está ligado a un punto cualquiera que se selecciona dentro del trayecto que recorre la electrificación (a causa de la fuerza electromotriz) mientras se transfiere de un cuerpo A a otro B, pero ¿Cómo ocurre esta transferencia de electrificación? En la

perspectiva de campos, cada cuerpo tiene un grado de electrificación, estos cuerpos interactúan por inducción, es decir, sin tocarlo, de tal manera que alrededor de ellos se altera el medio haciéndolo un conductor, así, si un cuerpo A tiene mayor grado de electrificación que un cuerpo B, el de menor grado experimentara una fuerza electromotriz debido a la perturbación del medio por parte del cuerpo A según sea su estado de electrificación (positiva o negativa) permitiendo así que la electrificación de A se transfiera a B por medio del espacio⁵ conductor, y donde estos grados de electrificación hacen referencia al potencial eléctrico.

⁵ Se hace referencia al medio circundante afectado por el cuerpo cargado.

CAPÍTULO IV

Con lo mencionado en el capítulo anterior, los textos de física seleccionados que abordan sobre el potencial eléctrico no lo hacen desde una mirada en específico si no que es una mezcla de las dos perspectivas generando confusión en la comprensión de este tema por parte de los estudiantes e incluso en el docente (Villalobos, 2019).

Así, las dos perspectivas: acción a distancia y perspectiva campos, que tienen maneras distintas, pero no contradictorias de explicar la interacción entre cuerpos cargados, y a la hora de hacer una explicación conceptual, la primera queda un poco limitada ya que se centra su análisis en los objetos cargados y en la segunda es el medio quien permite las interacciones entre estos objetos cargados, por lo tanto, el desarrollo de este trabajo de grado se sitúa desde la perspectiva de campos para realizar la conceptualización del potencial eléctrico y su relación con el fenómeno de las tormentas eléctricas, porque brinda más elementos conceptuales a la hora de explicar el fenómeno de formación del rayo en una tormenta eléctrica.

EL POTENCIAL ELÉCTRICO EN LAS TORMENTAS ELÉCTRICAS

Carga eléctrica de la tierra

Desde los comienzos de la humanidad, hemos sido testigos de los fenómenos atmosféricos, como lluvias, vientos, tornados y desde luego los rayos, relámpagos y los truenos, donde las culturas primitivas al no tener alguna explicación de cómo ocurrían estos fenómenos, asociaban estos últimos a manifestaciones de deidades (dioses), como por ejemplo hacia el año 700 A.C. (Luque, 2019) los griegos creían que los rayos eran una muestra de la ira de su dios Zeus, por otra parte en la mitología escandinava los rayos eran producto de la manifestación de Thor, dios del rayo y la fuerza. Y aun, hoy en día hay culturas que le rinden tributos a las manifestaciones al fenómeno del rayo, como es el caso de África, los bantúes, que salen en presencia de una tormenta para ahuyentarlas y evitar que caigan los rayos en sus aldeas.

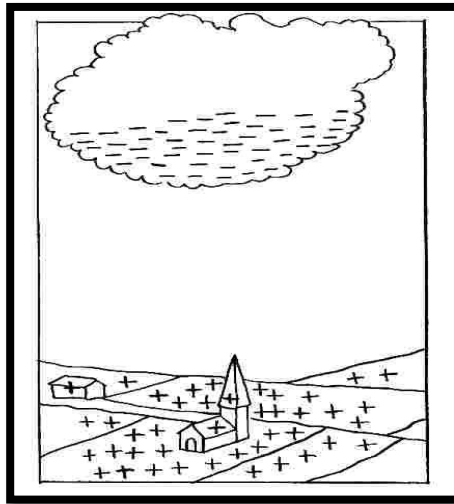
En el estudio del fenómeno de las tormentas eléctricas, el ser humano siempre ha estado muy limitado en la experiencia sensible a la hora de dar explicación del cómo ocurren estos fenómenos,

se postulan teorías que se articulan de tal modo que surge el experimento (Sanchez, 1991). En la segunda mitad del siglo XVII, se realizaron experimentos sobre electricidad atmosférica que pudieran establecer las causas de las descargas eléctricas, instrumentos como alambres de hierro conectados a postes realizado por Lemonnier, o el famoso experimento de la llave metálica atada a una cometa en medio de una tormenta eléctrica realizado por Benjamín Franklin en 1752, lograron evidenciar los efectos eléctricos de la atmosfera, siendo él mismo quien determino que la mayoría de las descargas eléctricas a tierra eran de signo negativo (Cortés, 2014) y donde logro almacenar energía eléctrica en botellas de Leyden, de igual forma:

