



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

“PROPUESTA DE PROTECCIÓN ANTE DESCARGAS  
ATMOSFÉRICAS EN LOS CAMPOS DE FÚTBOL DE  
PUMITAS EN CIUDAD UNIVERSITARIA”

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTAN:

MIGUEL ÁNGEL BRAVO ESLAVA

RICARDO CANO MARTÍNEZ

MIGUEL ÁNGEL DURÁN VÁZQUEZ



DIRECTOR DE TESIS:

ING. GUILLERMO LÓPEZ MONROY

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, MARZO 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**INTRODUCCIÓN**

<b>1.- ANTECEDENTES E INCIDENTES</b>	<b>1</b>
A.- Electricidad en la naturaleza.	1
B.- Los rayos en la mitología del hombre.	2
C.- Inicios del estudio científico Electricidad-Rayos.	11
D.- Incidentes provocados por los rayos.	25
<b>2.- DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: RAYOS</b>	<b>28</b>
A.- Carga eléctrica.	28
B.- Formación de la tormenta eléctrica y del rayo.	35
1.- Ionización de aire	35
2.- Estructura de la nube de tormenta.	39
3.- Clasificación, formación y parámetros de la descarga atmosférica.	47
a) Proceso de la Descarga atmosférica (rayo).	47
b) Clasificación de los rayos	50
c) Principales parámetros de los rayos.	53
<b>3.- DESCARGAS A CAMPO ABIERTO</b>	<b>59</b>
A.- Descargas atmosféricas en nuestro País.	60
B.- Efecto de la electricidad y de los rayos en el cuerpo humano.	66
1.- Leyes Físicas (Ley de Ohm, Ley de Watt, Ley de Joule).	66
2.- Lesiones eléctricas y efectos fisiológicos.	68
3.- Impedancia del cuerpo humano, descargas atmosféricas y sobretensiones.	72
<b>4.- NORMAS Y SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA TORMENTAS ELÉCTRICAS (SPTE)</b>	<b>80</b>
A.- Normas de protección.	80
1.- Norma Internacional y Norma Extranjera.	81
2.- Norma Nacional.	85

3.- NORMAS EN LA UNAM.	90
B.- Sistemas de Protección Contra Tormentas Eléctricas (SPTE)	91
1.- Valoración de riesgo.	92
2.- Pararrayos y terminales aéreas.	102
a) Principio de funcionamiento.	102
b) Tipos de pararrayos.	104
c) Método de la esfera rodante	107
d) Instalación de pararrayos	109
3.- Conductores de bajada.	112
a) Parámetros a considerar en el diseño	114
b) Sistema Externo de Protección Contra Tormentas Eléctricas (SEPTE) Aislado y No Aislado	116
c) Distancia de Seguridad	119
4.- Sistema de Puesta a Tierra (SPT)	122
a) Toma de tierra.	123
b) Terminales de tierra.	127
c) Empalmes	130
d) Antenas de radio y televisión	131
C.- Sistema Interno de Protección Contra Tormentas Eléctricas (SIPTE).	132
1.- Unión Equipotencial	132
2.- Red Interna de puesta a tierra.	134
<b>5.- PROPUESTA DE SPTE EN CAMPOS DE FÚTBOL DE PUMITAS EN CIUDAD UNIVERSITARIA</b>	<b>135</b>
A.- Consideraciones Generales.	135
1.- Dirección General de Actividades Deportivas y Recreativas (DGADyR).	136



2.- Localización, Densidad de Descargas a Tierra y Resistividad del Terreno.	139
3.- Actualización de la Norma Oficial Universitaria (PAEFI-02-09).	146
B.- Propuestas del Sistema de Tierras	160
1.-Primera propuesta del Sistema de Puesta a Tierra en la cancha de Fútbol, anillo.	160
2.- Tensión de Contacto y Tensión de paso.	170
3.- Segunda propuesta de Sistema de Puesta a Tierra, electrodos profundos.	173
C.- Propuesta de captadores mediante el método de la esfera rodante y puntas en árboles.	177
D.- Recomendaciones: Antes, durante y después en una tormenta eléctrica.	192
1.- Antes: Cosquileo, calcular tiempo y distancia.	193
2.-Durante: Localizar refugio ó reducir nuestra área de contacto.	194
3.-Después de la tormenta viene el auxilio.	196
E.- Difusión de la información	198

**APÉNDICE 1.-** Glosario.

**APÉNDICE 2.-** Noticias de accidentes provocados por los rayos en campos deportivos.

**CONCLUSIONES**

**BIBLIOGRAFÍA**



INTRODUCCIÓN



---

# INTRODUCCIÓN

---

A lo largo de la etapa universitaria que comienza con el ingreso a bachillerato, donde adoptamos el azul y oro como bandera, se acumula un enorme sentido de gratitud y amor por la Universidad, que va más allá de concluir con un título profesional o grado académico; porque ser universitario es un orgullo que tendremos para toda la vida.

Esta gratitud nos motivó a buscar un tema que beneficiara a la UNAM, a sus instalaciones, a su alumnado, trabajadores, o a cualquier persona que aunque ajena a la institución, pudiera disfrutar y ser favorecida por nuestra alma máter.

Al mismo tiempo de querer aplicar parte de lo aprendido en nuestros estudios, nos encontramos con las organizaciones Pumitas, cuyos programas y actividades que además de promover valores y un desarrollo integral principalmente de niños y jóvenes, son también una tradición, orgullo e ícono de la Universidad. La suma de estos factores nos indicó el camino de nuestro trabajo, este sería en provecho de Pumitas, así como de las instalaciones que los pequeños utilizan.

La siguiente tesis abordará la protección ante descargas atmosféricas (rayos), las cuales son un peligro latente en espacios abiertos, donde exista un índice considerable de incidencias de rayos, o simplemente se manifieste una nube oscurecida con amenaza de tormenta.



Se ha documentado que en varias partes del mundo, incluyendo México, se presentan accidentes por descargas atmosféricas que pueden llevar la muerte a las personas que realizaban alguna actividad laboral o recreativa, como podría ser un entrenamiento, práctica o partido de fútbol, incluso sin necesidad de presentarse precipitación pluvial.

La Universidad Nacional Autónoma de México, campus Ciudad Universitaria (CU), se encuentra asentada sobre un área propensa a descargas atmosféricas. Al contar con numerosos espacios abiertos, estos pueden representar un peligro potencial para cualquier persona que se encuentre expuesta en dicha zona abierta y desprotegida; es por tal motivo que surge la necesidad de crear un documento que sirva como referencia para que otros espacios abiertos y no únicamente las canchas de fútbol puedan contar con un sistema de protección ante descargas atmosféricas. También consideramos que debido a que el terreno en CU es muy similar en toda su extensión territorial, los cálculos podrían extrapolarse a cualquier otra zona del campus.

Finalmente, el objetivo de este documento es crear conciencia tanto en autoridades correspondientes de la Universidad, así como en los usuarios, acerca del riesgo y consecuencia que pueden provocar las descargas atmosféricas en espacios abiertos, específicamente en los campos de fútbol donde entrenan los Pumas. Si bien, contra el rayo no se puede garantizar una protección al 100% efectiva, sí podemos plantear un sistema que reduzca el riesgo y respalde la integridad física de todos los usuarios y participantes de dichas actividades, incluyendo, niños, jóvenes, familiares, estudiantes, trabajadores o cualquier persona que se encuentre en las cercanías de algún campo abierto, en este caso, del campo número 6.



# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES E INCIDENTES

---

### 1.A) ELECTRICIDAD EN LA NATURALEZA

La electricidad es un término complicado de definir por todas las ideas, propuestas e incógnitas que el hombre ha tenido respecto a esto. Pero la electricidad va más allá de la observación y curiosidad del hombre por conocerla y dominarla, la electricidad debe ser parte tan antigua y compleja como el tiempo, la materia y energía.

Una característica muy interesante de la electricidad, es que se considera una forma de energía que sólo se puede apreciar por los efectos que produce.

Algunos de estos efectos, los conoció el hombre en sus principios, por el temor al fenómeno del rayo en el cielo, mismo que lo cruzaba desde lo más alto hasta la tierra, para destruir árboles, animales y en ocasiones prender fuego a la vegetación.

En términos prácticos, la electricidad se puede definir como la propiedad fundamental de la materia que se manifiesta por la atracción o repulsión entre las partes de la misma, originada por la existencia de electrones (carga negativa) o protones (carga positiva).

También, como el fenómeno físico cuyo origen son las cargas eléctricas y su energía se manifiesta en fenómenos mecánicos, térmicos, luminosos y químicos.



Uno de estos fenómenos es el rayo, el cual se produce de forma natural y se le nombra “descarga atmosférica”. El rayo es la manifestación e ícono de la electricidad en la atmósfera terrestre.

## 1.B) LOS RAYOS EN LA MITOLOGÍA DEL HOMBRE

El rayo siempre ha sido uno de los elementos más impactantes para la humanidad, el hecho de encontrarse a la intemperie con una lluvia intensa, el ruido estruendoso y una ráfaga de luz atravesando el cielo de manera imponente, llega ser una situación tanto de miedo, curiosidad y admiración. Estas impresiones siempre se presentarán mientras el hombre no pierda la capacidad de asombro y respeto a la naturaleza.

A lo largo de la historia de la humanidad, las culturas han tenido características, rasgos, actividades y creencias particulares, pero también han coincidido en varios aspectos, principalmente fenómenos naturales.

Por ejemplo, los etruscos contemplaban atentamente las tormentas y en especial los rayos porque les servían para el oráculo: si caían hacia el este se consideraban favorables, pero si lo hacían hacia el noroeste, se preparaban para recibir desgracias.

Las culturas antiguas percibían el mismo fenómeno de distintas maneras, con diferente enfoque y explicaciones, pero compartiendo impresiones y convirtiéndolas bajo su perspectiva en creencias y deidades, en mitología.

Cultura Acadia. La antigua cultura Acadia se remonta al año 2000 A.C., la cual representaba el fenómeno del rayo mediante una diosa parada sobre los hombros



de un guardián alado y tras de ella sobre un carro de cuatro ruedas el dios del tiempo lanzando rayos con su fueete.

Mitología China. En la mitología China, la diosa Tien-Mu, es reina de los rayos. Ella sostiene firmemente dos espejos para dirigir los destellos del rayo. Tien-Mu



está rodeada por cinco dignatarios del "Ministerio de las tormentas", el jefe de aquellos: Lei-Tsu, (Fig. 1.1), dios del relámpago, asistido por el príncipe del trueno, Lei-Kung, así como Tan-Kua, "Dios titular del rayo y de la lluvia".

*Figura 1.1; Anuncio de una tronada. El portador del relámpago, Lei-Tsu, lleva un halo de fuego que simboliza su poderío; el tambor produce el trueno y su hacha derriba los árboles. Y, Fei-Lien, dios del viento.*

Mitología Griega. En la mitología griega el rayo fue considerado uno de los atributos propios de Zeus, (Fig. 1.2), padre de los dioses y de los hombres, quien era el dios de los fenómenos de la atmósfera. Sus funciones primarias estaban relacionadas con la lluvia y con el retorno del buen tiempo, pero muy particularmente con el rayo y el trueno. La mitología cuenta que cuando algo molestaba a Zeus, desde su trono de marfil ocultaba la cima del Olimpo con grandes y oscuras nubes e invadía la tierra con fuertes lluvias, relámpagos y truenos, demostrando su furia. Se le representó como un hombre vigoroso y maduro, en actitud majestuosa y



*Figura 1.2; Representación de Zeus.*





generalmente vestido de la cintura hacia abajo, llevando en su mano el cetro o el rayo o ambas cosas a la vez; así como en águila, uno de sus atributos o metamorfosis.

Cultura Hindú. El rayo también es atributo de la deidad Indra “el ardiente”. Considerado el dios de la guerra, la atmósfera, el cielo visible, el rayo y la tormenta. Su arma es el Vajra, (Fig. 1.3), hecha por Vishuá Karma, artesano y arquitecto de los dioses. Su forma original era de un disco. Más tarde, se describe como dos rayos transversales que se cruzan formando una equis.

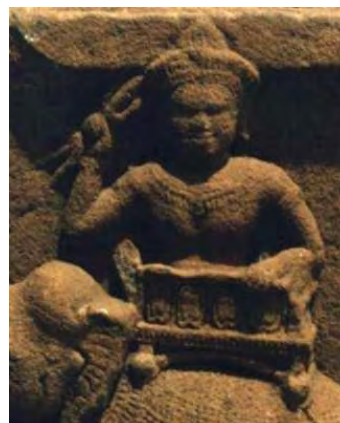


Figura 1.3; Indra portando el Vajra.

También se llama vajra a los rayos eléctricos que caen del cielo, de los cuales se creía que nacían a partir de la energía centrífuga del Vajra de Indra, al lanzarlo contra un enemigo. Este nombre se utiliza en armas similares utilizadas por los dioses, ó aquellas que pueden destruir encantamientos o magias. En la actualidad, el vajra es un arma simbólica y religiosa, representada en una esfera con dos lotos a sus lados, los que se prolongan en varios rayos, existiendo siempre un rayo de manera central.

Dioses Nórdicos. Thor, (Fig. 1.4), hijo de Odin y Yord. Reina sobre el trueno y los relámpagos, el viento y la lluvia fecundadora, rasgo que ha sobrevivido en las creencias laponas. Su castillo era el Bilskirnir (relampagueante); poseía dos cabras: Diente Crujidor y Diente Pulverizador quienes tiraban de su carroza "tronadora" mientras él la conducía alrededor de las nubes. Thor, el dios del trueno, producía rayos a medida que su martillo Mjöllnir golpeaba un yunque, o bien era



Figura 1.4; El dios Thor y su martillo Mjöllnir.



lanzado y volvía a su mano como un bumerang; en otra interpretación, Thor es el trueno, lo que se encuentra en los relámpagos, y el ruido que acompañan el vuelo de su martillo Mjöllnir.

Culturas Indígenas Precolombinas. La riqueza mitológica del fenómeno del rayo en las culturas indígenas precolombinas, está representada ejemplarmente en el libro del Popol Vuh, (Fig. 1.5). Traducido al español de la lengua autóctona de los indios Quichés de Guatemala por el padre dominico Francisco Ximénez, y publicado a principios del siglo XVIII.

El Popol Vuh, era en origen un antiguo códice maya y se divide en tres partes fundamentales: la creación y el origen del hombre, las aventuras de los semidioses Hunaphú e Ixbalanqué, y la historia antigua de las tribus indígenas de Guatemala. En Mesoamérica, se considera a Tepeu-Gucumatz y Hurakán, deidades primitivas creadoras del mundo y la humanidad. Hurakán representa el agua en diferentes formas, y su nombre fue empleado en Mesoamérica para designar al dios de las tormentas con truenos, vientos, lluvias y marejadas, desde las costas del Golfo de México, las penínsulas de Florida y Yucatán, las Antillas, y la costa de Centroamérica hasta las Guayanas en la América del Sur, derivándose vocablos parecidos en toda la cuenca del Mar Caribe. En su culto religioso, significaba fertilidad por la lluvia y castigo por la destrucción. Tepeu-Gucumatz, era la deidad creadora y constructora, padre y madre, y cubierta con un manto de plumas verdes y azules. Hurakán era identificado como el Corazón del Cielo y se manifestaba en una trinidad; Caculhá-Hurakán, rayo de una pierna, o sea, el relámpago; Chipi-Caculhá, que significa rayo pequeño, y Raxa-Caculhá, el rayo verde o rayo muy hermoso, también considerado el relámpago o trueno, en otra interpretación.



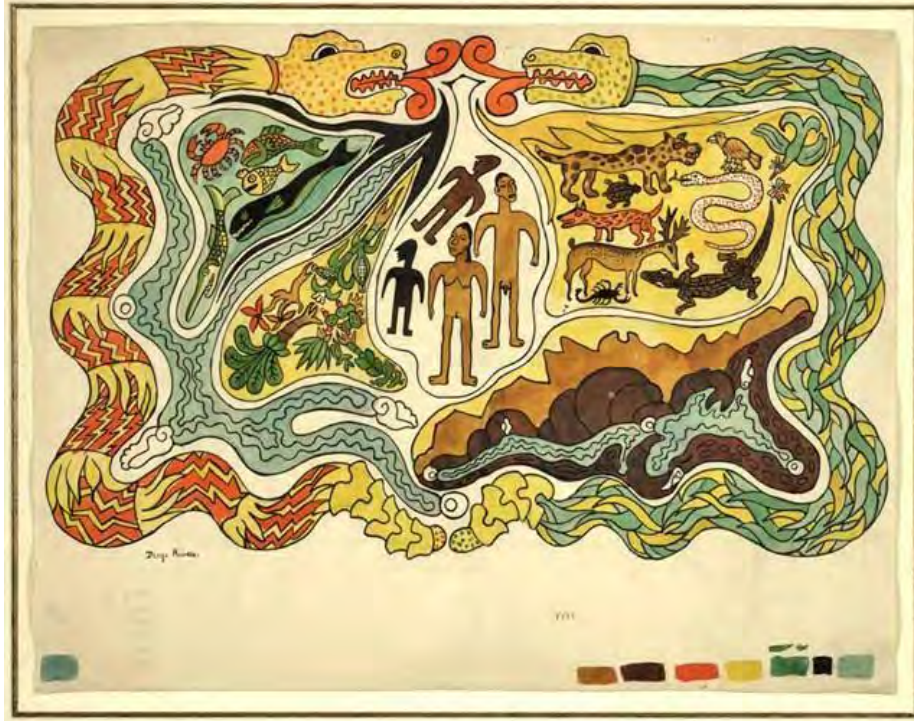


Figura 1.5; Dibujo de Diego Rivera, para la traducción al inglés del Popol Vuh.

Cultura Azteca. Para la cultura Azteca el rayo fue un fenómeno que dependía del dios de la lluvia y del relámpago Tlaloc, "el que hace brotar", (Fig.1.6). El nombre completo es Tlalocantecuhtli "Señor del lugar donde brota el vino (lluvia) de la tierra". También era conocido como "el proveedor" porque en su poder estaba la producción de lluvia que hacía crecer el maíz. Era el señor de los fenómenos atmosféricos y de los espíritus de las montañas.

Él descargó grandes cóleras sobre los Aztecas. A menudo usó sus rayos del relámpago para enfermar a las personas. Se dice que tenía cuatro diferentes jarrones de agua en su posesión. Cuando vaciaba la primera, traía vida a las plantas. La segunda causaba destrozo, la tercera traía el hielo, y la cuarta provocaría la destrucción total.

Tlaloc era representado como un hombre que usaba una red de nubes, una corona de plumas de herón, sandalias de espuma y cargaba cascabeles que hacían el trueno. Tenía dientes de jaguar heredados de la cultura Olmeca, para los cuales su dios de la lluvia era un hombre jaguar. En ocasiones pintan a Tlaloc con el rayo en una mano y dos mazorcas de maíz en la otra, precipitándose hacia la tierra o en actitud de despeñarse desde lo alto de un templo que simboliza a los cerros.



Figura 1.6; Imagen del dios Tlaloc.

Cultura Maya. Los dioses de la lluvia en la cultura Maya eran los Chacs, (Fig. 1.7) y se conocían con el nombre de los regadores. Eran ellos quienes producían los relámpagos, rayos, tormentas, lluvias y tempestades. Cuando iban a llevar las lluvias, los Chacs se reunían en su morada que se llamaba "al pie del cielo", desde donde salían por una puerta llamada "trueno" que empezaba en la capa de las nubes.



Figura 1.7; Grabado de un Chac, dios maya de la lluvia.

Con su jefe al frente atravesaban los cielos, cada uno con una calabaza de agua en una mano y en la otra algo parecido a una hacha de piedra bien pulida, la cual una vez lanzada sobre la tierra producía los rayos y los truenos; estos últimos también originados por los gritos o los diálogos entre ellos. Los Chacs iban en las cuatro direcciones.



Un análisis del significado de las invocaciones Mayas para la lluvia, muestra el conocimiento que parece ya tenían sobre la diferencia que actualmente se tiene entre rayos de nube a tierra y entre nubes, así como las relaciones no directas que hoy en día conocemos entre número de días con rayos y número de días con lluvia. Había meses y días especiales en que invocaban a los Chacs para la lluvia y en estas invocaciones utilizaban ciertos términos cuyo significado estaba relacionado con las lluvias. Por ejemplo: Lelemcaanchaac, "el dios de la lluvia látigo relampagueante", Mizencaanchaac, "rayo que barre el cielo" y Lelencaanil, "tormenta de muchas nubes y poca agua." Mediante los códices Mayas se puede apreciar la representación de un perro relámpago que lleva dos antorchas encendidas cuya representación es la tempestad. Estas dos antorchas pueden significar los dos diferentes tipos de rayos que ellos apreciaban.

Zona arqueológica de Tajín. La zona arqueológica del Tajín, se ubica al norte del estado de Veracruz. Esta palabra en totonaca significa "rayo o trueno". Su edificio más significativo es la pirámide de los Nichos, (Fig. 1.8); la estética de su arquitectura, la calidad y enorme presencia lo avalan. Cuenta con 365 Nichos, que le otorgan un valor simbólico asociado con el calendario solar (similar a la cultura maya y azteca), seguramente representado por esta pirámide.



*Figura 1.8; Pirámide de los Nichos, zona arqueológica del Tajín, Veracruz.*





Tajín tiene varias leyendas sobre su origen, que se han transmitido en el andar del tiempo. Una de ellas, nos cuenta que mucho tiempo antes de ser habitada la región, dentro de una caverna, siete sacerdotes habían levantado un templo dedicado al dios del trueno, la lluvia y las aguas de los ríos. Siglos después arribaron al lugar gente de nuevas costumbres, que se asentaron en este sitio y dieron por nombre Totonacan, y ellos mismos se dijeron Totonacas. Esta invasión de extranjeros, molestó a los sacerdotes, y fueron a la cueva a producir truenos, relámpagos, rayos, lluvias y torrenciales aguaceros con el fin de atemorizarlos; así pasaron varios días con sus noches en tormenta total.

Al darse cuenta de que las tempestades eran producidas por los siete sacerdotes, el pueblo Totonaca los envió en un navío al mar de las turquesas (Golfo de México) donde se perdieron para siempre. Ahora, era necesario controlar al dios del trueno y de la lluvia para evitar el desastre de las nuevas tierras, los sabios y gente principal se reunieron para analizar la situación, al darse cuenta de que nada se podía hacer contra las fuerzas de la naturaleza, decidieron rendirles culto y reverencia. Fue en aquella misma caverna donde los siete sacerdotes rendía culto al dios del trueno, que los Totonacas levantaron el asombroso templo del Tajín, que en su propia lengua quiere decir “lugar de las tempestades”. Donde además de veneración, se le imploró durante 365 días, como número de nichos que tiene este monumento invocando el buen tiempo en cierta época del año y la lluvia cuando es tiempo de fertilizar los cultivos.

Una versión modificada del mismo hecho, dice que el dios Tajín, que tiene poder sobre el rayo, las aguas y sobre los vientos, quería matar a los Totonacas, y éstos decidieron atarlo con el arcoíris para lanzarlo al mar. A todas horas, es vigilado por 12 Ancianos, y el día en que una doncella aparezca por ahí, portando una flor de vainilla y arrojándola al mar, el dios Tajín resucitará. Esta última interpretación de leyenda es muy simbólica.



En una oportunidad de visitar Tajín, se me relató la leyenda que se encuentra plasmada en el monumento de la entrada a esta zona arqueológica.

El personaje es un huérfano errante, que se quedó maravillado al encontrar un hacha que cortaba leña por sí misma y fue seguida por el niño hasta llegar a la pirámide de los nichos, morada de los doce tajines, doce viejitos que son los señores del trueno y ellos tomaron al joven a su servicio.

Una ocasión, cuando los ancianos se preparaban para salir a realizar sus labores, el huérfano miró como del baúl sacaban su vestimenta para el viento, la lluvia y el trueno; se calzaron botas que al golpear con ellas producían truenos, con capas revoloteadas creaban vientos, y al desenvainar las espadas los relámpagos. A pesar de las recomendaciones al joven de no tomar nada, durante una ausencia de los tajines, el muchacho tomó el traje más poderoso, el vestido de huracán. Acto seguido, provocó una terrible tormenta y los ancianos salieron a capturarlo. Al detener al joven, lo precipitaron al mar, donde lo sujetaron y se encuentra sin poder moverse y envejeciendo. Se dice que los ruidos que produce son al preguntar cuándo es el día exacto de su santo para poder celebrarlo, pero se le engaña diciéndole que es un día antes o después de la fecha verdadera, 24 de junio; pues de saberlo provocaría un diluvio.

En las culturas mencionadas, así como en otras tantas, se manifiesta con respeto y admiración los fenómenos atmosféricos. Sus deidades son representadas por imponentes personajes, que generalmente son dioses protagonistas en su cultura.

La mayoría de estas deidades, fungían como encargados de la lluvia, de ahí se desprendían los rayos, truenos y relámpagos; generalmente interpretados como castigo o señal divina.



La observación de estos fenómenos, concluye en el estudio y apreciación de cada uno en forma individual, así, se tenía un concepto claro de la diferencia entre el fenómeno visible que es el relámpago, la descarga eléctrica que es el rayo y la onda sonora llamada trueno. Por tal razón, la deidad podía ser representada con elementos que por si mismos se encargan de alguna de estas manifestaciones.

### 1.C) INICIOS DEL ESTUDIO CIENTÍFICO ELECTRICIDAD-RAYOS

El estudio formal de la electricidad es bastante extenso, cuenta con infinidad de ramificaciones y aplicaciones. Un objetivo de este trabajo es presentar a personajes de gran aporte a esta ciencia, mostrar desde los eslabones más antiguos que han hecho posible el desarrollo de ideas y conceptos, que permitieron a sus sucesores, formular experimentos, inventos, teorías, leyes sobre la electricidad, considerando un direccionamiento a las descargas atmosféricas.

Uno de los primeros hechos que le dan forma al estudio de la electricidad, ocurre hacia el año 600 a.C., cuando el filósofo y matemático griego Tales, que vivió en la ciudad de Mileto, (merecedor de ser incluido como uno de los Siete Sabios de Grecia), descubrió que una barra de ámbar frotada con una piel de animal o lana, se obtenían pequeñas cargas (efecto triboeléctrico) que atraían cuerpos ligeros como trozos de paja y pequeñas semillas; y que al continuar frotando durante un periodo de tiempo prolongado, podía causar la aparición de una chispa.

Muchos años después otro griego, Theofrastró (discípulo de Aristóteles), en uno de sus escritos del año 350 a.C., describe la propiedad del mineral “turmalina”, de que al ser calentada adquiere también la capacidad de atraer y adherir pequeños objetos al igual que el ámbar. En su tiempo, pudo imaginarse que se trataba del



mismo efecto; hoy en día se conoce que son de naturalezas distintas, mientras que el ámbar es un fenómeno triboeléctrico, la turmalina es un efecto termoeléctrico.

Es el año 50 d.C., que un filósofo cordobés Lucio Anneo Séneca, radicado en Roma, presenta en uno de sus siete libros, una observación sobre el fenómeno atmosférico del rayo; en el cual hace una distinción sobre el efecto que producen estas descargas y escribe que existen tres tipos de rayos: “el rayo que incendia, el que destruye y el que no destruye”. A esto se le suma la hipótesis de que las nubes más pesadas en lo alto de la atmósfera caían sobre las nubes que se encuentran más abajo y que la compresión entre nubes producía un calor tan fuerte que originaba el rayo, el relámpago y el trueno.

Tuvieron que transcurrir varios siglos para aportes significativos o verdaderamente destacados y no coincidencias o episodios sin contenido para este tema.

A comienzos del siglo XVI, el científico italiano, Girolamo Facastoro, interesado en la electricidad por frotamiento, construye un pequeño artefacto para detectarla; mediante una aguja sumamente pequeña y liviana, soportada y girando sobre un eje vertical; que al acercarla a un cuerpo electrizado, se orientaba hacia este. Siendo predecesor del “versorium” de William Gilbert.

Años más tarde, una contribución sobresaliente, es hecha por otro italiano, Girolamo Cardano. Quien en 1550, tras algunos experimentos sostiene la idea de que existe una diferencia radical entre la atracción de un imán sobre las piezas de hierro que están en su cercanía, y la atracción de la fricción del ámbar con cuerpos pequeños y ligeros. Cardano lo relata así:

“La diferencia entre los cuerpos magnéticos y los cuerpos eléctricos es esta: todos los cuerpos magnéticos se atraen con fuerza recíproca; en cambio, los cuerpos



eléctricos atraen solamente en su propia dirección y el cuerpo atraído gravita sobre el cuerpo eléctrico”.

El científico que recibe el crédito de ser primer padre de la electricidad y magnetismo fue el inglés William Gilbert, el científico de mayor renombre en Inglaterra durante el reinado de Elizabeth I (siglo XVI). Antes de él, todo lo que se sabía de la electricidad y el magnetismo era lo que conocían los antiguos, que la magnetita poseía propiedades magnéticas y que el ámbar y el azabache, cuando se frotaban, atraían pequeños pedazos de papel u otras sustancias de gravedad específica leve. A la propiedad adquirida por la barra de ámbar, se le llamó “electricidad”, que se deriva del griego *elektron* y significa ámbar, término que Gilbert comenzó a utilizar, además de inventar en latín “electricum”. Y es esta palabra del latín, la que pasaría otros idiomas europeos y perduraría sin grandes modificaciones.

Descubrió que dicha electrificación no se limitaba al ámbar, sino que es un fenómeno de carácter general. Gilbert construyó lo que hoy en día conocemos como electroscopio, llamándolo “versorium”, el cual consistía de una ligera aguja de metal, capaz de girar horizontalmente sobre un pivote, que empleaba para detectar la presencia de carga eléctrica en algunos cuerpos. Frotando diversas sustancias y examinando su comportamiento con respecto a la aguja giratoria, encontró dos clases distintas de sustancias, una que atraía a la aguja, similar al efecto del ámbar, y otra que no manifestaba atracción. A las primeras les llamó sustancias eléctricas y a las segundas sustancias analéctricas. Esto representa lo que hoy llamamos sustancias ó materiales conductores y aisladores.

Su obra más importante se publica en el año de 1600, “De Magnete, Magneticisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure”, es decir, “Sobre los imanes, los cuerpos magnéticos y el gran imán terrestre”, en la cual presenta sus





teorías sobre los cuerpos magnéticos y las atracciones eléctricas. Este libro fue el resultado de casi dieciocho años de estudio y experimentos sobre imanes y cuerpos electrizados. De los dos tomos que se compone el libro, el segundo está dedicado exclusivamente a los fenómenos eléctricos. Convirtiéndose en la primera obra impresa en la historia de la ciencia destinada a los temas de electricidad.

Se puede considerar que con los análisis de W. Gilbert, termina una época descriptiva de los fenómenos electrostáticos y comienza la de electrofísica, en la cual se van a realizar los descubrimientos fundamentales sobre la electricidad.

En 1629, los experimentos de la ciencia física (o “filosofía natural” como se decía en ese tiempo), del italiano Niccolo Cabeo, descubren el fenómeno de la repulsión eléctrica entre cargas del mismo signo, precediendo los estudios de Du Fay.

A mediados del siglo XVII, la única manera conocida para electrizar cuerpos, era por frotamiento manualmente; y es Otto von Guericke quien inventa la primera máquina electrostática en 1663. Esta sencillo y eficiente artefacto, cobro popularidad con prontitud y fue imitada en los laboratorios de física por toda Europa. Varios fueron los científicos que además de reproducirlo le hicieron mejoras a dicho aparato, destacando Gottfried Wilhelm Leibniz y Francis Hawksbee. También, esta máquina electrostática, significó el inicio de estudio para los grandes teóricos Stephen Gray y Charles F.C. Du Fay.

En 1708, el inglés William Wall declaraba que los destellos producidos por la máquina que producía electricidad estática “representarían un cierto grado del rayo y el trueno”; y se le atribuye haber sido el primero en pensar en la analogía entre el rayo y la chispa eléctrica. Su hipótesis decía que, electrizando un cilindro de ámbar de gran tamaño, debería de ser posible escuchar y ver una chispa comparables con el fenómeno atmosférico. Y así realizó con éxito su experimento;



Wall escribió: “esta luz y este chasquido representan en cierto modo el trueno y el relámpago”.

Es Stephen Gray, quien descubre en 1729, que la carga de un cuerpo electrizado puede trasladarse de ese cuerpo a otro colocando materiales que los pusieran en contacto; esto sólo era posible con algunos de estos materiales, mientras con otros no sucedía así. En el primer grupo encontró a los metales, y en el segundo, el vidrio y la seda entre otros. Uno de sus experimentos muy celebrados y llevados a números salones elegantes de la época, consistió en suspender a un joven de manera horizontal, mediante dos cuerdas de seda atadas al techo; cuando un tubo electrificado se situaba cerca de sus pies, su cara y manos atraían trozos de hojillas de metal, demostrando la inducción eléctrica descubierta por él.

La idea en general se popularizó, llegando incluso a tener aplicaciones insólitas como la del Niño Pordiosero de Leipzig (Alemania) que fue atado con cintas de seda (material aislante) y sobre él se aplicaron descargas eléctricas para conocer la magnitud del fenómeno. También idearon un experimento llamado el Beso Eléctrico. Se aplicaba electricidad a una mujer parada sobre un banquillo, con lo que quedaba cargada eléctricamente. Si un muchacho le daba un beso, el dolor era terrible, teniendo en cuenta que los labios son partes muy sensibles del cuerpo humano.

Es Gray, quien presenta la primera prueba experimental, de que a una persona, manteniéndola aislada, puede ser electrizada y originar chispas. La importancia de sus descubrimientos es reconocida al ser elegido miembro de la Royal Society en 1732. Años más tarde, realiza el primer prototipo de lo que hoy llamamos cable eléctrico, tomando un alambre metálico y aislándolo con una envoltura de tela. Con los experimentos e investigaciones, prueba que la electricidad no es similar al “fluido” de Gilbert, porque no pertenece ni depende de la sustancia que la contiene



por periodos largos. Y adelanta a Franklin, en su hipótesis de que los rayos atmosféricos son de naturaleza eléctrica.

Stephen Gray es el primero en destacar la importancia de poner a tierra los cuerpos con que se trabaja al manejar los aparatos y al estudiar los fenómenos electrostáticos, para la seguridad del experimentador.

Hacia el año 1733, un francés de nombre Charles François Du Fay, quien reanudó las investigaciones de Gilbert sobre la electricidad, propuso la hipótesis de que existían dos tipos de electricidad o fluido eléctrico, el vítreo y el resinoso. Estos fueron clasificados de dicha manera, porque descubrió que dos sustancias del mismo género se repelen, mientras que las de distinto género se atraen, este último enunciado, durante alguna época fue conocido como Ley de Du Fay; y propuso que los cuerpos eléctricamente neutros contienen cantidades iguales de ambos fluidos, mientras que los cuerpos cargados eléctricamente debían haber perdido alguna cantidad de estos dos tipos de fluido durante la frotación. Las observaciones de Du Fay en electricidad fueron impresas en el Volumen 38 de la "Philosophical Transaction of the Royal Society" en 1734.

Durante estos últimos años, como se mencionó, se perfeccionaron máquinas electrostáticas, en 1744 Johann Henrich Winkler diseñó y construyó una nueva versión para generar electricidad en forma de campos y chispas; él pensaba: "las chispas eléctricas que ya se producen son de la misma naturaleza que la materia, la esencia y la producción de los rayos y los truenos, siendo su diferencia solo gradual". Un año después, 1745, hace un anticipo teórico al mostrar la analogía entre el rayo en la atmósfera y la chispa eléctrica artificial. Y para 1746, en Inglaterra, Benjamin Wilson, adecua un colector a la máquina eléctrica de Winkler, con la intención de recoger las cargas generadas. Al mismo tiempo pero en Alemania, Georg Mathias Bose hace la mejora de la máquina electrostática,



agregando una barra metálica que actúa como recolector de la electricidad que se genera en diversas partes del mecanismo.

En estos años hace su aparición otro artefacto de suma importancia, es el primer condensador, lo que hoy es conocido como capacitor. Fue creado de distintas investigaciones, en primer lugar con Ewald Jürgen Von Kleist en Prusia; tomó un frasco de vidrio llenado parcialmente con puntillas previamente cargadas por una máquina electrostática, observó que al intentar tomar el exterior del frasco con la mano, recibía un choque eléctrico y posteriormente las puntillas quedaran descargadas; esto fue llamado “Kleistflasche” ó “frasco de Kleist”.

En Leyden (Holanda), aparece un reconocido miembro de las academias de ciencias de Berlín, Londres, París, Montpellier, Estocolmo y San Petersburgo; él es Pieter van Musschenbroek.

El Conde de Musschenbroeck tomó una botella y la llenó de agua. Dentro de la botella puso un conductor (hierro) y en el otro extremo comenzó a generar electricidad con una bola de cristal que puso a rotar (la fricción separa cargas). Andreas Cunaeus, ayudante del Conde, tenía la botella de agua en la mano, y cuando el conde generó electricidad rotando el cristal se produjo un "fuego eléctrico" hacia la mano de Andreas, es decir, una chispa o pequeño rayo. De esta manera fue descubierta la botella de Leyden, que pretendía un almacenamiento eléctrico y fuera la base de los actuales capacitores o condensadores eléctricos.

Este experimento pasó a manos de varios científicos amigos de Musschenbroeck, en Francia René Antoine Ferchault de Réaumur, Jean Allemand, Jean Antoine Nollet; mientras que en Inglaterra, es estudiado por John Bevis y posteriormente William Watson, que da forma definitiva a la llamada “botella de Leyden”; recubriendo el exterior y el interior de la pared de vidrio del frasco con tiras de láminas de un mismo metal y conectando la lámina interior a una bola de metal



implantada en el tapón de corcho del frasco mediante una pequeña cadena metálica. Dicha botella se convirtió en motivo de curiosidad y estudio en los laboratorios de ciencias.

En estos momentos la innovadora botella de Leyden, además de generar cargas electrostáticas, permitía almacenarlas y transportarlas a voluntad, la electricidad estaba lista para analizarse más a fondo, es por ello que la siguiente inquietud es descubrir su velocidad de propagación. En experimentos del profesor de botánica en París, Louis-Guillaume LeMonnier, descargando de diversas maneras la botella de Leyden, llega a la conclusión de que el tiempo que requería la electricidad para propagarse, era nulo. Así mismo, otros científicos de Inglaterra, William Watson, Henry Cavendish, Dr. Belvis, con experimentos similares determinan una vez más que la transmisión es instantánea.

Watson también observó que dos o más cuerpos cargados desigualmente con el mismo tipo de electricidad, tienen a equalizar sus cargas cuando son unidos entre ellos. Él compartía con Franklin, la idea de que existían dos estados de electrificación, debido al exceso o deficiencia de un mismo "fluido"; idea que fue pensada por dos hombres notables, con el océano Atlántico de por medio.

En 1750 se creó la Escuela de Electricistas, grupos de investigadores que hacían numerosos experimentos con el Jarrón de Leyden produciendo fenómenos que no sabían cómo interpretar, pero entendían la diferencia entre conducir y aislar; además conocían bastante sobre los fluidos y en consecuencia llamaron a la electricidad "fluido eléctrico".

Es Benjamín Franklin, de oficio político, editor, y científico, que estudiando a conciencia a los antes mencionados, Gilbert, Nollet y Watson, los toma como referencia para sus investigaciones en esta ciencia. A finales de 1746, recibe de



su amigo Peter Collinson material de física para reproducir los experimentos eléctricos que asombraban a Europa.

El gran aporte de Benjamín Franklin fue la explicación que dio al fenómeno y que aún es válida. Franklin dijo: "la naturaleza está en equilibrio, pero cuando se frota un material con otro, entonces un material queda en exceso de fluido eléctrico y el otro queda en defecto, es decir, se genera un fluido positivo y otro negativo". Muchos años después al fluido negativo se le llamó carga negativa o electrón y al fluido positivo carga positiva o protón.

Los estudios realizados desarrollan la idea de una analogía entre las chispas originadas en las máquinas electrostáticas y cuerpos cargados con los rayos atmosféricos. A finales de 1749, Franklin enlista similitudes entre el fluido eléctrico y el fenómeno natural: 1) producción de la luz; 2) color de la luz; 3) dirección con que se desvía de una línea recta; 4) movimiento rápido; 5) conductibilidad por los metales; 6) crujidos o ruidos al reventar; 7) persistencia en el agua o hielo; 8) desgarramiento de los cuerpos atravesados; 9) destrucción de los animales; 10) fusión de metales; 11) combustión de las sustancias inflamables; 12) olor de azufre.

Su investigación más impactante fue proponer y explicar que un rayo obedece al mismo fenómeno presentado en la botella de Leyden, ésta al ser tocada, producían una chispa y una descarga eléctrica. Franklin pensó que al elevar una cometa que interceptara un rayo, éste debía bajar por el hilo conductor de la cometa hasta una llave metálica, y de ella a tierra. Si esto sucedía así, entonces el fenómeno del rayo era igual al de un fluido eléctrico en laboratorio, es decir, a la descarga producida en un Jarrón de Leyden.

El famoso experimento de Franklin pretendía traer la naturaleza al laboratorio con la intención de modelar los fenómenos que estudiamos. Lo cierto es que a Franklin



no le cayó ningún rayo, pues si así hubiera sucedido, seguramente el investigador habría muerto en ese momento.

Lo que presuntamente sucedió en junio de 1752, (Fig. 1.9), fue que Benjamin encontrándose en una zona de lluvia, levantó el cometa y el hilo que lo sujetaba se empapó, así, éste aumentó su conductividad; dado que había un punto de referencia en tierra (Franklin), se produjo un campo eléctrico (fuerzas sobre cargas) y saltó un "arco eléctrico" entre la llave metálica y los nudillos de la mano que sujetaba el hilo. Franklin nunca dijo que le había caído un rayo sino que describió la descarga hacia su mano, que son hechos diferentes. Confirmando también que las tormentas eran fenómenos de tipo eléctrico y demostró por medio de su cometa que los rayos eran descargas eléctricas de tipo electrostático.



*Figura 1.9; Benjamin Franklin realizando su peligroso experimento.*

Una vez probado que el rayo era de naturaleza eléctrica, Franklin propuso descargar las nubes mediante una cometa conductora con una punta que condujera la electricidad hasta la tierra. En sus experimentos, no contemplaba la posibilidad de un golpe directo del rayo en la vara o cometa. Y recomendaba que el hombre se parara sobre un taburete, sin contacto directo con el suelo. La vara



de hierro utilizada no era un pararrayos, solo un medio de capturar cargas eléctricas que se originaban en su punta, y estas al no poder dirigirse hacia el suelo, lo hacían a través del cuerpo del manipulador.

Como consecuencia de estas experimentaciones se inventó el pararrayos: una varilla puntiaguda, colocada verticalmente muy alta sobre el suelo, en un sitio a la intemperie y conectada al suelo con una cadena o un alambre grueso que se hundía profundamente en la tierra; su doble función consistía en que si no podía prevenir la formación de un rayo, ofrecía un punto preferido de contacto al rayo y luego una guía segura para la corriente del rayo hacia el suelo.

Esto lo publicó en 1753 en su famoso "Poor Richard's Almanack" (Almanaque del pobre Richard), el cual fue una publicación anual de Benjamin Franklin, quien adoptó para su divulgación el seudónimo de "Pobre Richard" o "Richard Saunders". Ese mismo año, la afamada Royal Society honró a Franklin con su más alto galardón que esta institución reconoce al mérito científico.

La hazaña de Franklin es recordada por todo el mundo, pero no fue el primero en "bajar la electricidad del cielo". Este honor se acredita a Thomas François Dalibard, quien conoce las noticias de la propuesta de experimentos de Franklin en 1750. Su experimento lo realizó un mes antes que Benjamín Franklin, el 10 de mayo de 1752, al anunciarse una tormenta en su casa cerca de París; emplea un alto mástil de hierro de 40 pies de longitud y una pulgada de espesor, con una punta de cobre; sobre el terreno se colocó una mesa de madera sobre la cual cuatro botellas de vidrio sostenían una tabla cuadrada de madera que sostenía al mástil. Como lo esperaba Dalibard, extrajo chispas de aquella vara de hierro aislada del suelo mediante las botellas de vidrio.

Sin tener reportes oportunos de los experimentos realizados en América y Europa, los investigadores de cada continente continúan el estudio de este fenómeno. En





1753, otro francés llamado Romas, obtiene señales eléctricas muy enérgicas; coloca un alambre delgado a lo largo de una cuerda de 260 metros; pero es en 1757 que repite la prueba bajo una tormenta, obteniendo chispas de tamaño sorprendente. La barra metálica y la cuerda conductora eran polarizadas por el campo eléctrico de la nube, de tal manera que las cargas de polaridades contrarias se acumulaban en los extremos opuestos del conductor. Al disminuir la distancia entre el extremo inferior y el suelo, se originaba entre ambos una descarga en forma de chispa. Se menciona también, que Romas fué derribado una vez por una descarga demasiado fuerte, aunque no recibió ninguna herida de gravedad.