“Lemonnier sospechó también de una variación diurna de los efectos eléctricos a tiempo bueno, pero fue Beccaria quien, en 1775, también empleando un alambre estirado, confirmó la existencia de dicha variación basando sus conclusiones en 20 años de observaciones. Como dijimos, Benjamín Franklin ya había determinado que la mayoría de las descargas eléctricas a tierra eran de signo negativo. Beccaria confirmó esto y, además encontró que, a tiempo bueno, el alambre adquiría carga positiva” (Cortés, 2014).

Como se mencionó anteriormente, Franklin estableció que las cargas dirigidas a tierra son de signo negativo, por lo cual, la carga presente en la superficie de la tierra debe ser de signo positivo para que pueda existir una descarga entre la parte inferior de la nube y la superficie terrestre, tomando así una polarización como se ilustra en la figura 10:

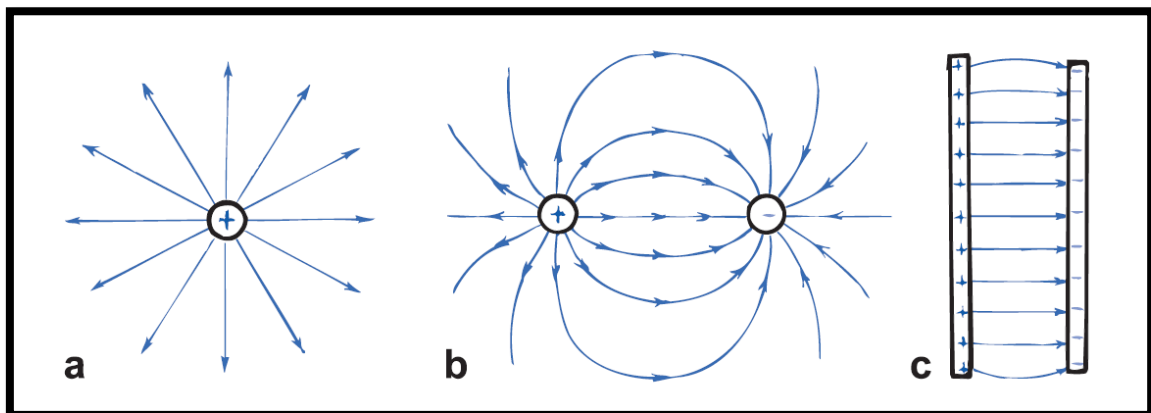
Figura 10: Polarización de la parte inferior de la nube y la superficie terrestre



Tomado de: Encontrad2 (2012). <https://encorda2.com/2012/07/29/rayos-truenos-y-relampagos-en-la-montana/>

Sabemos que una carga eléctrica (ya sea positiva o negativa) genera un campo eléctrico (E) a su alrededor, este campo eléctrico tiene tanto magnitud como dirección. A continuación, se evidencia en la figura 11; la carga **a** genera un campo hacia afuera, mientras que la carga **b** lo genera hacia el interior de ella, a las líneas que se forman alrededor de ellas se les llama líneas de fuerza, y son las responsables de atraer o repeler al objeto cargado.

Figura 11: Líneas de campo generadas por cargas.