Estos arriesgados experimentos y el capricho en general por dominar los misterios de la electricidad, despertó la curiosidad de varios investigadores que lo intentaron posteriormente, muriendo algunos en el proyecto.

En Alemania fallece el físico Johann Gabriel Dopplmayr en 1750, como consecuencia retardada de la descarga eléctrica de una botella de Leyden. Otro ejemplo es Georg Wilhelm Richmann, físico perteneciente a la Academia Imperial de Ciencias de San Petersburgo, donde estaba a cargo del observatorio astronómico, quien falleció investigando la electricidad atmosférica con un pararrayos sin “puesta a tierra”. Él había hecho pasar desde el tejado de su casa hasta su gabinete una barra de hierro aislada que conducía electricidad atmosférica y cuya intensidad medía a diario. Fallece el 6 de agosto de 1753, al descargarse en su frente una bola de fuego azulado, dejándolo muerto al instante, (Fig. 1.10).



Joseph Priestley, en su temprana historia de la electricidad de 1767, le canonizó como el primer mártir de la ciencia eléctrica al escribir: "No todo electricista puede morir de manera tan gloriosa como el justamente envidiado Richmann". Sin duda alguna un experimento muy peligroso.

A final de cuentas, el año de 1752, puede enmarcarse como el inicio de la electricidad atmosférica como disciplina. Los descubrimientos son: los fenómenos propios de las nubes en tormenta son de la misma naturaleza que la electricidad artificial (originada en el laboratorio), como lo demostraban los experimentos de Franklin y



*Figura 1.10; Descarga mortal sobre Georg Wilhelm Richmann.*

Dalibard; y que el aire libre de nubes está electrizado, esto observado por LeMonnier, sentando las bases de la ciencia de la electricidad atmosférica.

Las varillas verticales elevadas y los cometas continuaron por los cielos, LeMonnier, Francesco Ludovico Beccaria y Guillaume Mazéas, encuentran evidencia de electrificación, especialmente cuando había nubes de tormenta en el firmamento. Este último científico observó que durante la noche generalmente había poca electrificación, pero que esta aumentaba en gran medida después de la salida del sol y disminuía después del ocaso.

John Canton se encuentra entre los investigadores descubridores, menciona que las nubes podían electrizarse tanto positiva como negativamente. Otro personaje es Horace Benedict de Saussure, construye un electrómetro más sensitivo y



descubre que hay una variación anual en la magnitud de los efectos eléctricos en tiempo bueno, más grande en invierno que en verano.

En 1795, Coulomb establece que el aire es un conductor de electricidad, esto también es concluido en 1850 por Matteucci; pero este hecho tan importante es reconocido hasta 1887 por Liss.

En general, a partir de esta década de 1750 pasaron más de ciento cincuenta años sin avances realmente significativos en la interpretación de los rayos. La razón de esto es que ya estaba explicado lo fundamental y de ahí en adelante había que comenzar a medir, para lo cual se requerían equipos de gran rapidez, ya que el fenómeno del rayo se produce en tiempos muy cortos (microsegundos), que el ojo humano no logra captar a plenitud. Las personas perciben el relámpago, pero se presentan variados fenómenos que además de medirse, se deben registrar y documentar.

La investigación avanzó con la fotografía, espectrocopia, y numerosos equipos de medición.

En 1920 un físico inglés de apellido Wilson, con base en una serie de mediciones, plantea esta hipótesis: "entre la superficie de la tierra y la ionósfera existe una diferencia de potencial del orden de 250,000 volts". Entonces, la interrogante era saber que generaba esos 250,000 volts.

Hoy se sabe que esa diferencia de potencial no son 250,000 volts sino 249,900 volts, que varían poco con la latitud. Wilson planteó entonces la teoría del Circuito Eléctrico Global, es decir, un generador de voltaje, resistencias y corrientes. Pero luego el señor Whipple, uno de los discípulos de Wilson, planteó el siguiente corolario: "existe una diferencia de potencial debida a los rayos, pero no está uniformemente distribuida alrededor del globo terráqueo, sino que está



concentrada en las tres zonas de convección profunda tropical, Suramérica Tropical, Centro de África y Sureste Asiático. La mayor actividad de rayos está en zona continental y no en zona marítima". Comprobar lo anterior era muy difícil y solamente se logró en el año 1977 con mediciones de satélite.

#### **1.D) INCIDENTES PROVOCADOS POR LOS RAYOS**

En nuestro planeta, según el sistema de detección mundial de meteorología, se contabilizan más de 8 millones de rayos y 44 mil tormentas diariamente, esto da un aproximado de 100 rayos cada segundo, presentándose alrededor de 2 mil tormentas eléctricas de manera simultánea, dejando en consecuencia un estimado de 24 mil muertes y 240 mil heridos al año. En el mundo la más alta actividad de rayos se encuentra en la zona ecuatorial continental, siendo tres las principales: Sudamérica Tropical, Centro de África y Sureste Asiático.

Cada temporada de lluvias, un promedio de 550 tormentas severas azotan la República Mexicana. De éstas, buena parte son tormentas eléctricas, las cuales afectan principalmente la costa noroeste y la península de Yucatán, y en menor medida el centro, occidente y sur del país. Según estudios de la agencia espacial de Estados Unidos (NASA), en las costas de Sinaloa y Nayarit caen unos 30 rayos por kilómetro cuadrado, mientras que en el Distrito Federal, el Estado de México, Puebla, Guerrero y Jalisco el promedio es de 20.

La Secretaría de Salud tiene reportes de que cada año hay en promedio 150 muertes a causa de los rayos, y datos proporcionados por la Dirección General de Información en Salud de la Secretaría de Salud, da un promedio de 165 muertes. En total entre 1998 y 2005 murieron por los rayos 324 personas en México. El año en que más muertes ocurrieron fue en 2001, cuando la cifra llegó a 223 personas.



Los meses en que se registran más muertes suelen ser, al igual que los meses de tormentas eléctricas, julio y agosto.

En Estados Unidos, según la National Lightning Safety Institute (NLSI), de 1990 al 2003 hubo 756 muertes por rayos, es decir un promedio de 58 personas fallecidas anualmente. En Cuba, de 1987 al 2005, el promedio fue de 75 decesos por año.

Los datos de promedio de muertes a causa de un rayo, a lo largo del continente americano, corroboran que la actividad más intensa de los rayos se desarrolla en regiones tropicales y subtropicales continentales. En Colombia, se estima que mueren alrededor de 100 personas al año a causa de los rayos, por un promedio de 900 personas que sufren algún tipo de daño por la misma situación. En Brasil, el promedio anual de muertes a causa de las tormentas eléctricas es entre 100 y 150 personas fallecidas. Un año destacado por este fenómeno fue 1996 con 167 defunciones según registros del Ministerio de Salud.

Las tormentas eléctricas tienen la virtud de avisar, sus manifestaciones son palpables, ya que los rayos y relámpagos se pueden observar y los truenos escuchar. Los rayos pueden caer en cualquier lugar, donde menos se les espera, por eso, algunas ocasiones, su daño no puede ser atribuido a descuidos o negligencias. Aunque el previo conocimiento de su riesgo y la prevención puede reducir el número de víctimas. En los Estados Unidos, morían alrededor de 200 personas cada año cuando comenzaron las estadísticas sobre este asunto, ahora el promedio de muertos es menor a 80.

La incidencia y mortalidad por fulguración son muy difíciles de determinar, ya que no existen agencias que registren estas lesiones; además muchas víctimas no reciben tratamiento en el momento del accidente. Generalmente el impacto del rayo tiene más de una víctima al saltar la corriente de un individuo a otro, o a través de la tierra cuando alcanza a personas que se refugian de la tormenta.



En el mundo entero se han realizado un gran número de estudios e investigaciones sobre los rayos y sus efectos, desafortunadamente la aplicación de los resultados ha sido en menor proporción. Las pérdidas naturales son un problema, las pérdidas económicas son cuantiosas, y las vidas humanas que dejan de existir son invaluable e irrecuperables.

Cada año, el rayo causa cientos y miles de muertes en todo el mundo; el ser humano enfrenta impotencia, dolor y sufrimiento por su conocido o familiar. Es cierto que la vida no tiene una manera definida de terminar, que la muerte puede llegar de distintas formas pero siempre se debe aceptar como la única certeza de nuestro existir.

Cuando ocurre un accidente o fallecimiento por el fenómeno del rayo, no tenemos que culparnos de lo ocurrido ni buscar culpables o preguntarnos el motivo por qué pasó esa desgracia. Debemos evitar el pensar que el rayo es un castigo del cielo como se creía en diversas culturas de la humanidad. El rayo, es simplemente una reacción eléctrica de la naturaleza que se encarga de compensar una saturación o estrés eléctrico entre la nube y la tierra, sus efectos pueden ser destructivos y mortales comparados con otros fenómenos de la naturaleza, pero con un mayor número de muertes registradas que las provocadas por huracanes y tornados.

Durante la aparición de cada fenómeno, la naturaleza no reconoce a quién o qué está afectando, ataca indiferentemente a todo lo que esté a su paso.





# CAPÍTULO 2

## DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: RAYOS

---

### 2.A) CARGA ELÉCTRICA

Las primeras relaciones con el fenómeno eléctrico y experimentos con las cargas eléctricas, se habían desarrollado frotando sustancias y objetos con distintos materiales, observado la atracción de cuerpos y la repulsión de los mismos. Este método se llama “carga por fricción”. Estas cargas reciben el nombre de electricidad estática ó electrostática, puesto que generalmente se encuentran en reposo y se producen cuando un material transfiere sus electrones a otro.

Este fenómeno presume que en la superficie de un material, existen muchos átomos que no pueden combinarse con otros de la misma forma en que lo hacen cuando se encuentran dentro del material; por lo tanto los átomos superficiales contienen algunos electrones libres (son aquellos electrones de un material que no están unidos fuertemente a los átomos ó moléculas de éste y pueden desprenderse fácilmente de la estructura). Además, la energía calorífica que se produce por la fricción del frotamiento, se imparte a los átomos superficiales que entonces liberan los electrones. Esto es conocido como efecto triboeléctrico.

El resultado principal, fue clasificar al “fluido eléctrico” en dos clases distintas. Son numerosos los científicos que dedicaron su tiempo a este fenómeno, siendo lo más reconocidos y previamente mencionados: Tales de Mileto, William Gilbert, Charles François du Fay y Benjamin Franklin.



El famoso político y científico norteamericano Benjamin Franklin, es sin duda el personaje más importante y emblemático del estudio sobre la relación de electricidad y los rayos.

En sus observaciones de los experimentos realizados, encontró que cuando dos cuerpos se frotan entre sí, si uno de ellos se electriza positivamente, el otro deberá adquirir electricidad negativa. Para explicar esto Franklin formuló la teoría de que los fenómenos eléctricos se producen por la existencia de un “fluido eléctrico” que se encuentra en todos los cuerpos. En un llamado cuerpo neutro (no electrizado), el fluido existiría en “cantidad normal”. Al frotarse dos cuerpos entre sí, ocurriría una transferencia de fluido eléctrico de un cuerpo hacia el otro. El cuerpo que recibiera más fluido quedaría electrizado positivamente, mientras que el cuerpo que los perdiera, quedaría electrizado negativamente. La convención establecida por Franklin, es que el primer grupo tiene una carga positiva (+), y los pertenecientes al segundo grupo poseen carga negativa (-). Dichos términos no tienen significado matemático, simplemente denotan dos clases opuestas de carga eléctrica. También, las ideas mencionadas deducen que la cantidad de fluido eléctrico permanecería constante.

Las aportaciones de Franklin fueron sustento de la teoría actual, el día de hoy se sabe que en el proceso de electrificación dicha transferencia no se efectúa mediante un “fluido eléctrico” como se proponía, sino por el “paso de electrones” de un cuerpo hacia otro.

En la actualidad, la teoría atómica moderna sostiene que todas las sustancias, toda la materia está constituida de átomos y moléculas; y ahora sabemos que el origen de la carga es el átomo.





Cada átomo tiene un núcleo central cargado positivamente, donde se localizan los protones y neutrones, y alrededor del núcleo se encuentran los electrones, que giran en órbitas u orbitales.

Normalmente un átomo contiene el mismo número de electrones y protones, de forma que las cargas iguales y opuestas, es decir, las negativas y positivas se equilibran entre sí, y esto hace que el átomo sea eléctricamente neutro. Cada elemento tendrá distintas propiedades o características debido a la configuración de su átomo, como lo es el número de protones que contienen en el núcleo, o su variación en el número de electrones. Esta variante de átomos cargados son llamados “iones”. Si un átomo neutral pierde uno o más de sus electrones exteriores, el átomo adquiere una carga positiva neta y se denomina ion positivo. Un ion negativo es un átomo que ha ganado más electrones adicionales.

Para la electricidad es importante mencionar que la órbita exterior de un átomo, recibe el nombre de “capa de valencia” y los electrones que ahí se encuentren se llaman “electrones de valencia”.

Se conoce que todo electrón tiene la misma carga negativa, pero no todos los electrones poseen el mismo “nivel de energía”. Esta energía varía según la posición del electrón en los orbitales, los electrones cuya órbita está próxima al núcleo contiene menos energía que los que se encuentran en órbitas externas. Cuanto más lejanas estén las órbitas del núcleo, mayor será su energía. Al ser los electrones de valencia los más alejados de la fuerza atractiva del núcleo y tener el nivel de energía más alto, son los que pueden liberarse más fácilmente.

Si se aplica suficiente energía a un electrón, este saldrá fuera de su órbita, hacia la siguiente órbita inmediata superior. Así mismo, si se aplica suficiente energía a un electrón de valencia, este electrón se desligará de su átomo ya que no existe un orbital inmediato superior.



Durante el proceso de liberación de electrones de sus átomos, es cuando se produce la electricidad.

Sobre esta electricidad estática se puede comentar lo siguiente:

- En el proceso de electrización, el número de protones y electrones no se altera, solamente existe una separación de cargas. Por lo tanto no hay creación ni destrucción de carga eléctrica, es decir, la carga total siempre se conserva. Cuando dos objetos inicialmente neutros se cargan al frotarse uno con el otro, no se crea carga en el proceso. Los objetos adquieren carga porque se transfiere carga negativa de un objeto a otro.
- Existen dos tipos de cargas eléctricas: positivas y negativas. La carga negativa de un electrón es igual, pero opuesta a la carga positiva de un protón.
- Las cargas eléctricas de mismo nombre (mismo signo) se repelen, y las cargas de nombre contrario (signo contrario) se atraen.

Con los estudios de la carga eléctrica, también se clasificó a la materia de acuerdo a la capacidad de conducción de dichas cargas.

La materia se compone de muchos átomos arreglados de una forma específica para formar un material. Algunos materiales principalmente los metales, poseen un gran número de electrones de valencia también llamados “electrones libres” los cuales pueden moverse a través de él; este material cuyos electrones se liberan fácilmente, o tienen la capacidad de transferir electrones de un objeto a otro se les llaman “conductores”. Un conductor es un material por el cual puede transferirse carga fácilmente.

Al contrario de los conductores, existen materiales en los cuales sus electrones están firmemente unidos a sus átomos y no permiten que sus electrones se liberen



con facilidad, es decir, presentan pocos o nulos electrones libres, por lo tanto no es posible el desplazamiento de carga eléctrica de forma libre a través de estos cuerpos, estos son nombrados “aislantes” ó “dieléctricos”. Un aislador es un material que se resiste al flujo de carga eléctrica.

Para fines de aplicación, una tercera clase de materiales son los “semiconductores”, cuyas propiedades eléctricas se sitúan entre conductores y aislantes, es un material intermedio en su capacidad para transportar carga eléctrica.

Independientemente de la clasificación de material conductor o aislante, todas las sustancias contienen electrones y pueden lograr una carga estática. La atracción de un objeto neutro (sin carga), se debe a la separación de la carga positiva y negativa dentro de este cuerpo.

Esta idea se comprueba con otro de los tantos experimentos de la electricidad estática. El cuerpo neutro será una pequeña esfera descargada y una barra cargada negativamente. La aproximación de dicha barra con carga negativa, repele a los electrones débilmente ligados desplazándose al lado opuesto del objeto sin carga, de este modo, se presenta una deficiencia (carga positiva) en el lado cercano a la barra y un exceso (carga negativa) en el lado más alejado. Con este ordenamiento, las cargas diferentes se encuentran cerca de la barra y la fuerza de atracción será mayor que la de repulsión y el objeto eléctricamente neutro será atraído hacia la barra. Así determinamos que durante este proceso no se gana ni se pierde carga, simplemente la carga positiva y negativa del cuerpo neutro se redistribuye.

Al hablar de la redistribución de carga debido a la presencia de un objeto cercano cargado, uno de los beneficios puede ser útil para cargar objetos sin que exista



contacto. Este proceso se conoce como “inducción de cargas”; y puede llevarse a cabo sin ninguna pérdida de carga del cuerpo cargado.

Esta explicación se ejemplifica con una barra de caucho con carga negativa y una esfera metálica neutra, sostenida por un soporte aislante de modo que no exista un camino conductor hacia el suelo, (Fig.2.1). La primera acción (Fig.2.1.a), es acercar la barra de carga negativa hacia la esfera metálica neutra, -como se ha estudiado- presenta una redistribución de cargas; la repulsión de cargas provoca que algunos electrones de la esfera se desplacen al lado de la esfera más alejado de la barra; mientras que el lado más próximo de la esfera con la barra tiene una acumulación de carga positiva, debido a la migración de electrones que se alejaron de esa zona. Si a la esfera metálica se conecta un alambre conductor conducido a tierra (Fig. 2.1.b), parte de los electrones dejan la esfera y se trasladan hacia el suelo. En este momento se retira el alambre de conexión a tierra (Fig. 2.1.c) y la esfera metálica queda con excedente de carga positiva inducida. Finalmente, al retirar la barra de caucho de las inmediaciones de la esfera (Fig. 2.1.d), la carga positiva inducida permanece en la esfera sin conexión a tierra, esto debido a las fuerzas de repulsión entre cargas similares y a la enorme capacidad del metal en transferir electrones, siendo un excelente conductor.

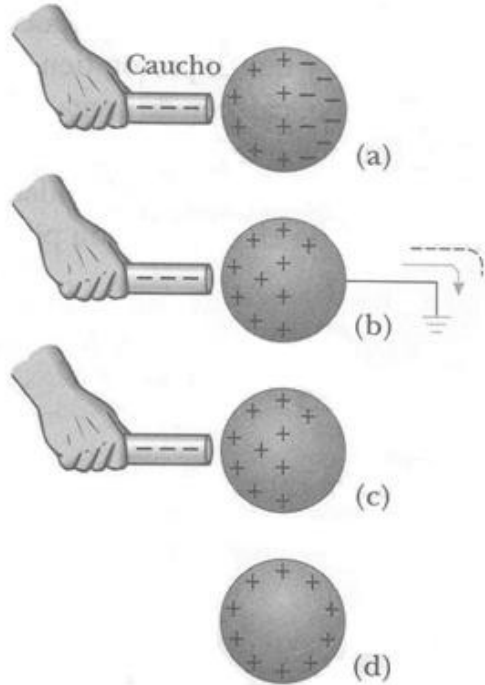


Figura 2.1; Carga de un objeto metálico por inducción. (a) La carga de una esfera metálica neutra se redistribuye al acercarle una barra de caucho cargada. (b) La esfera está conectada a tierra y algunos de los electrones salen de la esfera por el hilo conductor. (c) Al retirar la conexión a tierra, la esfera conserva un exceso de carga positiva. (d) Cuando se retira la barra de caucho, la esfera queda cargada uniformemente.

En la realización de este experimento, se incluyó un nuevo elemento de gran importancia para la realización de este trabajo: “conexión a tierra”.

Empleando términos eléctricos, la tierra se puede considerar como un depósito infinito de electrones; esto es, que puede aceptar o suministrar un número ilimitado de electrones. Considerando que un objeto con carga toca la tierra, este objeto procederá a compartir su carga con la tierra misma, y cede toda su carga para neutralizarse; a la par, la tierra es tan grande que no se produce ninguna carga neta sobre ella; quedando ambos cuerpos neutros. Tocar la tierra con un cuerpo cargado, se llama conexión a tierra; cuya finalidad consiste en hacer que un cuerpo cargado le ceda toda su carga en exceso a la tierra.

Generalmente, este contacto entre el objeto cargado y la tierra se hace por medio de un conductor por su facilidad de transferir electrones.

Se presentan casos en que los cuerpos pueden descargarse aunque no estuviera conectado a tierra mediante un hilo conductor. Por ejemplo, utilizando un soporte de vidrios para un cuerpo metálico, se da el caso de que sobre la superficie del



vidrio se forma una capa de vapor de agua. Dicha capa, al ser conductora, establece contacto eléctrico del cuerpo metálico con tierra, y por ello, se descarga.

De manera general en los climas húmedos, los cuerpos metálicos electrizados aún apoyados sobre aislantes, terminan por descargarse después de cierto tiempo. A pesar que el aire atmosférico sea aislante, la presencia de humedad hace que se vuelva conductor. De tal forma que un cuerpo electrizado cederá su carga a la tierra a través del aire.

## **2.B) FORMACIÓN DE LA TORMENTA ELÉCTRICA Y DEL RAYO**

### **2.B.1) IONIZACIÓN DEL AIRE**

Las cargas eléctricas estudiadas se encuentran presentes en la atmósfera con signo opuesto conocidas como iones. Esta “electricidad atmosférica” forma parte de algunos fenómenos de la naturaleza, también llamados electro-meteoros (por tratarse de una manifestación visible o audible) como son las tormentas eléctricas, los rayos, truenos y relámpagos entre otros.

Normalmente la electricidad no se propaga a través del aire por ser un aislador; y para concebir algunos de los fenómenos atmosféricos que poseen electricidad, necesitamos partir de sus orígenes en común: la ionización del aire y la estructura de una nube de tormenta.

Una molécula de gas “se ioniza” al ser liberado alguno de sus electrones a causa de la intervención de energía de un agente externo, así la molécula posee una carga positiva y el electrón liberado una carga negativa. Estos iones llamados normales o pequeños presentan en la atmósfera una movilidad del orden de 1.5 [centímetros por segundo], por lo cual también son conocidos como iones rápidos.





Los iones normales prontamente son atraídos a moléculas sin carga, a lo que se conoce como un par-ión. Cuando los iones normales son atraídos o capturados por materia distinta a moléculas sin carga, llamados núcleos de condensación, forman los iones grandes ó lentos, por su baja movilidad de 0.003 a 0.008 [centímetros por segundo]. Estos núcleos de condensación son pequeñas partículas de materias extrañas, como partículas de sal formadas por la evaporación de la espuma de mar, partículas de polvo o contaminación y residuos de combustión, que se encuentran presentes alrededor del mundo en cantidades diversas, desde 6 por [centímetro cúbico] muy por encima de los océanos, a 4 millones en el contaminado aire de las ciudades.

En la naturaleza se encuentra equilibrada la relación entre núcleos de condensación eléctricamente neutros con los de carga positiva y negativa. Ambos son los principales iones atmosféricos; pero existe un ion intermedio, cuya movilidad es del orden de 0.01 y 0.2 [centímetros por segundo] que aparece en condiciones meteorológicas especiales.

La distribución de iones grandes y pequeños es distinta en la atmósfera sobre el área continental que en los océanos. En el área continental, los iones grandes se presentan en relación de diez a uno. Los iones grandes de cada signo ( $N^+/N^-$ ) por [centímetro cúbico], es de 1000 a 8000, y los iones pequeños ( $n^+/n^-$ ) de cada signo por centímetro cúbico (cc) es entre 300 y 1000. En la atmósfera sobre los océanos, la proporción es inversa, ahora los iones pequeños son mayoría.  $N^+$  y  $N^-$  de iones grandes de cada signo es de 200 por [cc], y los iones pequeños  $n^+$  y  $n^-$  de cada signo por centímetro cúbico es entre 500 y 700. Estas diferencias se dan directamente porque la cantidad de núcleos de condensación que hay en la tierra son mayores a las del océano; al existir un mayor número de núcleos que atraigan iones rápidos, se formarán más iones grandes. Así, en el océano no se presentan tantos núcleos de condensación y los iones pesados ahora son minoría. Esta debe



ser una condicionante a que la mayor actividad de rayos en el mundo se presenta en zona continental.

Los agentes externos que aportaron energía para separar algún electrón de la molécula de gas en el aire y formar iones. Son conocidos como agentes de ionización y se consideran 3 principalmente.

- Efectos que causan sustancias radioactivas en la superficie terrestre.

Dichas sustancias son Torio, Uranio y otros productos de degradación, están ampliamente distribuidas sobre la corteza terrestre, cuyas capas más superficiales emiten rayos alfa, beta y gama hacia la atmósfera. La representación del número de “pares de iones producidos por cc por segundo”, es el símbolo “q”. Y la medición del poder de ionización de la radiación, emplea el símbolo “I”. Ejemplo:  $q = 3I$ , quiere decir que en el punto referido, la radiación crea tres pares de iones por cc por segundo.

Los efectos de los rayos alfa son despreciables al ionizar solamente algunos centímetros del aire. Los efectos de los rayos beta arroja un ionización que oscila 1 [I] en la superficie hasta 0.1 [I] a una altura de 10 [m]. Los efectos de los rayos gama entregan un promedio de 3 [I] en la superficie, 1.5 [I] a 150 [m] y de 0.3 [I] a un kilómetro de altura.

La energía de ionización por radiación terrestre cerca de la superficie, tiene un promedio entre 2 [I] a 10 [I]. Cada punto de medición sobre la superficie terrestre, puede variar por las características de radiación en ese lugar. Así mismo, sobre el océano el contenido radioactivo del agua marina es reducido en comparación a la tierra, y este efecto de radiación desde océanos es despreciable.



- Efectos de naturaleza radioactiva presente en el aire.

En la atmósfera también se presentan considerables cantidades de emanaciones radioactivas; Radón, Torio y sus productos sucesivos; además, gases que escapan de la tierra que se combinan con situaciones meteorológicas y una interacción directa con el aire. Se calcula que los rayos alfa de las mismas emanaciones y sus productos, mida la radiación del aire en  $2[I]$  en cercanías de la corteza terrestre. Los valores también varían en el sitio de medición, ya sea por la cantidad de emanaciones del lugar, o las condiciones climática de esa zona; con una ráfaga ascendente el nivel de emanaciones al aire disminuye rápidamente con la altura. Al igual que la radiación desde tierra este efecto disminuye sobre los océanos, cae al 1% de lo medido en tierra.

- Efectos de los rayos cósmicos.

Las radiaciones cósmicas son energía proveniente del sol en forma de ondas electromagnéticas que viajan hacia la superficie de la tierra; al cruzar la atmósfera estas ondas se dispersan al rebotar en moléculas de aire, gotitas de agua o pequeñas partículas de polvo, otras rebotan en la parte superior de las nubes y son reflejadas hacia el espacio. De la mínima radiación que llega del sol, la mitad es refleja hacia el exterior y la otra mitad es absorbida por la corteza terrestre. El aire aunque en menor medida, también absorbe esta energía solar en un 15%, por polvo y algunos gases atmosféricos como el vapor de agua, el ozono y dióxido de carbono. La radiación solar absorbida se convierte en calor al alcanzar la tierra. Este calor continuará excitando moléculas. La energía de ionización a nivel del mar sobre tierra, varía de  $2[I]$  en latitudes geomagnéticas bajas hasta  $1.5 [I]$  cerca del ecuador magnético.



Este tipo de ionización aumenta rápidamente con la altura sobre el nivel del mar; y se presenta con mayor número sobre la superficie terrestre que en el océano. Esta radiación cósmica es el complemento en lo más alto de las otras dos y preparan al aire como un medio conductor.

### **2.B.2) ESTRUCTURA DE LA NUBE DE TORMENTA**

La atmósfera está compuesta principalmente de oxígeno y nitrógeno, además de pequeñas cantidades de dióxido de carbono y otras sustancias como el agua. El agua en la atmósfera se puede presentar en tres formas: como vapor gaseoso invisible, como diminutas gotas líquidas y como cristales de hielo. Al enfriamiento del vapor de agua se le conoce como condensación. La temperatura en la que se presenta este fenómeno se llama punto de rocío. Así la condensación atmosférica se encuentra en función de la temperatura, cantidad de agua y núcleos de condensación.

Se ha mencionado que en la atmósfera la presencia de agua es en forma de vapor y generalmente invisible. Así, las nube son porciones de agua que ya se pueden contemplar, es agua en transición.

La formación de nubes proviene del calentamiento que el Sol produce sobre la Tierra, esto origina una corriente ascendente de aire cálido y húmedo; el aire se enfría progresivamente hasta condensarse y formar las nubes. Estos movimientos verticales de aire cálido y húmedo, se originan por la orografía o condiciones de inestabilidad en la atmósfera, como frentes fríos, bajas presiones atmosféricas, etc.

La clasificación utilizada por la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO) propuesta por el químico Luke Howard a



principios del siglo XIX; divide a las nubes en 3 clasificaciones principales respecto a su forma observada desde el suelo: cirros (del latín cirrus, “rizo”), estratos (stratus, “extendido”), y cúmulos (cumulus, “montón”). Los cúmulos -en ocasiones llamados “nubes coliflor”-, son sobresalientes por su desarrollo vertical. Sus cimas generalmente son en forma de cúpula, quizá con bultos ondulados, mientras que sus bases son planas y frecuentemente se trasladan lentamente en rebaños a través del cielo. Además de estas grandes categorías las nubes también se identifican con combinaciones de nombres. La palabra nimbo (del latín nimbus, “nube de lluvia”) se agrega constantemente para indicar que la nube esta precipitando, lloviendo.

Si las corrientes ascendentes continúan alimentando el crecimiento de la nube, su cima se expenderá horizontalmente en forma de yunque superando una altura aproximada de 10 [km] (troposfera) donde comenzará la formación de cristales de hielo al alcanzar en su interior temperaturas de 0 [°C]. Esto se debe a que la presión, al igual que la temperatura disminuyen con la altitud, así el aire húmedo se expande conforme se eleva; ya en la parte superior con bajas temperaturas (inferiores a la de congelación) se concentran fuertes corrientes de aire y turbulencia, provocando que el vapor de agua se condense en gotas de lluvia, cristales de hielo y granizo, logrando contener hasta medio millón de toneladas de agua.

Con estas condiciones (cúmulos altos y oscuros), se originan las nubes productoras de chubascos y tormentas eléctricas, a veces llamadas cabezas de tronadas, o propiamente “cumulonimbos”. Su identificación es fácil a la distancia, con un diámetro de 10 [km] o mayor, también por su color gris muy oscuro y que en su parte baja (entre 3 y 5 [km] del suelo) llega a impedir el paso de la luz solar. De este modo, se producen las primeras precipitaciones (de lluvia, nieve o granizo) acompañadas de fuertes corrientes descendentes que irán mermando las



corrientes ascendentes que alimentaban a la nube, y aparecerán también las primeras descargas eléctricas dentro de la misma nube o nubes de alrededor.

Las condiciones atmosféricas están dadas, pero se debe analizar la estructura de la nube de tormenta. Esta estructura resulta muy complicada y el mecanismo por el cual las cargas se separan no está definido completamente, ya que ninguna de estas dos teorías puede explicarla en su totalidad y seguramente sean complementarias de una manera que aún no se ha podido demostrar; su estudio se centra en las fricciones y colisiones entre partículas de hielo, gotas y vapor de distintos tamaños dentro de la nube, así como también la transferencia de cargas que las acompañan, pues en cada cambio de estado se ceden o adquieren dichas cargas.

Para que ocurra la transferencia de cargas, la nube deberá encontrarse electrificada, es decir, separadas las cargas eléctricas positivas de las negativas. Esta estructura de polarización se conoce como dipolo. Para explicarse esta configuración se consideran dos modelos distintos, el de precipitación y convección.

- Precipitación: Aproximadamente entre 2.5 y 3 [km] de la altura, la temperatura es de 15 a 20 grados centígrados bajo cero, donde se producen las partículas pesadas de agua o hielo, que caen a través de la nube por efecto de la gravedad. Otras partículas más ligeras del mismo compuesto (que tienden a permanecer suspendidas) colisionan entre ellas, y transfieren la carga eléctrica de la misma manera que la fricción. Así, los objetos que descienden adquieren carga negativa, mientras que aquellos más altos se cargan positivamente.





- Convección: Cuando llueve sobre la superficie terrestre, se produce una evaporación natural elevando vapor de agua. Este aire caliente asciende desde la tierra y por convección se enfriará en las alturas formando la nube. Las partículas ligeras de carga positiva son levantadas por las corrientes de convección en la nube, mientras que las partículas pesadas -cargadas negativamente-, son arrastradas hacia el fondo por las corrientes descendentes.

La nube de tormenta se desgasta al desaparecer la corriente ascendente que la alimentaba y proporcionaba altura. Al enfriarse la Tierra, se presentan fuertes corrientes descendentes de aire que provocan lluvias intensas, descargas eléctricas y ráfagas de viento que terminan por deshacer la nube. Se calcula que el tiempo en que se desarrolla este proceso es alrededor de 2 horas.

La interacción dentro de la nube y su proceso de separación de cargas es muy discutido, pero el resultado es lo más importante, donde aparece una acumulación de cargas positivas en la cima de la nube y de cargas negativas en la base de esta, asemejándose a una enorme pila donde se ha generado una gran cantidad de carga, comportándose como un dipolo de grandes magnitudes, modelo también conocido como dipolo tormentoso, (Fig.2.2).

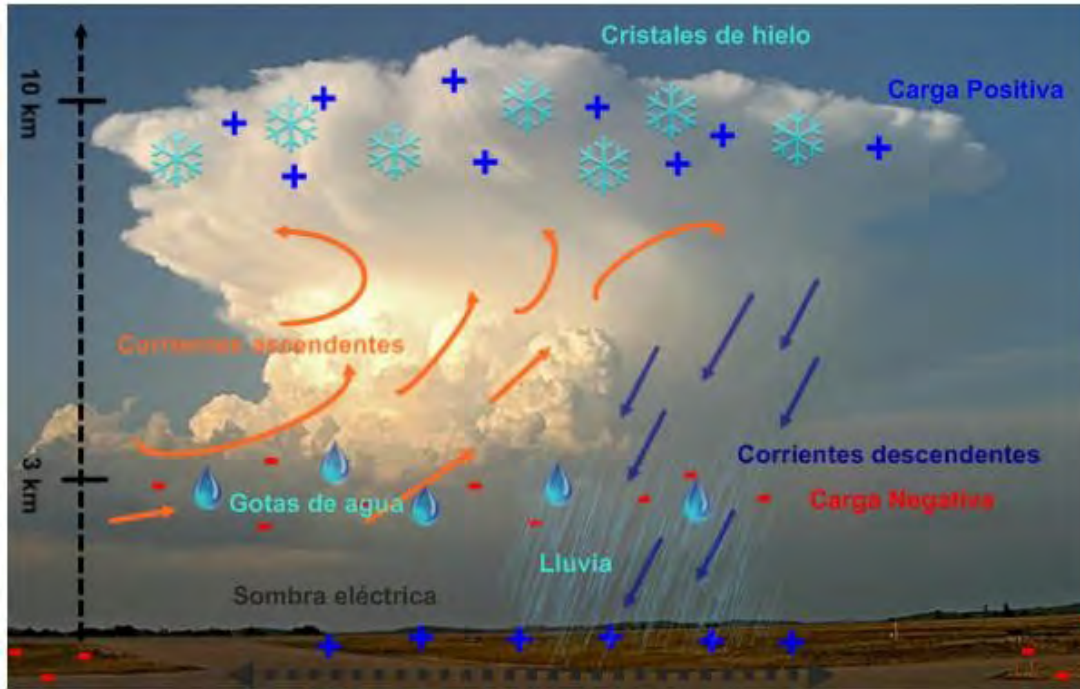


Figura 2.2; Formación y estructura de la nube de tormenta también conocida como Cumulonimbos.

Se considera que la tierra se encuentra cargada negativamente, mientras que su contraparte positiva se encuentra distribuida en la atmósfera. La resistividad de la atmósfera es variable respecto a la altura, y será de menor valor a una mayor altitud; tiende a ser constante en una capa llamada ionósfera, con partículas eléctricamente cargadas que se encuentra entre 50 y 60 [km] de altura; esto quiere decir que al reducir su resistividad, la atmósfera es propensa a comportarse como un conductor. Así, entre la superficie de la tierra y la ionósfera se produce una diferencia de potencial aproximada de 300,000 [V]. Con dicha configuración de la superficie terrestre cargada negativamente y la parte inferior de la ionosfera positivamente, este conjunto de elementos actuará como un condensador esférico, cuyo electrodo central es la tierra, y su corriente se calcula en 3 [A/km<sup>2</sup>], esto representa una corriente total de fuga de 2000 [A] continuos, (Fig. 2.3).

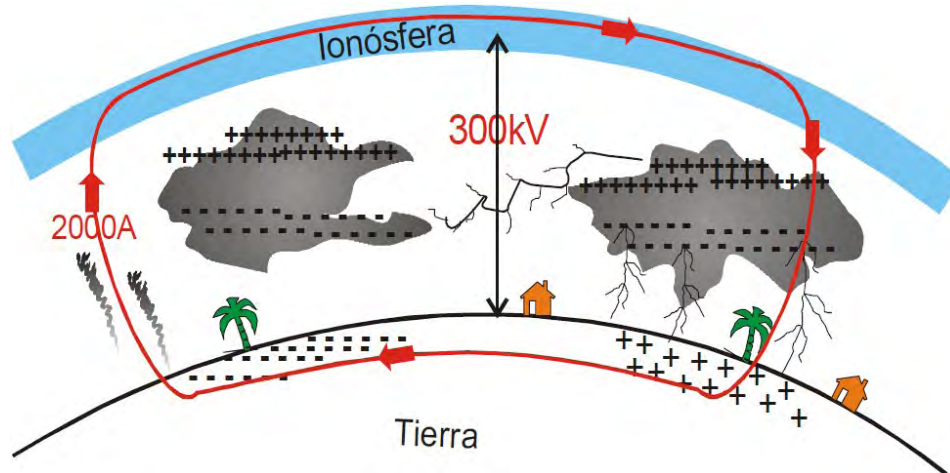


Figura 2.3; Diferencia de potencial entre la Tierra y la Ionósfera.

En un día de buen tiempo o condiciones normales (entiéndase como un día claro y despejado sin indicios de tormenta), se estima a nivel de suelo un campo eléctrico entre 100 - 125 [Volts/metro], esto quiere decir que entre la superficie terrestre y una altitud de 1000 metros la diferencia de potencial es de 100,000 a 125,000 [V].

Al presentarse una situación de tormenta se modifica este valor. Una vez cargada negativamente la parte inferior de la nube, se presenta en tierra un efecto “espejo de polarización inversa”, más propiamente dicho, el fenómeno de inducción electrostática. Esta carga negativa en la nube, repele la carga negativa que pudiera haber en el suelo (que en un principio es neutro), esto provoca que esa carga negativa se dirija hacia dentro de la tierra, dejando un residuo de carga positiva en la superficie. Si la nube se mueve y avanza, el suelo se va electrizando positivamente al paso de la nube y se le conoce como “sombra eléctrica”. Ahora la diferencia de potencial entre el suelo y la nube, alcanza un valor aproximado de 30 millones de volts.



En tiempo tormentoso, el campo eléctrico a nivel de suelo (antes de la aparición del rayo), alcanza valores entre los 10,000 y 20,000 Volts/metro; la gran cantidad de nubes promueve una intensa ionización positiva en el suelo que afecta el aire circundante y las superficies y/u objetos sobresalientes como edificios, árboles, antenas, etc., esto por el llamado “efecto punta”, alcanzado valores de 500,000 Volts/metro.

Este “efecto punta” puede ser estático en un punto, también en movimiento en el mismo punto o desplazarse por el suelo y las estructuras, siguiendo la dirección del viento o sentido de la nube. Este efecto o sensación de movimiento, generan la impresión de ver una corona ó múltiples efectos puntas, llamados entonces “efecto corona”, que son diminutas chispas eléctricas que aparecen en la parte superior de estructuras o materiales, generalmente de color azul-verde y con olor a ozono (por ionización del aire).

Conforme la acumulación de cargas aumenta, la fuerza de atracción entre las cargas negativas que están en la nube y las positivas que se encuentran en tierra también se incrementa. Si la fuerza de atracción es suficientemente intensa, se establecerá una gran diferencia de potencial eléctrico, ya sea entre la parte superior de la nube y su parte inferior, o entre dos nubes cercanas, o bien, entre una nube y la superficie de la tierra; de esta manera, se excede el valor límite de rigidez dieléctrica del aire (0.4 a 3 [MV/m]), esto es, el aire deja de comportarse como un aislante y comienza a hacerlo como conductor de la intensa corriente, así, estos dos puntos de atracción de diferente polaridad e igual potencial compensarán las cargas y formarán un camino para encontrarse. Esto se debe a que el valor normal de campo eléctrico para la disruptiva del aire seco a la presión atmosférica es 3 [MV/m], a una presión menor como la que se encuentra en las alturas de la nube, el valor puede ser 2 veces menor, y en presencia de gotas de agua 3 veces menor. Con esto podemos asumir un valor medio para producir la



ruptura dieléctrica del aire de 1 [MV/m]. Todo este acto se manifiesta en una fracción de segundo, es la descarga atmosférica que conocemos como rayo.

El rayo es una gran descarga eléctrica que golpea la tierra, cuya velocidad durante este proceso dentro del canal ionizado es de  $10^5$  [m/s], siempre acompañado por una manifestación luminosa que es el relámpago (también llamadas así las descargas eléctricas entre nubes), y una manifestación sonora, ya que el calor producido por la descarga eléctrica calienta el aire y lo expande bruscamente, esto produce el ruido característico llamado trueno; estos acontecimientos llegan diferidos en tiempo a nuestros oídos, y se ha considerado que es proporcional el tiempo de retardo entre el relámpago y el trueno a la distancia entre el observador y el lugar de la caída del rayo.

Siempre existirá una pequeña corriente entre la tierra y la ionósfera, principalmente porque la atmósfera no es un aislador al cien por ciento, y la segunda razón, es que las descargas atmosféricas que caen en tierra siempre restablecerán su carga negativa, estas son conocidas como descargas negativas y son mucho más comunes que las descargas positivas.

La producción de los rayos es un medio de la naturaleza por mantener un balance dinámico entre las cargas positivas de la ionósfera y las cargas negativas de la tierra.



## 2.B.3) CLASIFICACIÓN, FORMACIÓN Y PARÁMETROS DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA

### 2.B.3.a) PROCESO DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA (RAYO)

Ya se ha analizado la formación y estructura de la nube de tormenta, también la inducción electrostática del terreno; así, la interacción de todos los factores formarán la tormenta eléctrica y se puede presentar el proceso de la descarga atmosférica y formación del rayo. En este proceso se identifican varias etapas, (Fig. 2.4):

- a) Descarga preliminar (Break down preliminary). Se inicia con la configuración de dipolo de la nube y el aumento de potencial entre esta y la tierra, generando un campo eléctrico de alta tensión. A partir de este momento puede desencadenarse una descarga intra-nube ó nube a tierra, percibiéndose como una descarga luminosa.
- b) Líder escalonado ó “guía” (Stepper leader). Un líder es un canal o núcleo de plasma, es decir, gas con partículas cargadas (iones libres). Se desarrolla desde la nube a tierra de manera errática con saltos de decenas de metros. Al aumentar la tensión, también se ioniza el aire positivamente, que es atraído por la nube negativa y comienza a moverse formando una corriente ascendente. Este viento prepara una guía o corredor que será la ruta de descarga. El líder del rayo está compuesto por un núcleo de plasma altamente conductivo de intensidad estimada entre 100 y 1000 [A], este canal por el que se transmite la carga se encuentra rodeado de una envolvente de corona de algunos centímetros de diámetro, cuyo radio está entre 0.01 y 0.5 [m]. La alta temperatura del canal de plasma alcanza los 30,000 [°C], estas magnitudes evitan que decaiga y se disipe al estar inmerso en un campo eléctrico de ambiente débil.





- c) Líder ascendente (Upward leader). Cuando la guía se acerca a la tierra se produce el efecto punta o líder y efecto corona desde el suelo o estructuras construidas por el hombre. Si el campo eléctrico llega a una magnitud de 500 a 1000 [kV/m], las cargas adquirirán movilidad y se genera desde la tierra el trazador ascendente. Esto marcará la trayectoria de los caminos ionizados ó trazadores.
- d) Ruptura (Attachment). El aire constantemente ionizado, se vuelve el medio para la transferencia de cargas y encuentro entre la punta del trazador ascendente y la guía escalonada, distanciados entre 50 y 100 [m] se establece el campo eléctrico correspondiente a la ruptura dieléctrica del aire, e inicia el camino conductor de descarga, generando el rayo y así las cargas fluyen bruscamente hacia al suelo. Su manifestación luminosa y audible se trata del relámpago y el trueno respectivamente.
- e) Descarga de retorno (Return Stroke). La transferencia de la carga almacenada en el canal de la guía escalonada y parte de la carga de la nube, lleva a la primera descarga de retorno, que se propaga de forma continua hacia la nube. Cuando la descarga de retorno se detiene después del primer rayo podría terminarse la actividad eléctrica y esto se conoce como “rayo de un único impacto” ó “rayo de descarga única”. La intensidad de la descarga es del orden de 30 [kA] y en este proceso se transfiere a tierra la carga de la nube.
- f) Dardo líder (Dart leader). Una vez ocurrido el rayo, si existe más carga en la nube, esta se reconstituye y después de la primera descarga de retorno, tras un breve lapso de tiempo, se produce una segunda descarga de poca intensidad que reioniza el camino principal establecido por el primer retorno. Esta descarga dardo se realiza de forma continua, sin ramificaciones y a gran velocidad desde la nube hasta llegar cerca del suelo.

g) Segundo retorno y retornos sucesivos (Multiple stroke). Si este proceso termodinámico continúa activo deja la posibilidad a una segunda descarga (segundo retorno) ya de menor intensidad, que seguramente impactará en un punto distinto; del mismo modo, este proceso puede repetirse varias veces en un corto periodo de tiempo, pues los rayos cuentan con una guía ya ionizada. Cuando en la nube ya no hay suficiente carga, cesan las descargas de retorno y se alcanza un equilibrio natural.

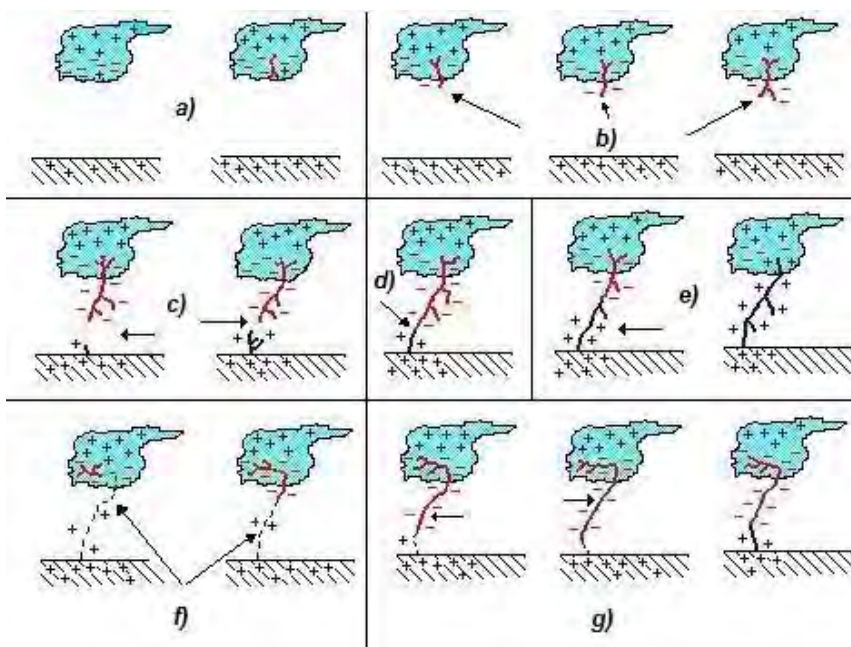


Figura 2.4; Proceso de la descarga atmosférica y formación del rayo.

- (a) Distribución de cargas y descarga preliminar.
- (b) Guía escalonada de aire ionizado.
- (c) Efecto punta, líder ascendente, y trazadores.
- (d) Ruptura, encuentro de trazadores.
- (e) Primer retorno.
- (f) Dardo líder, camino ionizado.
- (g) Guía rápida y retornos sucesivos.

La distancia entre la guía escalonada y el punto de impacto se conoce como “distancia de impacto”, y nos entrega información representativa y de primera mano sobre el fenómeno; si la carga del canal es grande, la distancia de impacto será mayor y así mismo será mayor la corriente del primer retorno, en otras palabras, a rayos de mayor intensidad mayor es la distancia de impacto.

### 2.B.3.b) CLASIFICACIÓN DE LOS RAYOS

Las descargas eléctricas son muy variadas en todos aspectos, se podría decir que ningún rayo es igual a otro. Una clasificación práctica se hace de acuerdo a su inicio y destino, (Fig. 2.5):

- Nube a tierra (descendentes), también llamadas descargas negativas, (Fig. 2.5.h).
- Tierra a nube (ascendentes), también llamadas descargas positivas, (Fig. 2.5.i).
- Nube a cielo, conocidos como “Duendes o espíritus”, son descargas hacia la atmósfera, más arriba de las nubes.
- Intranubes ó Internubes. Llamadas así, porque los rayos ocurren entre nube y nube ó dentro de la misma nube; en este caso se llaman relámpagos. Representan un 5 % de las descargas totales, y suelen aparecer durante las tormentas secas, (Fig. 2.5.j).

(h)



(j)



(i)

Figura 2.5;

(h) Descarga Negativa.

(i) Descarga ascendente ó positiva en la Torre Eiffel 25/mayo/2009.

(j) Descarga intranubes.



Un porcentaje igual o menor al 5% de los rayos, son las descargas anormales o raras al presentarse pocas veces. Estas pueden ser trayectorias laterales, descargas electrostáticas desde el suelo hacia un cielo casi sin nubes.

El estudio del rayo ha llegado a ser considerado como una fuente de corriente, la cual puede tener polaridad positiva, negativa o poseer ambas en una misma descarga, conocido esto como onda bipolar. Esto da pie a clasificar las descargas atmosféricas por su polaridad, en descargas negativas y descargas positivas.

Las descargas negativas o rayos negativos, son estudiadas por presentarse con mayor frecuencia, alrededor del 90% de las descargas que caen a la tierra son de este tipo y es el principal modelo de estudio.

Estas descargas negativas tiene como origen la nube y su destino es la tierra. Formadas por un tronco principal con ramificaciones en sentido descendente. En este tipo de rayos, el retorno deposita la carga positiva de varios coulomb sobre el canal del líder negativo precedente, cargando negativamente a la tierra, o bien neutralizando una parte de la carga inducida en tierra.

Se ha llegado a presentar una descarga de polaridad positiva generada de la nube a tierra, en la cual su rayo de retorno deposita la carga negativa de varios coulomb en el canal del líder precedente, llevando a tierra la carga positiva, o neutralizando una parte de la carga inducida en la tierra.

Las descargas positivas o rayos positivos se presentan con menor frecuencia, alrededor de un 10%. Éstas inician desde la tierra y se dirigen hacia las nubes, formadas por un tronco principal con ramificaciones en sentido ascendente. Este tipo de descargas se presenta en zonas de gran altitud, desde los picos de las montañas o desde altas estructuras construidas por el hombre, es decir, cuanto



más cerca se encuentre la nube cargada a la tierra, aumenta la posibilidad de que sea una descarga positiva (aunque no es una condición necesaria).

Los rayos con esta polaridad poseen magnitudes superiores a los negativos, tanto en su corriente pico (rango de 200 a 300 [kA]), como la carga total transferida. Otra característica de estos rayos con polaridad positiva, es que contienen una única descarga de retorno, seguida de un periodo de corriente continua. Se presentan principalmente durante el invierno.

Existen otros tipos de fenómenos relacionados con cargas eléctricas en la atmósfera, probablemente más testimoniales que científicos. Este hecho se podría explicar por el desplazamiento a voluntad del viento de las nubes cargadas, esto provocaría que los campos eléctricos ocasionen descargas verticales, horizontales o de variadas formas.

Una de estas manifestaciones son los rayos difusos, también llamados “relámpagos de calor”, que suelen ser frecuentes durante el verano. Este fenómeno no es un rayo por sí mismo, es un resplandor que ilumina el cielo como un reflejo de una tempestad muy lejana, a la cual no alcanzamos a observar o escuchar.

Los llamados rayos laminares, o rayos en láminas, son aquellos resplandores que resultan de la descarga (entre la carga eléctrica positiva y negativa) dentro de la propia nube.

El rayo en bola (rayo esferoidal), se presenta en forma de una esfera luminosa, semejante a una bola de fuego, de dimensiones que alcanzan el tamaño de un balón de fútbol. Cuando se llegan a presentar varias al mismo tiempo, se les denomina Rayo de rosario.

### 2.B.3.c) PRINCIPALES PARÁMETROS DE LOS RAYOS

Los parámetros y magnitudes que llega a presentar el rayo pueden ser tan variados y de grandes valores debido a la combinación de factores que hacen que cada descarga sea distinta a todas las demás en el mundo. Algunos de estos aspectos son: sus tipos de carga, intensidades de retorno, cantidad de retornos sucesivos, polaridad, tiempo de descarga, inicio y destino, y los lugares donde se presentan, entre otros. El comportamiento de la descarga se puede describir en dos características principalmente: tiempo e intensidad.

La primera descarga tiene una duración muy corta donde la corriente alcanza su valor máximo, para después decaer paulatinamente a un 50% del valor pico en un tiempo de 50 [μs] posterior al inicio. Después, la corriente llegaría a cero o mantendría un valor continuo del orden de centenas de amperes. En el caso de rayo con múltiples descargas, la segunda de ellas es aproximadamente la mitad del valor de la primera, y decrementa su valor en los eventos posteriores, (Fig.2.6).

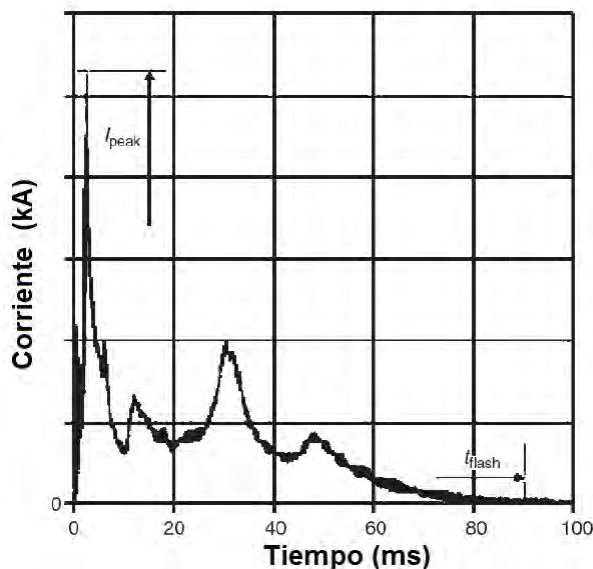


Figura 2.6; Gráfica de la descarga eléctrica atmosférica.  
Tiempo (ms) vs Corriente del rayo (kA).





Aquí se muestran los datos más representativos de un rayo:

- Corriente de pico: 1 a 300 [kA], 30 [kA] es el más representativo.
- Tiempo de subida: 1 a 30 [ $\mu$ s], 2 [ $\mu$ s] es el más representativo.
- Tiempo a valor medio: 10 a 250 [ $\mu$ s], siendo 50 [ $\mu$ s] el valor más representativo.
- Descargas por rayo: 1 a 15, valor medio 3 ó 4.

Los rayos poseen magnitudes sorprendentes, que respaldan el asombro que nos provoca presenciar alguno. La descarga de retorno asciende desde la tierra por el camino ya trazado con una velocidad de alrededor de 20,000 a 140,000 [km/s] que en conjunto, es inferior a la mitad de la velocidad de la luz; y también alcanza temperaturas entre los 20,000 y 30,000 [ $^{\circ}$ C].

La potencia que se desarrolla en una descarga eléctrica atmosférica es muy grande, su elevada corriente se libera en muy corto tiempo. Las sobretensiones que aparecen en los cuerpos alcanzados por estas descargas también son elevadas, al igual que las corrientes del orden de kilo amperes, pues producen caídas de tensión de decenas o centenares de kilo volts.

La corriente que transporta como media es entre 20 y 30 [kA], y en caso extremos se puede incrementar estos valores hasta 10 veces. En el 50% de los casos la primera descarga supera los 20 [kA].

Estas características del rayo (que pueden variar según las condiciones), llega a tener un radio de 20 [m] de destrucción sobre el punto de entrada a tierra.

Para el estudio de este fenómeno y desarrollar la protección contra rayos, los parámetros más relevantes son cuatro:



- Magnitud de la corriente de pico (Valor pico de la corriente máxima);  $I$  [A]. Es uno de los parámetros más importantes de una descarga, útil para el diseño de protección contra rayos, como la caída de tensión en volts cuando el rayo impacta en la resistencia de puesta a tierra, así como la distancia de impacto del rayo en la estructura. Una descarga de rayo puede considerarse como una fuente casi ideal de corriente. Su valor medio llega a ser de 30,000[A].
- Gradiente (pendiente) máximo de corriente del rayo;  $(\Delta i / \Delta t)_{\max}$ . Máxima tasa de ascenso de la corriente de rayo. Las descargas de rayo se componen de una serie de impactos parciales, respecto al tiempo, se pueden identificar entre el primer impacto corto y los impactos cortos subsecuentes. Su principal diferencia entre ambos tipos de impactos es que, debido a la necesidad de estructurar un canal de rayo, en el primer impacto corto existe una incitación menos marcada de la pendiente de la corriente de rayo que en los impactos cortos subsecuentes, pues estos ya encuentran un canal de rayo totalmente definido. Por esto, el valor de gradiente máximo de los impactos cortos subsecuentes es el utilizado para el cálculo de tensiones electromagnéticas inducidas que se representan en los lazos metálicos, abiertos o cerrados en cualquier instalación, y son las causantes de daños de los equipos electrónicos. Su valor medio es de 20 [kA/ $\mu$ s].
- Carga total de la corriente del rayo,  $Q = \int i dt$ ;  $Q$  [As]. La carga de la corriente de rayo determina la energía producida directamente en el punto de impacto y en todos aquellos puntos en los que la corriente de rayo se propaga en forma de un arco eléctrico por encima de una zona de aislamiento. La energía producida  $W$  en el punto donde se genera el arco eléctrico se origina como producto de la carga  $Q$  y de la caída de tensión  $U$ ; ( $W=Q/U$ ). Así, la carga de la corriente de rayo puede volatizar o fundir componentes del sistema externo



de protección sobre los cuales se descarga el rayo directamente. Su valor medio es de 10 [As].

- Energía específica (impulso cuadrado de la corriente);  $\int i^2 dt [A^2s] = W/R [J/\Omega]$ . La energía específica de una corriente de impulso es la energía generada por la corriente de impulso en una resistencia de 1 [ $\Omega$ ]. Esta generación de energía específica, también se denomina como la integral del cuadrado de la corriente de impulso por el tiempo de duración de la misma. La energía liberada por un rayo en si misma no es muy grande, pero al ser su tiempo de descarga tan diminuto (medible en microsegundos), su potencia desarrollada es enorme. Esta energía específica es la responsable del calentamiento de las partes conductoras y del esfuerzo electrodinámico entre conductores. Su valor medio es de 105 [As<sup>2</sup>].

Existen otros parámetros que consideran información más específica, como datos sobre la zona del suceso, estadística, mediciones directas de las descargas. Toda la información obtenida, debe ser considerada para una adecuada selección y estudio del sistema de protección.

- Nivel cerámico ( $N_k$  ó  $T_d$ ). Es el número de días al año que una tormenta eléctrica (con descargas atmosféricas) afecta a una zona definida. También se llega a trabajar con el número de horas de tormenta al año ( $T_h$ ). Estos datos varían con la localización geográfica y las condiciones naturales del territorio estudiado.
- Densidad de rayos (descargas) a tierra ( $N_g$ ). Expresa la cantidad de rayos que caen por kilómetro cuadrado de territorio y por año. Se conoce que este dato puede variar mucho en años consecutivos para una misma región. La



densidad de carga del rayo es proporcional a la saturación de carga electrostática de la zona. A mayor densidad de carga, mayor es el riesgo de generar un líder y a continuación una descarga de rayo.

$$N_g = 0.04 \times T_d^{1.25} \text{ [núm.de rayos/km}^2\text{-año]}$$

- Polaridad del rayo. Es el signo de las cargas transferidas. Dependen de la dirección del flujo de la corriente entre una nube y la tierra. Son más frecuentes las de cargas negativas que las positivas. La polaridad definida claramente describe al voltaje como positivo o negativo al punto que lo origina.
- Dirección: Considera el origen y destino del rayo, principalmente ascendente (de tierra a nube), y descendente (de nube a tierra).
- Multiplicidad (Número de descargas consecutivas): Son las repeticiones que se pueden presentar después de la primera descarga. En el 55% de los casos, ocurren descargas múltiples; en un 90% la cantidad de descargas no son más de 8, y la media es de 3 o 4 descargas por rayo. El intervalo de tiempo entre descargas sucesivas, está entre los 0.5 [ms] hasta 0.5 [s].
- Impedancia del canal: Se llega a considerar a la nube y a la Tierra como placas de un condensador que se descarga a través de un canal con impedancia de 5 [kW] de carácter inductivo, debido a la falta de un cierto tiempo para la formación del canal.
- Cuadrado de la corriente de impulso del rayo: Se utiliza para el cálculo del calentamiento y los esfuerzos electromecánicos al circular la corriente del rayo por conductores metálicas de las protecciones primarias.



Otros aspectos complementarios de información y estadística lo son:

- Forma de onda.
- Corriente de retorno.
- Duración e intervalo entre descargar individuales.
- Intervalo de tiempo entre golpes sucesivos  $\Delta t[\text{ms}]$  (intervalo entre descargas).
- Tiempo inicial y final del frente de onda ( $t_f, t_q$ ) (tiempo de frente, tiempo de cola y tiempo total).
- Coordenadas Geográficas del evento.
- Fechas y hora del suceso (a/m/d(h/m/s/ms)).

Algunas normas internacionales como la IEC 61312-1, presentan curvas de probabilidad de la mayoría de estos parámetros, que complementan a los resultados de las investigaciones de una determinada área.



# CAPÍTULO 3

## DESCARGAS A CAMPO ABIERTO

El rayo es una fuerza de la naturaleza impactante, es tan asombrosa como letal, es tan gigantesca como instantánea, es causante de muchos daños en estructuras y pérdidas cuantiosas, pero nada comparado a ser motivo de numerosas muertes en todo el planeta; sin distinción de edad, sexo o creencias. El rayo es naturaleza, es física, es una compensación de cargas eléctricas entre nubes y la Tierra, y no un castigo del cielo como se le consideraba en la edad media. La descarga atmosférica es un fenómeno que continuará presentándose, al cual, el hombre ha decidido respetar por ser inevitable y protegerse sin llegar a controlarlo.

Los efectos de los rayos son diversos, su principal y más temida acción es el peligro en que pone a las personas, desde accidentes relacionados e impactos indirectos, hasta un impacto directo y mortal que deje sin vida al ser humano que cumplía con su labor, realizaba un paseo o practicaba alguna actividad o deporte. La caída del rayo puede ocurrir en el campo y en la ciudad, puede comenzar un incendio al quemar los árboles cercanos a la zona donde cayó, también puede provocar desperfectos en edificaciones antiguas o modernas ocasionando pérdidas en producción o daño a equipo, y así convertirse en un costo de reparación.



Las descargas atmosféricas no pueden evitarse y el hombre en respuesta solo intenta protegerse, en primera instancia cuidar la vida misma, posteriormente a las estructuras, edificaciones y bienes en general.

Los datos, magnitudes y parámetros que se mencionan sobre las descargas atmosféricas, son resultados de estudios, experimentos y estadística sobre este fenómeno, pero son con ejemplos más palpables donde las personas llegamos a vislumbrar ó comenzamos a entender con mayor claridad, los verdaderos alcances y potencial de los rayos.

### 3.A) DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN NUESTRO PAÍS

La actividad de descargas atmosféricas se presenta a lo largo y ancho de todo el mundo. Se ha comentado que la mayor actividad se concentra en la zona ecuatorial dentro de los continentes; en Sudamérica Tropical, el centro de África y sureste Asiático, (Fig. 3.1).

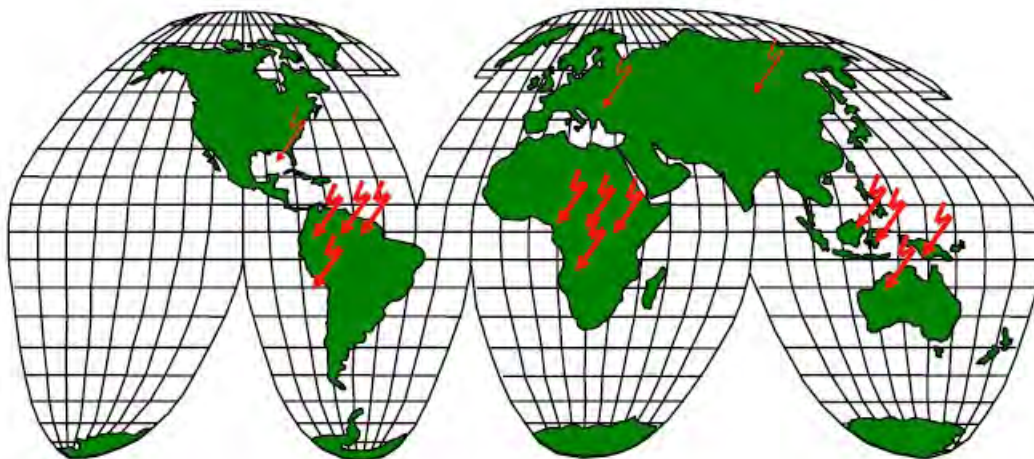


Figura 3.1; La mayor actividad se desarrolla en la zona ecuatorial continental, como Sudamérica Tropical, centro de África y sureste de Asia.



En nuestro planeta cada continente, país y región del mismo, tiene condiciones muy distintas entre sí. Ya sea por los movimientos de rotación y traslación de la Tierra, por su ubicación en los hemisferios, por la cercanía a los polos o el ecuador, topografía, hidrografía, entre otros tantos aspectos.

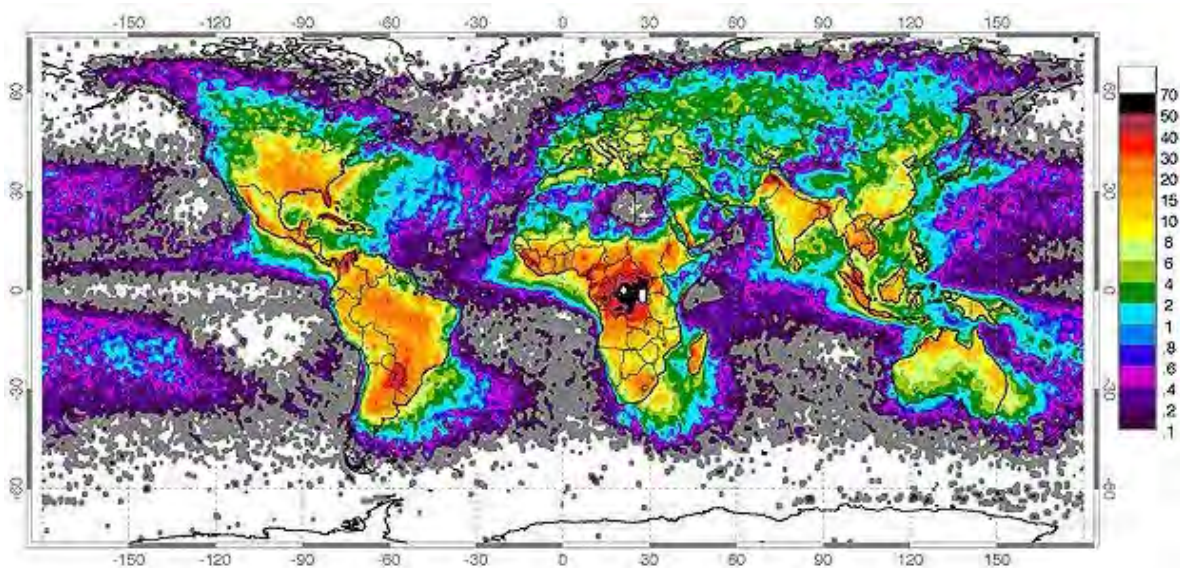
En México, hablar de la Geografía y su íntima relación con el Clima que posee el país, es tratar uno de los temas más extensos y enriquecedores para la nación. Son precisamente estas asignaturas, elementos relevantes para la manifestación de rayos.

Los aspectos que forman nuestra geografía y clima, pueden ser los tipos de suelo, latitud, altitud respecto a nivel del mar, la densidad de lluvias, sistemas montañosos, la zona o región, atmósfera terrestre, temperatura, humedad, presión, vientos, precipitaciones, estaciones del año, entre otros. La interacción de estos y otros factores, proveerán condiciones para presentarse en mayor o menor medida la actividad de descarga.

El Nivel Ceráunico ( $N_k$  ó  $T_d$ ), sea quizá el parámetro más importante de la investigación sobre los rayos (Fig. 3.2), como se ha comentado gran parte de estos estudios se basa en la estadística de su manifestación. El también mencionado índice Ceráunico, se trata de la cantidad de días tormentosos por año en un determinado punto geográfico. Los días tormentosos serán aquellos en que se escuchen truenos en dicho punto; y se registra como un solo dato, independientemente de la cantidad de truenos percibidos ese día. En el caso de observar relámpagos pero no truenos, no se registran como días tormentosos.

Cuando la estadística o información es llevada a un mapa regional o nacional, se unen con líneas los puntos con igual índice Ceráunico para generar un Mapa Isoceráunico, (Fig. 3.3).

En nuestro país, los mapas isoceráunicos han dejado de actualizarse, una de las últimas referencias más completas se encuentran entre los años 1983 y 1993, (Fig. 3.4), del Instituto de Investigaciones Eléctricas, donde se refleja que la actividad es variable en el transcurso del tiempo, a comparación de mapas como el de 1986 y 1991.



*Figura 3.2; Representación de incidencia mundial anual promedio de un rayo.*

Los datos en cada mapa por muy actual que este sea, no son precisos al 100%, ya que la densidad de descargas a tierra puede variar considerablemente de un año para otro. Para aumentar su fiabilidad, se debe tener en cuenta dicha variación de la densidad de descargas a tierra, con valores entre 0 y 20. Así mismo para la elaboración del mapa se debe tomar el promedio de al menos 5 años consecutivos.





Figura 3.3; Representación del Nivel Ceráunico en nuestro país.

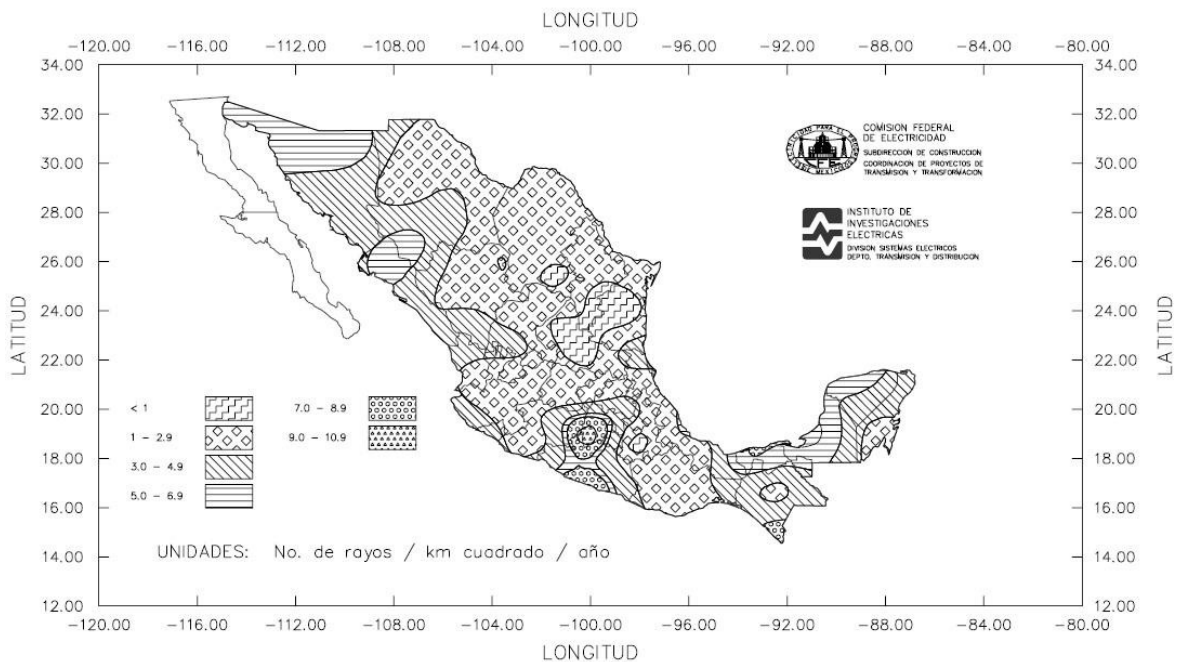


Figura. 3.4; Mapa de Isodensidad de rayos a tierra, México, 1983-1993.

México promedia 50,000 tormentas eléctricas anuales y se estima el índice ceráunico entre 30 y 50 días por año, considerado valores medios por todas las variaciones del transcurso del tiempo, así como aspectos locales, como son topografía, minerales del suelo, humedad, etc.



Así, cada región del mundo es muy distinta una a la otra y difieren en índice cerámico, mapas isocerámicos y densidad de descargas a tierra. Por eso los investigadores alrededor del globo, han propuesto relaciones empíricas sobre la interacción de densidad de descargas a tierra y el número de días tormentosos al año para una región determinada (Tabla 3.1).

Relación propuesta	Referencia	Región
$0.04 \times (T_d)^{1.25}$	Anderson/Eriksson	CIGRE
$0.053 \times (T_d)^{1.17}$	Eriksson/Potgieter	Sudáfrica
$0.026 \times (T_d)^{1.9}$	Stringfellow	Reino Unido
$0.004 \times (T_d)^2$	Muller/Hillebrand	Suecia
$0.15 \times T_d$	Brown/Whitehead/Golde	Estados Unidos
$0.023 \times (T_d)^{1.3}$	CIGRE	-
$0.036 \times (T_d)^{1.3}$	Kolokolov/Paviova	Rusia
$0.1 \times T_d$	Aiya	India
$0.15 \times T_d$	-	Nueva Guinea
$0.17 \times T_d$	Horn/Ramsey	Estados Unidos (sur)
$0.11 \times T_d$	Horn/Ramsey	Estados Unidos (norte)
$0.024 \times (T_d)^{1.12}$	De La Rosa	México
$0.03 \times (T_d)^{1.12}$	-	Brasil
$0.0017 \times (T_d)^{1.56}$	Torres	Colombia
$0.19 \times T_d$	Brooks	Mundial Templado
$0.15 \times T_d$	Golde	Mundial Templado
$0.13 \times T_d$	Brooks	Mundial Tropical

Tabla 3.1. Relación de densidad de rayos a tierra en función del Nivel Cerámico ( $T_d$ )



Es importante mencionar que por razones de confiabilidad y seguridad, es recomendable que las magnitudes y parámetros del rayo obtenidos en Zonas Templadas, no sean aplicadas directamente en Zonas Tropicales, en su lugar tomas referencias locales.

Cuando no se cuenta con un mapa de densidad de descargas a tierra ( $N_g$ ), este se puede estimar de las siguientes maneras.

- Para Zona Templada, se utilizan la relación del nivel cerámico:

$$N_g = 0.04 \times T_d^{1.25} \text{ [número de rayos/km}^2\text{-año]} \quad (IEEE)$$

$$N_g = 0.1 \times T_d \text{ [número de rayos/km}^2\text{-año]} \quad (IEC)$$

- Para Zona Tropical, se utiliza los resultados encontrados en regiones montañosas.

$$N_g = 0.024 \times T_d^{1.12} \text{ [número de rayos/km}^2\text{-año]} \quad \text{México}$$

$$N_g = 0.03 \times T_d^{1.12} \text{ [número de rayos/km}^2\text{-año]} \quad \text{Brazil}$$

$$N_g = 0.0017 \times T_d^{1.56} \text{ [número de rayos/km}^2\text{-año]} \quad \text{Colombia}$$

Donde  $T_d$  es el nivel cerámico, número de días de tormenta por año.

Hoy en día es muy sencillo tener acceso a la información del clima y la atmósfera, como datos, estadísticas, estudios, investigaciones, etc. Mediante la red se puede contar con información del momento y de primera mano de casi cualquier país y punto en el planeta.

La Organización Meteorológica Mundial, es un organismo de las Naciones Unidas, es el portavoz autorizado acerca del estado y el comportamiento de la atmósfera terrestre, su interacción con los océanos, el clima que produce y la distribución resultante de los recursos hídricos. La OMM promueve la cooperación para la





creación de redes de observaciones meteorológicas, climatológicas, hidrológicas, geofísicas y para el intercambio, proceso y normalización de los datos afines; y contribuye a la transferencia de tecnología, la formación y la investigación.

La colaboración de casi 200 estados y territorios, y el apoyo entre los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales, favorece la aplicación de la meteorología a los servicios meteorológicos para el público, la agricultura, aviación, navegación, el medio ambiente, las cuestiones relacionadas con el agua y la atenuación de los efectos de los desastres naturales.

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), es el encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país.

En cada nación, pueden existir diversos organismos, instituciones y redes de información meteorológicas, que comparten datos, infraestructura, y ofrecen un panorama global o local de algún fenómeno atmosférico para el conocimiento, uso y prevención del ser humano.

### **3.B) EFECTOS DE LA ELECTRICIDAD Y DE LOS RAYOS EN EL CUERPO HUMANO**

#### **3.B.1) LEYES FÍSICAS (Ley de Ohm, Ley de Watt, Ley de Joule).**

A lo largo de la historia del hombre -de manera empírica- debió observar muchísimos accidentes en personas a causa de un rayo. Científicamente las explicaciones comenzaron cuando se estudio que los seres vivos y en particular el cuerpo humano reaccionan al ser sometidos a descargas eléctricas. Luigi Galvani fue pionero en este estudio, sus experimentos comenzaron aplicando descargas



eléctricas a ancas de rana, las cuales sufrían contracciones involuntarias, y se establecieron los efectos producidos por la electricidad en los nervios y músculos de los animales.

Respecto al cuerpo humano, también es vulnerable a los efectos eléctricos. Nuestro sistema nervioso está específicamente diseñado para conducir corriente eléctrica, funcionando mediante el envío de pequeñas señales eléctricas; así se determinó que en él también se cumplen leyes físicas aplicadas a circuitos eléctricos, como son:

- Ley de Ohm. En una resistencia al paso de la corriente eléctrica, sometida a una diferencia de potencial, la intensidad de la corriente eléctrica es directamente proporcional a la tensión e inversamente al valor de la resistencia.  $I = \frac{V}{R}$

- Ley de Watt. La potencia eléctrica es el trabajo producido por una resistencia debida a la circulación por ella de una corriente eléctrica, esta potencia es directamente proporcional a la tensión y a la intensidad de la corriente.

$$P = V \cdot I = (R \cdot I)I = R \cdot I^2 = R \left(\frac{V}{R}\right)^2 = \frac{V^2}{R} [W]$$

- Ley de Joule. Cuando la corriente eléctrica atraviesa un conductor, éste se calienta emitiendo energía calorífica (genera un aumento de temperatura), de forma que el calor desprendido es directamente proporcional a la resistencia del conductor, al tiempo durante el cual circula la corriente y al cuadrado de la intensidad que lo atraviesa.  $E = P \cdot t; E_{calor} = R \cdot I^2 \cdot t$



### 3.B.2) LESIONES ELÉCTRICAS Y EFECTOS FISIOLÓGICOS.

Las lesiones eléctricas ocurren en el organismo cuando este cierra el circuito entre dos elementos que están sometidos a una diferencia de tensión (que se llamará “tensión de contacto”), en esta interpretación eléctrica, el cuerpo humano ocuparía la función de una resistencia, es decir, existe un punto de entrada y otro de salida de corriente eléctrica que circularía a través del cuerpo. La gravedad del percance depende del recorrido de la corriente por el cuerpo, en especial cuando pasa por órganos vitales (corazón, pulmones, hígado, etc.). Algunos de estos daños o efectos fisiológicos de la corriente son:

- Choque eléctrico. Cuando la persona forma parte del circuito eléctrico, o sea, paso directo o indirecto de una corriente eléctrica externa a través del cuerpo, identificando al menos dos puntos de contactos, uno de entrada y otro de salida de la corriente.
- Electrocuación. Llamado así cuando la persona fallece a causa del paso de corriente por su cuerpo.
- Fibrilación ventricular. Consiste en una sucesión de contracciones rápidas y desordenadas de las fibras del miocardio, el cual deja de enviar sangre a los distintos órganos y aunque se encuentre en movimiento, no sigue su ritmo normal de funcionamiento.
- Tetanización o contracción muscular. Es el movimiento involuntario de los músculos a causa del paso de energía eléctrica. Ocurre cuando la corriente es tal, que en la persona que sujeta un electrodo energizado no puede soltarlo por su voluntad. Dependiendo del recorrido de corriente, se observa en manos, brazos, músculos pectorales, etc.



- Efectos sobre el sistema nervioso, respiratorio y circulatorio. Si la corriente circula por la cabeza, repercute en el sistema nervioso, que a su vez afecta el sistema respiratorio y también circulatorio. Esto se debe a que el cerebro controla el sistema nervioso por medio de impulsos eléctricos; la corriente externa provoca alteraciones, pérdida de control muscular o desordenes de tipo nervioso. Si esto afecta la regulación de la función respiratoria, puede ocasionar un paro respiratorio y así la asfixia. También al perder el control muscular, afecta directamente al músculo vital, el corazón.
- Efectos químicos. La corriente produce electrólisis en las células provocando concentraciones ácidas.
- Efectos caloríficos. El efecto Joule dice que toda corriente eléctrica cuando circula por una resistencia (el cuerpo), produce energía calorífica. Esto se manifiesta en quemaduras, que pueden ocurrir ya sea por efecto de un arco eléctrico externo, ó por la circulación de corriente a través del cuerpo. Las quemaduras pueden ser de primero, segundo o tercer grado, pues los tejidos se dañan con temperaturas superiores a los 70°C y las células cerebrales son dañadas a temperaturas superiores a los 60 °C.
- Otros factores fisiopatológicos. Ya antes mencionados como contracciones musculares, aumento de presión arterial, dificultades de respiración, suspensión temporal del corazón, quemaduras térmicas y trauma contuso, etc.; no llegan a ser mortales, normalmente son reversibles y pueden presentarse sin fibrilación ventricular.

Los daños presentados son efectos de la electricidad en general sobre el cuerpo humano, y aunque estos efectos pueden ser diferentes en cada persona, dependerán de la magnitud de corriente que circuló por el cuerpo, del estado de la



piel en contacto, del tiempo de duración de la corriente, la frecuencia de la fuente de energía ó simplemente por la parte del cuerpo afectada. De manera particular, hablando de las condiciones de una descarga atmosférica sobre una persona, se magnifican los parámetros, así las condiciones y características como la transformación de energía eléctrica en calor, efectos de estallido y propiedades eléctricas del rayo, llegan a resultar mortales en algunas ocasiones.

La comparación de magnitudes y valores apropiados al caso, demuestran de manera clara y contundente el poder del rayo; por ejemplo, la siguiente tabla considera los efectos del choque eléctrico a 60 [Hz] cuando pasa a través del tronco del cuerpo.

<b>Manifestación y efectos que se presentan</b>	<b>Intensidad de corriente</b>
Umbral de percepción. Valor mínimo de corriente que puede sentirse. Se presenta una sensación de hormigueo. Puede ser peligroso bajo ciertas condiciones.	0.5 - 1 [mA]
Umbral de desprendimiento. Valor máximo de corriente que permite desprenderse del electrodo. Leve sensación de choque.	5 - 10 [mA]
Corriente paralizante. Límite de corriente antes de que se presente una contracción muscular. El choque provoca que se pierda el control muscular.	10 – 30 [mA]
Dolor, posible desmayo, paro respiratorio. La persona no se puede soltar de la fuente de electricidad y es posible su muerte.	50 [mA]



Umbral de fibrilación ventricular. Interfiere la coordinación del movimiento del corazón, impide el bombeo de sangre. (Depende de parámetros eléctricos y fisiológicos). 100-300 [mA]

Superando los 300 [mA], son severas las contracciones del corazón que no presenta fibrilación. Si el choque eléctrico se suspende rápidamente, el corazón probablemente reanude su ritmo normal. Pudiese detener la respiración y se debería aplicar respiración artificial. >300 [mA]

Fibrilación ventricular. El ritmo cardiaco cesa. Ocurren contracciones musculares y daño a los nervios. La muerte es muy probable. 1000 [mA]

Valores mayores a un ampere provocan paro cardiaco, quemaduras severas y es casi segura la muerte. >1 [A]

Podemos observar que el cuerpo humano soporta mínimas intensidades de corriente que van alterando su funcionamiento, así parecemos totalmente vulnerables a las grandes intensidades de los rayos, aunque existen testimonios y sobrevivientes a impactos directos e indirectos.

Durante el desarrollo de una tormenta, existen personas que llegan a mostrar irritabilidad, a sentirse inquieto por estrés electromagnético, también mencionan que sienten el aire “pesado” y “los nervios de punta”, presenta dolores de cabeza, hormigueo, etc. Con el ambiente ligeramente cargado de manera positiva por la sombra eléctrica debajo de las nubes, dicho tipo de carga provoca un incremento en los niveles de serotonina (transmisor del sistema nervioso, en términos más apropiados, sustancia química con la cual se comunican las neuronas y se





relaciona con las transmisión de señales en el sistema nervioso). En determinadas áreas de este sistema, los niveles altos de serotonina hacen a las personas más activas, y probablemente más agresivas.

### **3.B.3) IMPEDANCIA DEL CUERPO HUMANO, DESCARGAS ATMOSFÉRICAS Y SOBRETENSIONES (TENSIÓN DE CONTACTO Y TENSIÓN DE PASO).**

Si la resistencia del cuerpo humano la consideramos constante, la corriente aumenta al incrementar la tensión (Ley de Ohm). Si la resistencia del cuerpo se supone variable, la corriente aumenta con la humedad del terreno.

La impedancia que muestra el cuerpo humano, también dependerá de la humedad de la piel; se estima que la piel seca ofrece una resistencia entre 3000 y 5000 [ $\Omega$ ], mientras que al encontrarse húmeda y/o mojada, se reduce a valores entre 1000 y 1500 [ $\Omega$ ] aproximadamente; en días cálidos y húmedos la resistencia del cuerpo baja, siendo la sudoración un factor para disminuirla.

Se debe tener en consideración que para el interior del cuerpo, la resistencia disminuye considerablemente debido a una mayor proporción de agua en los tejidos internos, así, los órganos son mucho más sensibles al paso de corriente y resulta más peligrosa una trayectoria por el interior de nuestro cuerpo que por fuera de el.

El cuerpo humano puede ser visto como elemento bioeléctrico, polarizado eléctricamente y la actividad electromagnética del entorno llega a afectarlo; el rayo será entonces un pulso peligroso para las personas. Ahora, el ser humano forma parte como elemento eléctrico del modelo de descarga atmosférica, su baja impedancia lo hace vulnerable al paso de corriente, especialmente en estado mojado al haber sido alcanzado por la lluvia. La nube de tormenta tiene influencia

sobre la electricidad de los seres vivos y en el momento crítico en que se produce la chispa de descarga, da lugar a la sacudida que ocasiona la muerte, esto lo llamamos “choque ó golpe eléctrico”. Recapitulando, antes de formarse la descarga, el ser humano puede percibir la sensación del efecto corona, como un cosquilleo u hormigueo por el cuerpo y los cabellos se ponen de punta, (Fig. 3.5).

Cuando se presenta un impacto directo del rayo, este mata por “fulminación” ó “electrización”. Y de manera indirecta también puede matar por tensiones y contactos de paso.



*Figura 3.5; Impacto directo. Una persona golpeada directamente por un rayo se convierte en una parte del canal de descarga del rayo principal.*

Las lesiones mortales por esta descarga se deben al paso de corriente de varios kiloamperes de intensidad a través del interior del cuerpo, provocando un paro cardíaco, un paro respiratorio, lesiones cerebrales y las quemaduras en órganos internos; o bien la suma de daños y efectos eléctricos y químicos sobre tejidos y sistema nervioso desemboca en el paro cardio-respiratorio.

Los daños en casos no fatales ocurren generalmente cuando la mayor parte de la corriente se transfiere externamente mediante un arco voltaico que se genera entre la cabeza y el suelo, estos pueden ser quemaduras de la piel, rotura del tímpano, lesiones de retina, caída al suelo por onda expansiva, caída al suelo por agarrotamiento muscular debido a una tensión de paso ligera, lesiones

pulmonares, óseas y estrés post-traumático. Las secuelas se presentan como pérdida de memoria, trastornos del sueño, irritabilidad, náuseas, jaquecas crónicas y problemas musculares o en articulaciones.