Tomado de Física conceptual (Hewitt, 2007)

La ley de Coulomb establece que una la fuerza de un objeto cargado sobre otro objeto cargado es proporcional al producto de la magnitud de la carga Q , con la magnitud de otro objeto cargado q e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Matemáticamente se escribe así:

$$\vec{F} = k \frac{Q * q}{r^2} \hat{r} \quad (7)$$

Donde k es una constante de proporcionalidad cuyas unidades en el SI (sistema internacional) son Nm^2 /C^2 (N: Newton. m: metros. C: coulomb) y r es la distancia de separación entre las cargas (Q y q) medida en metros (m) y ϵ_0 es la permitividad eléctrica en el vacío.

$$k = 8.987551787 \times 10^9 N m^2 / C^2 = 1/4\pi\epsilon_0$$

El campo eléctrico (E) generado por una carga q es:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (8)$$

Reemplazando (7) en (8) tenemos:

$$\vec{E} = k \frac{Q * q/r^2}{q} \hat{r} \quad (9)$$

Simplificando q :

$$\vec{E} = k \frac{Q}{r^2} \hat{r} \quad (10)$$

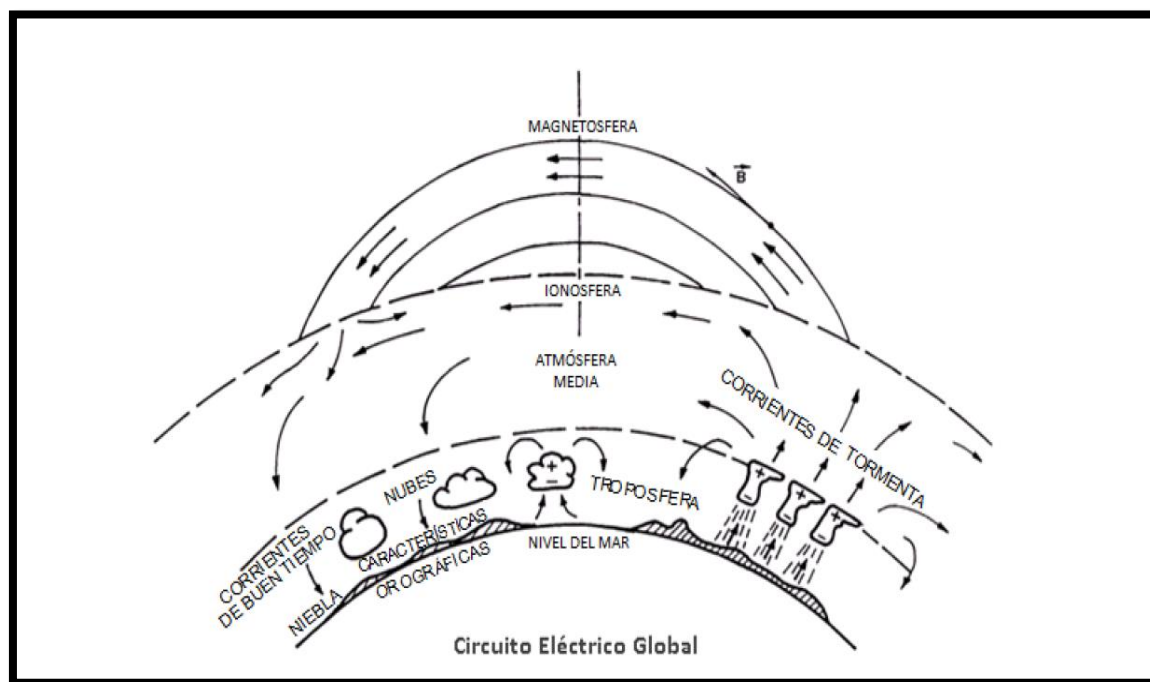
Expresándolo en términos de ϵ_0 :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r} \quad (11)$$

Debido a la presencia de carga eléctrica en la superficie terrestre, este genera un campo eléctrico que afecta los cuerpos electrificados presentes en la atmósfera, que por medio de la inducción de este campo eléctrico se establece una polaridad en el ambiente que conduce una corriente a través de las capas atmosféricas, donde la corriente ascendente desde la superficie de la tierra hasta la parte baja de la nube de tormenta se compone de la corriente dependiente del campo, la corriente del rayo (Cortés, 2014). Esta corriente dependiente del campo se propaga por todo el mundo a través de la ionósfera/magnetósfera por medio de las líneas del campo eléctrico y magnético en el hemisferio opuesto formando así de circuito global eléctrico como se muestra en la figura 12.

Así, el circuito eléctrico global (GEC) se genera a partir del campo eléctrico y la corriente eléctrica que fluye en la atmósfera inferior (la ionósfera y la magnetósfera) formando un condensador esférico gigante con la superficie de la Tierra, que conduce la corriente vertical a través de la resistencia columnar de la atmósfera (Cortés, 2014).