Cuando el impacto ocurre en las cercanías y la corriente del rayo penetra por un solo punto de una superficie conductora homogénea, se produce entonces la conocida área de gradiente de potencial ó diferencia de potencial de forma radial sobre la tierra, proporcional a la intensidad de carga y resistividad del terreno, (Fig. 3.6).



Figura 3.6; Distribución del potencial en caso de descarga de rayo en una zona de terreno homogéneo.

Las consecuencias de este impacto varían de acuerdo a características como resistividad del terreno, intensidad, distancia y tiempo del impacto. En palabras

más correctas, las sobretensiones que pueden afectar a una persona son tensión de paso y tensión de contacto, (Fig. 3.7).

La tensión de paso, es la diferencia de tensión entre dos puntos de la superficie del terreno separados por una distancia “d”. Dicho de otro modo, esta diferencia de potencial se produce entre las distintas partes del cuerpo que tienen contacto con el suelo (principalmente los pies) y fluiría una corriente a través de el, (Fig. 3.7.a).

La tensión de contacto es la diferencia de tensión entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie, (Fig. 3.7.b).

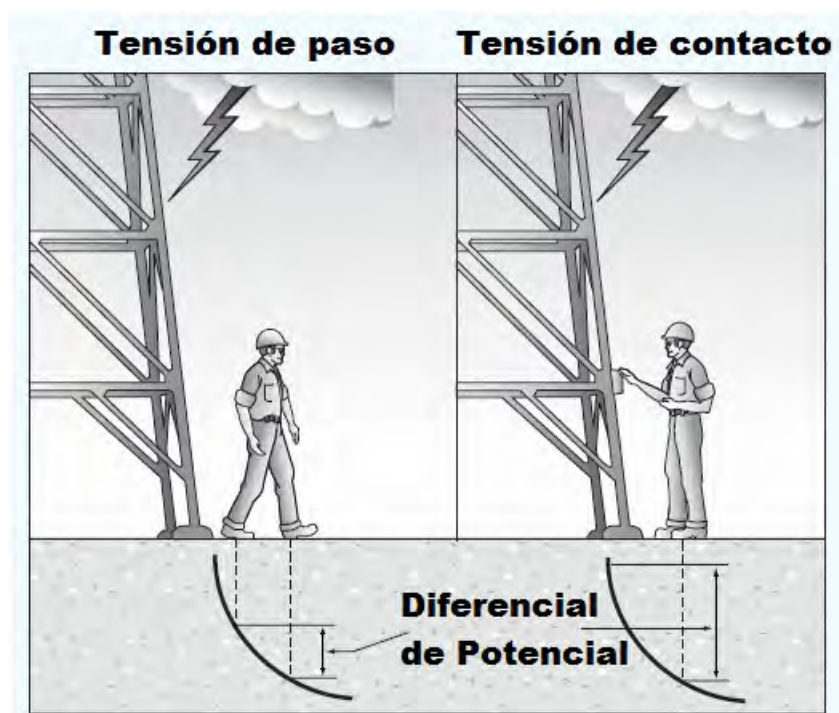


Figura 3.7. (a); Tensión de paso, generada por la diferencia de tensión entre dos puntos a una distancia “d” del impacto. (b) Tensión de contacto, ocurrida cuando se hace contacto directo con alguna estructura metálica puesta a tierra.

Debido a alguna perturbación atmosférica, fallas del equipo o instalaciones eléctricas, las altas corrientes a las que puede quedar expuesto el ser humano, obliga a tomar las debidas precauciones para minimizar el peligro. En un diseño para subestaciones, la tensión de paso es la diferencia de potencial superficial que puede experimentar una persona con los pies separados a 1[m] de distancia y sin hacer contacto con algún objeto aterrizado, (Fig. 3.8).

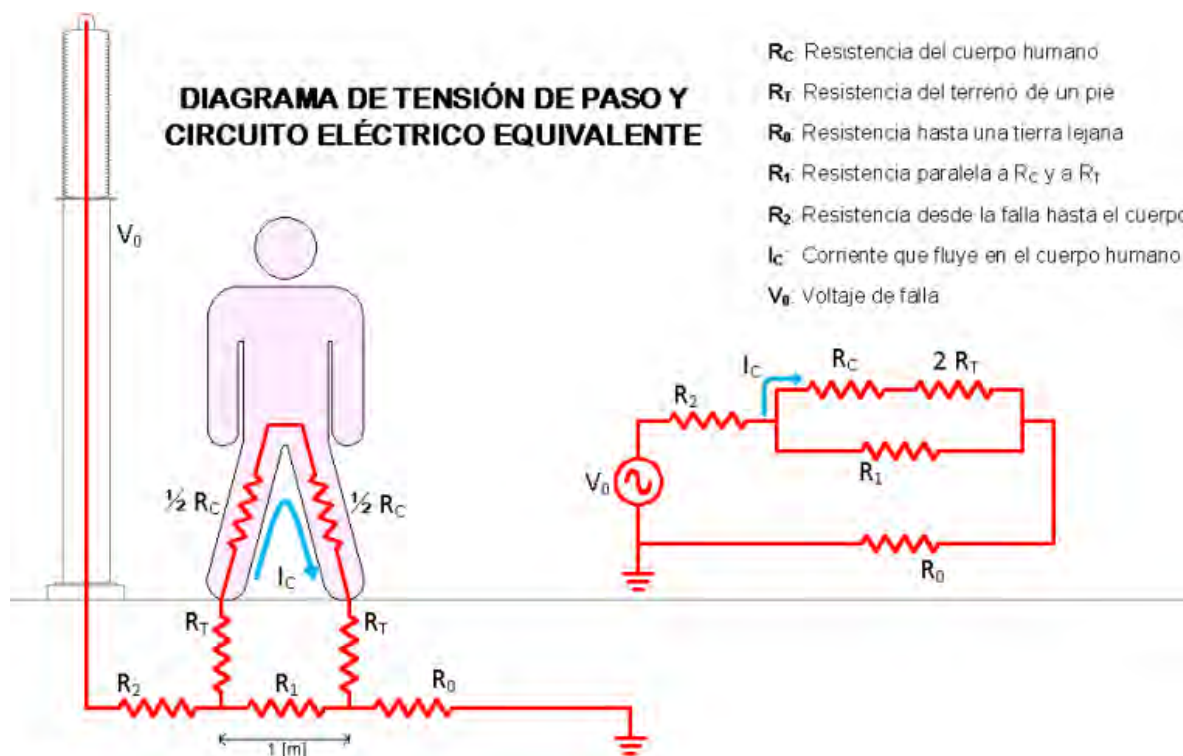


Figura.3.8; Diagrama representativo del paso de la corriente a través de las piernas, con una separación de 1[m]. A un costado, su circuito equivalente. (Fuente: STD-80-2000-IEEE).

Así mismo, la tensión de contacto será la diferencia de potencial entre la elevación del potencial de tierra y el potencial superficial en el punto en donde una persona está parada mientras al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura metálica aterrizada, (Fig. 3.9).



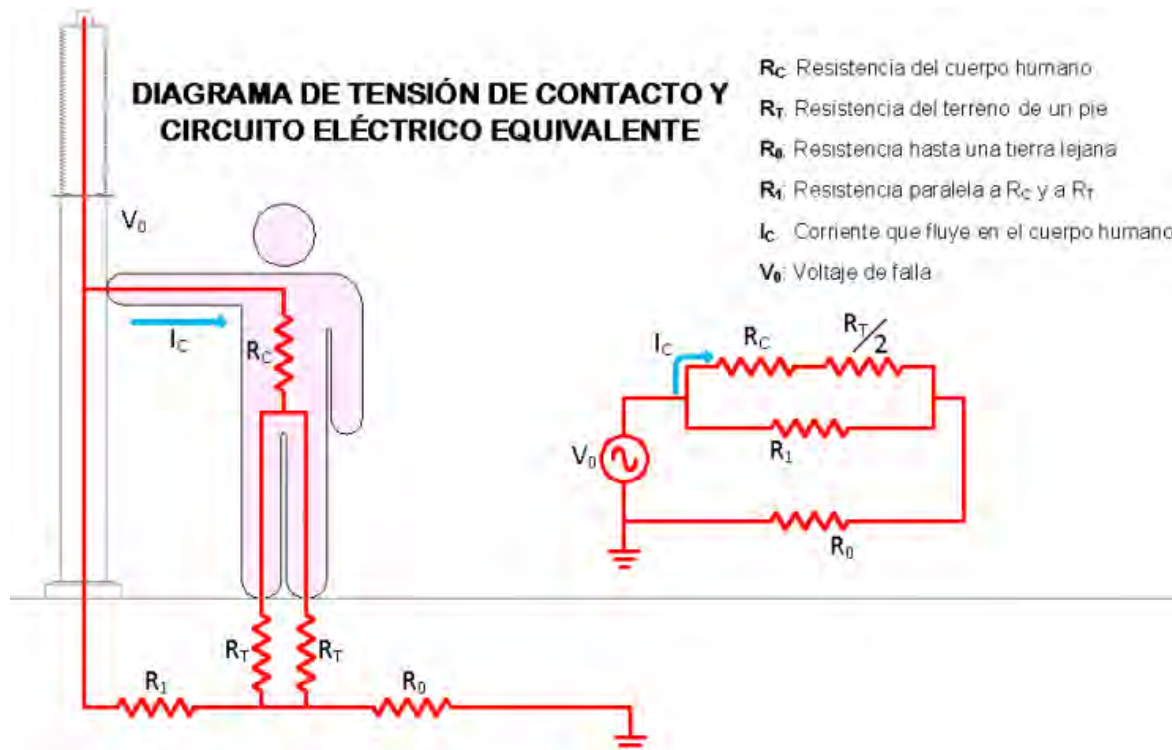
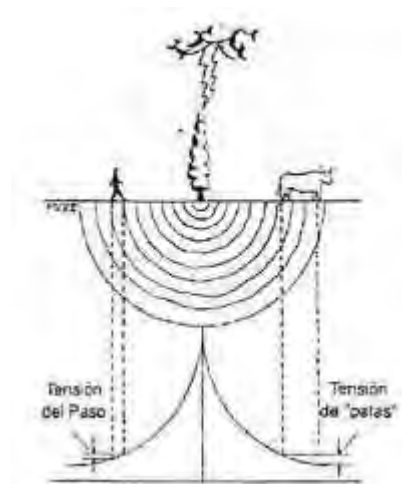


Figura 3.9; Diagrama representativo del paso de la corriente de contacto a través del cuerpo .A un costado, su circuito equivalente. (Fuente: STD-80-2000-IEEE).

Una observación en el caso de tensión de paso, es la llamada corriente de tierra; la descarga que cae en las cercanías, recorre un tramo de suelo y entra en el cuerpo, por el punto de contacto más cercano del impacto, viaja a través de los sistemas cardiovascular y/o nervioso, y sale del cuerpo, por el punto de contacto más alejado, (Fig. 3.10).





*Figura 3.10; Corriente de tierra. Cuando mayor sea la distancia entre estos puntos de contacto, mayor será la posibilidad de muerte o heridas graves. Esta situación es un factor importante de la muerte en el ganado y animales de granja.*

La naturaleza del rayo pretende encontrar el camino más directo para llegar a tierra, cuando el impacto ocurre en elementos que no están diseñados naturalmente para conducir esta descarga como árboles, edificios o estructuras, estos no soportan los efectos térmicos y dinámicos (esfuerzos electromagnéticos) provocados por las grandes cantidades de corriente. En estos casos, los caminos que tomará la corriente eléctrica ocurrida por la descarga serán los de menor impedancia como estructuras metálicas, canalizaciones de servicios o conductores de alimentación, este flujo de corriente producirá la ruptura de dieléctricos, generando arcos que provocan incendios o simplemente estropean las estructuras.

Incluso también se corre peligro por alguna descarga lateral, provocada por una diferencia de potencial entre estructuras metálicas cercanas y el mismo conductor de descarga en la protección, o el objeto que conduzca la descarga a tierra. Esta llega a magnitudes de Mega volts también peligrosas para el entorno, (Fig. 3.11).



*Fig. 3.11; Descarga lateral. La cercanía con punto que lleve la descarga a tierra, puede provocar una descarga lateral de bastante peligro.*

En resumen, los daños producidos por las descargas atmosféricas dependen principalmente de la duración y punto de impacto. Las descargas se presentan como descarga directa, descargas laterales (secundarias), por tensiones de paso, tensiones de contacto, ó por inducción de sobretensiones.

Se mencionó también que ningún daño en estructura o bienes materiales, es comparable con la pérdida de la vida humana. Una desgracia se puede presentar en un simple campo de agricultura, camino en el campo o espacio deportivo al aire libre, a pesar de contar con alguna estructura cercana que en teoría reduciría el riesgo.



# CAPÍTULO 4

## NORMAS Y SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA TORMENTAS ELÉCTRICAS (SPTÉ)

---

### 4.A) NORMAS DE PROTECCIÓN

Las investigaciones, resultados y experimentos acerca de las descargas atmosféricas causaron gran interés desde sus inicios. En 1823, se formó una comisión de ilustres personajes de la Academia de Ciencia de Francia, entre estos se encontraba Poisson, Lefevre, Girard, Dulong, Fresnel y Gay-Lussac; su misión era mejorar el pararrayos de Franklin y presentar un informe con recomendaciones sobre la protección de edificios contra descargas eléctricas. Esta información fue utilizada como estándar hasta la aparición del libro “Pararrayos, su historia, naturaleza y modo de aplicación” de Anderson en 1879.

Los comités de normalización en el área electrotécnica comenzaron a finales del siglo XIX alrededor del mundo. En el año de 1906 se creó la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). En el transcurrir de los años, aproximadamente a partir de la década de los 50’s, se produjo una revolución tecnológica a gran escala y como consecuencia también generó modificaciones en sus normativas y leyes para su regulación. Estas actividades de normalización internacional, fueron



coordinadas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Así se funda en 1947 la ISO ó International Organization for Standards.

En el campo de la ingeniería, así como en otras tantas disciplinas, es recurrente el término de “Normas o Normativa”, que se explicará a continuación para una adecuada interpretación, ya que es un complemento importante de este trabajo.

La palabra Norma, proviene del latín y significa “escuadra”. Es toda aquella ley o regla que se establece para ser cumplida y respetada, y que permite ajustar ciertas conductas o actividades. Las normas, pueden estar organizadas y enfocadas a diversas temáticas, como económicas, laborales, penales, etc.

La Normalización es el proceso de elaborar, aplicar y mejorar las normas para una aproximación ordenada a una actividad específica para el beneficio y con la cooperación de todos los involucrados. A través de este proceso se establece la terminología, clasificación, directrices, especificaciones, atributos, características, y los métodos de prueba o las prescripciones aplicables a un producto, proceso o servicio.

Son numerosas las organizaciones que durante años se han dedicado al estudio de las descargas atmosféricas y han emitido normas, esto con la finalidad de reducir los riesgos y consecuencias sobre las personas, seres vivos y estructuras. Las normativas de aplicación conjuntan la experiencia de campo con las pruebas de laboratorio.

#### **4.A.1) NORMA INTERNACIONAL Y NORMA EXTRANJERA**

En todo el planeta, se proponen lineamientos referidos a la protección contra rayos. En la unión europea, hay una mayor tendencia hacia el principio de Franklin



y métodos activos; al paso del tiempo se unificó su criterio y publicaron la Norma Internacional CEI/IEC 1024-1, “Protección de Estructuras Contra Rayos”. En esta norma, como en general todas las de su tipo, aclara que un sistema de pararrayos no puede prevenir la formación de rayos y que ningún sistema puede garantizar de manera absoluta la protección de estructuras, sin embargo, asegura que el seguimiento de sus recomendaciones puede minimizar los riesgos por estos fenómenos.

Otra norma del viejo continente, de la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional), es la IEC 61024, fue quizá el mejor documento de referencia simple para protección contra el rayo durante muchos años. Las mejoras y actualizaciones de esta norma, se encuentra en su reemplazo la IEC 62305.

En Francia se publica la NF C17-102, “Protección de las estructuras y de las zonas abiertas contra el rayo mediante dispositivos con tipo de cebado”.

En 1904, la National Fire Protection Association (NFPA) de los Estados Unidos, editó por primera vez su norma NFPA 78, con el nombre de “Specifications for Protection of Buildings Against Lightning”, y se basó en la norma británica British Lightning Code. Tenía actualizaciones periódicas, y así se llegó a la NFPA 780. Siendo esta norma de uso voluntario, se tomó como referencia por muchas jurisdicciones regionales, agencias gubernamentales, y así fue adoptada generalmente en todo el país convirtiéndose en un Código Nacional.

Algunas de las normas eléctricas más consultadas y representativas son:



ANSI	American National Standards Institute	Estados Unidos
BS	British Standards	Gran Bretaña
IEC	International Electrotechnical Commission	Suiza
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Estados Unidos
NEC	National Electrical Code	Estados Unidos
NEMA	National Electrical Manufacturers Association	Estados Unidos
NFPA	National Fire Protection Association	Estados Unidos

En nuestro tema de protección contra descargas atmosféricas, las normas de mayor consulta son la IEC 62305, la NFPA 780, la NF C 17-102 y la NTC 4552. Aunque coincidan en bastantes puntos, se toman como referencia porque son el resultado de los estudios e investigaciones con características propias de una región, localidad o país. Prácticamente en todas las normas se pueden encontrar errores, desde pequeños como las unidades de medidas, hasta frases ambiguas, confusas, que dejan al aire algunos aspectos que son cubiertas por la subjetividad del responsable, creencias u otros factores que lo llevan a una u otra determinación. Si bien es un documento de consulta, se espera que sea lo más claro posible.

Estos son algunos comentarios destacables de dichas normas:

- IEC 62305      Protección contra el rayo.





Esta norma Se divide en cuatro secciones: 1) Principios Generales; 2) Evaluación del riesgo; 3) Daño físico a estructuras y riesgo humano; 4) sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras.

La norma IEC-62305 está basada en pararrayos tipo “Franklin” y especifica la colocación de supresores de picos transitorios de sobretensión. Ambos, pararrayos y supresores dependen de un buen aterramiento.

- NFPA 780      Sistemas de protección contra descargas atmosféricas

Norma Americana (Estados Unidos). Ofrece requisitos de instalación en los sistemas de protección contra rayos. Sus documentos tratan la protección contra descargas atmosféricas de edificios y estructuras, recreación, etc., y cualquier otra situación que involucra peligro del rayo a las personas o propiedad, exceptúe esos conceptos que utilizan sistemas con dispositivo de cebado en sus terminales aéreas.

- NFC 17 102      Protección de las estructuras y de las zonas abiertas contra el rayo mediante pararrayos con dispositivo de cebado.

Norma Francesa. Comenta en su análisis: “este documento describe las principales disposiciones destinadas a asegurar la protección de los edificios contra los impactos de rayos directos por pararrayos con dispositivo de cebado. El principio de la protección de los edificios contra el rayo se basa en el modelo electrométrico”.

- NTC 4552      Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos).

Norma colombiana, modificada de la norma IEC 62305. Establece las medidas que se deben adoptar para lograr la protección eficaz contra los riesgos asociados



a la exposición directa o indirecta de personas, animales, equipos y el entorno a las descargas atmosféricas.

Finalmente, en documentación emitida por el gobierno de nuestro país, se define la norma Internacional y la Extranjera, de la siguiente manera.

La Norma Internacional, es el lineamiento o documento normativo que emite un organismo internacional de normalización u otro organismo internacional relacionado con la materia, reconocido por el gobierno mexicano en los términos del Derecho Internacional.

La Norma Extranjera, es la norma que emite un organismo o dependencia de normalización público o privado reconocido oficialmente por otro país.

#### **4.A.2) NORMA NACIONAL**

En nuestro país, la Normatividad Mexicana es una serie de normas cuyo objetivo es asegurar valores, cantidades y características mínimas o máximas en el diseño, producción o servicio de los bienes de consumo entre personas morales y/o físicas, sobre todo los de uso extenso y fácil adquisición por el público en general. La Ley Federal sobre Metrología y Normalización, contiene un apartado al respecto, Título Tercero, Capítulo II, “De las Normas Oficiales Mexicanas y de las Normas Mexicanas”.

La Norma Oficial Mexicana (por sus siglas conocidas como normas NOM), se refiere a la regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias competentes a través de sus respectivos Comités Consultivos Nacionales de Normalización, conforme a las finalidades en el artículo 40 de la Ley sobre Metrología y Normalización. Establece reglas, especificaciones,



atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se le refieran a su cumplimiento o aplicación.

La NOM es de uso obligatorio para quien cae dentro del alcance de la aplicación de las mismas, y cuando las actividades o productos se hagan durante la vigencia de la misma.

La Norma Mexicana (por sus siglas conocidas como NMX), se trata de la norma que elabora un organismo nacional de normalización, o bien la Secretaría de Economía, en los términos de esta Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Las normas NMX son de uso aplicación voluntaria, salvo en los casos en que los particulares manifiesten que sus productos, procesos o servicios son conformes con las mismas. Este tipo de norma puede ser obligado su uso si es referida en una NOM para realizar algo.

El Capítulo III (De la Observancia de las normas), en su artículo 54 de la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización, nos indica que las normas mexicanas, serán la referencia para determinar la calidad de productos y servicios de que se trate, particularmente para la protección y orientación de los consumidores. Dichas normas en ningún caso podrán contener especificaciones inferiores a las establecidas en las normas oficiales mexicanas.

El procedimiento para aplicar una norma, comienza con la creación o adopción de un estándar para algún producto o servicio. El CENAM (Centro Nacional de Metrología) cuenta con diferentes comités técnicos, quienes crean, estudian y/o adaptan esos estándares, en el caso de ISO sus estándares pueden ser obligatorios por algún acuerdo internacional el cual debió ser ratificado por el



Senado de la República como cualquier tratado internacional, en el caso de los emitidos por un organismo oficial regional o nacional de otro país como el Comité Europeo de Normalización de la Unión Europea, o la ANSI de los Estados Unidos.

Los estándares mencionados, pueden ser tomados íntegramente de su fuente con la correcta traducción a nuestro idioma, además adecuarla al estándar de la normatividad mexicana. Los Derechos legales para el uso del contenido intelectual del contenido de las fuentes, deben ser adquiridos por la CENAM o la DGN (Dirección General de Normalización), lo cual puede ser librado por los tratados internacionales previos, como lo son para los procedimientos generales para la evaluación de la conformidad emitidos por ISO y que se nombran en México con un doble nombre.

En muchos países, pero puntualmente en el caso de México, su condición geográfica y comercial con E.U.A, implican una semejanza a sus condiciones, los comités técnicos crean un estándar nacional adaptando las ideas generales del estándar extranjero, lo que implica en ocasiones la obtención de los derechos de la obra original. Otro caso es la adopción u homogenización de un estándar en común, en el cual mediante un tratado internacional por el cual la parte técnica se deja a un país o a ambos países, obligados ambos a acatar sin modificación.

Las normas que se presentan en México, obligan a la protección contra descargas atmosféricas, solo a algún tipo de edificaciones, sin establecer el método de una manera concreta, quedando expuesta a interpretaciones ambiguas. La mejor recomendación, es también estudiar y emplear normas de otros países, donde se tiene una mayor reglamentación, experiencia y sea congruente a las normativas nacionales.



Normas de nuestro país:

- NOM-001-SEDE-2005; INSTALACIONES ELÉCTRICAS, SECRETARÍA DE ENERGÍA.

La estructura de esta Norma Oficial Mexicana (en adelante NOM), responde a las necesidades técnicas que requiere la utilización de las instalaciones eléctricas en el ámbito nacional, se cuida el uso de vocablos y se respetan los términos habituales, para evitar confusiones en los conceptos. Asimismo se han ordenado los textos procurando claridad de expresión y unidad de estilo para una más específica comprensión. Lo que hará más fácilmente atendible sus disposiciones.

El objetivo de esta NOM es establecer las especificaciones y lineamientos de carácter técnico que deben satisfacer las instalaciones destinadas a la utilización de la energía eléctrica, a fin de que ofrezcan condiciones adecuadas de seguridad para las personas y sus propiedades, en lo referente a la protección contra: los choques eléctricos, los efectos térmicos, sobre corrientes, las corrientes de falla y sobretensiones.

El cumplimiento de las disposiciones indicadas en esta norma garantiza el uso de la energía eléctrica en forma segura; asimismo esta norma no intenta ser una guía de diseño, ni un manual de instrucciones para personas no calificadas.

En julio del 2012, la Secretaría de Energía publica en el Diario oficial de la Federación, el Proyecto de la norma oficial NOM-001-SEDE-2012-Instalaciones Eléctricas (utilización), que sustituirá a la edición 2005.

Dicho proyecto, se emite para consulta, sugerencias y comentarios para aporte y mejora del documento, en un periodo de 60 días. También cuenta con aclaraciones y nuevas secciones que se han producido en el ámbito de equipos o instalaciones eléctricas durante los últimos años.



- NOM-022-STPS-1999; ELECTRICIDAD ESTÁTICA EN LOS CENTROS DE TRABAJO, CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE. SECRETARIA DEL TRABAJO Y PREVISIÓN SOCIAL

Su objetivo es establecer las condiciones de seguridad en los centros de trabajo para prevenir los riesgos por electricidad estática.

Dicha norma rige en todo el territorio nacional y aplica en todos los centros de trabajo donde se almacenen, manejen o transporten sustancias inflamables o explosivas y que por naturaleza de sus procesos empleen materiales, sustancias o equipos capaces de almacenar o generar cargas eléctricas estáticas o que estén ubicados en una zona donde puedan recibir descargas eléctricas atmosféricas.

En el año 2008, después del proceso del anteproyecto de modificación de la norma oficial mexicana, se expide la NOM-022-STPS-2008; ELECTRICIDAD ESTÁTICA EN LOS CENTROS DE TRABAJO-CONDICIONES DE SEGURIDAD.

La publicación reciente, mejora la norma y facilita su aplicación, contribuyendo a la prevención y disminución de los riesgos de trabajo ocasionados por la presencia de electricidad estática generada en los procesos o por las descargas atmosféricas.

- NMX-J-549-ANCE-2005; SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA TORMENTAS ELÉCTRICAS. ESPECIFICACIÓN, MATERIALES Y MÉTODOS DE MEDICIÓN.

Esta norma mexicana establece las especificaciones, diseño, materiales y métodos de medición del sistema integral de protección contra tormentas eléctricas, para reducir el riesgo de daño para las personas, seres vivos,





estructuras, edificios y su contenido, utilizando como base el método de la esfera rodante reconocido internacionalmente.

Se debe asegurar que el diseño del sistema de protección cumpla con la norma nacional NMX-J-549-ANCE-2005. Pero no cuenta con un carácter de obligatorio, por lo que diversas marcas entran al mercado instalando sus sistemas bajo normatividad francesa, en el mejor de los casos, o simplemente ninguna.

#### **4.A.3) 4 NORMAS EN LA UNAM**

Dentro de la Universidad, existe una dependencia administrativa y de servicio llamada Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC). Su principal objetivo es coadyuvar en el cumplimiento de los fines sustantivos de la Universidad Nacional Autónoma de México, mediante la planeación proyecto y construcción de las obras de ampliación requeridas; así como la conservación, rehabilitación y mantenimiento de edificaciones, espacios abiertos, equipos e instalaciones electromecánicas existentes que forman parte del patrimonio inmobiliario institucional.

La DGOyC, presenta una serie de recomendaciones o Actualización de la Norma Oficial Universitaria referente a las Instalaciones Eléctricas (2009), la cual tienen como objetivo establecer los criterios, requisitos y procedimientos para la planeación y diseño de las instalaciones eléctricas en las áreas que las requieran, manteniendo el nivel de servicio y seguridad en los que respecta a suministro y utilización de la energía eléctrica demandada por los usuarios de los inmuebles, para cumplir con sus funciones sustantivas de Docencia, Investigación, Difusión de la Cultura y apoyo.



Esta Norma debe ser utilizada correctamente, es de aplicación obligatoria en el diseño de las instalaciones eléctricas de la UNAM, de inmuebles nuevos, ampliaciones, remodelaciones y rehabilitaciones de las instalaciones existentes. La Norma Oficial Universitaria, obedece las disposiciones de la NOM-001-SEDE-2005, así como los principios correctos de la Ingeniería, para poder realizar Instalaciones Eléctricas seguras, flexibles y económicas.

En este documento encontramos apartados a diversos puntos del diseño eléctrico, como alumbrado, receptáculos, motores, circuitos derivados, alimentadores generales, sistemas de emergencia, tableros de baja tensión, subestaciones, métodos de instalación y especificaciones, destacando para nuestro trabajo el de sistemas de tierra y sistemas de pararrayos.

Las consideraciones del documento universitario sobre los temas de sistemas de tierra, y sistemas de pararrayos, así como otros apartados de normas y especificaciones, serán tomados en cuenta para la parte final de este capítulo, por tratar puntos importantes para el desarrollo de este trabajo, dichos documentos son la NOM-001-SEDE-2005; NOM-022-STPS-2008; la NFPA 780 (Standard), 1997; y la NF C 17-102, y el libro Esmeralda de IEEE Standard 1100, 1992.

#### **4.B) SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA TORMENTAS ELÉCTRICAS (SPTE)**

Las normativas en cuestión de pararrayos, pretenden definir un tipo de instalaciones donde la prioridad sea la protección de las personas y animales. El principio común es adoptar un sistema que reduzca la incidencia de rayos en la instalación, pretendiendo interceptar el rayo antes de que este choque con la



estructura que se desea proteger, y posteriormente dirigir toda la corriente por un conductor de baja resistencia, de manera correcta y segura a que se disipe en tierra y así evitar posibles daños a causa de la descarga.

En pocas palabras, el rayo es la representación de la saturación de carga eléctrica entre nube y tierra, así el diseño e instalación de los equipos para Sistemas de Protección Contra Tormenta Eléctrica (SPTE), que consideren las especificaciones de las diversas normas, reducen el riesgo de daño que pueda provocar un rayo; cabe destacar que su aplicación no es garantía de una absoluta protección, a personas o estructuras.

En el diseño de una protección más eficaz, se debe considerar un sistema externo de protección contra tormentas eléctricas (SEPTE) el cual está formado por elementos para interceptar, conducir y disipar la corriente de rayo; y un sistema interno de protección contra tormentas eléctricas (SIPTE) basado en uniones equipotenciales, blindaje electromagnético, puesta a tierra y protección contra transitorios.

En función de la norma NMX-J-549-ANCE-2005, considera tres partes fundamentales para un SPTE, la Valoración de riesgo, el diseño de SEPTE y el diseño del SIPTE.

#### **4.B.1) VALORACIÓN DE RIESGO**

En el análisis y diseño de un sistema integral de protección, comenzamos con la valoración de riesgo, cuyo objetivo es evaluar, en términos de probabilidad, la incidencia de un impacto de rayo sobre una estructura tomando en cuenta la complejidad del fenómeno del rayo. Este cálculo, permite definir las características



y ubicación de los elementos de todo el SPTE, incluso determina la necesidad de instalar el sistema externo.

El valor a calcular, es la frecuencia anual promedio de rayos directos a una estructura ( $N_0$ ).

$$N_0 = N_g \times A_e \times 10^{-6}$$

En donde:

$N_g$  densidad promedio anual de rayos a tierra por  $\text{km}^2$  (densidad de rayos a tierra).

$A_e$  Área equivalente de captura de la estructura, en  $\text{m}^2$ .

En la siguiente imagen, (Fig. 4.1), se muestra el procedimiento para aplicar la Norma Mexicana.

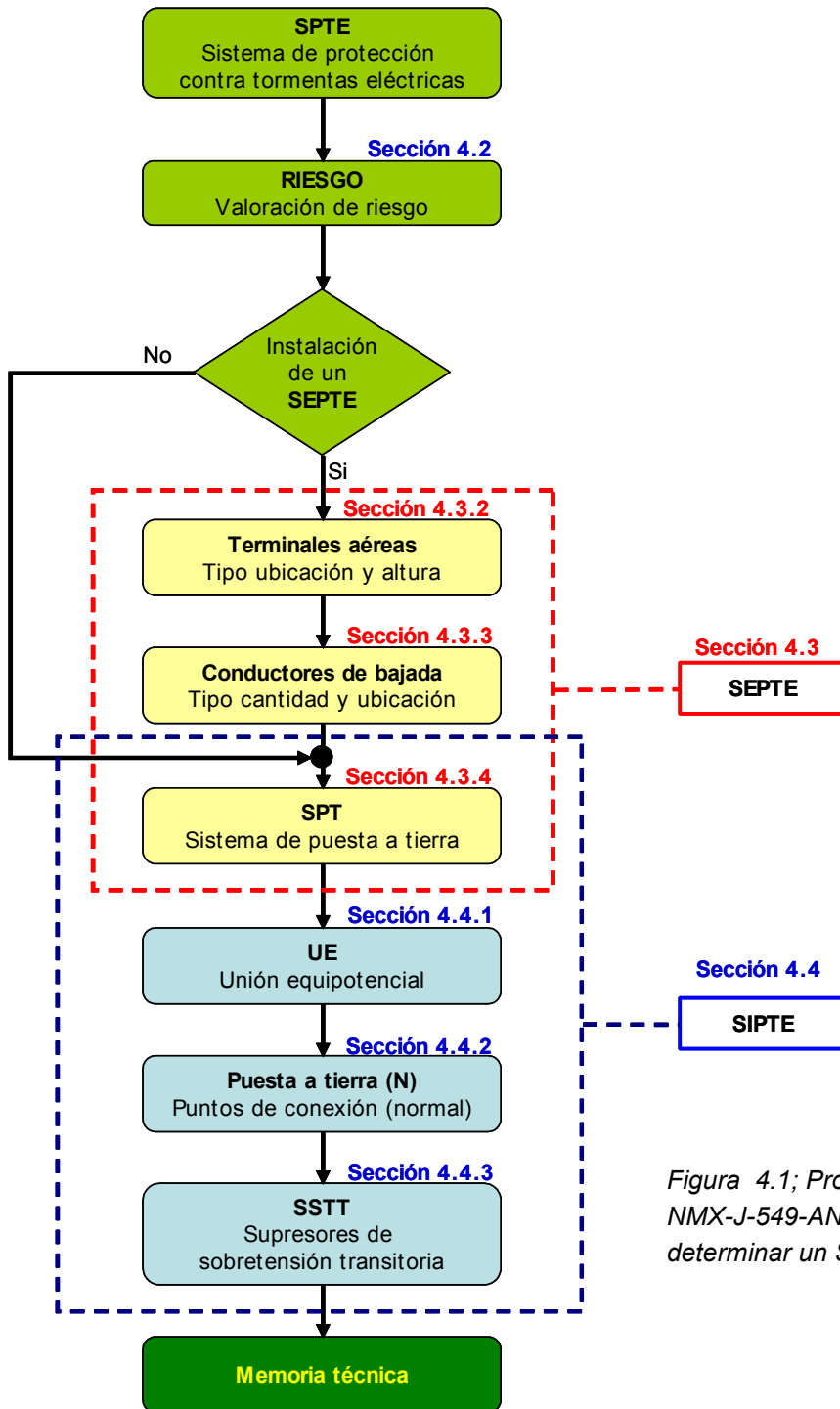


Figura 4.1; Procedimiento de la NMX-J-549-ANCE-2005 para determinar un SPTE.



El siguiente parámetro,  $N_d$ , es la frecuencia anual permitida de rayos directos a una estructura, en otras palabras, es el riesgo permitido de incidencia de un rayo directo a una estructura, definida por su tipo, uso y contenido. Estos valores se aprecian en la tabla 4.1, (combinación de la tabla 1 y 2 pertenecientes a la NMX-J-549-ANCE-2005).

Estructuras comunes	Efectos de las tormentas eléctricas	Frecuencia ( $N_d$ )	*Nivel de protección recomendado
Residencia	Daño a instalación eléctrica, equipo y daños materiales a la estructura. Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra.	0.04	III ó IV
Granja	Riesgo principal de incendio y potenciales de paso. Riesgo secundario derivado de la pérdida de suministro eléctrico provocando posibles desperfectos por falla de controles de ventilación y de suministro de alimentos para animales.	0.02	II ó III
Tanques de agua elevados: metálicos. Concreto con elementos metálicos salientes.	Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra, así como posibles daños al equipo de control de flujo de agua.	0.04	III
Edificios de servicios tales como: Aseguradoras, centros comerciales, aeropuertos, puertos marítimos, centros de espectáculos, escuelas, estacionamientos, centros deportivos, estaciones de autobuses, estaciones de trenes, estaciones	Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	0.02	II





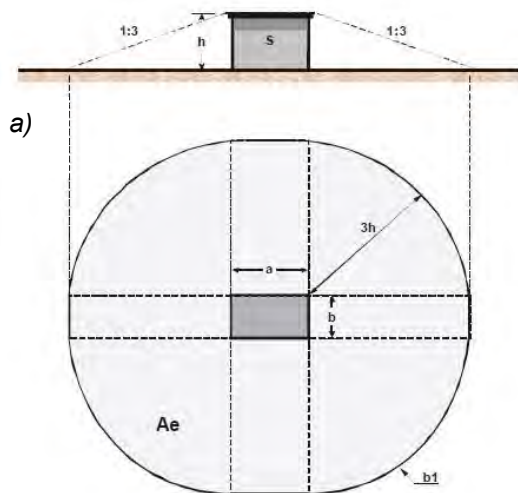
de tren ligero o metropolitano.			
Hospital Asilo Reclusorio	Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	0.02	I ó II
Industria tales como: Máquinas herramientas, ensambladoras, textil, papelería, manufactura, almacenamiento no inflamable, fábrica de conductores, fábrica de electrodomésticos, armado equipo de cómputo, muebles, artefactos eléctricos, curtiderías, agrícola, cementeras, caleras, laboratorios y plantas bioquímicas, potabilizadoras	Efectos diversos dependientes del contenido, variando desde menor hasta inaceptable y pérdida de producción.	0.01	I ó II
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de vestigios culturales irremplazables	0.02	II
Edificios de telecomunicaciones	Interrupciones inaceptables, pérdidas por daños a la electrónica, altos costos de reparación y pérdidas por falta de continuidad de servicio.	0.02	I ó II
<b>NOTAS</b>			
<p><b>1</b> Para cualquier estructura común debe evaluarse el nivel de riesgo en función de su localización, densidad, altura y área equivalente de captura, para decidir la protección.</p> <p><b>2</b> Para estructuras en zonas con <b>densidad de rayos a tierra</b> mayor a 2, y si el techo de la construcción es de material inflamable (madera o paja), debe instalarse un SEPTÉ.</p> <p>* El nivel de protección I es el de mayor protección y el nivel de protección IV es el de menor protección.</p>			

Las áreas equivalentes de captura, pueden ser muy variadas y se han clasificado de tres formas en general:

1. Estructura aislada ubicada en terreno plano, con techo plano y de dos aguas, (Fig. 4.2).

Terreno plano y techo plano.

$$A_e = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2$$



Terreno plano y techo a dos aguas.

$$A_e = ab + 6hb + 9\pi h^2$$

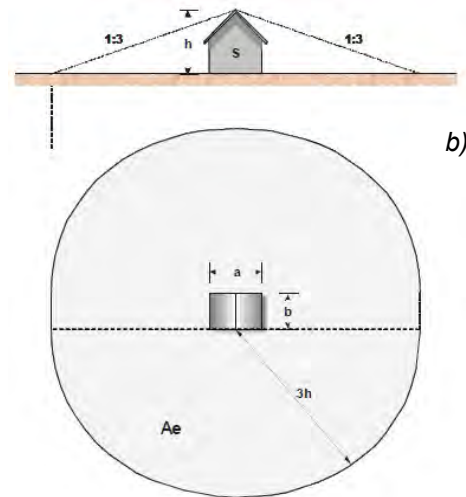


Figura 4.2; Área de captura equivalente para una estructura de terreno plano y (a) con techo plano, (b) con techo a dos aguas.

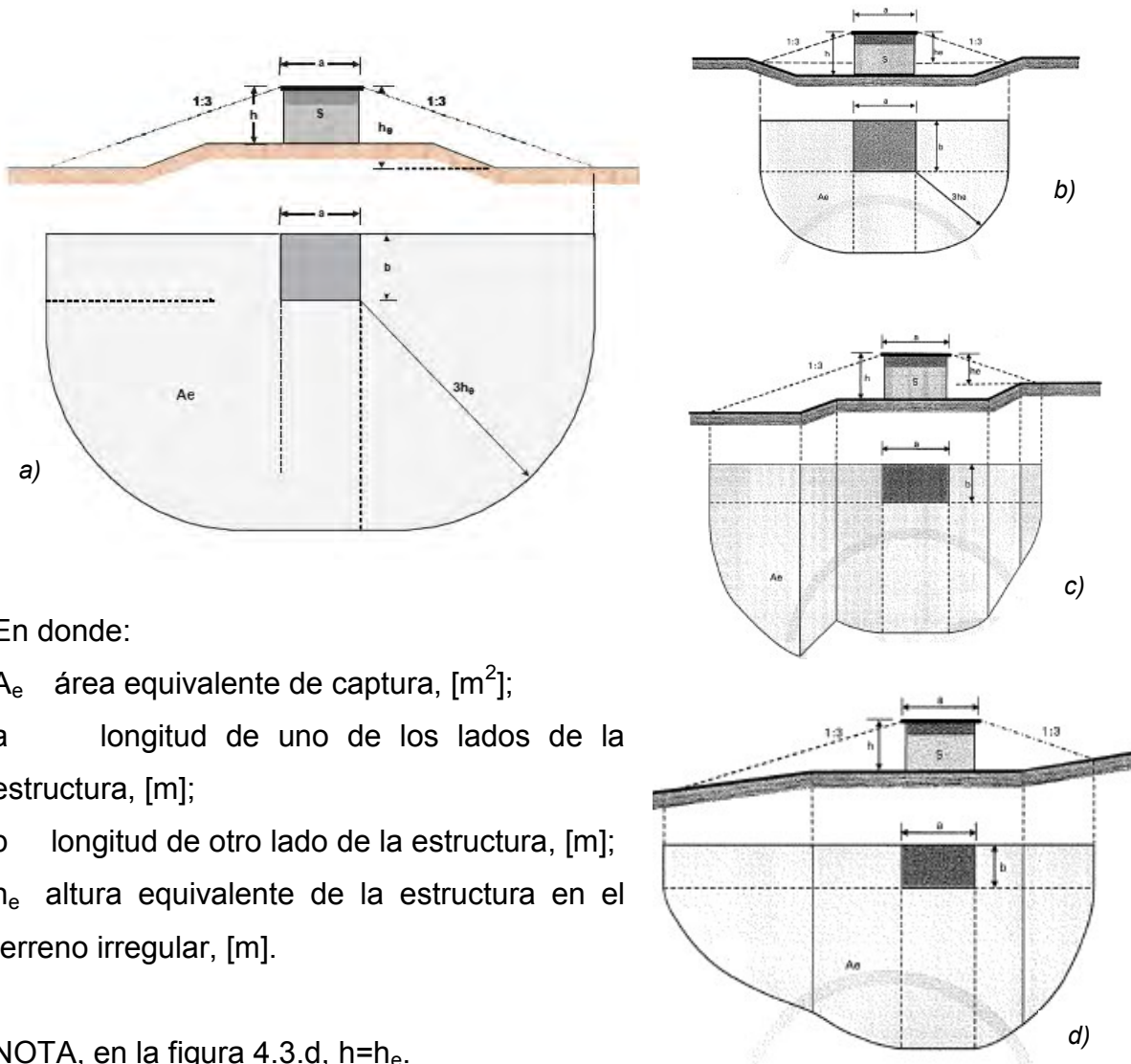
En donde:

- $A_e$  área equivalente de captura, [m<sup>2</sup>];
- $a$  longitud de uno de los lados de la estructura, [m];
- $b$  longitud de otro lado de la estructura, [m];
- $h$  altura de la estructura, [m].

NOTA.- la altura  $h$  total de la estructura o edificio a proteger debe considerar la altura de todos los equipos o componentes instalados en el techo.

2. Estructura aislada ubicada en terreno irregular, (Fig. 4.3).

$$A_e = ab + 6h_e(a + b) + 9\pi h_e^2$$



En donde:

- $A_e$  área equivalente de captura, [m<sup>2</sup>];
- $a$  longitud de uno de los lados de la estructura, [m];
- $b$  longitud de otro lado de la estructura, [m];
- $h_e$  altura equivalente de la estructura en el terreno irregular, [m].

NOTA, en la figura 4.3.d,  $h=h_e$ .

Figura 4.3; Área de captura equivalente para una estructura en terreno irregular, (a), (b), (c), (d).

3. Estructura con otras adyacentes, primero se calculan las distancias correspondientes con la siguiente ecuación y posteriormente el área equivalente de captura.

$$X_s = \frac{d + 3(h_s - h)}{2}$$

En donde:

$X_s$  distancia equivalente, [m<sup>2</sup>];

$h_s$  altura del objeto vecino, [m];

$h$  altura de la estructura bajo consideración, [m];

$d$  distancia horizontal entre la estructura y el objeto vecino, [m].

Los mencionados objetos vecinos influyen significativamente sobre el área equivalente cuando la distancia entre ellos son menores que  $3(h + h_s)$ . En este caso, sus áreas equivalente se traslapan, el  $A_e$  calcula mediante el área resultante en la intersección de las líneas perpendiculares a la línea de trazado entre el objeto a protegerse y el objeto vecino a una distancia equivalente, (Fig.4.4).

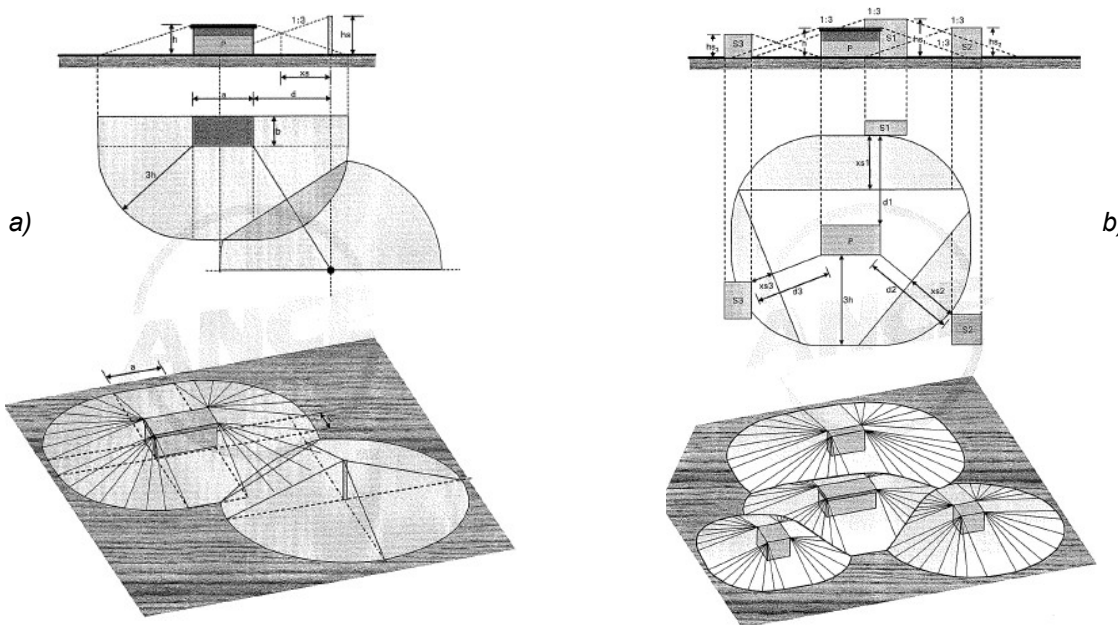


Figura 4.4; Área de captura equivalente para una estructura con objetos vecinos, (a), (b).



Después de obtener el área de captura, se calcula el valor de  $N_0$  y debe ser comparado con el valor de frecuencia media anual permitida  $N_d$ , así se puede evaluar la necesidad de protección con las siguientes consideraciones:

- a) Si  $N_0$  (estimado) es  $\leq N_d$  (tabla 4.1, valor permitido), el SEPTE es opcional.

La condición mencionada indica que el SEPTE puede o no ser instalado. A pesar de que el riesgo estimado es menor que el riesgo permitido, aún existe la posibilidad de que un rayo impacte sobre la estructura que no cuenta con el SEPTE.

- b) Si  $N_0$  (estimado) es  $> N_d$  (tabla 4.1, valor permitido) debe instalarse un SEPTE.

La cuarta columna de la tabla 4.1, es para seleccionar el nivel de protección que debe utilizarse para la ubicación y altura de las terminales aéreas, dependiendo del tipo y uso de la estructura indicado en la misma.

En cualquiera de los casos, si se coloca o no el SEPTE, la protección debe ser integral y debe ser instalado el sistema interno de protección SIPTE.

En caso de ser necesario el SEPTE, también se puede determinar el nivel de protección correspondiente, calculando la eficiencia, tabla 4.2 (tabla 5 de la NMX-J-549-ANCE-2005).

Eficiencia

$$E = 1 - \frac{N_0}{N_d}$$

Nivel de protección	Eficiencia SEPTE
I	0.98
II	0.95
III	0.9
IV	0.8



Los experimentos de Franklin crean el primer sistema de protección contra descargas atmosféricas, consistente en una “varilla metálica colocada en posición vertical sobre un punto elevado, una varilla enterrada en tierra, y un conductor se conecta ambas”; él observó que de esta manera, las descargas atmosféricas incidían en la varilla elevada, recorriendo el camino de menor resistencia hacia tierra, y así reduciría la posibilidad de daños en elementos cercanos. En otras palabras, consiste en establecer un punto de impacto (pararrayos) interceptando la trayectoria del rayo, un camino definido de baja resistencia, que conjuntamente trabajan para captar y posteriormente drenar la corriente a tierra y evitar altos niveles de voltaje durante la descarga.

Estos elementos conforman un SEPTTE, (Fig. 4.5).

- Terminales aéreas. El número de estas y su ubicación dependerán del nivel de protección seleccionado, así como la aplicación del método de la esfera rodante.
- Conductores de bajada. El número de conductores y su ubicación dependerán del tipo de sistema de protección seleccionado, puede ser aislado o no aislado.
- Sistema de puesta a tierra. El número de electrodos (ya sea individual o en arreglo), lo determina el cumplimiento del valor de resistencia adecuado.

*Fig. 4.5; Elementos que conforman el Sistema de Protección Externo contra Tormentas Eléctricas.*







## **4.B.2) PARARRAYOS Y TERMINALES AÉREAS**

Como ya se ha mencionado con anterioridad, el rayo es la reacción eléctrica causada por saturación de cargas electrostáticas que se generan entre el cielo y la tierra durante la activación del fenómeno eléctrico de una tormenta. En fracción de segundos y durante la descarga, la energía electrostática acumulada se convierte en energía electromagnética. Esta puede ser fatal si no es conducida eficazmente a la tierra. Un pararrayos es un instrumento cuyo objetivo es atraer un rayo y canalizar la descarga eléctrica hacia tierra, de modo tal que no cause daños a construcciones o personas.

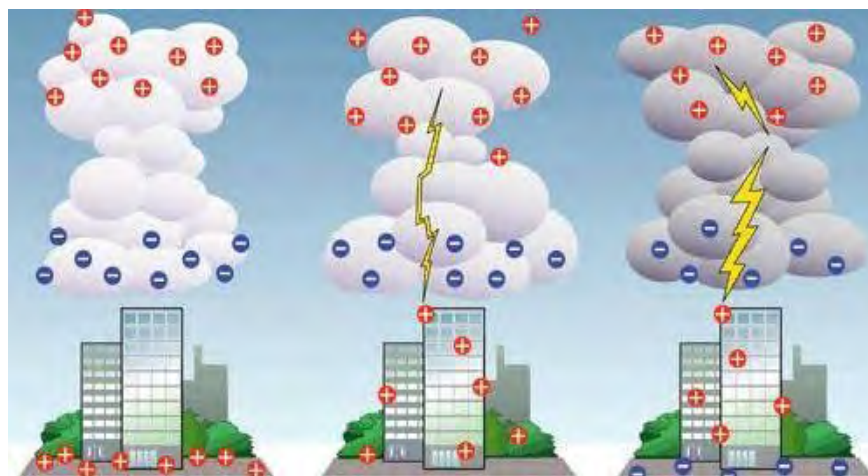
Este artefacto fue ideado por Benjamín Franklin mientras realizaba una serie de experimento con puntas agudas metálicas colocadas en contacto con la tierra, y observar su propiedad de descargar los cuerpos electrizados situados en su proximidad. Los pararrayos están compuestos por una barra de hierro coronada por una punta de cobre o de platino colocada en la parte más alta del edificio al que protegen. La barra está unida, mediante un cable conductor a tierra (la toma de tierra es la prolongación del conductor que se ramifica en el suelo, o placas conductoras también enterradas, o bien un tubo sumergido en el agua de un pozo). En principio, el radio de la zona de protección de un pararrayos es igual a su altura desde el suelo, y evita los daños que puede provocar la caída de un rayo sobre otros elementos, como edificios, árboles o personas.

### **4.B.2.a) PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

El principio del funcionamiento de los pararrayos consiste en que la descarga electrostática se produce con mayor facilidad, siguiendo un camino de menor resistividad eléctrica, por lo cual un metal se convierte en un camino favorable al

paso de la corriente eléctrica. Los rayos caen también principalmente en los objetos más elevados ya que su formación se favorece cuanto menor sea la distancia entre la nube y la tierra, (Fig.4.6).

Como elemento protector de los circuitos eléctricos, se utilizan en la actualidad dos tipos de pararrayos, los de Resistencia Variable y los de Óxido de Zinc.



*Figura 4.6; Distribución de cargas en el entorno de una nube de tormenta, y su mayor probabilidad de impacto respecto a una distancia menor entre nube y tierra.*

Debido a la forma y características del pararrayos (efecto punta), la densidad de carga en la punta del pararrayos es tal que ioniza el aire que lo rodea, de modo que las partículas de aire cargadas positivamente son repelidas por el pararrayos y atraídas por la nube, realizando así un doble objetivo:

- a) Producir una compensación del potencial eléctrico al ser atraídos esos iones del aire por parte de la nube, neutralizando en parte la carga. De esta forma se reduce el potencial nube-tierra hasta valores inferiores a los 10,000 [V] que marcan el límite entre el comportamiento dieléctrico y el conductor del aire, y por tanto previenen la formación del rayo.



- b) Conducir al rayo a tierra ofreciéndole un camino de menor resistencia. Este camino lo formarán el pararrayos, el conductor de descarga y las tomas de tierra.

Un fenómeno que debemos tener en cuenta es el de "disipación natural", que es producida por los árboles, vallas, rocas y demás objetos de forma puntiaguda, ya sean natural o artificiales, sometidos al campo eléctrico de la nube de tormenta, que irán produciendo esa compensación de potencial de forma natural, produciendo la neutralización de la carga de la nube, o al menos, reduciéndola significativamente con lo que se disminuye el riesgo al llegar la nube sobre zonas habitadas o peligrosas.

#### **4.B.2.b) TIPOS DE PARARRAYOS**

Sea cual sea la forma ó tecnología utilizada, todos los rayos tienen la misma finalidad: ofrecer al rayo un camino hacia tierra de menor resistencia que si atravesara la estructura del edificio.

Existen dos tipos fundamentales de pararrayos, el pararrayos de puntas y pararrayos reticulares también conocidos como "Jaula de Faraday":

- a) Pararrayos de puntas: formado por una varilla de 3 a 5 [m] de largo, de acero galvanizado de 50 [mm] de diámetro con la punta recubierta de wolframio (para soportar el calor producido en el impacto con el rayo). Si además se desea prevenir la formación del rayo, pueden llevar distintos dispositivos de ionización del aire. La zona protegida por un pararrayos clásico tiene forma cónica, (Fig. 4.7).

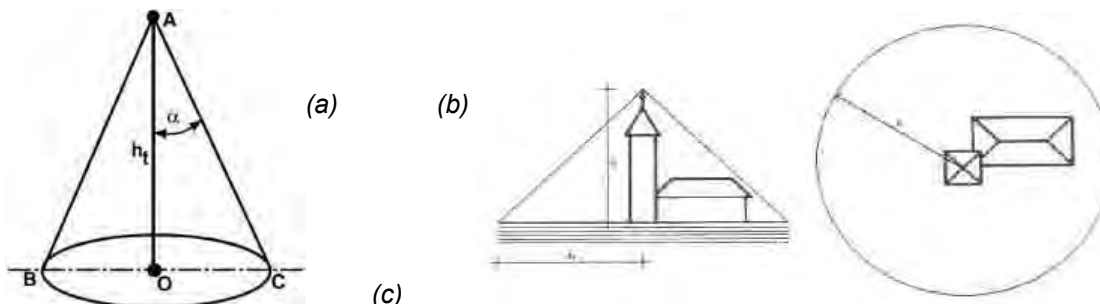


Figura 4.7; Protección cónica.

- (a) *Parámetro de la figura cónica.*
- (b) *Representación de la protección de zona (radio de protección).*
- (c) *Ejemplo de protección en un edificio.*

En este tipo de pararrayos, el efecto de compensación de potencial es muy reducido, por lo que en zonas con alto riesgo suelen usarse otro tipo de pararrayos.

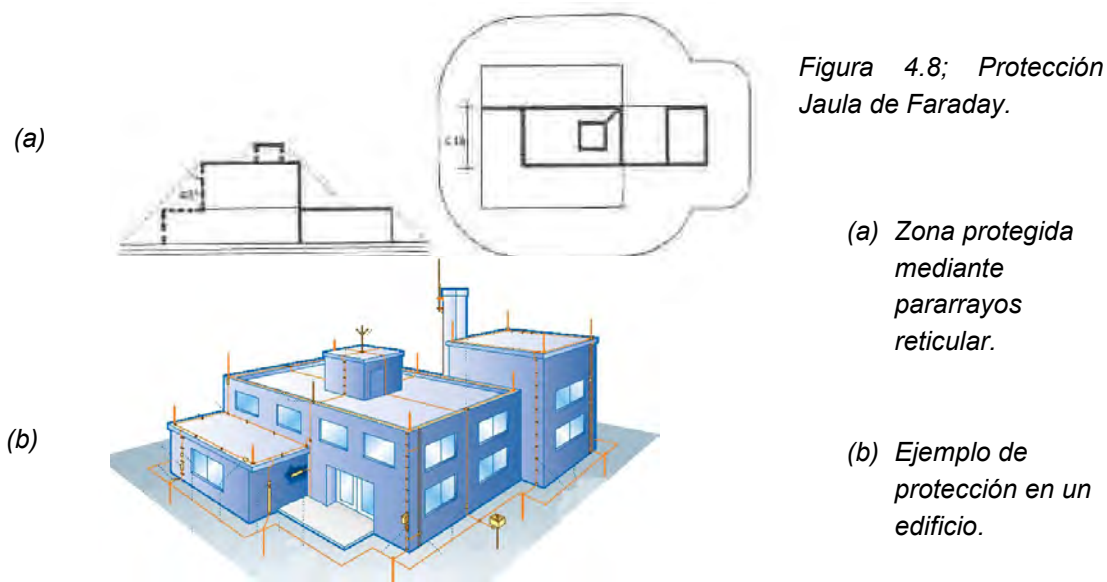
- De tipo radiactivo: consiste en una barra metálica en cuyo extremo se tiene una caja que contiene una pequeña cantidad de isótopo radiactivo, cuya finalidad es la de ionizar el aire a su alrededor mediante la liberación de partículas alfa. Este aire ionizado favorece generación del canal del rayo hasta tierra, obteniendo un área protegida de forma esférico-cilíndrica.
- Tipo ión-corona solar: este tipo de pararrayos incorpora un dispositivo eléctrico de generación de iones de forma permanente, constituyendo la Mejor alternativa a los pararrayos atómicos. La energía necesaria para su funcionamiento suele proceder de fotocélulas.
- De tipo piezoeléctrico: se basa en la capacidad de los materiales piezoeléctricos, de producir carga eléctrica a partir de los cambios en su

estructura debido a presiones externas (tales como las producidas por el viento durante un vendaval).

Para mejorar el comportamiento de los pararrayos de punta, puede usarse la técnica denominada "matriz de dispersión", que consiste en un conjunto de puntas simples o ionizadoras cuya misión es la de ofrecer una multitud de puntos de descarga entre tierra y nube, así mismo repartir esa descarga de neutralización en una mayor región de modo que se reduce la aparición de puntos con distintos potenciales que favorezcan la aparición del rayo.

b) Pararrayos reticulares o de jaula de Faraday: consisten en recubrir la estructura del edificio mediante una malla metálica conectada a tierra.

Hay que hacer notar que los edificios modernos con estructura metálica, cumplen una función similar a las jaulas de Faraday, por lo que la probabilidad de que un rayo entre en uno de estos edificios es extremadamente pequeña, (Fig. 4.8).





#### 4.B.2.c) MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE

Dependiendo del nivel de protección, el radio de la esfera rodante se puede escoger a partir de la siguiente tabla 4.3, (tabla 3 de la NMX-J-549-ANCE-2005).

Nivel de Protección	Radio de la Esfera (rsc) [m]
Nivel I	20
Nivel II	30
Nivel III	45
Nivel IV	60

Estos niveles y corrientes están dados para que con el radio escogido cualquier corriente igual o superior a la escogida sea interceptada por el sistema de protección externo y no impacte directamente a la estructura.

El posicionamiento de las puntas captadoras debe realizarse de manera tal que la esfera escogida por el nivel de protección nunca toque ninguna parte de la estructura, de este modo la esfera siempre estará soportada por algún elemento del sistema de captación

Para determinar gráficamente la altura mínima de la instalación de intercepción, se trazan arcos de circunferencias con radio igual a la distancia de impacto rsc, entre los objetos a ser protegidos y las terminales de captación, de tal forma que los arcos sean tangentes a la tierra y a los objetos o tangentes entre objetos; cualquier estructura por debajo de los arcos estará protegida por el o los objetos que conformen el arco, y cualquier objeto que sea tocado por el arco estará expuesto a descargas directas, (Fig. 4.9).



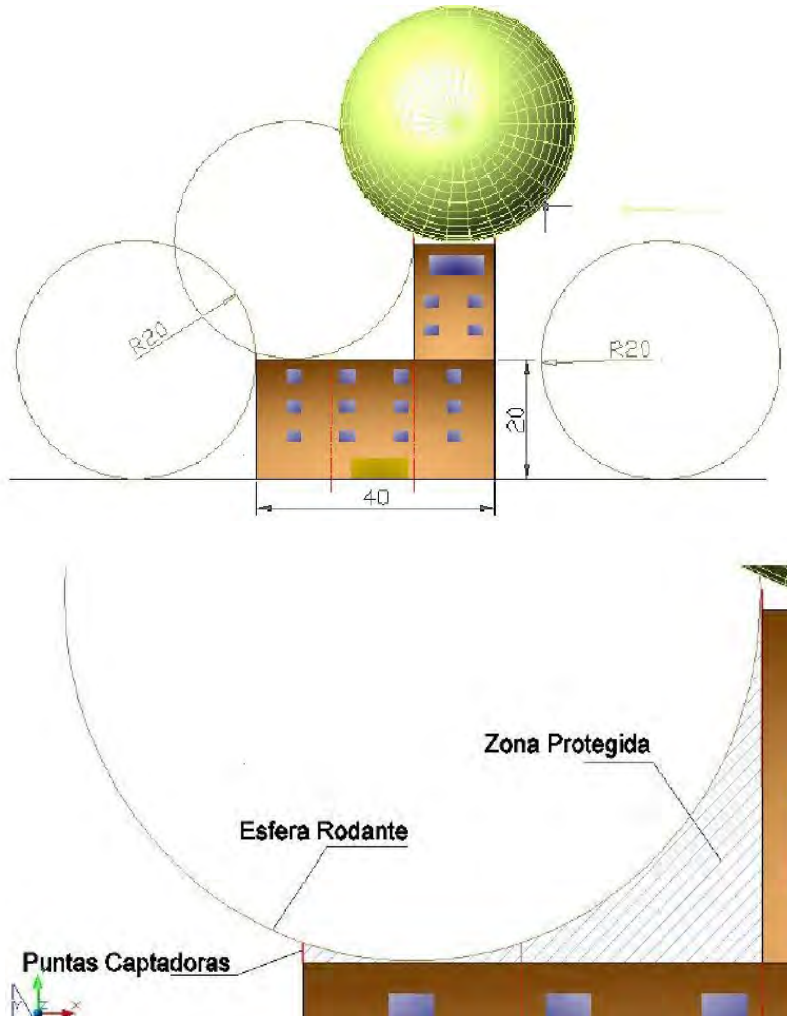


Figura 4.9; Utilización y área a proteger del método de la Esfera Rodante.

En estructuras más altas que el radio de la esfera rodante, pueden existir rayos que impacten los costados de éstas. Cada punto lateral de la estructura tocado por la esfera rodante es un punto factible de ser impactado. Sin embargo, la probabilidad que rayos impacten los costados es prácticamente despreciable para estructuras menores a 60 [m].



#### 4.B.2.d) INSTALACIÓN DE PARARRAYOS

Según las Normas Tecnológicas de la Edificación es necesario la instalación de pararrayos en los siguientes casos:

- Edificios de más de 43 metros.
- Lugares en los que se manipulen sustancias tóxicas, radiactivas, explosivas o inflamables.
- Lugares con un índice de riesgo superior a 27. Este índice se calcula dependiendo de la zona geográfica, materiales de construcción y condiciones del terreno.

Se ha demostrado que con el tiempo, las descargas de rayos sobre un pararrayos tienden a cristalizar la tierra donde están enterrados los electrodos. Esto trae a consecuencia la desintegración paulatina de los mismos y la pérdida de conductividad de la tierra, superando la resistencia de 10 [ $\Omega$ ].

La inspección visual de la bajante en todo su recorrido es fundamental para asegurarnos que está en condiciones, viendo que todos los soportes están fijados, del mismo modo, un vistazo a la punta y el cabezal captador. Si se deja de lado el mantenimiento, el rayo cuenta con una alta probabilidad de caer en otro sitio como en líneas eléctricas, árboles, e instalaciones industriales con la seguridad de daños.

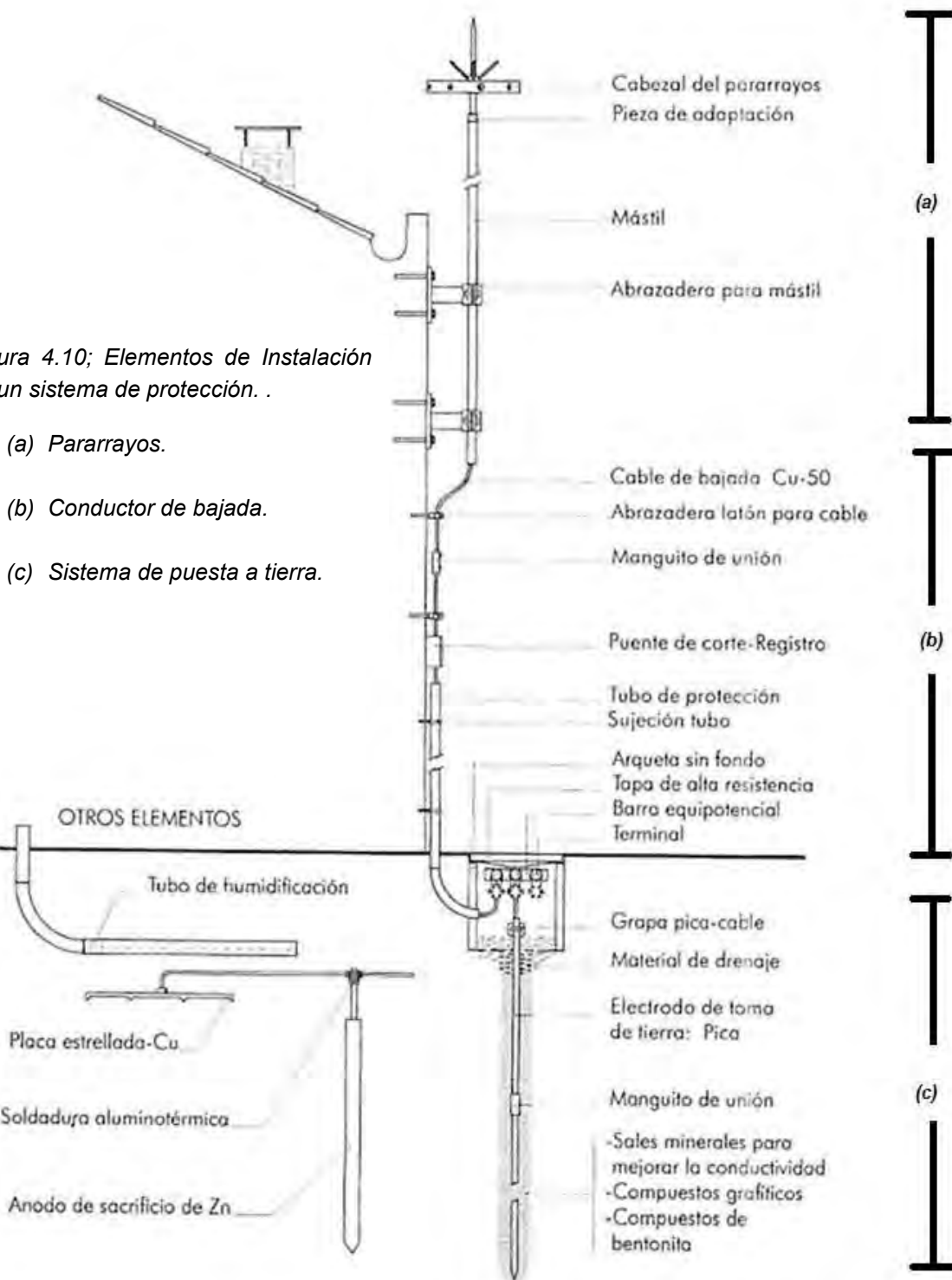
Aún contando con pararrayos, sería negligente dar por seguro una protección total. No sabemos cómo va a caer un rayo, pero si contamos con un alto porcentaje de certeza que atrayéndolos con una buena instalación para su descarga a tierra, protegeremos nuestras instalaciones.



Se sugiere también la instalación de protectores transitorios de sobretensión en el interruptor principal tanto en viviendas como en industrias, donde cualquier sobretensión en la línea será derivada a tierra actuando este como un conmutador protegiendo el resto de la instalación.

Se ha mencionado que la continuidad de los elementos del SEPTE es sumamente importante para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema, toda la instalación, uniones, conexiones, etc., son ilustrados a continuación, (Fig. 4.10).

Figura 4.10; Elementos de Instalación de un sistema de protección. .





### 4.B.3) CONDUCTORES DE BAJADA

Posteriormente a la acción de interceptar la trayectoria del rayo, la siguiente maniobra es conducir su corriente a lo largo de un conductor de baja impedancia, también conocido como “conductor de bajada” o “instalación derivador”, desde las terminales aéreas hasta el sistema de puesta a tierra. Los objetivos de dicho conductor es no sobrecalentarse y evitar elevados niveles de voltaje durante la descarga.

Cuando se habla del calentamiento de las partes conductoras y el esfuerzo electrodinámico entre conductores, nos referimos a la energía específica que pasa a través de ellos. Si le asignamos un valor de resistencia en corriente continua  $R_{cc}$ , al conductor de bajada a tierra, su energía transferida será  $E_w = R_{cc} (W/R)$  [J]. Esta deducción, nos muestra que si el valor de  $R_{cc}$  es más bajo en el conductor de bajada, la energía aportada también será menor, y esto reduciría la probabilidad de fusión y destrucción del conductor a causa del incremento de la temperatura al paso de la energía.

Este tipo de conductores es sometido a condiciones muy distintas a los empleados en instalaciones de distribución de energía eléctrica. Estas diferencias comienzan en el tipo de frecuencia en la que operan, 50 o 60 Hz, en tanto que en las descargas atmosféricas se presentan elevadas corrientes transitorias, que se llevan a cabo en tiempos muy breves. El pico de corriente llega a ser alcanzado en un par de microsegundos, y decrecerá a una velocidad más lenta, mientras que la polaridad de la descarga se mantendrá durante todo el pulso, ya que no hay una inversión en el sentido de la corriente. En su gran mayoría la energía se debe a una considerable componente continua, pero también se involucran importantes componentes de radiofrecuencia. Estas componentes producen los efectos de autoinducción e inducción mutua y de efecto pelicular (mejor conocido como



efecto piel o efecto Kevin), que también afectarán al comportamiento del conductor de bajada.

En condiciones industriales, considerando a un conductor de extensión corta e instalaciones interiores, el conductor se comporta como una simple resistencia óhmica; en tanto que las características eléctricas y efectos mencionados en el caso de descarga atmosférica afectan su comportamiento, siendo su circuito equivalente en una configuración sencilla, el de una resistencia y una inductancia en serie.

Esta inductancia que caracteriza al conductor, implica que las bajadas sean trayectorias cortas y directas a tierra, con un mínimo de curvaturas, ya que estas aumentan el valor inductivo. En caso de que la curva sea inevitable, su radio de curvatura debe ser lo mayor posible, nunca inferior a 20 centímetros o curvaturas con ángulo menor a  $90^\circ$ .

Los conductores usuales para esta tarea son de alambre o cable de cobre, sin protección o aislamiento. Por razones de seguridad siempre deben existir mínimo dos caminos de descarga a tierra; ya que al presentarse una descarga, los conductores de bajada podrían tener impedancias distintas que pueden generar lateralmente diferencias de potencia, y así presentarse las descargas o arcos laterales que propicien una situación de riesgo, además la corriente que drena cada conductor de bajada hacia tierra produce inducción mutua entre las bajadas. Esta inducción mutua incrementa la impedancia que ofrecen las bajadas, por lo cual es recomendable que estos conductores se encuentren lo más alejados posible entre sí.





#### 4.B.3.a) PARÁMETROS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO

Para el diseño de los conductores de bajada, se deben considerar los puntos siguientes:

- Materiales: altamente resistentes a la corrosión. Se utiliza principalmente cobre, acero inoxidable, hierro galvanizado en caliente, aluminio.
- Dimensiones: sección mínima de 50 mm<sup>2</sup>. En ambientes especialmente corrosivos, algunas normas recomiendan secciones mayores.
- Geometría: al ser más importante la inductancia que la misma resistencia en el conductor, se obtiene mayor beneficio trabajar con conductores planos y anchos.
- Fijación: debe ser de manera firme y permanente tanto a las terminales áreas como al sistema de puesta a tierra, puede fijarse directamente sobre la mampostería, excepto en que se considere material inflamable, en cuyo caso se emplean elementos de fijación específicos.
- Trazado: debe distribuirse uniformemente a lo largo del perímetro de la estructura mediante una configuración lo más simétrica posible, procurar caminos directos y cortos a los elementos del sistema de puesta a tierra, y evitar cambios bruscos de dirección.
- Número de bajadas: la recomendación es de mínimo dos bajadas por captador, esto para sistemas instalados sobre estructura a proteger.
- Equipos sensibles y zonas de riesgo; se debe procurar que su camino sea distanciado de circuitos eléctricos, equipos electrónicos sensibles, y zonas de riesgo de fuga o explosión, accesos para el personal, así como puertas y ventanas.



El conductor de bajada se puede formar por elementos como una solera, una barra redonda, un cable, o un componente natural (acero estructural o de refuerzo). En cualquier configuración estos conductores de bajada deben ser desnudos, excepto de que sean diseñados para el confinamiento de campo eléctrico producido por la corriente de la descarga atmosférica. En cualquier situación debe respetarse la distancia de seguridad entre bajadas.

En la siguiente tabla 4.4, se observan las dimensiones mínimas de los conductores de bajada, propuesta por la tabla 13 de la NMX-J-549-ANCE-2005.

Material	Conductor de bajada mm <sup>2</sup>
Acero	50
Cobre	16
Aluminio	25

Algunas partes de la estructura a proteger, llegan a formar parte del sistema de descarga llamándose “componentes naturales de bajada”. Estos pueden ser la estructura metálica del edificio (columnas y trabes), la armadura de acero (si fue construida con este fin, o cuente son uniones mecánicas o soldadas), y elementos de la fachada con perfiles metálicos. Estas conexiones no deben provocar problemas de corrosión, ya que afectarían la resistencia eléctrica de los elementos de la estructura así como la correcta continuidad eléctrica entre sus partes.



#### 4.B.3.b) SEPTE AISLADO Y NO AISLADO

Cuando se trate de un SEPTE aislado, los arreglos de las terminales aéreas y conductores de bajada, no deben tener contacto con la estructura a proteger, es decir, se debe conservar una distancia de seguridad “s” respecto a las partes metálicas de la instalación, este arreglo se sugiere para estas dos situaciones:

- Cuando el paso de la corriente del rayo pueda dañar la estructura.
- Cuando el paso de la corriente pueda generar un incendio o explosión.

En ambos casos, se recomienda el cumplimiento de los siguientes puntos:

- Si las terminales aéreas son independientes y separadas de la estructura, ó montadas de forma aislada a este, debe utilizarse cuando menos un conductor de bajada por cada terminal aérea.
- Si las terminales aéreas forman una red de conductores horizontales y están montadas en mástiles separados de la estructura, o montadas de forma aislada sobre esta, debe instalarse por lo menos un conductor de bajada por cada mástil soporte.
- A nivel de suelo, los conductores de bajada deben interconectarse al Sistema de Protección de Tierra (SPT).

Cuando el SEPTE es no aislado, a diferencia del caso anterior, se indica que las terminales aéreas y los conductores de bajada deben estar conectados a nivel de techo. Y a nivel de suelo, los conductores deben interconectarse con el SPT. En el caso de encontrar impedimentos físicos de la estructura para la conexión a nivel de suelo, se debe utilizar el acero de refuerzo o estructural de la cimentación para lograr el acoplamiento, para este caso también se hacen recomendaciones como las siguientes:



- Si el SEPTÉ se conforma por una sola terminal aérea, o también por terminales aéreas horizontales, deben emplearse dos o más conductores de bajada.
- Se recomienda la distribución de los conductores de acuerdo a la siguiente tabla. Estos se deben localizar cerca de cada una de las esquinas de la estructura, aplicando las sugerencias mencionadas anteriormente.

La tabla 4.5 (tabla 6 de la NMX-J-549); indica la distancia promedio de separación entre los conductores de bajada contiguo de acuerdo al nivel de protección.

Nivel de protección	Distancia promedio [m]
I	10
II	15
III	20
IV	25

- Si la pared de la estructura está hecha de material inflamable, los conductores de bajada deben localizarse a una distancia mayor a 0.1 [m] del elemento a proteger.
- Los conductores de bajada deben conectarse con los conductores horizontales alrededor de la estructura o edificio.

Como ejemplo característico de esta sección, se toma un edificio con distintas alturas en el techo y con un sistema no aislado de protección; donde se muestra la configuración principal o arreglo físico representativo de las conexiones entre terminales aéreas, los conductores de bajada y el sistema de puesta a tierra, (Fig. 4.11).

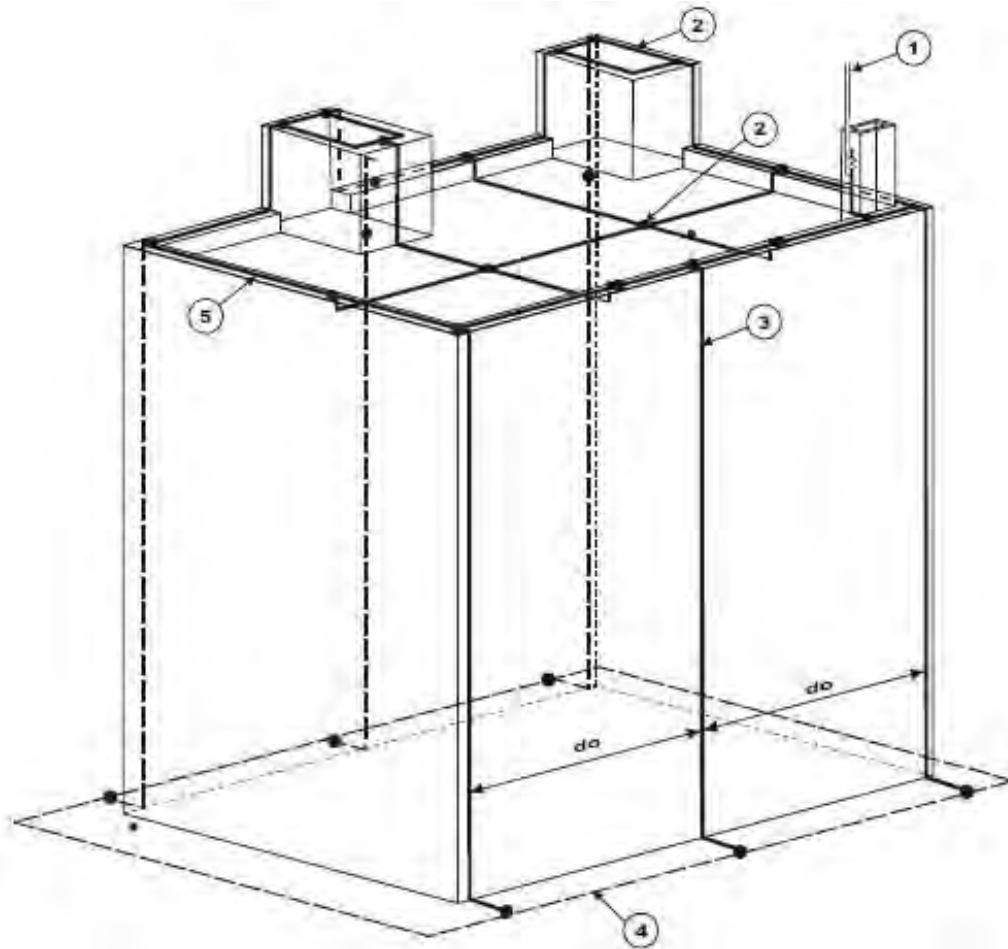


Figura 4.11; Nota.-Se indica una sola terminal aérea vertical por motivos de claridad en el dibujo.

Donde:

1. Terminal aérea vertical.
2. Terminal aérea horizontal.
3. Conductor de bajada.
4. Sistema de Puesta a Tierra.
5. Conexión de terminales aéreas y conductores de bajada a nivel de techo.

### 4.B.3.c) DISTANCIA DE SEGURIDAD

Se han mencionado numerosas recomendaciones y puntos importantes que deben ser tomados en cuenta a la hora diseñar de la protección. Por último, y no menos importante, se trata de la distancia de seguridad y rutas sugeridas para los conductores de bajada.

Las rutas del conductor de bajada, deben evitar zonas de tráfico de personas, cumpliendo con una distancia mínima de seguridad, como lo muestran las siguientes imágenes, (Fig. 4.12).

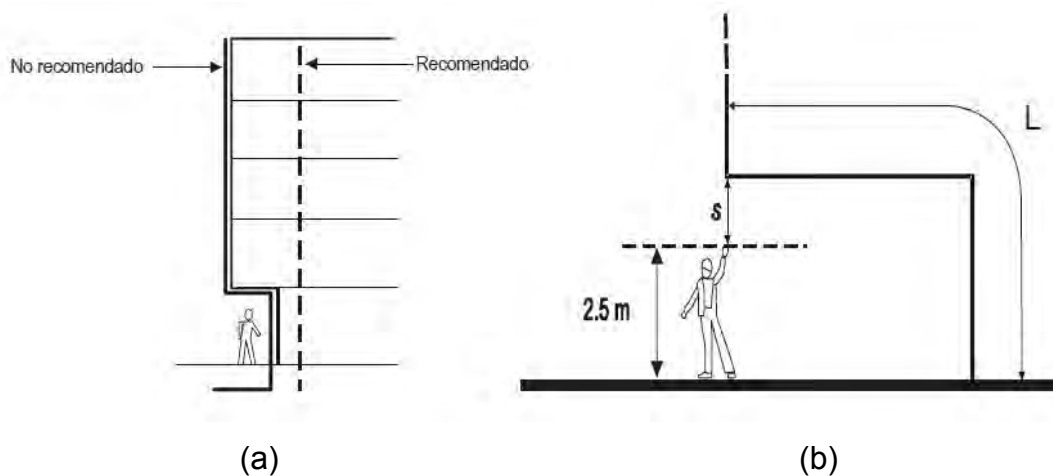


Figura 4.12; (a) Ruta recomendada para conductores de bajada en edificios con geometrías complejas como la indicada con tránsito de personas.

(b). Distancia de seguridad para el caso de un conductor de bajada en edificios con geometrías complejas. (Nota.- La altura de la persona con la mano alzada se considera de 2.5 [m]).

La siguiente ecuación se emplea para calcular la distancia de seguridad:

$$s = k_i \frac{k_c}{k_m} l \quad ; \quad d \geq s$$





Donde:

- s distancia de seguridad [m]  
 d distancia entre los elementos a evaluar [m]  
 $k_i$  depende del nivel de protección seleccionado del SEPTE  
 (tabla 4.6, TABLA 7 NMX-J-549-ANCE-2005).  
 $k_c$  depende de la configuración dimensional (Figura 4.12.a,b,c)  
 $k_m$  depende del material de separación (aire o sólido)  
 (tabla 4.7, TABLA 8 NMX-J-549-ANCE-2005).  
 l longitud del conductor de bajada desde el punto de ubicación del elemento  
 a evaluar a tierra [m]

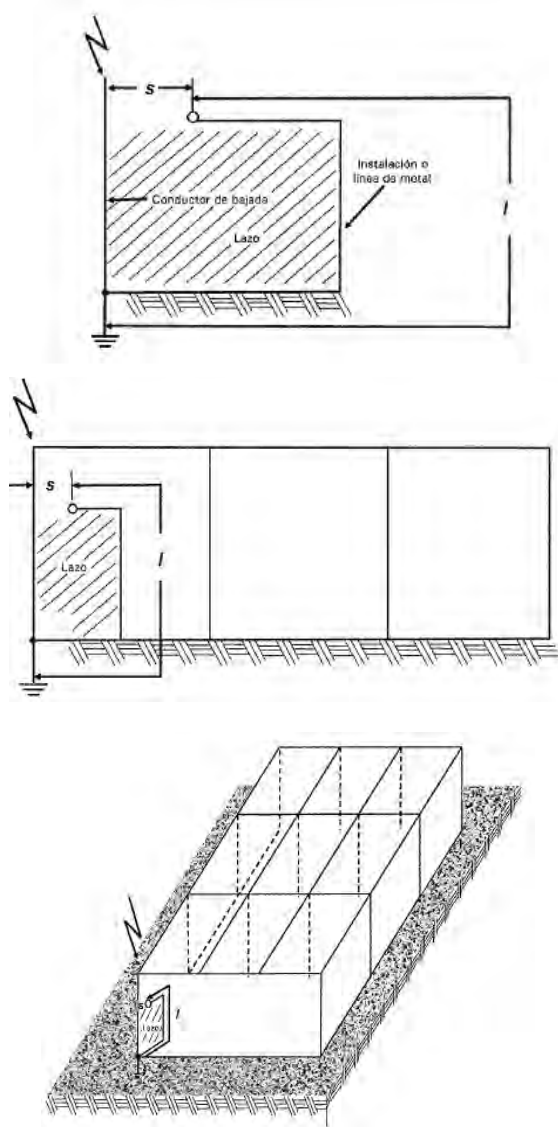
La tabla 4.6 (tabla 7 de la NMX-J-549-ANCE-2005); indica los valores de  $k_i$  para el efecto de proximidad de las instalaciones y el SEPTE.

Nivel de protección	Coefficiente $k_i$
I	0.1
II	0.075
III Y IV	0.05

La tabla 4.7 (tabla 8 de la NMX-J-549-ANCE-2005); indica los valores de  $k_m$  para el efecto de proximidad de las instalaciones y el SEPTE.

Material de separación	Coefficiente $k_m$
Aire	1.0
Sólido	0.5

El valor del coeficiente  $k_c$ , configuración dimensional, se considera en función de los números de conductores de bajada. En la siguiente ilustración, (Fig. 4.13), se muestra la selección de dicho valor.



(a); valor del coeficiente  $k_c$  para uno o dos conductores de bajada.

$$k_c = 1$$

(b); valor del coeficiente  $k_c$  para tres o cuatro conductores de bajada.

$$k_c = 0.66$$

(c); valor del coeficiente  $k_c$  para más de cuatro conductores de bajada.

$$k_c = 0.44$$

Figura 4.13; Valor del coeficiente  $k_c$ , para (a) uno o dos, (b) tres o cuatro, (c) más de cuatro conductores de bajada.



Donde:

s distancia de seguridad [m].

l longitud del conductor de bajada desde el punto de ubicación del elemento a evaluar a tierra [m].

#### 4.B.4) SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT)

En esta sección se definirán conceptos básicos que si bien están sumamente ligados, no significan lo mismo, en primer lugar tenemos puesta a tierra y tierra física. La puesta a tierra se refiere al camino que recorre la corriente desde el equipo aterrizado hasta el sistema de tierra física; mientras que esta última es el “conector” que une al Planeta Tierra con la puesta a tierra.