Figura 12: *Circuito eléctrico global*



Tomado de: APLICACIONES DE LA TEORÍA DE LA DISTANCIA DEBYE AL ESTUDIO DEL CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL. Manizalez, Colombia

En este proceso las nubes son electrificadas gracias a las corrientes verticales entre la superficie de la tierra y la parte inferior de la nube, produciendo así un gradiente de potencial entre la superficie terrestre y la nube.

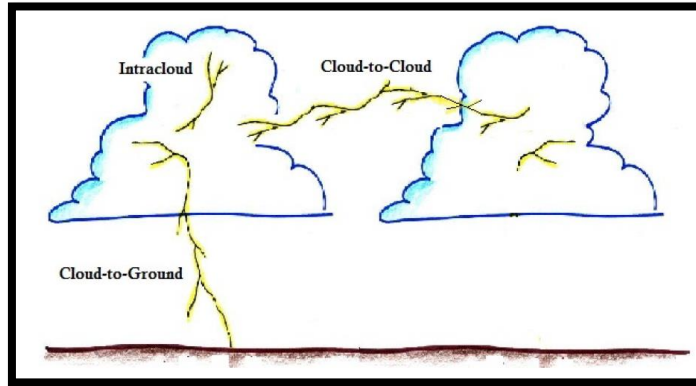
Nube-Tierra: son los que se producen desde una nube hacia la superficie terrestre.

Intra Nube: Son los que se originan dentro de la misma nube en zonas de distinta carga.

Nube-Nube: son los que van de una nube a otra.

Nube-Aire: son aquellas descargas que van dirigidas hacia la atmosfera. A continuación, se ilustra en la figura 13 los tipos de rayos mencionados anteriormente.

Figura 13: Descargas eléctricas formadas por nubes de tormenta



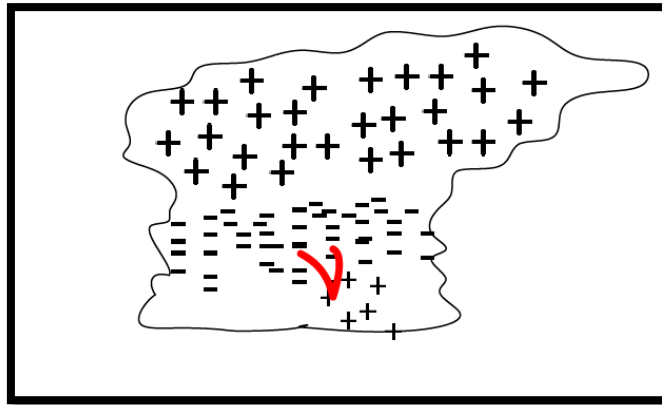
Tomado de: APLICACIONES DE LA TEORÍA DE LA DISTANCIA DEBYE AL ESTUDIO DEL CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL. Manizalez, Colombia

Grado de electrificación Nube-Tierra

Hoy en día no se sabe con exactitud el proceso por el cual las nubes de tormenta (cumulonimbos) obtienen su carga eléctrica en la parte interior (Villa, 2015), pero es posible explicar su interacción con la superficie terrestre cuando se produce la descarga eléctrica (rayo), como se mencionó en el capítulo II, en los tipos de electrificación basándonos en diferentes textos de física y en el tratado de electricidad y magnetismo de James. C. Maxwell, el método de electrificación que permite construir una explicación en la interacción nube y tierra es la inducción eléctrica.

Se sabe que en la superficie de la tierra el tipo de carga que se acumula es de signo positivo que, a su vez, durante una tormenta induce una carga negativa en la base de la nube debido a la fuerza eléctrica de atracción, esta fuerza de atracción la experimentan cargas de signo opuesto que, al mismo tiempo, esta carga negativa induce una carga positiva en la parte superior de la nube lo que genera la polarización de la nube (figura 14). Teniendo en cuenta que las nubes cumulonimbos se forman a una altura de 2 km sobre la superficie de la tierra (Villa, 2015), las cargas en la superficie ejercen una fuerza de atracción sobre las cargas negativas y de repulsión sobre las positivas, a medida que va desarrollándose la tormenta, la concentración de cargas en la superficie de la tierra y la base de la nube se incrementa.