El objetivo de todo sistema de puesta a tierra es proveer un camino con la más baja impedancia posible para que las corrientes de falla ó bien las que son ocasionadas por fenómenos transitorios, como lo son las descargas atmosféricas que llegan a descargarse a tierra. Una puesta a tierra adecuada denota que está acoplada a través de una conexión o conexiones de suficiente baja impedancia y capacidad de conducción de corriente de tal manera que impida los aumentos en la tensión que podrían resultar en peligros o riesgos indebidos y excesivos a personas o equipo conectado a la red eléctrica.

Se debe entender que la impedancia total del sistema de puesta a tierra y no su resistencia únicamente, tenga valores bajos que permitan disipar tanto los elementos de baja frecuencia como los de alta, generalmente contenidos en la descarga.

Otros conceptos que se deben tener claro antes de continuar con este tema son: resistividad y resistencia. La resistividad, también llamada como resistencia



específica, es la propiedad que tienen todos los materiales para oponerse al paso de una corriente eléctrica. Se denota por la letra griega rho ( $\rho$ ) y se mide en ohms-metro. De manera general la resistividad se calcula con la siguiente ecuación:

$$\rho = R \frac{S}{l}$$

Donde:

R es la resistencia en ohms [ $\Omega$ ];

S es la sección transversal del conductor en [ $m^2$ ];

l es la longitud del conductor en [m].

Pasando este concepto a términos del estudio que nos compete, la resistividad la definimos como la propiedad que tiene el suelo para conducir electricidad, la cual se determina por el tipo de suelo, contenido de humedad, constitución química, temperatura, etc. Por otro lado, la resistencia eléctrica (R) es toda oposición que encuentra la corriente eléctrica a su paso por un circuito eléctrico cerrado, atenuando o frenando el libre flujo de circulación de las cargas eléctricas o electrones. Cualquier dispositivo conectado a un circuito eléctrico representa en sí una carga, resistencia u obstáculo para la circulación de la corriente eléctrica. La podemos calcular de manera general despejando R de la ecuación anterior o bien aplicando la Ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I}$$

Donde:

R es la resistencia en [ $\Omega$ ];

V es la tensión en volts [V];

I es la corriente eléctrica en amperes [A].

#### 4.B.4.a) TOMA DE TIERRA

Como antes se mencionó, el sistema de puesta a tierra sirve para proveer a la corriente de falla un camino seguro para su posterior disipación sin causar daño alguno tanto a personas o equipos conectados a la red eléctrica. Una vez que la terminal aérea ha captado el rayo, el derivador conduce a tierra su carga eléctrica para ser disipada a través de la toma de tierra, en este punto existen dos aspectos principales que se deben tener en cuenta:

- La resistencia del terreno con relación a la carga lateral.
- El potencial eléctrico en el suelo que rodea la zona a proteger.

En el esquema, (Fig. 4.14),  $I$  es la intensidad de corriente que se descarga en el conductor,  $L$  es la inductancia del camino que sigue la carga y  $R$  es la resistencia a tierra. SP puede indicar un sistema de conducciones metálicas (agua, eléctricas, telefónicas, etc.) enterradas y cuyo potencial es el de tierra.

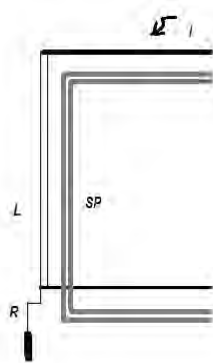


Figura 4.14;  
Edificio con sistema de  
pararrayos metálicos y de  
conducción de fluidos.

Cuando la toma de tierra del sistema de protección se encuentra separada de las conducciones metálicas, existirá una diferencia de potencial entre una y otra. Esta tensión y el riesgo de descargas colaterales están en función de la resistencia de tierra. Para decrementar dicho riesgo debe reducirse la resistencia al mínimo.



En zonas donde la resistividad es alta, dicha recomendación presenta dificultades. Una posible solución sería conectar la terminal de tierra de conducción tan cerca como se pueda de los puntos por los que éste entra en la zona protegida (edificio, casa, etc.) con lo cual la resistencia se reduce por efecto de la conexión en paralelo. El riesgo de descargas colaterales vendría determinado exclusivamente por la inductancia, siendo independiente del valor de la resistencia a tierra.

Se sugiere que todas las tomas a tierra se interconecten entre sí y con las conducciones metálicas también. Esta interconexión se le llama unión equipotencial y su fin es el de reducir las diferencias de potencial ocasionadas por un rayo cuando éste alcanza algún componente de intercepción como lo puede ser un pararrayos o antena, ya sea en un área cercana de la instalación o en la misma estructura. En el caso en el que se tengan sistemas de puesta a tierra para distintos servicios dentro de una misma instalación eléctrica (comunicaciones, servicio de energía eléctrica, etc) la resistencia a tierra del SPT, debe ser menor o igual a 10 [ $\Omega$ ] antes de la conexión con los sistemas existentes. No obstante, el uso de materiales plásticos en el sistema de suministro de agua afecta negativamente a su conexión eléctrica: si tales uniones son el único medio de descarga a tierra, puede conllevar graves riesgos desde el punto de vista de la protección contra rayos.

Con el propósito de mantener la elevación de potencial del sistema de puesta a tierra en niveles seguros, se recomienda que el valor de la resistencia a tierra se mantenga en niveles no mayores de 10 [ $\Omega$ ]. Este valor de resistencia debe cumplirse para cada arreglo de 3 electrodos por conductor de bajada, cuando estos no se encuentren interconectados.

Otro riesgo es cuando la toma de tierra se conecta con la cubierta de un suministro eléctrico o al terminal neutro de una instalación eléctrica, esto





incrementa el potencial tanto en la cubierta como en este terminal mientras dura la descarga del rayo; por lo tanto, la instalación eléctrica del edificio puede resultar dañada. Por otro lado, para evitar este peligro basta con instalar derivadores de sobretensión adecuados.

En cuanto a las conducciones de gas, el riesgo que se plantea corresponde a las consecuencias de un chispazo en presencia de una fuga accidental. Pero si la conexión de las tuberías de gas se ha realizado correctamente, el riesgo de chispazos es prácticamente imposible y obviamente, la circulación de una corriente eléctrica a través de una conducción metálica de gas nunca dará lugar a una explosión. Sin embargo, si dicha conexión se ha omitido y la distancia entre la toma de tierra del sistema de protección y las conducciones y conexiones de gas son inadecuadas, esto puede favorecer una descarga colateral que provoque una explosión. Dicho de otro modo, las tuberías de gas no deben bajo ninguna circunstancia, ser utilizadas como electrodo de puesta a tierra.

De lo anterior podemos concluir que la conexión entre la toma de tierra del dispositivo de protección y las partes metálicas de los distintos sistemas de suministro reduce notablemente el riesgo de descargas colaterales. También debemos tomar en cuenta que este procedimiento resulta más barato que los diversos métodos para disminuir la resistencia del terreno, particularmente en aquellas zonas que se encuentran en un área de moderada o alta resistividad.

Se requiere un criterio para establecer la separación mínima entre la toma de tierra y aquellas zonas metálicas cuya conexión no es necesaria. Esta distancia viene dada por la razón  $I(R/E)$ , donde  $I$  y  $R$  son respectivamente, intensidad de corriente y resistencia, y  $E$  es la rigidez dieléctrica del terreno (cuyos valores típicos oscilan entre 0.2 y 0.5 [MV/m]). Un ejemplo sería considerando un mínimo de dos tomas de tierra, cada una de 10 [ $\Omega$ ] y con igual caída de potencial, y



además se considera una intensidad de corriente de más de 100[kA], la separación mínima en el suelo arcilloso de 0.2[MV/m] será de 5[m].

#### **4.B.4.b) TERMINALES DE TIERRA**

La resistencia de equilibrio (es decir, que no tiene carga eléctrica alguna) de una terminal de tierra está sujeta a variantes estacionales y debe tenerse cuidado en su instalación. Deberá ser más profunda en lugares donde exista una pileta con agua o sea factible la congelación y debe estar alejada de objetos de masa considerable que emanen calor (donde el terreno tiende a researse).

Los cambios climáticos debidos a las diferentes estaciones del año, también son un factor a considerar, estos alteran los terrenos, especialmente los esponjosos, debido al gradual empobrecimiento del contacto entre la terminal de tierra con el terreno que lo rodea y del incremento paulatino en la resistencia de la toma de tierra. Por tal motivo, es preferible introducir la terminal en un suelo virgen.

Es poco recomendable disminuir artificialmente la toma de tierra mediante la colocación de compuestos químicos salinos debido a que este tipo de métodos sólo resulta efectivo durante un corto periodo y aumenta considerablemente el riesgo de corrosión.

Por otra parte, seleccionar el tipo de terminal de tierra viene dada por las características del terreno, su homogeneidad o estratificación, resistividad en las distintas capas, grado de humedad y el nivel de conductividad de esta agua, etc. En terrenos con alta resistividad, específicamente en los rocosos, las terminales en forma de anillo podrían considerarse como la única solución práctica.



Comúnmente, solo hay que determinar la resistividad de la superficie de cimentación.

Las planchas metálicas no son aconsejables, puesto que su utilización es muy costosa, además es difícil mantener un contacto adecuado con el terreno circundante. Casi siempre suelen recomendarse varillas como terminales de tierra. Por otro lado, una base de hormigón armado (mezcla de cemento reforzado con una armadura de barras de hierro o acero), habitual como cimiento de puntales de acero y de pilares de hormigón en la construcción moderna, puede reemplazar a las terminales de tierra. Su resistencia tiene una variación estacional idéntica a la de un electrodo de cobre enterrado cerca del cimiento, y la tasa de corrosión de su armadura es menor que la de un electrodo puesto en el mismo suelo.

En general, conforme a lo establecido en la NMX-J-549-ANCE-2005 vigente, un electrodo o terminal de puesta a tierra puede ser de cualquier tipo y forma siempre y cuando cumpla con estos aspectos:

- Material metálico.
- Tener una baja resistencia a tierra (no más de  $10[\Omega]$  para cada arreglo de 3 electrodos por conductor de bajada cuando no estén interconectados).
- Todos los materiales utilizados en el diseño de un sistema de protección contra tormentas eléctricas deberán tener alta conductividad eléctrica, durabilidad y soportar la corrosión.
- Los materiales utilizados no deben ser nocivos para el medio ambiente.
- Los que se encuentren formados por diferentes piezas metálicas deberán estar unidas por medio de soldadura.



En la siguiente tabla 4.8, se muestra “Material y dimensiones nominales mínimas de los electrodos de puesta a tierra”, conforme a la tabla 14 de la NMX-J-549-ANCE-2005.

Material	Configuración y dimensiones nominales mínimas	
Cobre	Cilindro sólido	53.5 mm <sup>2</sup>
	Cintilla	Ancho x espesor 25mm x 1.5mm
	Tubo	Diámetro interior 13mm Espesor de pared mínimo 1.8mm
	Placa plana	500mm x 500mm Espesor mínimo 1.52mm
	Lámina (arreglos)	0.25m <sup>2</sup> Espesor mínimo 0.711mm
	Cable trenzado	53.5mm <sup>2</sup>
Acero	Tubo galvanizado	Diámetro interior de 19mm Espesor de pared mínimo 2.71mm Espesor mínimo de recubrimiento 0.086mm
	Varilla de acero estirada en frío, con recubrimiento de cobre electrolítico	Diámetro de 14.3mm mínimo y 15.5mm máximo Espesor mínimo del recubrimiento 0.254mm
	Placa plana galvanizada	500mm x 500mm Espesor mínimo de recubrimiento 0.086mm Espesor mínimo de la placa 6.4mm
	Varilla galvanizada	Diámetro de 13mm mínimo y 25mm máximo Espesor mínimo de recubrimiento 0.086mm
Acero inoxidable	Cintilla o solera	Ancho x espesor 25mm x 1.5mm
	Varilla	Diámetro de 14.3mm mínimo y 15.5mm máximo
	Placa plana	500mm x 500mm Espesor mínimo de la placa 6.4mm
	Lámina (arreglos)	0.25m <sup>2</sup> Espesor mínimo de 1.245mm de la lámina



Para el acero inoxidable el tipo de aleación deberá ser 304. Los aceros inoxidables son aleaciones de hierro con un mínimo de 10.5% de cromo. Sus características se obtienen mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo. La aleación 304 es un acero inoxidable austenítico de uso general, esto quiere decir que es más inoxidable y resistente a la corrosión atmosférica y a ciertos ácidos, no puede ser templado y revenido ni pre-cocido de forma ordinaria. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío.

#### **4.B.4.c) EMPALMES**

En un sistema de protección contra rayos deben evitarse en lo posible los empalmes, pues estos son puntos especialmente débiles. Algunos de ellos particularmente en la instalación aérea, pueden llegar a concentrar toda la carga del rayo; debido a esto, tienen que ser capaces de soportar dicha carga sin sufrir deterioro y tampoco provocar chispazos.

La capacidad de realizar esta tarea dependerá de su resistencia, que se incrementa con las impurezas, irregularidades o suciedad de las piezas metálicas unidas; esto se puede evitar por medio de una cuidadosa limpieza y con una fuerte compresión del punto empalmado.

Tampoco es aconsejable empalmar metales de naturaleza distinta, aunque si no existiera otra opción, se deberán tomar medidas especiales para evitar su corrosión.



#### 4.B.4.d) ANTENAS DE RADIO Y TELEVISIÓN

Las antenas colocadas en los tejados por lo general son la parte más alta de los edificios. Así que, si éstos no tienen protección y los tejados no son metálicos, serán puntos de frecuentes caídas de rayos, lo que ocasionará deterioros tanto en la estructura de la antena como en los equipos receptores o en los cables que los unen.

Una antena instalada fuera del alcance de la zona de protección de un pararrayos no necesita otra ayuda más que su unión, junto con todos los elementos metálicos o componentes conductores al derivador; no obstante, dicha conexión suele provocar interferencias.

Cuando la antena sea la parte más alta de un edificio protegido con pararrayos, tanto el mástil como las partes metálicas deberán estar conectadas a la terminal aérea de la manera más directa posible. Sin embargo, aun habiendo realizado esto, el conductor de alimentación se puede dañar; y como consecuencia parte de la corriente del rayo podría descargarse a través de él, y por tanto en el equipo. Por eso es recomendable que cada chasis de todos los aparatos electrónicos sean conectados a tierra, porque si no podrían averiarse los componentes de los aparatos e incluso las personas cercanas al equipo podrían sufrir algún daño.

Cuando el equipo receptor está conectado a la antena por medio de cable coaxial blindado, lo más conveniente es que su vaina se una a la terminal aérea; igualmente resulta ventajoso el uso de bridas especiales de seguridad que unan la antena, núcleo del cable y vaina. Cuando el cable no sea blindado, la antena y el mástil deben conectarse a tierra y las bridas protectoras instalarse entre los hilos conductores y el neutro.





En un edificio desprovisto de pararrayos y ubicado en zonas tormentosas, la antena se debe tomar en cuenta como un conjunto de la terminal aérea, del derivador y la terminal de tierra. Pese a ello, para un diseño más económico es aconsejable disminuir el calibre del derivador, pero siempre con un mínimo de 25[mm<sup>2</sup>].

Las acometidas de suministro eléctrico pueden ser aéreas o estar enterradas. En el segundo caso, las vainas metálicas de los cables deben conectarse a la red de tierra, en caso contrario, cualquier ocupante del edificio estará expuesto a un grave peligro si cayera un rayo.

#### **4.C) SISTEMA INTERNO DE PROTECCIÓN CONTRA TORMENTAS ELÉCTRICAS (SIPTE)**

Este sistema de protección consta de cuatro elementos:

1. Sistema de puesta a tierra (SPT).
2. Unión equipotencial (UE).
3. Red interna de puesta a tierra.
4. Supresores de sobretensión transitoria (SSTT)

##### **4.C.1) UNIÓN EQUIPOTENCIAL**

Esta parte del SIPTE tiene como fin reducir el riesgo de un incendio ó explosión para evitar exponer a un peligro al personal y equipo ubicado dentro del espacio que será protegido ocasionado por la incidencia de un rayo. Es menester tomar



medidas que garanticen minimizar las diferencias de potencial, estas acciones ó medidas se conocen unión equipotencial.

Convenientemente, todas las estructuras de acero y las estructuras de concreto con acero de refuerzo, si no son usadas como una parte del SPTTE, deberán ser unidas al SPTTE mediante el SPT, visto con anterioridad en este mismo capítulo.

Si una instalación comparte servicios tales como suministro de energía eléctrica, telefonía, cómputo, comunicaciones, sistema de pararrayos, sistema para drenar carga estática, etc., todos los sistemas de puesta a tierra deberán estar interconectados entre sí y bajo el nivel del suelo por lo menos 60cm. Llevando a cabo el procedimiento mencionado, se logra que en condiciones anormales de operación, todos los servicios tendrán la misma referencia a tierra, y así reducir fallas y daños a los equipos eléctricos y/o electrónicos.

Los elementos que constituyen la UE son:

- Conductores de unión: Utilizados para interconectar dos partes metálicas. Su longitud deberá ser lo más corta posible y su sección transversal debe cumplir con los valores indicados en el capítulo 6 de la NMX-J-549-ANCE-2005.
- Barras de unión: Utilizadas para interconectar mediante los conductores de unión, elementos metálicos de diversos sistemas (energía eléctrica, telecomunicaciones, gas, agua, etc.), así como los elementos de estructuras metálicas de la instalación a un solo punto de unión.
- SUPRESORES DE SOBRETENSIONES TRANSITORIAS (SSTT): Estos son parte fundamental del SPTTE, estos dispositivos se usan en dos casos. En primer lugar, para la protección de un equipo eléctrico ó electrónico sensible. Segundo, en donde no se permite el uso de conductores de unión, como lo puede ser en la unión de dos piezas metálicas aisladas entre si (tuberías de



gas) y por restricciones del sistema de protección catódica (técnica para controlar la corrosión galvánica).

#### **4.C.2) RED INTERNA DE PUESTA A TIERRA**

La puesta a tierra de los equipos eléctricos, electrónicos, estructuras metálicas, tuberías, elevadores, etc., que se encuentren en el interior de un edificio ó estructura, es un medio de seguridad en el cual uno de sus objetivos es la de garantizar la operación confiable y la integridad física de los equipos ante condiciones anormales y principalmente proporcionar seguridad a las personas.

La puesta a tierra deberá satisfacer lo indicado en las normas NMX-J-549-ANCE-2005 y NOM-001-SEDE-2005 para instalaciones eléctricas.



# CAPÍTULO 5

## PROPUESTA DE SPTE EN CAMPOS DE FÚTBOL DE PUMITAS EN CIUDAD UNIVERSITARIA

---

### 5.A) CONSIDERACIONES GENERALES

A manera general el diseño es aquella pre-configuración o bosquejo en la búsqueda de una solución; ya sea durante o previo a la investigación u observación de alternativas. En una instalación eléctrica el “diseño eléctrico” es la parte medular para lograr el funcionamiento particular de sus componentes y colectivo en sus sistemas. Con el estudio, observación e investigación realizada para este trabajo, se diseñan 2 propuestas para SPTE.

Primeramente se mencionarán algunas consideraciones generales que están vinculadas al desarrollo del diseño de un SPTE en la zona deportiva de Ciudad Universitaria, específicamente en el campo 6 de fútbol.



### 5.A.1) DIRECCIÓN GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS (DGADyR).

La UNAM cuenta con una Dirección General de Actividades Deportivas y Recreativas, que brinda orientación a toda la comunidad universitaria, acerca de las actividades relativas a la práctica del deporte (actividades deportivas) y al empleo del tiempo libre (actividades recreativas) que se llevan a cabo en la Universidad, (Fig.5.1).

Su principal objetivo es contribuir a la formación integral de la comunidad en su desarrollo físico, psicológico, ético y social, a través del desarrollo de actividades deportivas y recreativas. Así mismo, el fomento de estas actividades y el desarrollo de sus aptitudes, propician la detección de talentos y su reclutamiento como integrantes de los equipos representativos de la UNAM y potenciar sus capacidades hacia el alto rendimiento.



Figura 5.1;  
Ubicación de la Dirección General de Actividades Deportivas y Recreativas.



Además de los beneficios físicos que representa practicar deporte o acudir a alguna actividad recreativa, se favorece el desarrollo de valores tales como la honradez, lealtad, autocuidado, disciplina, superación personal, trabajo en equipo, respeto, el uso inteligente del tiempo libre, y el sentido de identidad con su escuela, su universidad y su país.

En la Universidad, se cuenta con más de 40 disciplinas deportivas, eso sin mencionar el sinfín de actividades recreativas que ha ido incrementando semestre a semestre. Casi la totalidad de sus instalaciones se encuentran dentro de Ciudad Universitaria, (Fig.5.2), **y los campos deportivos se localizan en su mayoría al sur del Estadio Olímpico México 68.**

Figura 5.2;  
Ubicación de los  
Campos  
Deportivos de  
Futbol Asociación.







Como toda dependencia de la Universidad, se manifiesta una gran seriedad y compromiso de todas las personas encargadas, así como de entrenadores y el personal relacionado con las actividades mencionadas, esto en referencia a la preocupación por desarrollar un **“Reglamento General para el Uso de Instalaciones Deportivas y Recreativas”**, mismo que fue aprobado por la propia DGADyR el día 25 de enero de 2010, y que destaca para este trabajo en los siguientes puntos:

#### Capítulo I. Disposiciones Generales

Artículo 1°. El presente Reglamento es de observancia general y obligatoria, **regula el uso de las instalaciones, a cargo de la Dirección General de Actividades Deportivas y Recreativas (DGADyR)**, que se destinen a la realización de eventos deportivos y recreativos en Ciudad Universitaria.

Artículo 5°. La DGADyR a través del área responsable **vigilará la conservación mantenimiento y adecuación de las instalaciones deportivas y recreativas en beneficio de un mejor servicio y seguridad del usuario.**

#### Capítulo III. De los usuarios de las instalaciones deportivas y recreativas.

Artículo 18. Se consideran usuarios de las instalaciones deportivas y recreativas:

- i. Los miembros de la comunidad universitaria o personas que gozan de ese derecho conforme a las condiciones que regula este Reglamento...
- ii. Los participantes en los programas de extensión de la DGADyR:
  - a) **Asociaciones Pumitas;**
  - b) Programas vacacionales infantiles;



- c) Programas para alumnos de escuelas incorporadas o para ex alumnos de la UNAM, y
- d) Programas para el público en general.

Artículo 19. Son derechos de los usuarios:

- i. Conocer las disposiciones del presente Reglamento.

Artículo 20. Son obligaciones de los usuarios:

- i. Cumplir el presente Reglamento.

Capítulo IV. De las **causas de suspensión del acceso a las instalaciones deportivas** y recreativas.

Artículo 22. El acceso de los usuarios a las instalaciones será restringido por cualquiera de las siguientes causas:

- iv. **Por condiciones climatológicas adversas o desfavorables que pongan en riesgo la integridad física o la vida de los usuarios.**

#### **5.A.2) LOCALIZACIÓN, DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA Y RESISTIVIDAD DEL TERRENO.**

Gran parte del sur de la Ciudad de México está **compuesto por suelo de roca volcánica** debida a la erupción del volcán Xitle hace aproximadamente 1670 años. La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), campus Ciudad Universitaria (CU), se ubica dentro de la zona sur de la ciudad, posee alrededor de 700 hectáreas de extensión territorial (*fuelle: expedicionmexico.net/unam/*).

Como se mencionó anteriormente, los campos de fútbol se encuentran en la zona sur del Estadio Olímpico México 68, (Fig.5.3). **El acceso a estos, es por el circuito interior universitario, o bien arribando por las rutas 4,6,10 u 11 del sistema de transporte interno PumaBús, con paraderos ubicados en la estación de metro Universidad (ruta 4), el estacionamiento 1 del Estadio Olímpico Universitario (EOU) (ruta 6), y la estación de MetroBús (ruta 10 y 11), (Fig.5.4).**



*Figura 5.3; Vista superior de los campos deportivos de Ciudad Universitaria; paradas cercanas del sistema de transporte interno PumaBús y localización del Campo 6 (STUNAM).*

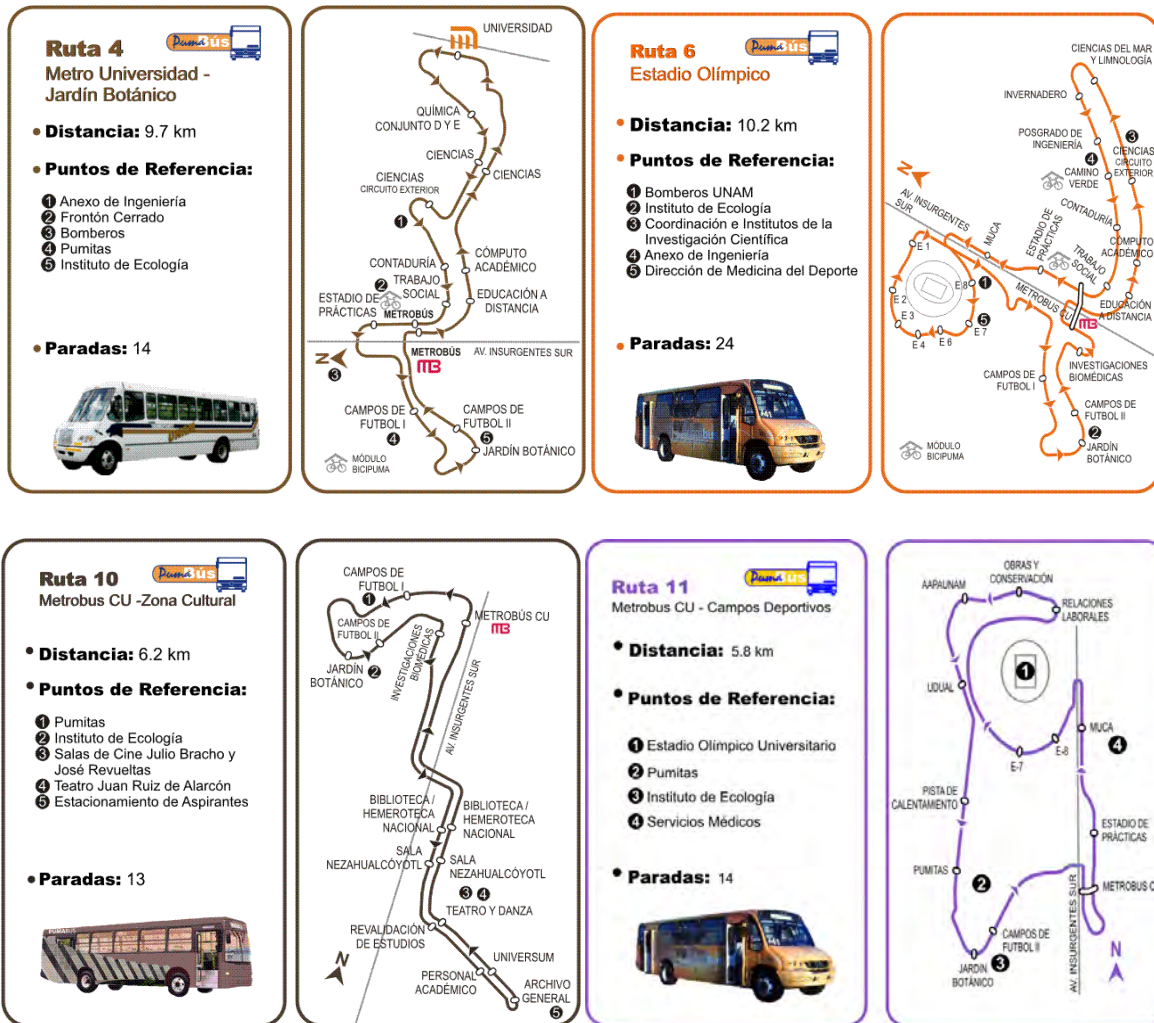


Figura 5.4; El Sistema de Transporte Interno PumaBús cuenta con las Rutas 4, 6, 10 y 11 para llegar a los Campos Deportivos.

En el Reglamento General para el Uso de Instalaciones Deportivas y Recreativas, se hace mención de las “condiciones adversas o desfavorables”, las cuales entenderemos como todo evento atmosférico capaz de producir, directa o indirectamente, daños a las personas o daños materiales de consideración.





En este caso, una nube negra y cargada, es potencialmente una amenaza de tormenta eléctrica.

La **NMX-J-549-ANCE-2005**, en el apéndice D, incluye un mapa de la densidad de rayos a tierra (DRT) -o como se le había nombrado, densidad de rayos a tierra ( $N_g$ )- de la República Mexicana, debido a que la Norma Internacional deja este dato a consideración de la autoridad competente de cada nación. Dicho apéndice también incluye un mapa de cada Estado del país, incluyendo el Distrito Federal, (Fig.5.5).

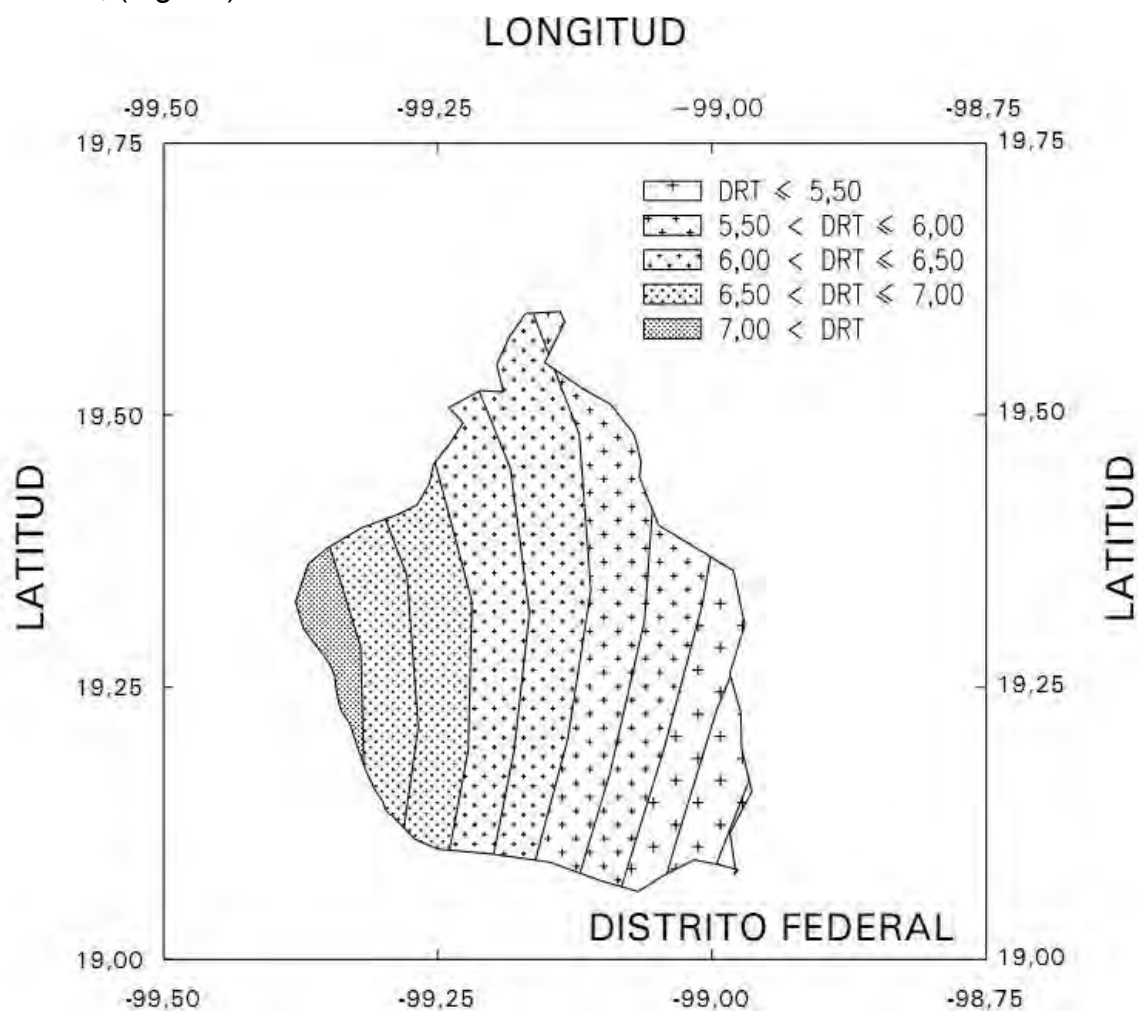
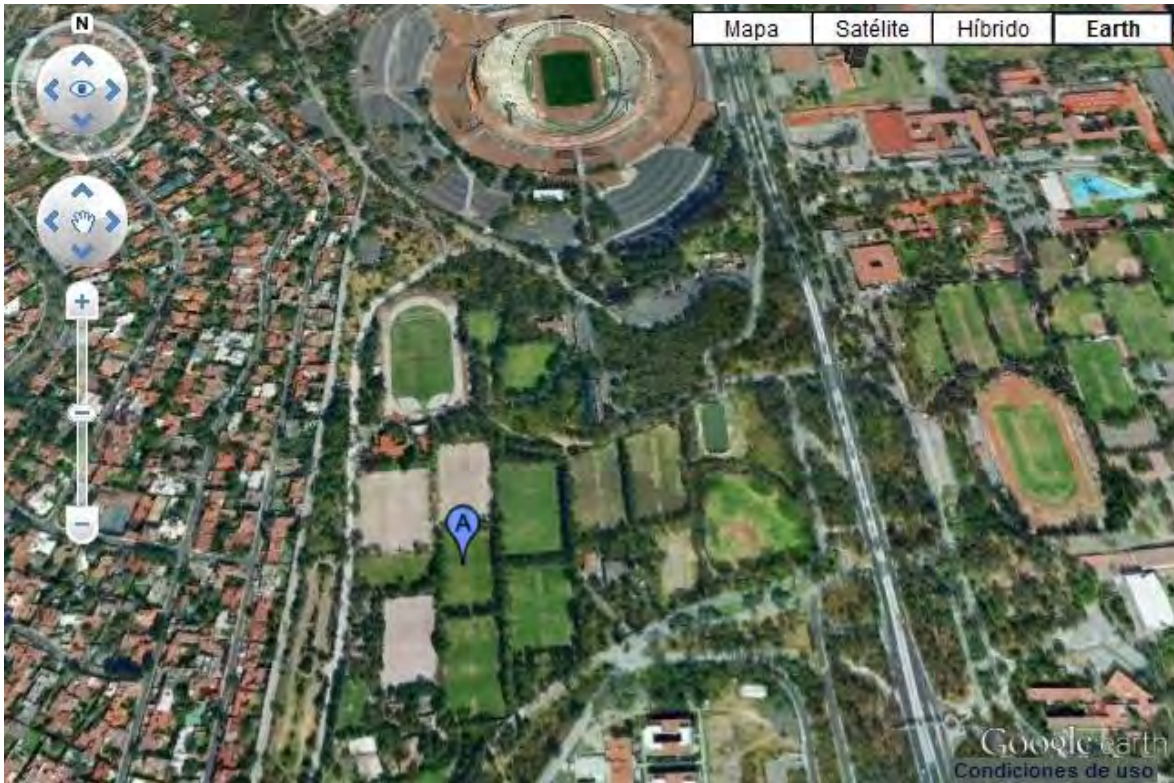


Figura 5.5; Mapa promedio anual de densidad de rayos a tierra por estados, distrito Federal.



Analizando dicho mapa, se ubicó la zona de interés, en primer lugar Ciudad Universitaria y posteriormente el **campo 6 de fútbol, con las siguientes coordenadas: Latitud 19.325126°, Longitud -99.19313°, (Fig. 5.6).**

Para esta zona, el valor correspondiente de DRT es de 6.5 [núm.de rayos/km<sup>2</sup>-año], ya que se toma el valor superior inmediato del rango **mostrado**. Así obtenemos un parámetro importante para el desarrollo de este trabajo, la densidad de rayos o descargas a tierra.



*Figura 5.6; Ubicación del campo 6 con coordenadas geográficas, para determinar el rango de la densidad de rayos de acuerdo al mapa correspondiente al D.F., que proporciona la NMX-J-549-ANCE-2005. Latitud 19.325126°, Longitud -99.19313°.*





Otro aspecto relevante es conocer la resistividad del terreno, ya que esto es necesario para determinar el diseño de la conexión a tierra de nuevas instalaciones y poder satisfacer la necesidad de resistencia de tierra.

**La resistividad del suelo es la propiedad de tiene éste, para conducir electricidad**, también nombrada resistencia específica del terreno.

En la **NOM-022-STPS-1999 se define a la resistividad, como la resistencia que ofrece al paso de corriente un cubo de terreno de un metro por lado.**

Esta cualidad varía en los terrenos de todo el mundo de manera geográfica y a diversas profundidades, algunas de sus determinantes son:

- Sales solubles. La resistividad del suelo es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos; en otras palabras, por la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas.
- Composición propia del terreno. Esta composición depende de la naturaleza del mismo terreno. Por ejemplo, el suelo de arcilla normal posee una resistividad de de 40-500 [ $\Omega$ -m], mientras que la resistividad de un terreno rocoso es de 5000 [ $\Omega$ -m] o más alta.
- Estratigrafía. Es el estudio de las relaciones temporales y espaciales de los cuerpos rocosos que forman la corteza terrestre. Esto nos muestra que el terreno no es uniforme en sus capas, y a distintas profundidades se encuentran diversos perfiles de resistividad.
- Granulometría. Es la medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, así como de los suelos. Esto influye sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad de contacto con los electrodos incrementando la resistividad con el mayor tamaño de los



granos de la tierra. De este modo la resistividad de la grava es superior a la de la arena y que esta sea mayor que la de la arcilla.

- Estado higrométrico. La combinación de agua y humedad influyen considerablemente en el terreno. Este valor varía con el clima, época del año, profundidad y nivel freático. Por ejemplo, la resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso de éste. Pero, un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante. Y puede presentarse el caso de que en tiempo de sequia, un terreno puede tener tal resistividad que no pueda ser empleado en el sistema de tierra. Por ello, el sistema debe ser diseñado tomando en cuenta la resistividad en el peor de los casos.
- Temperatura. A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota más al llegar a 0 [°C], hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra.
- Compactación. La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo. Por ello, se debe procurar colocar los electrodos en los terrenos más compactos posibles.



Finalmente, de acuerdo a estudios realizados dentro del territorio de la Universidad, **la profundidad promedio antes de llegar a la roca es de 0.5 [m].** Mientras que su **resistividad ( $\rho$ ) de la roca posee un valor entre 5000-5700 [ $\Omega$ -m].** (Dato obtenido del libro de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, *Sistema de Tierras en Redes de Distribución* del Ing. Guillermo López Monroy).



### 5.A.3) ACTUALIZACIÓN DE LA NORMA OFICIAL UNIVERSITARIA (PAEFI-02-09).

Las normativas dejan abierta la posibilidad de aplicar otros sistemas de protección, donde la necesidad de soluciones para la protección del rayo sea particularmente más exigente, esto nos proporciona un mayor margen de maniobra y la capacidad de incorporar otros métodos o estudios para consolidar una propuesta de protección.

Anteriormente se mencionó que la UNAM cuenta con una “Actualización de la Norma Oficial Universitaria”, emitida por el PAE (Proyecto de Ahorro de Energía) de la Facultad de Ingeniería, (Fig. 5.7).

	<b>PROYECTOS DE AHORRO DE ENERGÍA</b> <b>UNAM, FACULTAD DE INGENIERÍA</b>				
	APROBÓ ING. AUGUSTO SÁNCHEZ C.	REVISIÓN 01	FECHA 21-SEP-2009	PROYECTO PAEFI-02-09	

### ACTUALIZACIÓN DE LA NORMA OFICIAL UNIVERSITARIA Instalaciones Eléctricas

Figura 5.7; Norma Oficial Universitaria.

Dicho documento fue consultado en su capítulo 10 “Sistemas de Tierra”, capítulo 11 “Sistemas de Pararrayos”, capítulo 12 “Métodos de Instalación” y capítulo 13 “Especificaciones”. Cabe mencionar que este documento PAEFI-02-09, tiene como base la NOM-001-SEDE-2005, y destacamos los siguientes apartados y artículos:



## Capítulo 10 Sistemas de Tierra.

### 10.1 Requisitos del diseño.

10.1.1 Los inmuebles de la UNAM deben incluir en su diseño; **un sistema de tierra para:** subestaciones, **sistemas de pararrayos**, equipo electrónico y de telecomunicaciones. Todos estos **deberán estar interconectados a 30 [cm] bajo el terreno.**

10.1.2 Los sistemas de tierra deben **cumplir como mínimo con lo establecido** en la **NOM-001-SEDE-2005**, el libro esmeralda de IEEE, Standard 1100 (2005) y en la **NMX-J-549-ANCE-2005.**

10.1.3 Los diferentes sistemas de tierra que se construyan en la UNAM deben cumplir con los siguientes valores:

Sistemas de Tierra	Valor Máximo de Diseño
<b>Pararrayos en CU</b>	<b>20 [<math>\Omega</math>]</b>
Pararrayos fuera de CU	10 [ $\Omega$ ]

10.1.4 Para diseñar un sistema de tierras debe realizarse un estudio previo de resistividad y área disponible de terreno, recomendando lo siguiente: **Para sistemas de tierra en C.U. y terrenos rocosos debe proyectarse como primera alternativa un sistema de electrodos profundos en delta (no deberá emplearse intensificador químico GEM, GAP, bentonita sódica en las perforaciones profundas), o con sistema radial hasta encontrar el área de disipación efectiva;** en terreno de siembra con malla de electrodos a base de varillas copperweld y mejoramiento de terreno.



10.1.5 El sistema de electrodos artificiales a tierra de la Subestación Eléctrica y el del sistema de protección de pararrayos del edificio, **deben interconectarse para evitar potenciales peligrosos que podrían resultar de dos sistemas a tierra independientes entre sí.**

10.1.7 Cada sistema de tierra **debe contar con registro de medición.**

10.2 Artículos mínimos requeridos de la NOM-001-SEDE-2005.

Los artículos de la NOM-001-SEDE-2005 que se indican como los mínimos requeridos para complementar los diseños de esta especialidad en los inmuebles que diseña, construye, opera y conserva la UNAM.

Artículo 250-Puesta a tierra.

250-A. Disposiciones generales.

250-1. Alcance.

NOTA 1: **Los sistemas y conductores de circuito son puestos a tierra para limitar las sobretensiones eléctricas debidas a descargas atmosféricas,** transitorios en la red o contacto accidental con líneas de alta tensión, y para estabilizar la tensión eléctrica a tierra durante su funcionamiento normal....

NOTA 2: Los **materiales conductores** o equipo eléctricos o que forman parte de dicho equipo, **son puestos a tierra para limitar la tensión a tierra de esos materiales...**

250-C. Ubicación de las conexiones de puesta a tierra de los sistemas.

250-21. Corrientes eléctricas indeseables en los conductores de puesta a tierra.



- a) Arreglo de sistema para evitar corrientes eléctricas indeseables. **La puesta a tierra de sistemas eléctricos, circuitos, apartarrayos y elementos metálicos de equipo y materiales que normalmente no conducen corriente, debe realizarse de tal manera que se eviten trayectorias que favorezcan la circulación de corrientes indeseables por los conductores de puesta a tierra.**

250-E. Puesta a tierra de los equipos.

250-44. Equipo no eléctrico. **Deben ser puestos a tierra las partes metálicas del equipo no eléctrico descrito en los siguientes incisos.**

d) **Separaciones metálicas. Las separaciones metálicas, rejillas y otros elementos metálicos similares** alrededor de equipo de 1 [kV] y más entre conductores, excepto en subestaciones o bóvedas que sean únicamente accesibles a la compañía suministradora.

NOTA: cuando haya partes metálicas en edificios que puedan quedar electrificadas y entrar en contacto con las personas, una adecuada unión y puesta a tierra ofrecen protección adicional.

250-46. Separación de los conductores de bajada de los pararrayos. **Las canalizaciones, envolventes, estructuras y partes metálicas de equipo eléctrico que no transporten normalmente corriente eléctrica se deben mantener alejadas 1.8 [m] como mínimo de los conductores de bajada de los electrodos de puesta a tierra de los pararrayos o deben unirse cuando la distancia a los conductores de bajada sea inferior a 1.8 [m].**

NOTA: Para el sistema de electrodos de puesta a tierra de pararrayos, véase 250-86. Véanse también separación de los conductores de bajada de los pararrayos, en 800-13 y 820-10 (f) (3).





## 250-F. Método de puesta a tierra.

250-51. Trayectoria efectiva de puesta a tierra. **La trayectoria a tierra** desde los circuitos, equipo y cubiertas metálicas **de conductores debe ser:**

- (1) **permanente y eléctricamente continua;**
- (2) de **capacidad suficiente para conducir con seguridad cualquier corriente eléctrica de falla que pueda producirse,** y
- (3) de una **impedancia suficientemente baja como para limitar la tensión eléctrica a tierra** y facilitar el funcionamiento de los dispositivos de protección del circuito.

El terreno natural no se debe utilizar como el único conductor de puesta a tierra de equipo.

## 250-H. Sistema de electrodos de puesta a tierra.

250-81. Sistema de electrodos de puesta a tierra. (250-81). “Si existen en la propiedad, en cada edificio o estructura perteneciente a la misma, los elementos (a) a (d) que se indican a continuación y cualquier electrodo de puesta a tierra prefabricado instalado de acuerdo con lo indicado en 250-83(c) y 250-83(d), **deben conectarse entre sí para formar el sistema de electrodos de puesta a tierra**”, (Fig. 5.8).

NOTA: En el terreno o edificio pueden existir electrodos o sistemas de tierra para equipo de cómputo, pararrayos, telefonía, comunicaciones subestaciones o acometida, apartarrayos, entre otros, **y todos deben conectarse entre sí.**

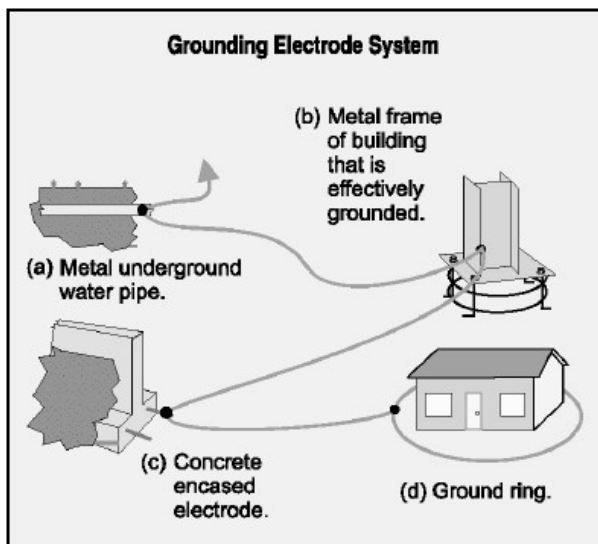


Figura 5.8; Sistema de electrodos de puesta a tierra, artículo 250-81, de la NOM-001-SEDE-2005.

- a) Tubería metálica subterránea para agua. “Una tubería metálica subterránea para agua en contacto directo con la tierra a lo largo de 3 [m] o más y con continuidad eléctrica hasta los puntos de conexión del conductor del electrodo de puesta a tierra y de los conductores de unión”.
- b) Estructura metálica del edificio.
- c) Electrodo empotrado en concreto.
- d) Anillo de tierra. Un anillo de tierra que rodee el edificio o estructura, en contacto directo con la tierra y a una profundidad bajo la superficie no inferior a 800 [mm] que conste como mínimo en 6[m] de conductor de cobre desnudo de tamaño nominal no inferior a 33.6 [mm<sup>2</sup>] (2 [AWG]).

250-83. Electrodo especialmente contruidos. “**Cuando no se dispongan algunos de los electrodos especificados en 250-81, debe usarse uno o más de los electrodos especificados en los incisos a continuación, en ningún caso el valor de resistencia a tierra del sistemas de electrodos de puesta a tierra debe ser superior a 25 [Ω].**

Cuando sea posible, **los electrodos de puesta a tierra contruidos especialmente deben enterrarse por debajo del nivel de humedad**



permanente. Los electrodos de puesta a tierra especialmente contruidos deben estar libres de recubrimientos no conductores, como pintura o esmalte. Cuando se use más de un electrodo de puesta a tierra para el sistema de puesta a tierra, todos ellos (incluidos los que se utilicen como electrodos de puesta a tierra de pararrayos) no deben estar a menos de 1.8 [m] de cualquier otro electrodo de puesta a tierra o sistema para puesta a tierra. Dos o más electrodos de puesta a tierra que estén efectivamente conectados entre sí, se deben considerar como un solo sistema de electrodos de puesta a tierra.

- a) Sistema de tubería metálica subterránea de gas. **No se debe usar como electrodo de puesta a tierra un sistema de tubería metálica subterránea de gas.**
- b) Otras estructuras o sistemas metálicos subterráneos cercanos. **Otras estructuras o sistemas metálicos subterráneos** como tubería o tanques subterráneos.
- c) Electrodos de varilla o tubería. **Los electrodos de varilla y tubo no deben tener menos de 2.4 [m] de longitud**, deben ser del material especificado a continuación y estar instalados del siguiente modo:
  - 1) Los electrodos de puesta a tierra **consistentes en tubería o tubo (conduit) no deben tener un tamaño nominal inferior a 19 [mm] (diámetro)** y, si son de hierro o acero, **deben tener sus superficie exterior galvanizada o revestida de cualquier otro metal que los proteja contra la corrosión.**
  - 2) Los electrodos de puesta a tierra **de varilla de hierro o de acero deben tener como mínimo un diámetro de 16 [mm]**. Las varillas de acero inoxidable inferiores a 16 [mm] de diámetro, las de metales no ferrosos o sus equivalentes, deben estar aprobadas y tener un diámetro no inferior a 13 [mm].



- 3) El electrodo de puesta a tierra **se debe instalar de modo que tenga en contacto con el suelo un mínimo de 2.4 [m]**. Se debe clavar a una profundidad no inferior a 2.4 [m] **excepto si se encuentra roca, en cuyo caso el electrodo de puesta a tierra se debe clavar a un ángulo oblicuo que no forme más de 45° con la vertical, o enterrar en una zanja que tenga como mínimo 800 [mm] de profundidad**. El extremo superior del electrodo de puesta a tierra debe quedar a nivel del piso, excepto si el extremo superior del electrodo de puesta a tierra y la conexión con el conductor del electrodo de puesta a tierra están protegidos contra daño físico, como es específica en 250-17.
- d) Electrodo de placas. Los electrodos de puesta a tierra **de placas deben tener en contacto con el suelo un mínimo de 0.2 [m<sup>2</sup>] de superficie**. Los electrodos de puesta a tierra de placas de hierro o de acero deben tener un espesor mínimo de 6.4 [mm]. Los electrodos de puesta a tierra de metales no ferrosos deben tener un espesor mínimo de 1.52 [mm].
- e) Electrodo de aluminio. **No está permitido utilizar electrodos de aluminio.**

250-84. Resistencia de electrodos de varillas, tuberías y placas. **Un electrodo que consista en una varilla, tubería o placa, debe tener una resistencia a tierra de 25 [Ω] o menor una vez enterrado**. En caso de que la resistencia a tierra sea mayor que 25 [Ω] debe complementarse con uno o más electrodos **adicionales** de cualquier de los tipos especificados en 250-81 o 250-83 hasta obtener este valor de resistencia permisible. **Cuando se instalen varios electrodos** de barras, tubos o placas para cumplir los requisitos de esta Sección **se debe colocar a una distancia mínima de 1.8 [m] entre sí y debe estar efectivamente conectados entre sí**. El valor de la resistencia a tierra de los electrodos no debe ser mayor que 25 [Ω] para casas habitación, comercios, oficinas o locales **considerados como de concentración pública**.



250-86. Sistema de electrodos de puesta a tierra de pararrayos. **No se deben utilizar conductores de puesta a tierra de pararrayos, ni tubos, varillas u otros electrodos de puesta a tierra fabricados utilizados para poner a tierra las bajadas de los pararrayos, en sustitución de los electrodos de puesta a tierra indicados en 250-83** para la puesta a tierra de sistemas eléctricos y de equipo. Esta disposición **no impide cumplir los requisitos de unión de los electrodos de puesta tierra** de diversos sistemas.

NOTA 1: Para la separación de conductores de bajada de los pararrayos con otros elementos metálicos, véase 250-46. Para la unión de sistemas de electrodos de puesta a tierra, véanse 800-40(d), 810-21(j) y 820-40(d).

NOTA 2: **Si se interconectan todos los electrodos de puesta a tierra de distintos sistemas, se limita la diferencia de potencial entre ellos y entre sus correspondientes sistemas de alambrado.**

250-I. Conductores de puesta a tierra.

250-91. Materiales. Los materiales de los conductores de puesta a tierra se especifican en los incisos siguientes:

- a) Conductor del electrodo de puesta a tierra. El conductor de puesta a tierra **debe ser de cobre o de otro material resistente a la corrosión**. El material debe ser resistente a la corrosión que pueda producirse en la instalación, y debe estar adecuadamente protegido contra la corrosión. **El conductor debe ser alambre o cable, aislado, forrado o desnudo y debe ser un solo tramo continuo, sin empalmes ni uniones.**

Excepción 3: **Se permite empalmar el conductor del electrodo de puesta a tierra por medio de conectores de presión del tipo irreversible** aprobados para ese fin **o mediante un proceso de soldadura exotérmica.**



250-92. Instalación. Los electrodos de puesta a tierra, deben instalarse como se especifica en los siguientes incisos:

- a) Conductor del electrodo de puesta a tierra. Un **conductor del electrodo de puesta a tierra o su envolvente debe sujetarse firmemente a la superficie sobre la que va instalado**. Un conductor de cobre o aluminio de **21.2 [mm<sup>2</sup>] (4 AWG) o superior debe protegerse si está expuesto a daño físico severo**. Se puede llevar un conductor de puesta a tierra de **13.3 [mm<sup>2</sup>] (6 AWG) deben alojarse en tubo (conduit) metálico tipo pesado, semipesado, ligero, en tubo (conduit) no metálico tipo pesado o en cable armado**.

No deben utilizarse como conductores de puesta a tierra, conductores aislados o desnudos de aluminio que estén en contacto directo con materiales de albañilería o terreno natural o si están sometidos a condiciones corrosivas. Cuando se utilicen a la intemperie, los conductores de puesta a tierra de aluminio no deben instalarse a menos de 45 [cm] del terreno natural.

250-J. Conexiones de los conductores de puesta a tierra.

250-112. Al electrodo de puesta a tierra. **La conexión de un de un conductor del electrodo de puesta a tierra con electrodo de puesta a tierra correspondiente, debe ser accesible y estar hecha de tal manera que asegure una puesta a tierra eficaz y permanente**. Cuando sea necesario asegurar esta conexión a una instalación de tubería metálica utilizada como electrodo de puesta a tierra, se debe hacer un puente de unión efectivo alrededor de las juntas y secciones aisladas y alrededor de cualquier equipo que se pueda desconectar para su reparación y sustitución. Los conductores de unión deben ser lo suficientemente largos como para permitir el desmontaje de dichos equipo, manteniendo la integridad de la unión.





Excepción: **No es necesario que sea accesible una conexión enterrada con un electrodo de puesta a tierra empotrado en concreto, hundido o enterrado.**

250-115. Conexión a los electrodos. **El conductor de puesta a tierra se debe conectar al electrodo de puesta a tierra mediante soldadura exotérmica, zapatas, conectores a presión, abrazaderas u otros medios aprobados. No deben utilizarse conexiones que dependan únicamente de la soldadura.** Las abrazaderas de tierra deben estar aprobadas para el material del electrodo de puesta a tierra y para el conductor del electrodo de puesta a tierra y, cuando se utilicen en tubería, varillas u otros electrodos enterrados, **deben estar también aprobadas para su uso enterradas directamente en el terreno natural.** No debe conectarse al electrodo de puesta a tierra con la misma abrazadera o accesorio más de un conductor, excepto si la abrazadera o accesorio está aprobada(o) para utilizarla con varios conductores. La conexión debe hacerse por uno de los métodos explicados en los incisos siguientes:

- a) Abrazadera sujeta con pernos. Abrazadera de latón o bronce fundido o hierro dulce o maleable.
- b) Accesorios y abrazaderas para tubería. Un accesorio, abrazadera u otro mecanismo aprobado, sujeto con pernos a la tubería o a sus conexiones.
- c) Abrazadera de tierra de tipo solera. Una abrazadera de tierra aprobada de tipo solera, son una base de metal rígido que asiente en el electrodo y con una solera de un metal y dimensiones que no sea probable que cedan durante o después de la instalación.
- d) Otros medios. Otros medios sustancialmente iguales a los descritos y aprobados.

Capítulo 11 Sistemas de pararrayos.



Debe instalarse en los diferentes inmuebles de la UNAM, de acuerdo a su tamaño, tipo de estructura y uso específico; así como su localización y el nivel isocerámico de la región.

11.1 Sistemas a utilizar. Los sistemas de pararrayos a utilizar deben ser de Jaula de Faraday (Principio Receptor Pasivo) y Sistema Reactivo (tipo ionizante) cuyos diseños se apoyan e basan en la NMX-J-549-ANCE-2005, NOM-001-SEDE-2005, NOM-022-STPS-2008 y el NFC 17-102.

#### 11.2 Generalidades

11.2.1 Todas las bajadas de los sistemas de pararrayos deben estar canalizadas con tubería (conduit) PVC servicio pesado, o lo indicado por la DGOyC.

11.2.2 En el sistema de Jaula de Faraday, todas las bajadas deben diseñarse con un registro a 1.8 [m] del nivel del piso terminado para alojar el desconectador.

11.2.3 en el caso del sistema de Jaula de Faraday, todos los equipos y estructuras ubicados en azoteas deben conectarse al sistema de pararrayos. (Los sistemas de deben diseñar e instalar con una garantía por escrito de por lo menos 5 años).

11.2.4 Para aterrizaje del sistema de pararrayos debe cumplirse con lo indicado en el capítulo 10 “Sistemas de Tierra” de esta Norma.

#### Capítulo 12 Métodos de Instalación.

Para los métodos de instalación de los inmuebles que diseña, construye, opera y conserva la UNAM, registrará todo lo indicado en el capítulo 3 de NOM-001-SEDE-2005.

##### 12.11 Sistemas de tierra.



12.11.1 Antes de construir un sistema de tierras se debe realizar un estudio de resistividad del terreno (tipo de suelo, contenido de humedad del mismo, etc.).

12.11.2 Todas las uniones de los electrodos con el cable deben ser soldadas.

12.11.3 En la unión del cable con el electrodo, en el registro de medición debe usarse un conector mecánico.

12.11.4 Todas las uniones en las mallas deben ser soldadas.

12.11.5 Para los electrodos de varilla copperweld, se debe indicar el diámetro y profundidad del pozo de tierra, así como el tratamiento que se debe dar al terreno donde se instalará.

12.11.6 Para el electrodo profundo, se debe indicar el diámetro y profundidad del barreno, así como el tratamiento que se debe dar al terreno donde se instalará.

12.12 Sistema de pararrayos.

12.12.1 Todas las conexiones deben ser soldadas.

12.12.2 El registro de medición en piso no es necesario.

12.12.3 Para CU, en el caso de las bajadas de los sistemas de pararrayos tipo Jaula de Faraday, todas las bajadas deben interconectarse con cable y a su vez conectar la malla al sistema de tierra, en el punto más cercano.

12.12.4 La separación mínima entre los electrodos de una delta debe ser de 3 [m].

NOTA. Para casos especiales consultar a la DGOyC.

Capítulo 13 Especificaciones, (Fig. 5.9).

13.11 Sistemas de tierra.



13.11.1 Cable de cobre.

13.11.2 Conectores soldables.

13.11.3 Conectores mecánicos.

13.11.4 Electrodo tipo copperweld (varilla).

13.11.5 Electrodo compuesto (cinta de cobre, grafitos, sulfatos, cromatos, silicatos).

13.12 Sistemas de pararrayos.

13.12.1 Los materiales utilizados para el sistema Jaula Faraday (pasivo) son de cobre y bronce.

13.12.2 Los materiales utilizados para el sistema reactivo (ionizante) son de cobre y bronce.

Finalmente se han abordado distintos elementos que consideramos de suma importancia para el diseño de las dos propuestas de protección.

Se han revisado las condiciones naturales del campo deportivo número 6 de CU, como localización, densidad de descargas a tierra y resistividad del terreno. También se revisó la normativa de la UNAM para los aspectos técnicos de diseño e instalación, así como la consulta a la dependencia (DGADyR) y su reglamento emitido para regularizar el uso de las instalaciones, en nuestro caso, considerando condiciones atmosféricas desfavorables.



## **5.B) PROPUESTAS DEL SISTEMA DE TIERRAS**

### **5.B.1) PROPUESTA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN LA CANCHA DE FÚTBOL**

En los capítulos previos se estudiaron las características de un sistema de puesta a tierra y como bien sabemos, mucho depende de la resistividad del terreno. En lugares donde la resistividad es baja, es relativamente sencillo y económico poner un SPT, el asunto se complica un poco cuando encontramos terrenos con resistividad alta, como lo es un terreno rocoso.

Como se ha mencionado, la Universidad cuenta con una amplísima área verde, la cual en gran parte es reserva natural. En temporada de lluvia y al existir una cantidad considerable de árboles, se convierte en una zona propensa a descargas atmosféricas, incluso en ocasiones, sin la necesidad de presentar precipitación pluvial.

Nuestra propuesta se enfoca al campo de entrenamiento de fútbol de pumitas del STUNAM, ubicado dentro de los Campos de Fútbol Asociación, junto a la pista de calentamiento, esto a espaldas de medicina del deporte, (Fig. 5.9).

Inclusive, los cálculos presentados podrían extrapolarse a otros campos o espacios abiertos debido a que la mayoría del terreo en CU está compuesto por roca.

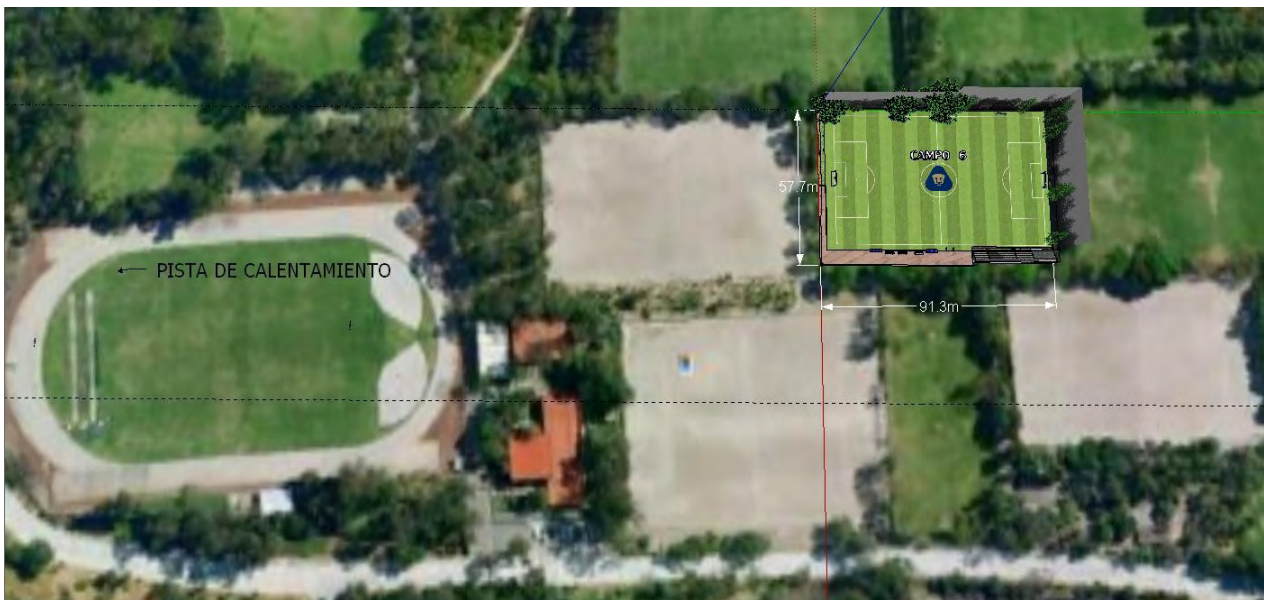


Figura 5.9; Sistema de electrodos de puesta a tierra, artículo 250-81, de la NOM-001-SEDE-2005.

Las dimensiones únicamente de la cancha son 52[m] de ancho por 81[m] de largo, por lo tanto ésta tendrá un perímetro de 266[m], (Fig. 5.10).



Figura 5.10; Medidas de la cancha de fútbol.





Datos del terreno:

Profundidad promedio antes de llegar a la roca: 0.5 [m].

Resistividad ( $\rho$ ) de la roca: 5000-5700 [ $\Omega$ -m].

Perímetro a rodear: 266 [m].

Se utilizará la ecuación de Dwight, para obtener la resistencia a tierra del terreno.

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left[ \ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 \right]$$

Donde:

$\rho$  es la resistividad del terreno.

$L$  es la longitud del conductor dividida entre 2.

$a$  es el radio del conductor.

$s$  es la profundidad del conductor multiplicada por 2.

A continuación se evalúan distintos valores de longitud de conductor, manteniendo constantes la resistividad del terreno, los parámetros del conductor y la profundidad del mismo, esto para llegar a obtener un valor de resistencia a tierra lo suficientemente bajo para drenar la corriente del rayo.



Parámetros del conductor:

Cable de cobre desnudo.

Calibre.	Sección transversal nominal en [mm] <sup>2</sup>	Clase de cableado.	Número de hilos/diámetro en [mm].	Diámetro del conductor nominal en [mm].
2/0	67.43	A	7/3.5	10.51

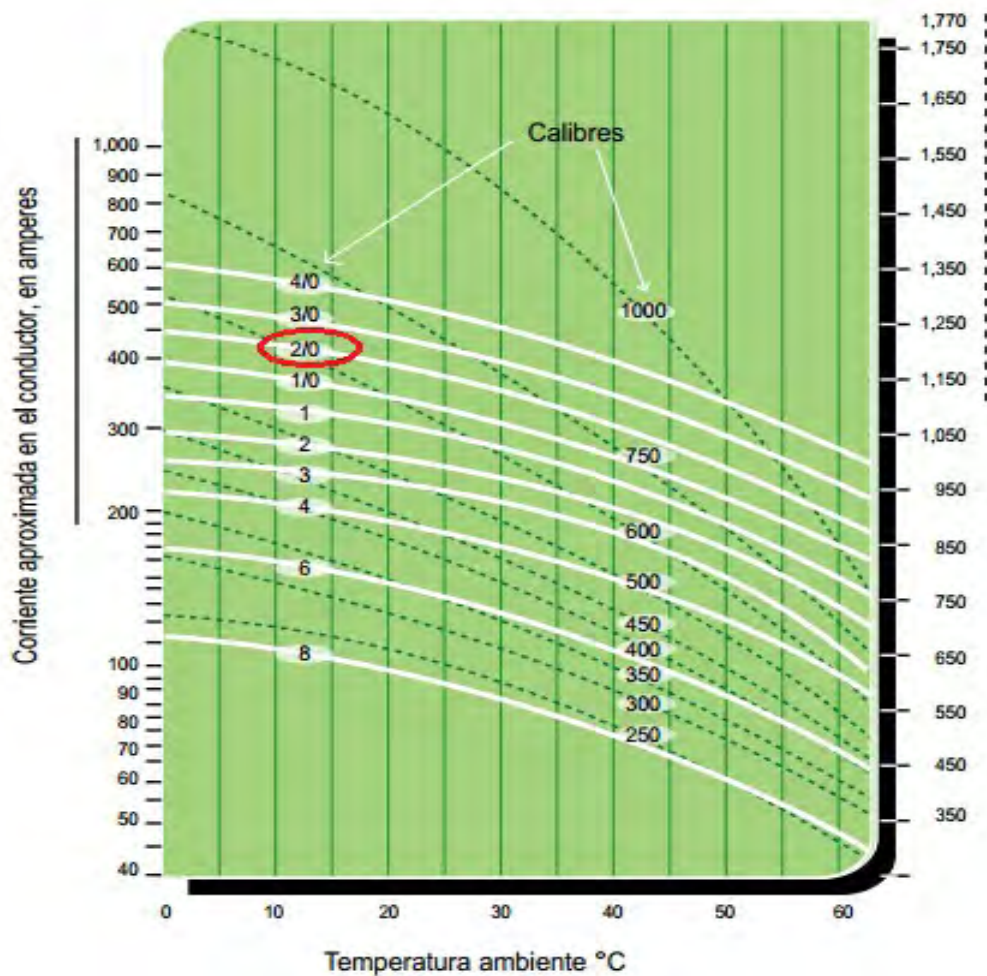


Figura 5.11; Gráfico de las características del cobre.



En la gráfica anterior (Fig. 5.11), se muestra la capacidad de conducción de corriente para conductores desnudos.

Para una *longitud del conductor* = 380 [m],  $s = 0.5$  [m],  $a = 0.005255$  [m] y  $\rho = 5000$  [ $\Omega$ -m].

Sustituyendo valores:

$$R = \frac{5000}{4\pi(190)} \left[ \text{Ln} \frac{4(190)}{(0.005255)} + \text{Ln} \frac{4(190)}{1} - 2 \right] = 34.585 \text{ } [\Omega]$$

Como podemos observar, este ya es un valor aceptable teniendo en cuenta la resistividad tan elevada que tenemos en roca.

Procedemos a calcular con otro valor, ahora para una *longitud del conductor* = 350 [m].

$$R = \frac{5000}{4\pi(175)} \left[ \text{Ln} \frac{4(175)}{(0.005255)} + \text{Ln} \frac{4(175)}{1} - 2 \right] = 37.175 \text{ } [\Omega]$$

Estos valores de resistencia a tierra son aceptables, pero debido a que la longitud del conductor usado en los cálculos excede en varios metros al perímetro de la cancha, se procederá a ajustar el análisis.

Se propondrá un SPT en anillo, es decir alrededor de la cancha. Para esto, a las dimensiones de la misma, se le agregará 1 [m] por cada esquina como se muestra en la figura 5.12.

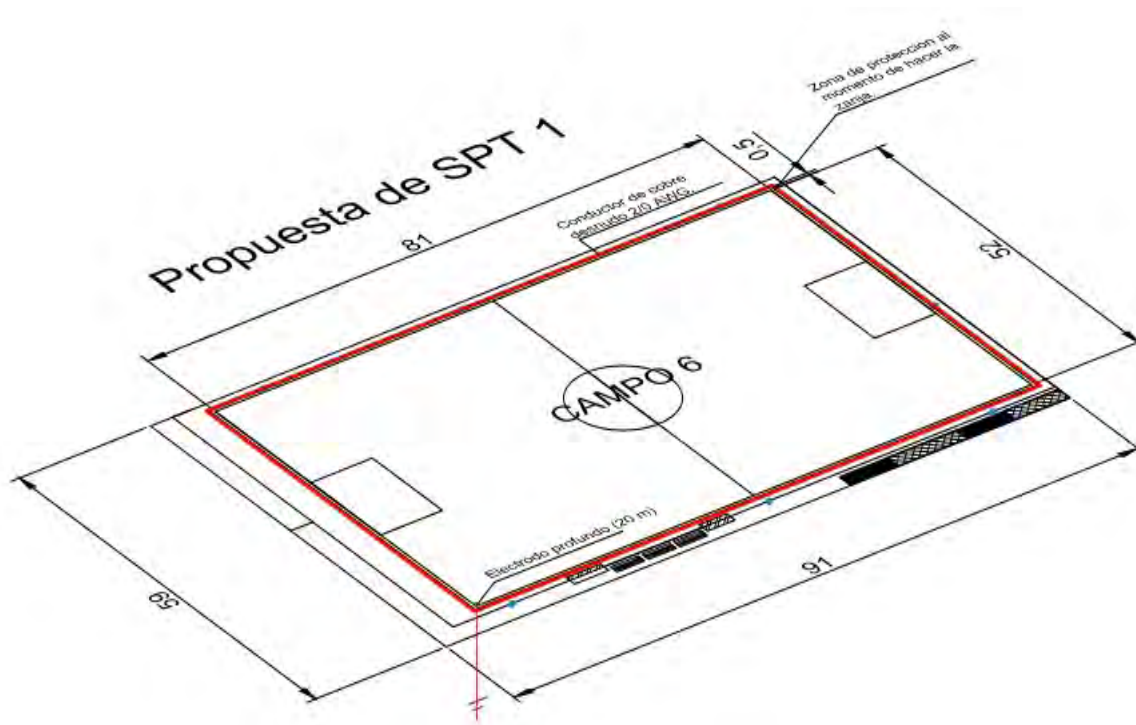


Figura 5.11; Primera propuesta SPT.

Ahora a las dimensiones originales de la cancha se le sumarán 4 metros (debido a el metro que se sumó por cada esquina), esto nos da como resultado 270 [m] de perímetro.

A partir del nuevo perímetro de cavará una zanja de 0.3 [m] de ancho por 0.5 [m] de profundidad, y es ahí donde se enterrará el conductor horizontal. Se elige 0.5 [m] de profundidad debido a que en esa zona hay una capa de relleno que oscila en ese valor antes de tocar roca. A continuación se muestra en la figura 5.12, una imagen del perfil de suelo de los campos deportivos.





Figura 5.12; Perfil de suelo del campo 3, ubicado a un costado del campo número 6..

Sustituyendo nuevamente en la ecuación, ahora con una *longitud del conductor* = 270 [m].

$$R = \frac{5000}{4\pi(135)} \left[ \text{Ln} \frac{4(135)}{(0.005255)} + \text{Ln} \frac{4(135)}{1} - 2 \right] = 46.661 [\Omega]$$

Notamos que nos da un valor de resistencia a tierra más elevado que los primeros, pero debemos tomar en cuenta que es un terreno rocoso y que este valor aún lo podemos reducir con algún tratamiento para el suelo, pero antes de eso, también se propone un electrodo profundo en una de las esquinas del perímetro.



En terreno rocoso, se realizan perforaciones con equipo neumático o motorizado con una broca de 5.08 [cm] de diámetro. En este caso proponemos una profundidad de 20 [m], en los cuales también se enterrará el mismo calibre de cable, es decir, 2/0 AWG. Por lo tanto, a la longitud del perímetro le sumaremos 20 [m], lo cual no da como resultado 290 [m].

Sustituyendo el valor de la nueva *longitud del conductor*:

$$R = \frac{5000}{4\pi(145)} \left[ \text{Ln} \frac{4(145)}{(0.005255)} + \text{Ln} \frac{4(145)}{1} - 2 \right] = 43.835 [\Omega]$$

Con esos 20 [m] de electrodo profundo se logró reducir un poco más la resistencia a tierra, pero aún debemos contemplar un tratamiento para el suelo, es decir, en la zanja donde irá enterrado el conductor. Cabe destacar que cualquier electrodo profundo tiene que alcanzar y respetar los valores requeridos o sugeridos por norma, esto independientemente de determinar una profundidad por medio de cálculos.

Para dicho tratamiento se utilizará bentonita sódica, la cual es una arcilla cuya principal propiedad es la capacidad de absorber y retener agua. Su función radica en llenar las grietas, aberturas y huecos que existen o se hacen en el terreno, mediante una masa que envuelve partículas de éste y los une eléctricamente, formando una gran superficie de contacto y haciendo un buen camino para las corrientes eléctricas que se drenan a tierra. El uso de la bentonita sódica es de difícil manejo, puesto que en contacto con el agua se crea una película impermeable, y para mezclarse con ésta no es tarea fácil. Al estar mezclada con agua, se forma una papilla cuya resistividad oscila entre 2.5 y 3.6 [ $\Omega$ -m], llega a una hinchabilidad media de unos 25 litros por cada kilogramo de bentonita, por tal motivo, cuando se va a mezclar con agua cierta cantidad de bentonita, ésta se deberá echar en un recipiente al menos 10 veces mayor para posteriormente



agregar el agua. Debe de mezclarse muy bien para que quede una mezcla homogénea y lo suficientemente fluida para poder verterla desde el recipiente a la zanja o pozo según sea el caso.

En nuestro diseño del SPT proponemos que la mezcla de bentonita sódica quede como se muestra en la siguiente figura 5.13:

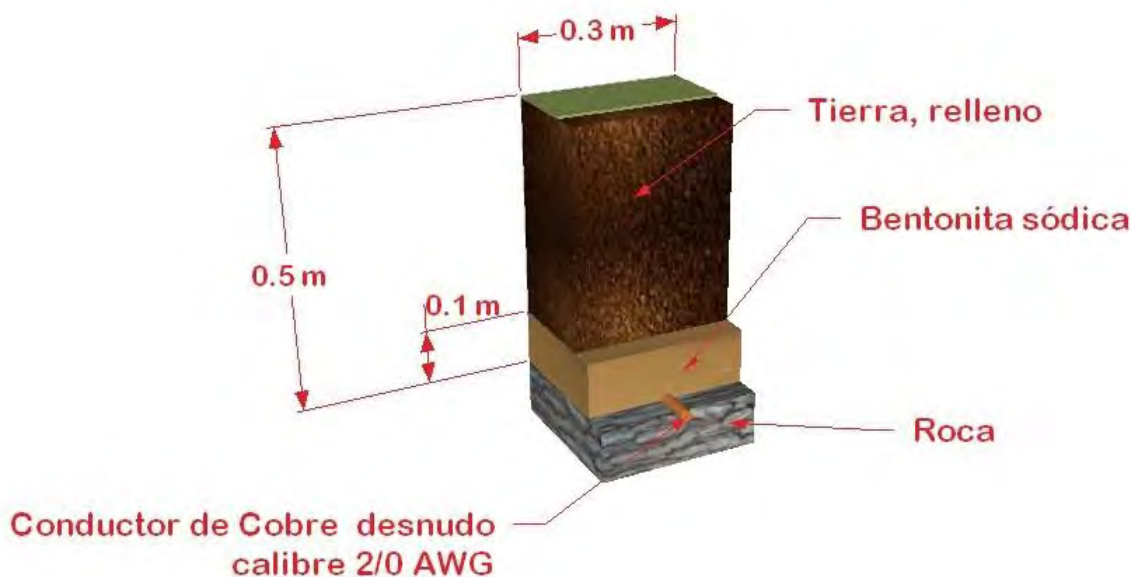


Figura 5.13; Perfil de suelo de la primera propuesta de SPT.

Con este tratamiento al terreno se espera una reducción de la resistencia a tierra de 43.835 [ $\Omega$ ] que originalmente tenía, a 17.534 [ $\Omega$ ] aproximadamente, es decir un rendimiento del 60%.

Destaco que se eligió el calibre 2/0 AWG de conductor conforme a la NOM-001-SEDE-2005, la cual menciona en su artículo 250-81 inciso d): *Un anillo de tierra que rodee el edificio o estructura, en contacto directo con la tierra y a una profundidad bajo la superficie no inferior a 800 mm que conste como mínimo de 6*



*m de conductor de cobre desnudo de tamaño nominal no inferior a 33.6 [mm<sup>2</sup>] (2 AWG).*

Observación: Tanto en la NOM-001-SEDE-2005 como en la NMX-J-549-ANCE-2005 mencionan que en casos de que el terreno presente resistividad alta, como lo es el rocoso, se deben considerar arreglos más específicos para llegar a obtener un valor aceptable de resistencia a tierra. Concretamente la NMX-J-549-ANCE-2005 nos dice en 4.3.4.7 inciso a): *Arreglo de electrodos de puesta a tierra horizontales y verticales formando un lazo cerrado alrededor de la estructura **a la profundidad que el suelo lo permita** e interconectarlo con el acero de refuerzo o estructural de la instalación. Deben evitarse en lo posible arreglos con trayectorias abiertas. En caso de que no sea posible enterrar dicho arreglo, éste debe ubicarse en contacto directo sobre la superficie del suelo rocoso, con una cubierta de concreto con el objeto de evitar que las personas tengan un contacto directo con el conductor y ofrecer una protección contra daño mecánico y condiciones ambientales.*

Lo anterior justifica que los cálculos realizados para el SPT propuesto se utilizara una profundidad de 0.5 [m] para el conductor enterrado. Las normas antes mencionadas manejan distintos valores de resistencia a tierra, en la NMX-J-549-ANCE-2005 dice que como máximo este valor debe llegar a 10 [ $\Omega$ ] y en la NOM-001-SEDE-2005 a 25 [ $\Omega$ ], es por eso que a criterio nuestro, el valor de resistencia a tierra obtenido al final, ya considerando el tratamiento con bentonita sódica al terreno, es muy bueno, puesto que como sabemos, era un suelo con una resistividad muy elevada.



## 5.B.2) TENSIÓN DE CONTACTO Y TENSIÓN DE PASO

En capítulos previos definimos a qué se referían estas tensiones, a continuación se muestran las ecuaciones para calcular dichos valores:

$$E_{\text{contacto}50\text{kg}} = \frac{116 + 0.17\rho}{\sqrt{t}}$$

$$E_{\text{contacto}70\text{kg}} = \frac{157 + 0.24\rho}{\sqrt{t}}$$

$$E_{\text{paso}50\text{kg}} = \frac{116 + 0.7\rho}{\sqrt{t}}$$

$$E_{\text{paso}70\text{kg}} = \frac{157 + \rho}{\sqrt{t}}$$

Se consideran tensiones de paso y de contacto para dos distintos valores de masa corporal, puesto que hoy en día existen más ingenieras y es una consideración muy importante hacia ellas debido al riesgo que conlleva una labor relacionada con la ingeniería eléctrica.

En nuestro diseño, para calcular estos valores consideramos un tiempo de duración de la descarga atmosférica de 50 $\mu$ s en promedio, aunque normalmente estas ecuaciones son aplicadas en subestaciones, donde el tiempo considerado de una falla es de 0.5s, podrían aplicarse en este diseño para tener una referencia de un valor aproximado de la tensión al momento de una descarga atmosférica. A continuación se ilustrará con un ejemplo lo antes mencionado:

*Un trabajador se encuentra en una subestación de potencia dando mantenimiento a un tablero y toca la estructura en el momento que ocurre una falla a tierra, la tensión máxima que se presenta en este momento es de 3000 V. El piso de la subestación donde se encuentra de pie es de grava con una resistividad de 3000  $\Omega$ -m; opera la protección abriendo el interruptor en 0.5 s, desde que se inicia la falla hasta que se libera la corriente de cortocircuito. El trabajador es de complejión robusta y pesa aproximadamente 70 kg. ¿El trabajador se daña al recibir la tensión de contacto?*



$$\rho = 3000 \Omega\text{-m}$$

$$t = 0.5 \text{ s}$$

*Sustituyendo estos valores en la ecuación de tensión de contacto tenemos:*

$$E_{\text{contacto}70\text{kg}} = \frac{157 + 0.24(3000)}{\sqrt{(0.5)}} = \frac{877}{0.70} = 1240.45 \text{ V}$$

*El trabajador es dañado porque la tensión de contacto es menor que la que se presenta en la subestación.*

Del ejemplo anterior podemos concluir, tanto para la tensión de contacto como para la tensión de paso, que **estos valores siempre deberán ser mayores que las tensiones que puedan llegar a generarse en una subestación en el momento de una falla**. Recordemos que a menor tensión mayor corriente, en otras palabras, si el cuerpo humano soporta una tensión de contacto mayor a la tensión generada por una falla, fluirá menor corriente por el cuerpo, lo que por consecuencia protegerá la integridad física de las personas.

Y para efectos de nuestro diseño, como ya mencionamos que la duración promedio de una descarga atmosférica es de  $50\mu\text{s}$  y con una intensidad de corriente de  $30\text{kA}$ , si sustituimos este tiempo en la ecuación de tensión de paso, tenemos:

Donde  $\rho$  es la resistividad de roca, es decir  $5000 \Omega\text{-m}$ .

$$E_{\text{paso}70\text{kg}} = \frac{157 + 5000}{\sqrt{0.00005}} = 729\,309.934 \text{ V}$$



Comparando este resultado obtenido con el de la tensión generada por la descarga atmosférica, tenemos:

De la ley de Ohm:

$$V = RI$$

Donde:

R= Resistencia a tierra obtenida en el diseño, 17.534  $\Omega$ .

I = Intensidad de corriente del rayo, 30000 A

$$V_{\text{rayo}} = (17.534\Omega)(30000A) = 526\ 020\ V$$

$$526\ 020\ V_{\text{rayo}} < 729\ 309.934\ V_{\text{paso}}$$

Como observamos, el valor de la tensión de paso es muchísimo mayor que la tensión generada por el rayo, en consecuencia, para este parámetro podemos decir que queda más que protegida la persona que llegara a encontrarse en el campo al momento de una descarga atmosférica.

Situación distinta sucede con la tensión de contacto, para este parámetro tenemos:

$$E_{\text{contacto}70kg} = \frac{157 + 0.24(5000)}{\sqrt{0.00005}} = 191\ 908.78\ V$$

$$526\ 020\ V_{\text{rayo}} > 191\ 908.78\ V_{\text{contacto}}$$

Observamos que la tensión generada por el rayo en este caso es mayor que la tensión de contacto, en este punto la persona podría sufrir algún daño si en el momento de una descarga atmosférica estuviera tocando algún elemento conductor del SPT, para este inconveniente se propone que todo elemento



conductor expuesto a la superficie (bajadas, empalmes, etc) estén protegidas por tubo de PVC color verde. Quizá se podría pensar que no sea la mejor solución, pero debido a que para llegar a obtener un valor de resistencia a tierra muy bajo en terreno rocoso conlleva un alto costo económico, consideramos que es una alternativa de solución viable, además que sería un hecho fortuito que alguien se encontrara tocando algún elemento conductor del SPT al momento de la caída de un rayo.

Cabe mencionar que cuanto menor tiempo se esté expuesto a una falla eléctrica, se reducirá el riesgo de fibrilación ventricular, lo que en consecuencia ocasionará menor daño físico a la persona, ó podría no sufrir daño alguno si se encuentra protegida por un buen SPT.

### **5.B.3) SEGUNDA PROPUESTA DE SISTEMA A PUESTA A TIERRA, ELECTRODOS PROFUNDOS.**

Como ya se mencionó, en ocasiones cuando el terreno no permite que el valor de resistencia a tierra sea el adecuado, se consideran métodos especiales para llegar a lograrlo, con el inconveniente económico que esto conlleva.

En esta segunda propuesta, para llegar a obtener un valor de resistencia a tierra adecuado como lo marcan las normas, nos centraremos completamente en electrodos profundos.

Como no sabemos con exactitud a que profundidad se tendría que taladrar para llegar a un valor bueno de resistencia a tierra, el cálculo se hará en función de la resistencia y no de la profundidad, siguiente gráfica (Fig. 5.14).



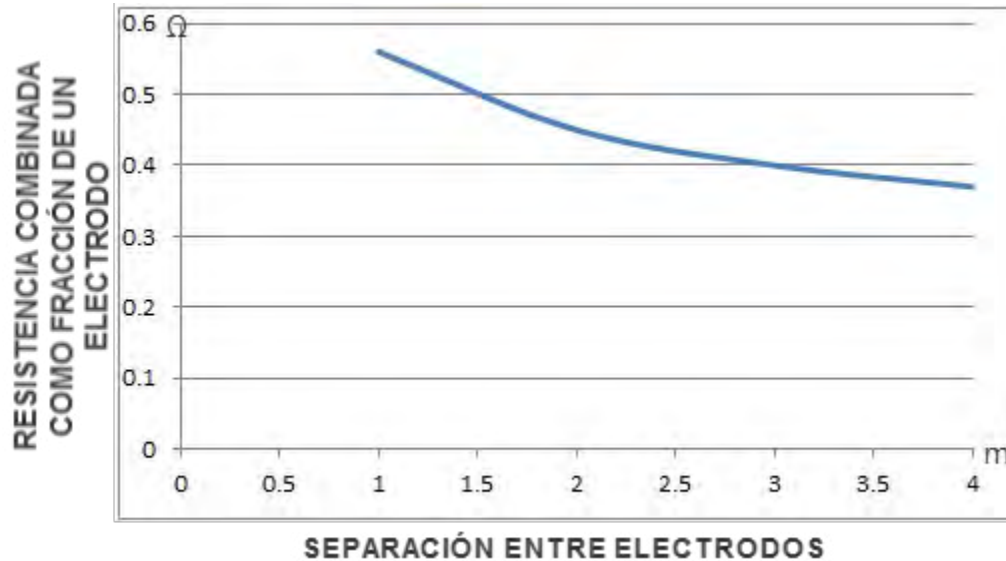


Figura 5.14; Nos muestra el valor de resistencia a tierra si se colocan tres electrodos en línea recta a una distancia determinada uno del otro.

De la gráfica podemos deducir lo siguiente:

Si tenemos un valor de resistencia a tierra de 35  $[\Omega]$  con un solo electrodo, y necesitamos un valor menor de 20  $[\Omega]$ , el valor se reducirá en un 44% colocando dos electrodos más en línea recta con una distancia de 2 m entre cada uno de ellos, es decir, de 35  $\Omega$  que se tenían, quedarán 15.4  $[\Omega]$  ( $35 \Omega \times 0.44$ ), esto para un electrodo de 5/8 de pulgada de diámetro, ó 300 kcmil (15.96 [mm] de diámetro nominal) que es el valor aproximado para el cual aplica la gráfica.