Figura 14: Polarización de una nube de tormenta



Tomado de: Localización de Tormentas eléctricas usando redes de sensores puntuales de campo electrostático (Garzón, 2015).

A la concentración de cargas en la superficie de la tierra llamaremos Q , a medida que va aumentando la concentración de cargas, el campo eléctrico E generado también incrementa. Este campo eléctrico es el responsable de que pueda existir una interacción entre la superficie de la tierra y la nube, incluso, dentro de la misma nube, debido a que el campo eléctrico ayuda a permear el ambiente alrededor de la carga haciéndolo conductor de electricidad, es decir, el aire o gas circundante adquiere propiedades eléctricas que permite el recorrido de la descarga eléctrica.

Las cargas negativas las llamaremos q , y se encuentran en la base de la nube, estas experimentarán una fuerza eléctrica de atracción hacia la superficie de la tierra, que según el grado de concentración generan un campo eléctrico lo suficientemente fuerte para permear su medio circundante (aire) volviéndolo conductor posibilitando así la descarga.

Esta concentración de cargas en la superficie de la tierra y la nube tiene una particularidad, están una distancia de separación y a un grado de electrificación una respecto a la otra, así, para que se genere un rayo, estos grados de electrificación deben ser distintos.

Para nuestra explicación se tomará la superficie terrestre como punto de referencia de todas las interacciones con la nube. La concentración de cargas positivas Q genera un campo eléctrico E que interactúa con las cargas negativas q en la parte inferior de la nube, este campo ejerce una fuerza eléctrica de atracción sobre q , de tal manera que por la ley de Coulomb tenemos:

$$\vec{F} = k \frac{Q * q}{r^2} \hat{r} \quad (12)$$

Fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales y su unidad en el SI (Sistema Internacional) son Newtons. Q y q son las cargas y sus unidades en el SI es Coulomb, k es la constante de proporcionalidad en unidades Nm^2/C^2 . r es la distancia de separación entre las cargas medida en metros(m) en el SI, que llamaremos r_t y r_n respectivamente.

Y para el campo eléctrico generado por Q , que actúa sobre q es:

$$\vec{E} = \frac{F}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r} \quad (13)$$

En la interacción de este campo eléctrico con la carga q , provocara que esta se mueva en dirección a la superficie terrestre, así, este campo realiza un trabajo sobre q . donde cuantitativamente el trabajo (W) tiene unidades en el SI (sistema internacional) de Julios y relaciona la fuerza medida en newtons y la distancia medida en metros (m).

$$W_{t \rightarrow n} = \int_{r_n}^{r_t} \vec{F} dr \quad (14)$$

Reemplazando (13) en (14), tenemos:

$$W = \int_{r_n}^{r_t} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} dr \quad (15)$$

Teniendo así que:

$$W = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_t} \right) \quad (16)$$

Pasando q a dividir y operando los paréntesis, tenemos:

$$\frac{W}{q} = \frac{kQ}{r_n} - \frac{kQ}{r_t} = \Delta V \quad (17)$$

Donde kQ/r_n y kQ/r_t en la ecuación (17) son el grado de electrificación (llamado potencial eléctrico) de la superficie terrestre y la parte inferior de la nube, teniendo como referente la concentración de la carga tanto en la parte inferior de la nube como en la superficie de la tierra, así, el grado de electrificación es lo que llamaremos potencial eléctrico, la superficie terrestre se encuentra un potencial eléctrico respecto a la distancia de separación con la base de la nube, que a su vez, esta también tiene un potencial eléctrico respecto a la superficie terrestre, que una al ser menor que la otra (diferencia de potencial eléctrico) genera una descarga eléctrica conocida como rayo, generando un efecto visual (luz) llamado relámpago y sonoro llamado trueno, que es producido por la expansión del aire debido al incremento de temperatura alrededor de la descarga eléctrica.

$$V_1 = \frac{kQ}{r_n} \text{ Potencial eléctrico en la superficie inferior de la nube}$$

$$V_2 = \frac{kQ}{r_t} \text{ Potencial eléctrico en la superficie terrestre}$$

$$\Delta V = V_1 - V_2 \text{ Diferencia de potencial entre las superficies}$$

Como se evidencia, el potencial V_1 y V_2 varían según la distancia de separación que se encuentren las superficies, y es el medio donde se encuentran los objetos cargados quien permite la interacción de tal manera que, cuando la diferencia de concentración de cargas (Q y q) opuestas es muy grande, este potencial (V) vence la resistencia eléctrica del aire que se va electrificando debido al campo eléctrico generado por las concentraciones de carga estableciendo un canal de

conexión para que circule la descarga eléctrica (rayo) entre la nube y la tierra o en dado caso, de la tierra a la nube.

Así, en una descarga eléctrica durante tormenta es una manifestación de la interacción por medio inductivo entre la superficie terrestre y la nube, e incluso, dentro de la misma nube, donde el medio, en este caso la troposfera, es fuente de la interacción entre las superficies electrificadas que se da por y a través del medio quien permite la interacción Nube-tierra por medio del campo eléctrico desarrollando la descarga eléctrica (el rayo) a causa de la diferencia de potencial V , así, J.C. Maxwell hace énfasis que la fuerza no reside en los cuerpos electrificados, si no en el medio circundante de los objetos (Villalobos, 2019).

La presencia de rayos durante una tormenta eléctrica es evidencia de los fenómenos electrostáticos en la naturaleza, y para que ocurran se deben a procesos complejos de interacción entre la troposfera y la superficie terrestre, donde solo podemos aproximarnos a las explicaciones desde la física y la química, entre otras, partiendo de las experiencias realizadas en laboratorios, y más aún, debemos generar cuestionamientos sobre su formación y funcionamiento, logrando desarrollar dispositivos de lectura de campo eléctrico que permitan conocer la formación y aproximación de tormentas eléctricas para desplegar las acciones de prevención temporales que puedan evitar o al menos minimizar los daños.

En el contexto colombiano se hace necesario que en las instituciones educativas de educación media, en las clases de física se estudien los fenómenos naturales, teniendo como referentes conceptuales libros de texto de física, permitiendo así ampliar el conocimiento y las aplicaciones de los diferentes temas a la vida cotidiana del estudiante, con el objetivo de que el estudiante sea un agente activo y conocedor de su entorno en el cual vive, que pueda aportar en la solución de problemas en la sociedad.

De acuerdo a lo que se desarrolló en este trabajo, se podría afirmar –desde la experiencia actual-, que la conceptualización física que el estudiante encuentra en los textos, muchas veces no tiene sentido para él, sin un lenguaje verbal que robustezca el formalismo matemático presente en la mayoría de los textos que se utilizaron, es por esto que existe una clara tendencia en la que la enseñanza de las ciencias no se enfoque únicamente en que los estudiantes aprendan la ciencia como un conjunto de ecuaciones desligados de los fenómenos cotidianos en los que se interactúa o como un listado de conceptos, es así que, las formas distintas de orientar la enseñanza de las

ciencias con actividades de enseñanza-aprendizaje que pueden parecer totalmente distintas, en realidad se complementan (Pozo Municio & Gómez Crespo, 2009), logrando una comprensión e interiorización por parte de los estudiantes de los temas más abstractos y generales siendo esto posible a través de los contenidos más específicos.

Desde esta mirada, la realización de este trabajo de grado se enmarco en la consolidación de ambas maneras de entender un fenómeno, estudiando el formalismo matemático que permite cuantificar los elementos involucrados en la formación del rayo en una tormenta y el lenguaje verbal detrás de esta formalización, sin otorgarle prioridad a ninguna y siendo ambas maneras, igual de importantes.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

El fenómeno de las tormentas eléctricas desde la mirada científica abarca conceptos que permiten generar una explicación del cómo ocurren y su comportamiento en un intervalo de tiempo, permitiendo establecer medidas preventivas que se deben tener en cuenta cuando ocurren para evitar daños a los bienes materiales y afectaciones a los seres vivos. En el desarrollo de este trabajo de grado se presentó de manera general el fenómeno de las tormentas eléctricas, haciendo énfasis en la descarga eléctrica conocida como rayo, encaminando a una aproximación conceptual del potencial eléctrico, llegando a las siguientes conclusiones:

- El fenómeno de las tormentas eléctricas es muy complejo y explicarlo abarca más áreas de estudio como la termodinámica y la química, ya que en el desarrollo de estos fenómenos se deben presentar condiciones adecuadas en la atmosfera como

temperatura, humedad, presión, además que el mecanismo por el cual las nubes cumulonimbos obtienen electricidad estática no se ha establecido con claridad.

- La electrificación por inducción permite realizar una explicación más detallada del fenómeno de formación del rayo en tormentas eléctricas tomando como base los libros de texto de física: Paul G. Hewitt (2007). *Física conceptual. Décima edición*. YOUNG, HUGH D. y ROGER A. FREEDMAN (2009). *Física universitaria, con física moderna volumen 2. Decimosegunda edición*. GIANCOLI, DOUGLAS C. (2009). *Física para ciencias e ingeniería con física moderna. Cuarta edición*), y en el tratado de electricidad y magnetismo de James Clerk Maxwell, aunque estos textos no utilizan el fenómeno natural para realizar una explicación del concepto, en la realización de este trabajo de grado solo se estableció una aproximación al concepto de potencial eléctrico dada la complejidad del fenómeno en sí.
- El potencial eléctrico en los libros lo abordan como un carácter especial del cuerpo cargado con relación a otro, sin tener en cuenta el medio donde se encuentran como un agente que permite la interacción, es decir, los cuerpos o las partículas son las fuentes de la acción, desde esta perspectiva (acción a distancia) no se brindan elementos conceptuales suficientes que permitan una aproximación conceptual del potencial eléctrico a partir del fenómeno de formación del rayo.
- La perspectiva de campos brinda los elementos conceptuales que permiten la construcción conceptual del potencial eléctrico a partir del fenómeno de formación del rayo, donde en la interacción Nube-Tierra es el medio un principal protagonista del fenómeno electrostático (rayo). Así, en el desarrollo del trabajo se logró establecer una relación del concepto de potencial eléctrico (desde una perspectiva de campos) partiendo de los elementos conceptuales involucrados en la explicación del fenómeno de formación de rayo en tormentas eléctricas.
- Los elementos conceptuales que permitieron la aproximación al concepto de potencial eléctrico fueron el fenómeno de la inducción eléctrica, se presenta cuando la superficie de la nube induce una carga opuesta en la superficie de la tierra gracias al campo eléctrico generado por las cargas presentes en la parte baja de la nube, a esta concentración de carga en relación con la distancia que separa las superficies y el medio en el que se encuentren (Nube-Tierra) se les llama grado de electrificación o potencial

eléctrico, así, si el campo eléctrico entre las superficies modifica el medio circundante y debido al potencial que tienen cada una permitiendo así la interacción eléctrica (Nube-tierra) en forma de rayo.

- Los conceptos implicados en el fenómeno de formación del rayo en una tormenta eléctrica permitieron establecer un dialogo con los libros de texto de física que muchas veces se utilizan en los cursos de física de la universidad y en las clases de física en los colegios, así, el concepto de potencial eléctrico se puede explicar de manera significativa en el sentido que el estudiante puede asociarlo a un evento de su cotidianidad.
- Se invita a los docentes en formación en licenciatura en física a establecer un dialogo conceptual de los fenómenos naturales con los conceptos científicos que permiten aproximar a una explicación de los fenómenos en sus espacios académicos, posibilitando así que el estudiante tenga una mayor comprensión según el contexto geográfico donde se encuentre.

Bibliografía

- Ayala, M. M. (2006). Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades.
- Castillo, J. C. (2006). Castillo, J. C. (2006). SOBRE LA RELACIÓN MECÁNICA ELECTROMAGNETISMO (De los Fenómenos Mecánicos al Mecanicismo). Universidad Pedagógica Nacional.
- Catalá, R., & Chamizo, J. A. (2010). Las reformas curriculares de ciencias en México y España en los niveles secundaria y bachillerato. *Cuadernos México*, 10.
- Cortés, C. L. (2014). *APLICACIONES DE LA TEORÍA DE LA DISTANCIA DEBYE AL ESTUDIO DEL CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL*. Manizales, Colombia.
- Feynman, R., & Leighton, R. (1964). *Lecturas de Feynman*. En R. Feynman. Addison Wesley Longmen de Mexico, S.A de C.V.
- Garzón, Á. A. (2015). Localización de Tormentas Eléctricas Usando Redes de Sensores Puntuales de Campo Electrostatico. Medellín, Colombia.
- GIANCOLI, D. C. (2009). *Física para ciencias e ingeniería con física moderna. Cuarta edición*. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Gil, D. (2005). ¿Cómo promover el interés por la cultura científica?. Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años. *Santiago de Chile : Oficina Regional de Educación de la UNESCO para América Latina y el Caribe*, 476.
- Hewitt, P. G. (2007). *Física conceptual. Décima edición*. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Luque, M. Y. (2019). Electrificación de las nubes de tormenta: el mecanismo no-inductivo.

- Maxwell, J. C. (1954). *A treatise on electricity and magnetism. I*. New York: Dover Publications Inc.
- Ministerio de Educación Nacional. (2004). *Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales y Ciencias Sociales*.
- Moreira, M. A., & Greca, I. M. (2003). *CAMBIO CONCEPTUAL: ANÁLISIS CRÍTICO Y PROPUESTAS A LA LUZ DE LA TEORÍA DEL APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO. Ciência & Educação*.
- Paque, E. U. (2014). *CARACTERIZACION DE LOS FENÓMENOS ELECTROSTÁTICOS DESDE UNA PERSPECTIVA DE CAMPOS*.
- Periago, M. C., & Bohigas, X. (2005). Persistencia de las ideas previas sobre potencial eléctrico, intensidad de corriente y ley de Ohm. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 7(2). Obtenido de <http://redie.uabc.mx/vol7no2/contenido-periago.html>
- Porras, Y., & Reyes, J. (2019). Enseñanza de la Física Basada en el Fenómeno del Rayo Eléctrico. *Revista Científica*, 302-321. Obtenido de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/revcie/article/view/14502>
- Pozo Municio, J. I., & Gómez Crespo, M. Á. (2009). *Aprender y enseñar ciencia. Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*. Madrid-España: EDICIONES MORATA, S. L.
- Rivera, A. (21 de Julio de 2014). *Mujeres con ciencia*. Obtenido de <https://mujeresconciencia.com/2014/07/21/por-que-las-ninas-estudian-fisica/>
- Rivera, S. (2011). Obtenido de <https://es.slideshare.net/RIVSANTOS/zonas-trmicas-9231720>
- Sanchez, H. T. (1991). Los rayos: una visión mitológica, científica y tecnológica. *Ingeniería e Investigación*, 29-34.
- Sierra Tamara, L. J., & Escobar Morales, G. A. (2004). *INVESTIGACIONES SOBRE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFERICAS*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR , CARTAGENA DE INDIAS.

- Todosociales. (s.f.). Obtenido de <https://todosociales.wordpress.com/atmosfera-terrestre-y-su-contaminacion/>
- Todosociales. (s.f.). Obtenido de <https://todosociales.wordpress.com/atmosfera-terrestre-y-su-contaminacion/>
- Torres Sánchez, H. (1991). Los rayos una visión mitológica, científica y tecnológica. *Ingeniería e Investigación*(24), 29-34.
- Tristán, R. (19 de Noviembre de 2013). *Laboratorio para Sapiens*. Obtenido de <https://rosamtristan.com/2013/11/19/los-ninos-no-quieren-ser-cientificos/>
- Villa, A. (2015). *Localización de tormentas eléctricas usando redes de sensores puntuales de campo electrostático*. Medellín.
- Villalobos, P. A. (2019). ANÁLISIS CONCEPTUAL DEL TRATADO DE J.C MAXWELL DESDE LA PERSPECTIVA DE CAMPOS PARA LA ENSEÑANZA DE LA ELECTROSTÁTICA. Bogotá D.C, Colombia.
- Vosniadou, S. (2006). ¿Cómo aprenden los niños? *Serie prácticas educativas*.
- YOUNG, H. D., & FREEDMAN, R. A. (2009). *Física universitaria, con física moderna volumen 2*. México: PEARSON EDUCACIÓN.