Para nuestro diseño, llegaremos a un valor de 10  $[\Omega]$  como lo marca la NMX-J-549-ANCE-2005, que es la que se especializa en protección contra descargas atmosféricas. Para esto, se deberá perforar el terreno a la misma distancia de la línea blanca que delimita la cancha como se indicó en la primer propuesta, allí se colocará un electrodo hasta llegar a un valor de resistencia a tierra de 25 $[\Omega]$ ,



posterior a eso, colocaremos dos electrodos mas en línea recta a la misma profundidad que el primero, ahora consultamos la gráfica y vemos que para una separación de 3 [m] entre electrodos tenemos un valor de resistencia combinada como fracción de un electrodo de 0.4 [ $\Omega$ ], entonces de los 25 [ $\Omega$ ] que teníamos quedarán 10 [ $\Omega$ ],  $25 [\Omega] \times 0.4 = 10 [\Omega]$ .

Esto lo haremos en los dos lados más largos de la cancha a la distancia que indiquen las bajadas de los pararrayos ó adecuando esto a cualquier situación que pudiera presentarse, esto se muestra en la figura 5.15.

Con esta propuesta de diseño se logra tener un valor de resistencia a tierra mejor que en la primera, pero hay que mencionar, económicamente hablando, puede llegar a salir mucho más caro un diseño de SPT con electrodos profundos que con un diseño en anillo o radial, debido a que generalmente son muchos metros los que hay que perforar para poder llegar a un valor de resistencia a tierra adecuado.

En ambas propuestas llegamos a tener el mismo inconveniente con la tensión de contacto, es decir, sigue siendo menor que la generada por el rayo, pero como antes se mencionó, el costo económico para llegar a un valor de resistencia a tierra lo suficientemente bajo es elevado, es por tal motivo es que nos ajustamos a lo que exige la norma, y se propondrá nuevamente que todos los conductores que no estén enterrados deberán ser protegidos por tubo de PVC color verde. Además para esta tesis, las ecuaciones de tensión y de contacto y de paso son para darnos una aproximación de los valores que pudieran llegar a generarse en el momento de una descarga atmosférica, puesto que no son tan exactas tratándose de valores de tiempos demasiado cortos, como lo es la duración de una descarga atmosférica.

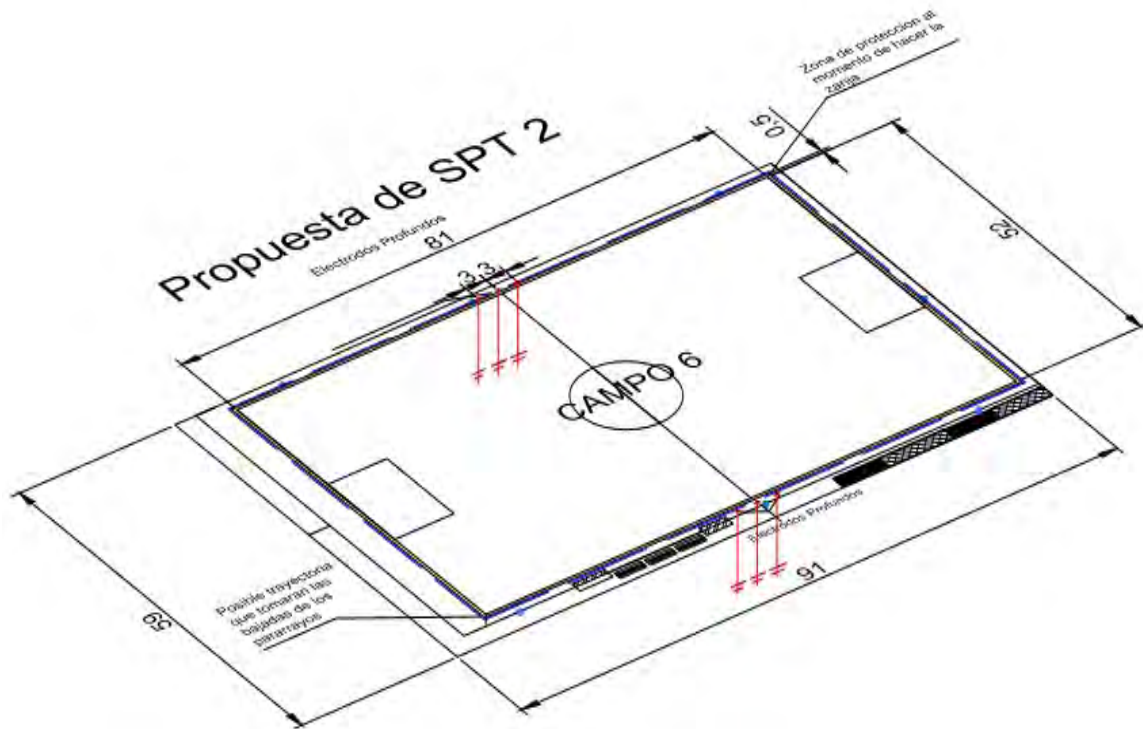


Figura 5.15; Nos muestra el valor de resistencia a tierra si se colocan tres electrodos en línea recta a una distancia determinada uno del otro.



### 5.C) PROPUESTA DE CAPTADORES MEDIANTE EL MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE Y PUNTAS EN ÁRBOLES

Una vez estudiado el suelo y sus características, se analizaron las condiciones exteriores del campo, como sus instalaciones y especialmente los puntos más destacados y candidatos a iniciar el líder ascendente, como los serían los árboles de mayor altura.

Las instalaciones dentro del campo 6 y sus alrededores, comprenden a la malla ciclónica que limita un campo deportivo de otro, las gradas donde los acompañantes observan las actividades de los niños o jugadores, las dos bancas dentro del terreno de juego, así como ambas porterías principales en los extremos, o aquellas de menor tamaño que se presentan ocasionalmente. Pero son los árboles de importante tamaño y grosor, los puntos más destacados sobre el terreno, son candidatos idóneos para el efecto punta y concretar la descarga atmosférica a tierra.

Con una cantidad importante de árboles alrededor del campo de futbol, se han seleccionado en principio, ocho árboles que sirven de referencia, sobresalientes por su altura y ubicación casi simétrica. Su ubicación se muestra en la figura 5.16.

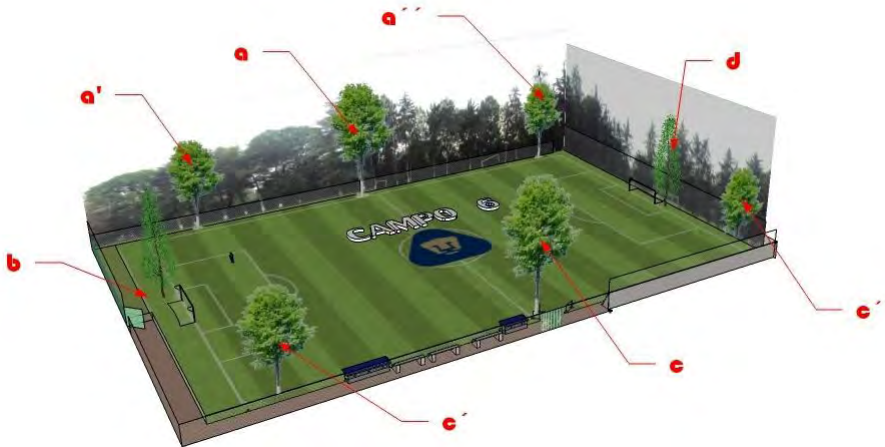


Figura 5.16;  
Árboles  
principales en  
el campo 6.

Las alturas de los árboles se determinaron con métodos sencillos de estimación. Se aprovechó como punto de referencia, una portería auxiliar (P) de 1.7 [m] de altura aproximadamente, que se encontraba situada a un lado de los árboles seleccionados. Así, la relación que obtuvimos entre la altura real del árbol(H) y la portería real (P), debía corresponder a la relación de la altura del árbol en las fotografías (h) y la portería en la misma imagen (p),  $\frac{H}{P} = \frac{h}{p}$ .

De esta manera, la razón para estimar la altura real del árbol (H) sería:  $H = \frac{hP}{p}$ .

Las siguientes imágenes (Fig. 5.17) son ejemplo del cálculo de la altura para un árbol.

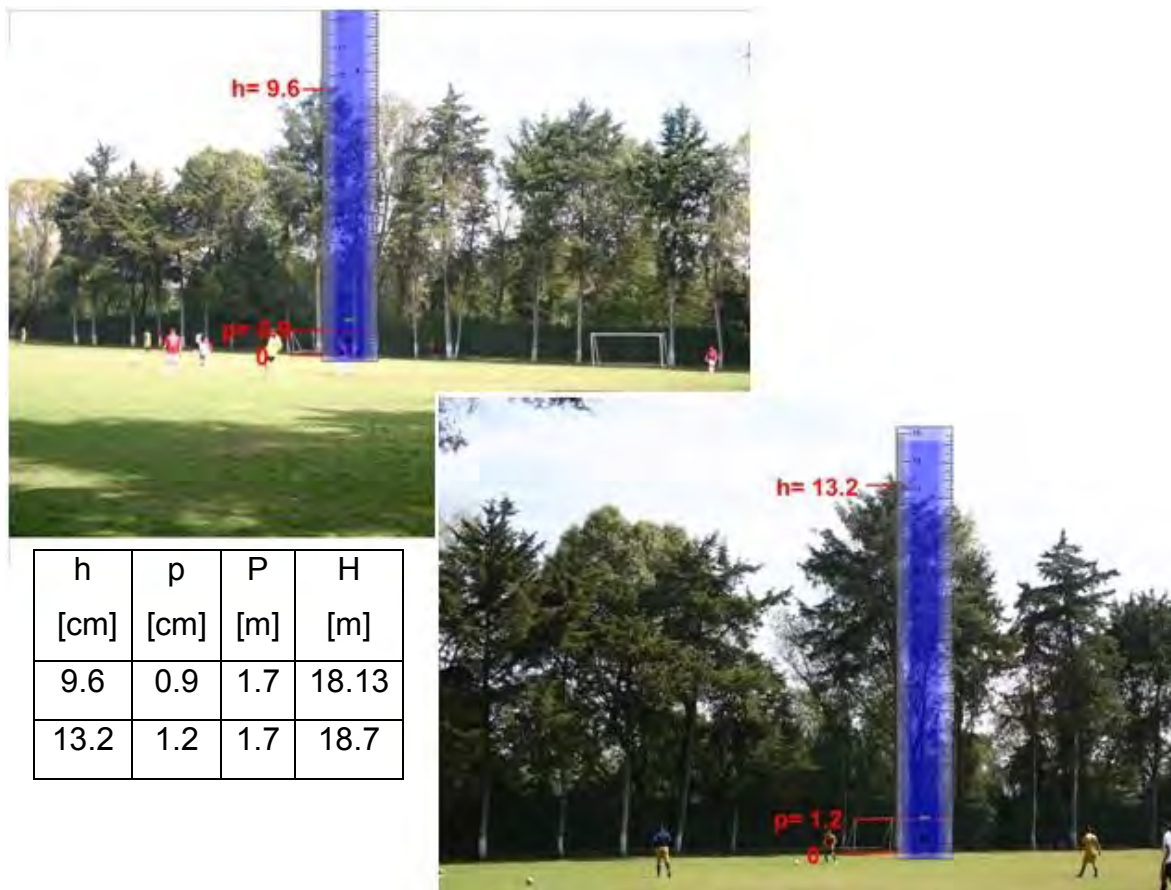


Figura 5.17; Muestra las mediciones para calcular la altura de los árboles.



Sustituyendo los datos obtenidos del análisis gráfico, se obtuvieron diversos valores, los cuales nos llevaron a determinar que para los árboles centrales (a y c), la altura donde aún se podría colocar y sostener la base de la punta captadora es de 18-18.5 [m] aproximadamente, mientras que en todos los demás sería entre 16 y 16.5 [m]. Así se acordó que para los árboles más altos, que corresponden a los ubicados en la zona de medio campo, su altura final del captador sería de 20 [m], mientras que para el resto de los árboles seleccionados, correspondería una altura de 18 [m].

En la imagen siguiente (Fig. 5.18), se muestran un análisis gráfico del alcance del diámetro de protección desde la punta de los 8 árboles principales (a, a', a'', b, c, c', c'', d) como simulando el movimiento de la esfera rodante hasta tocar el terreno, considerando los valores de altura de 20 [m] y 18 [m] correspondientes.

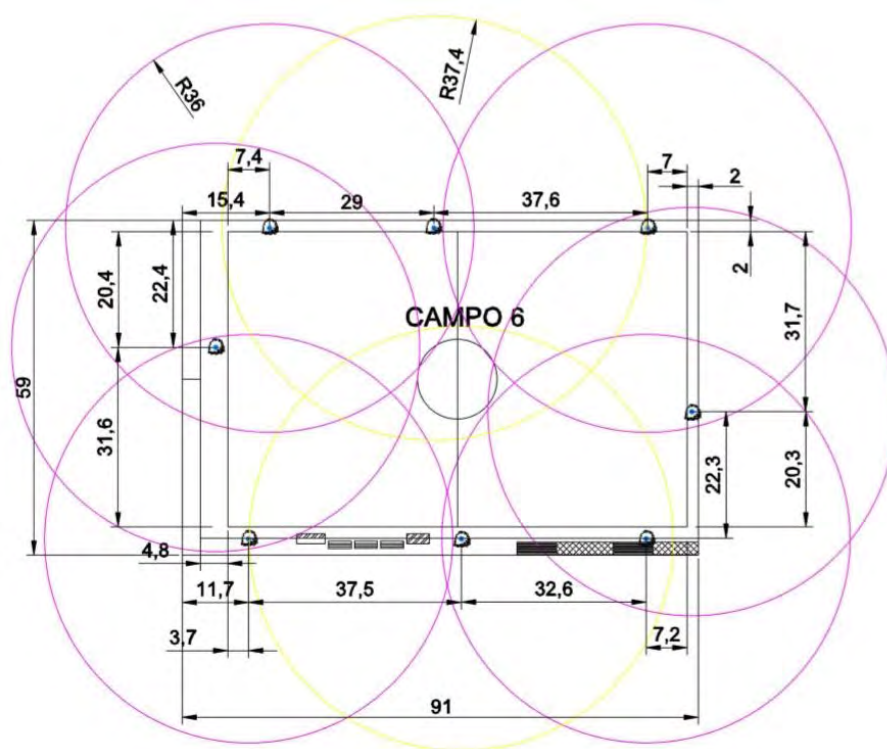


Figura 5.18; Árboles {a,c} Radio de 37.3[m]; árboles (a',a'',b,c',c'',d) Radio 36 [m].





En un principio se estudió el método de ángulo de protección, o cono de protección, debido a la sencillez que presenta un campo abierto. Considerando dos estructuras sencillas con 20 [m] de altura y ángulos al centro  $\alpha=45^\circ$  (una detrás de cada portería), nos entrega un área circular protegida del terreno, de un radio igual a la altura del pararrayos de 20 [m], unidas por cables aéreos tendidos entre los mástiles, cuyo objetivo es presentarse como un dispositivo terminal o receptor no solo de un único punto, sino de una línea de intercepción que prevé de una zona de protección debajo del tendido.

La idea de colocar uno o varios tendidos, además de dos puntas captadoras por cada uno de ellos, en cualquier tipo de configuración a lo largo o ancho del campo deportivo, presentaba un exceso de material y poca estética en el proyecto. Estos factores, además de un abandono de este método por otros con mayor base científica, nos encaminó a desechar este procedimiento, y a estudiar y seleccionar el método de la esfera rodante como sistema de protección para este trabajo.

El método de la esfera rodante, se deriva de un modelo electro-geométrico, que sugiere que al considerar una esfera imaginaria de un determinado radio, el rayo presentará una mayor probabilidad de tocar las superficies u objetos que se encuentren dentro de la esfera o estén en contacto con su superficie; así quedará protegido el área o volumen al exterior de la esfera.

En superficies abiertas, la esfera tocaría una parte del terreno como un plano tangente y giraría sobre el eje que determinaría el pararrayos, dejando bajo rotación, una especie de embudo invertido que será la zona protegida, (Fig. 5.19.a). Si se combinan varias puntas, se pueden simular numerosas esferas y principalmente diversos rodamientos, que determinarán las áreas que podemos proteger, (Fig. 5.19.b); así la suma de estas “sombras” bajo cada esfera acordarán un volumen mayor de protección, (Fig. 5.19.c).

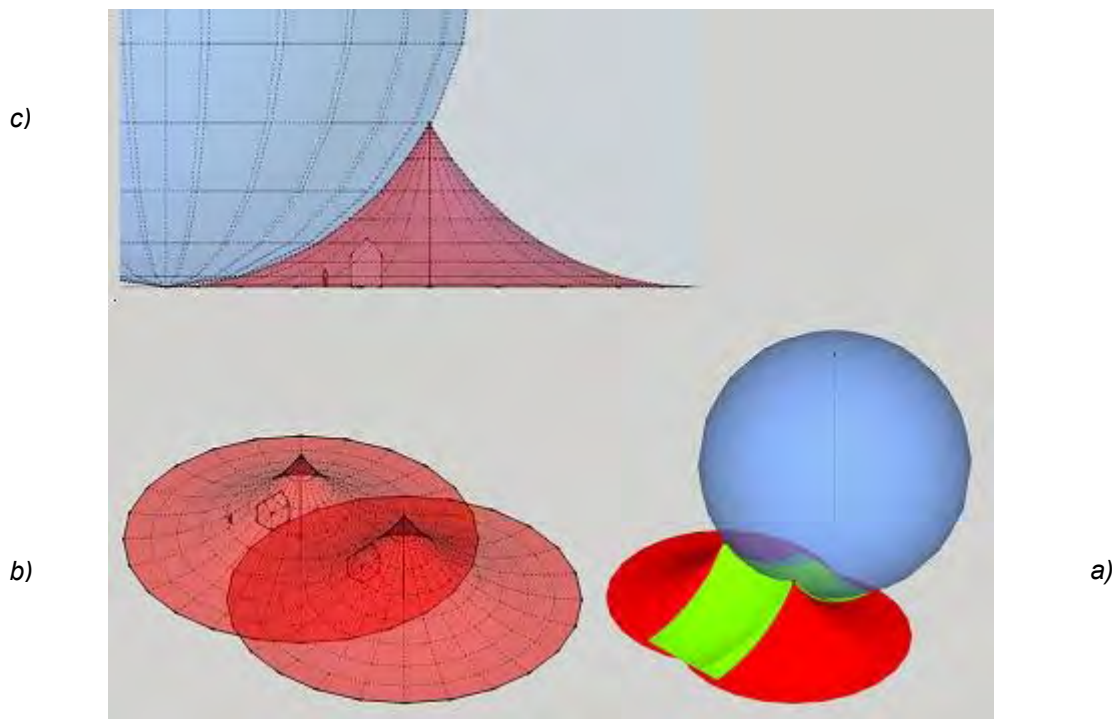


Figura 5.19; Análisis de la zona de protección de la Esfera Rodante con varios puntos altos.

Una vez decidido que el método a analizar es de la esfera rodante, se consideran todos los factores previamente estudiados, desde las condiciones del terreno como ubicación, condiciones atmosféricas, densidad de descargas a tierra y resistividad el terreno, pasando por las sugerencias y recomendaciones de las normativas mencionadas en los capítulos previos, hasta aquella información inicial de la formación del rayo; todo con el objetivo contar con bases sólidas y los argumentos necesarios que nos permitan entregar una propuesta de protección seria, funcional y adecuada a los campos deportivos de Ciudad Universitaria, la cual también se pueda tomar en cuenta para otro tipo de espacios con características similares, todo en beneficio de aquellas personas que disfrutan de actividades al aire libre y los espacios donde pueden desarrollarse.



En función de la norma NMX-J-549-ANCE-2005, considera tres partes fundamentales para una SPTE: la valoración de riesgo, el diseño del SEPTE y el diseño del SIPTE.

El objetivo de la valoración de riesgo consiste en estimar la posible incidencia de un impacto de rayo, es tan importante que puede definir la necesidad de contar o no con el sistema externo de protección y recurrir inmediatamente al sistema de puesta a tierra. Dicha evaluación se realizó bajo el siguiente procedimiento:

- Para calcular la frecuencia anual promedio de rayos directo a una estructura ( $N_0$ ), la fórmula utilizada es:

$$N_0 = N_g \times A_e \times 10^{-6}$$

En donde:

$N_g$  densidad promedio anual de rayos a tierra por [ $\text{km}^2$ ] (densidad de rayos a tierra); cuyo valor para esta zona oscila entre 6 y 6.5.

$A_e$  Área equivalente de captura de la estructura, en [ $\text{m}^2$ ].

- En primer lugar consideramos únicamente al campo de juego (se agregaron dos metros del lado más angosto de la cancha para considerar el área de bancas) y ambas porterías como si fuera una estructura aislada con techo plano y ubicado en terreno plano, esto con el fin de dar la impresión de una sencilla estructura donde se encontrarían en actividades las personas involucradas. La fórmula para estas consideraciones de terreno y techo plano es:

$$A_e = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2$$

En donde:

$A_e$  área equivalente de captura, [ $\text{m}^2$ ];

$a$  longitud lateral mayor de la cancha, 81 [m];

$b$  longitud lateral menor de la cancha, 54 [m];

$h$  altura de ambas porterías, 2.44 [m].



Sustituyendo:  $A_e = (81 * 54) + 6 * 2.44(81 + 54) + 9\pi * 2.44^2 = 6518.734 [m^2]$

Conociendo los valores de la ecuación, procedemos a calcular  $N_0$ .

$$N_0 = 6.5 \times 6518.734 \times 10^{-6} = 0.04237;$$

$$N_0 = 6 \times 6518.734 \times 10^{-6} = 0.0391$$

- Comparando estos valores con el de frecuencia anual permitida  $N_d=0.04$ , nos encontramos el caso del  $DRT=6.5$ ,  $N_0$  (0.04237) es mayor que  $N_d$ . Lo que significa que debe instalarse el SEPTTE. De cualquier manera, si el riesgo estimado fuera menor al riesgo permitido, sigue estando latente la posibilidad de un impacto de descarga atmosférica. Como es el caso del  $DRT=6$ ,  $N_0$  (0.0391).
- Bajo la premisa de la NOTA 1, (tabla 1 de la NMX-J-549-ANCE-2005) de evaluar el nivel de riesgo en función de su localización, densidad y área equivalente de captura para decidir la protección; contemplamos que las condiciones del terreno, como los árboles alrededor del campo, son puntos altos que pueden atraer el rayo hacia esa zona, aún en su forma natural, estos árboles funcionarían como “concreto con elementos metálicos salientes”. Así sus efectos sería “daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra”, y el valor de la frecuencia anual permitida de rayos directos a una estructura sería  $N_d=0.04$ ; mientras que su valor de nivel recomendado sería el III.
- En la tabla 4.1, la frecuencia ( $N_d$ ), nos permite decidir el nivel de protección recomendado, el cual podría ser III ó IV. También se puede seleccionar este nivel de protección de acuerdo a la eficiencia de la tabla 4.2 (tabla 5 de la NMX-J-549-ANCE-2005).

Eficiencia

Nivel de	Eficiencia SEPTTE
----------	-------------------



$$E = 1 - \frac{N_0}{N_d}$$

protección	
I	0.98
II	0.95
III	0.9
IV	0.8

En este caso, la eficiencia no es un parámetro que nos aporte mucho, ya que la sustitución nos entrega los valores de -0.05925 y 0.0255.

Sustituyendo:  $E = 1 - \frac{0.04237}{0.04} = -0.05925$ ;  $E = 1 - \frac{0.0391}{0.04} = 0.0255$

- El hecho de no obtener los resultados esperados. Nos condujo a investigar y actualizar un parámetro importante como el mapa de la densidad de rayos a tierra ( $N_g$ ), ya que estas ilustraciones representan valores obtenidos entre los años 1983 y 1993, pasando poco más de 30 años desde su inicio. Es en la Unidad de Informática para Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS), donde localizamos un proyecto llamado “Atlas Climático Digital de México”, que nos presenta vasta información atmosférica, ambiental y socioeconómica acerca de nuestro país, en una gran cantidad de mapas y bases de datos.

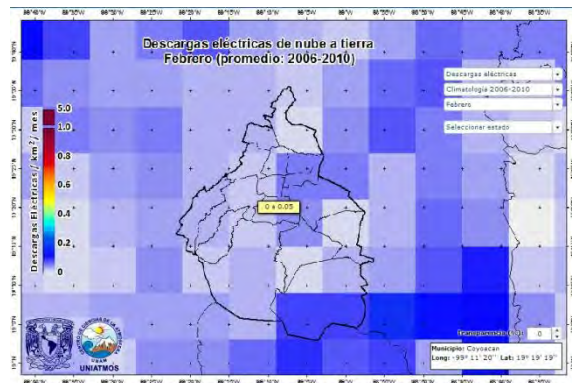
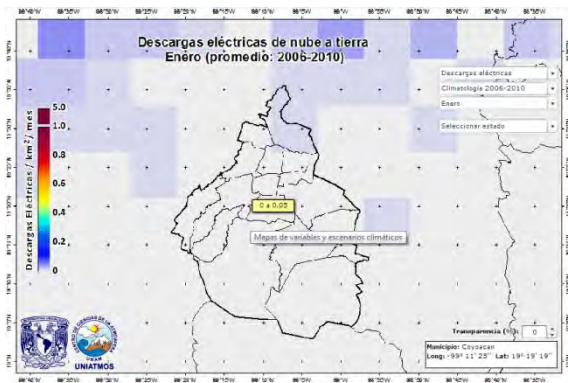
El apartado de nuestro interés, es el de Climatología Atmosférica, el cual reúne mapas y datos de 396 composiciones cartográficas de promedios climatológicos mensuales de descargas eléctricas nube a tierra, para el periodo 2006-2010 en la República Mexicana. Localizamos nuestro sitio de interés, con las coordenadas previamente mencionadas, latitud  $19.325126^\circ$ , longitud  $-99.19313^\circ$ , esto dentro del Distrito Federal. De este modo, obtendremos una lectura de descargas eléctricas de nube a tierra, por



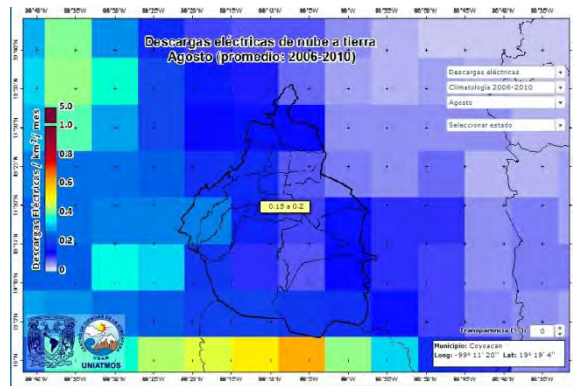
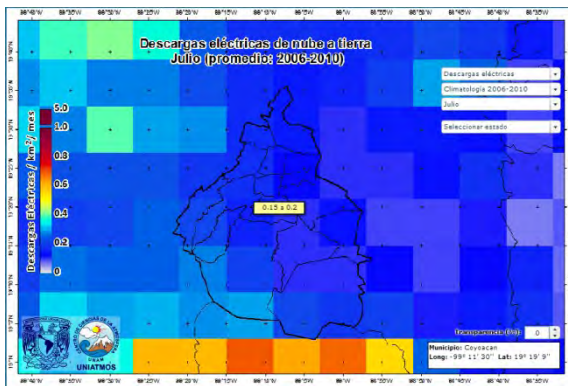
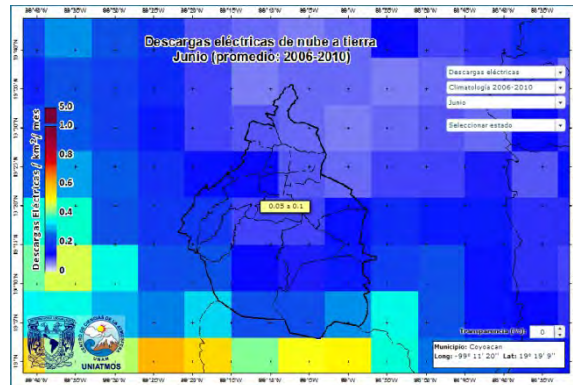
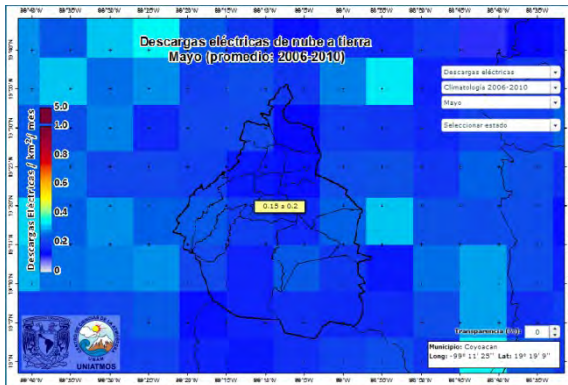
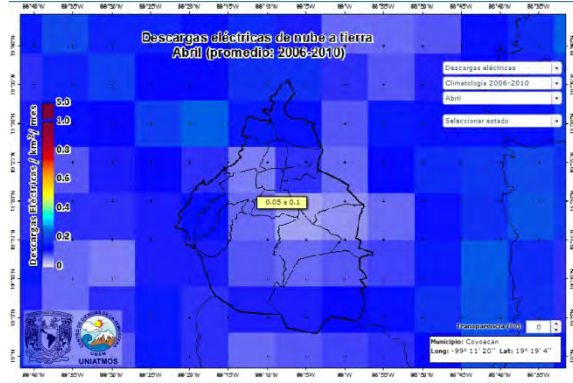
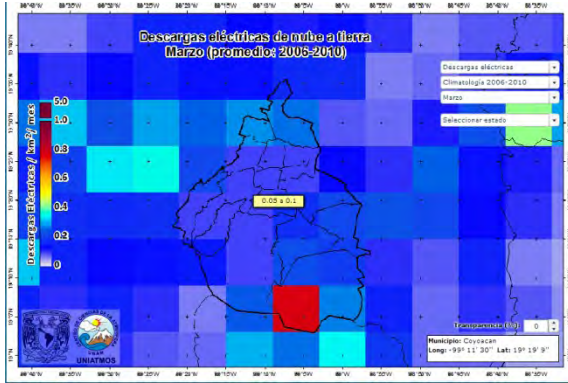
kilómetro cuadrado, por mes, en un periodo mucho más reciente de 2006-2010.

A continuación se tabulan los datos y se hace la corrección de las unidades en “meses”, por “año”.

Mes	Promedio [Desc. Elec./km <sup>2</sup> /mes]	N <sub>g</sub> [Desc. Elec./km <sup>2</sup> /año]
Enero	0 a 0.05	0 a 0.6
Febrero	0 a 0.05	0 a 0.6
Marzo	0.05 a 0.1	0.6 a 1.2
Abril	0.05 a 0.1	0.6 a 1.2
Mayo	0.15 a 0.2	1.8 a 2.4
Junio	0.05 a 0.1	0.6 a 1.2
Julio	0.15 a 0.2	1.8 a 2.4
Agosto	0.15 a 0.2	1.8 a 2.4
Septiembre	0.15 a 0.2	1.8 a 2.4
Octubre	0.1 a 0.15	1.2 a 1.8
Noviembre	0 a 0.05	0 a 0.6
Diciembre	0 a 0.05	0 a 0.6







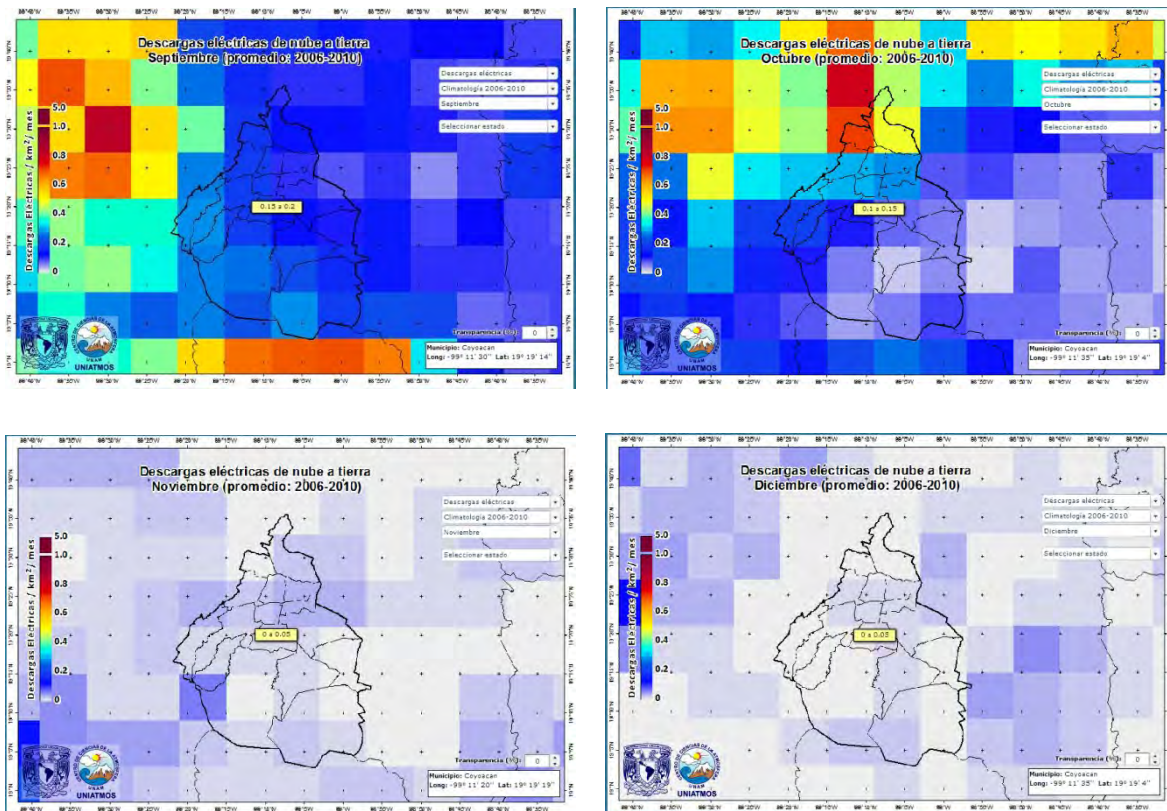


Figura 5.20; Conjunto de mapas y datos sobre el DRT en el Distrito Federal, de acuerdo al periodo 2006-2010, del proyecto UNIATMOS.

Retomando los cálculos de la frecuencia anual promedio de rayos directos ( $N_0$ ); con valores recientes de  $N_g$ . tenemos:

$$N_0 = N_g \times A_e \times 10^{-6}$$

En donde:

$N_g$  Densidad promedio anual de rayos a tierra por  $\text{km}^2$  (periodo 2006-2010).

$A_e$  Área equivalente de captura de la estructura =  $6518.734 \text{ m}^2$

Así como la eficiencia

Así como la eficiencia:  $E = 1 - \frac{N_0}{N_d}$



$N_d$  Frecuencia anual permitida = 0.04

Sustituyendo obtenemos los siguientes valores:

$N_g$	$N_0$	Eficiencia
0	0	-
0.6	0.00391	0.90221
1.2	0.00782	0.80443
1.8	0.01173	0.41331
2.4	0.01564	0.21775

Los datos de la tabla anterior, indican un cálculo de eficiencia del 0.90221; con lo cual, de acuerdo la tabla 5 de la NMX-J-549-ANCE-2005; nos permite seleccionar un Nivel de protección III, lo cual sustenta nuestra primera elección.

- Finalmente considerando que la protección es de Nivel III, la tabla 3 de la NMX-J-549-ANCE-2005, nos concede un radio para la esfera rodante de 45 [m].

Con todo el estudio de este fenómeno y las características que se presentan en el campo 6, terminamos con la información sobre descargas atmosféricas en los árboles.

La razón por la que muchas descargas atmosféricas caigan en los árboles, es debido a que estos **actúan como un pararrayos**. Esto sucede por la simple razón de que la electricidad siempre busca el camino más libre, o en palabras más





exactas, la ruta que oponga la menor resistencia al momento de hacer la descarga desde las nubes a la tierra.

A pesar de que sabemos que la madera como tal es un mal conductor de la electricidad, los árboles poseen una compleja estructura interna, una enorme serie de pequeñísimos millones de conductos. Estos transportan diferentes sustancias sumamente importantes para el árbol, como la savia, el agua y las sales minerales. Todos estos elementos le dan una particular humedad a los árboles, al tiempo que **los convierten en excelentes conductores para las descargas eléctricas de los rayos.**

El árbol, en el camino de la descarga del rayo, pasa a ser un conductor mucho mejor que el mismo aire, facilitando cerrar el circuito de las nubes a la tierra. Especies como robles, olmos, pinos, abetos, álamos, arces y fresnos, son mucho más propensos a recibir el golpe mortal, estos árboles grandes y altos, llevan grandes cantidades de agua en su interior, especialmente durante el verano.

Es por eso que para esta propuesta se optó por utilizar un sistema de captación y bajada de descargas sobre los árboles del campo deportivo, ya que los postes que pudieran instalarse, no alcanzarían la misma altura que tienen los árboles más altos, las cuales oscilan entre los 18 y 20 metros.

Se determinaron los árboles principales, de acuerdo a características como los de mayor altura, distancia entre ellos y ubicación dentro del terreno a proteger, quedando seleccionados los árboles a, b, c, d. Esto se aprecia en la siguiente imagen, (Fig. 5.21).

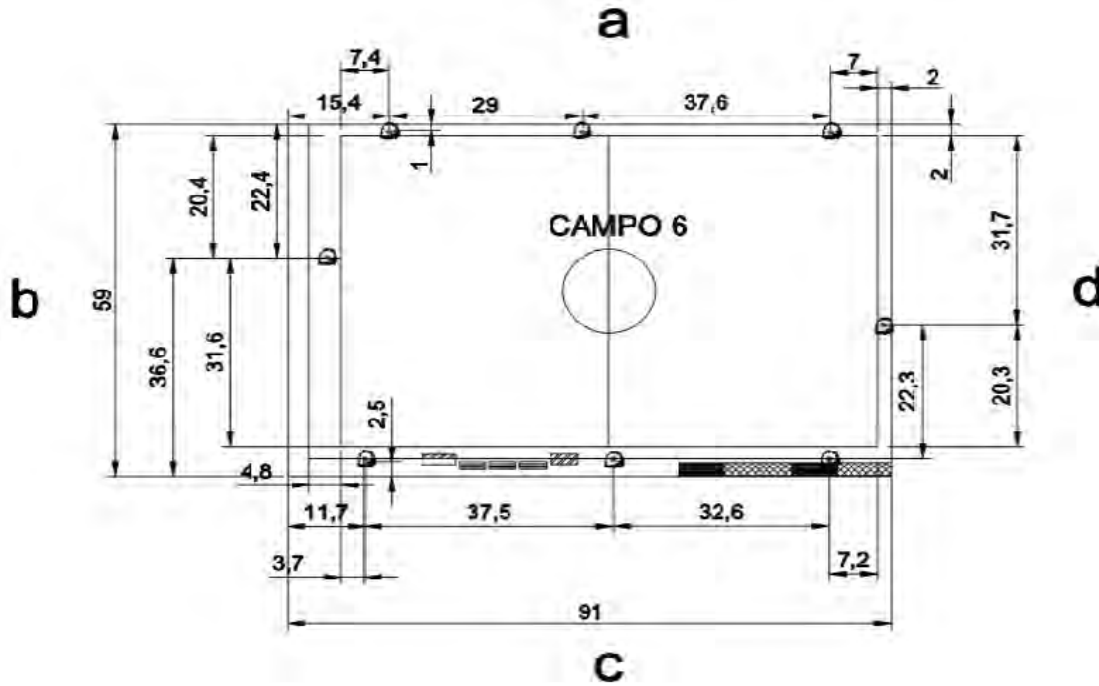


Figura 5.21; Ubicación de los principales árboles seleccionados para instalar las puntas captadoras.

Ya habiendo considerado los arboles donde se colocaran las puntas receptoras, el plano ya con los radios de protección se muestran a continuación.

Es así como queda la protección de la cancha de futbol, haciendo uso del método de protección de la Esfera Rodante, cuyos radio de la esfera es de 45 metros ya que por las características del área a proteger, se concluyó que el nivel de protección a utilizar es de nivel III.

Para la instalación de los pararrayos, los conductores estándar se utilizan en el tronco principal del árbol y para todas las conexiones a tierra. Dicho conductor se extiende desde la parte accesible más alta del árbol, el tronco principal a tierra y bajo tierra a la barra de tierra, o alguna propuesta distinta de SPT, (Fig. 5. 22).

Los conductores en miniatura son utilizados para el cableado en las ramas, y se extenderá desde las alturas accesibles de tres o más de las principales ramas al tronco principal.

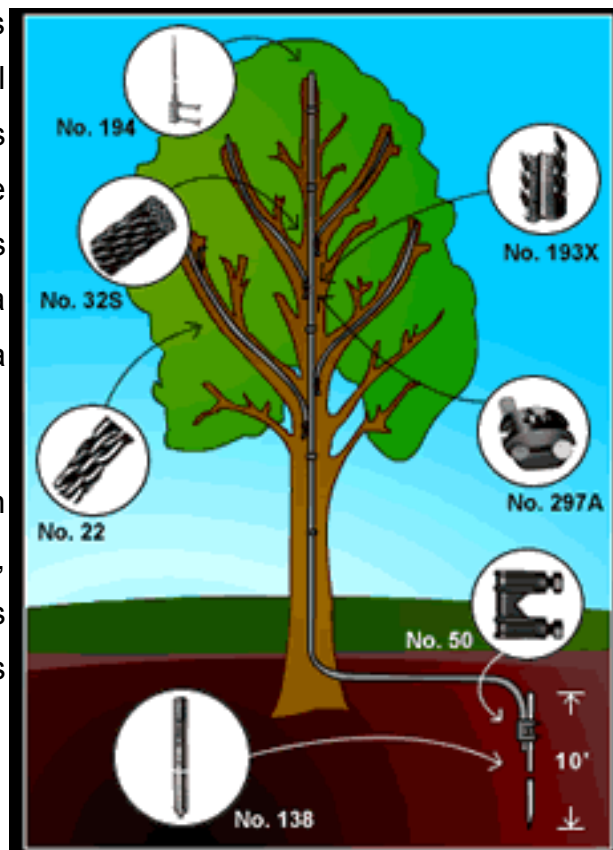


Figura 5.22, Instalación recomendada de puntas franklin o captadores en un árbol.

Por último, los elementos de fijación para los cables se utilizan para unir con seguridad el conductor al árbol de tal manera que no interfiera con el crecimiento continuo del árbol y permitiendo que se balancee en el viento. Los anclajes deben estar separados por no más de 0.9 metros de distancia.

#### 5.D) RECOMENDACIONES: ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE LA TORMENTA ELÉCTRICA

Las descargas atmosféricas se anuncian con la formación de las nubes de tormenta, el cielo nublado y el comenzar de los estruendos en el firmamento. Con





estas características, podemos pensar que, si es posible prever la formación de la tormenta, también será posible tomar las medidas necesarias para evitar pérdidas humanas, acciones que al parecer son muy sencillas pero capaces de disminuir el riesgo a un contacto directo, o algún tipo de daño que pueda producir una descarga atmosférica, ya sea en el sitio donde nos encontremos ó sus cercanías.

La magnitud del daño dependerá en gran medida de la trayectoria que siga la corriente a través del cuerpo humano, si el paso alcanza el pecho de la persona, es mucho más peligroso a comparación del paso por alguna pierna. Las quemaduras en la piel y perjuicio al sistema nervioso, son las primeras manifestaciones en aparecer.

El daño principal en estos incidentes, se presenta concretamente en el paso de corriente de gran magnitud a través del nervio cardíaco, simplemente puede provocar que el corazón deje de latir. Aunque se considera letal una descarga de este tipo, se han podido salvar personas con un masaje cardíaco; aspectos como este y las medidas de prevención, pueden ser de gran utilidad para salvar una vida en caso de encontrarse bajo esta situación.

Esta Tesis nos ubica en el campo 6 de los campos deportivos de fútbol, especialmente dirigida a una participación infantil y juvenil; aunque también, ésta sección de recomendaciones es propuesta para todos los campos deportivos de la zona, o bien campos abiertos donde se presente una tormenta eléctrica.

#### **5.D.1) ANTES: COSQUILLO, CALCULAR TIEMPO Y DISTANCIA**

De manera práctica, se puede tener una idea de la distancia en la que nos encontramos en relación al lugar donde están cayendo los rayos. Esto nos



ayudaría a dar prioridad a la acción a realizar, si es posible localizar un refugio o bien adoptar una posición que reduzca nuestra área de contacto.

Se puede estimar una distancia aproximada de la tormenta, gracias a la luz emitida por el relámpago y el estruendo del trueno. La luz de la primera se produce en el instante en que se genera el rayo, en cambio el trueno es escuchado instantes más tarde. Para esta tarea, de manera empírica se comienzan a contar los segundos que transcurren entre el destello visible del relámpago y el ruido del trueno. Este tiempo se debe multiplicar por 340, ya que la velocidad del sonido es de 340 [m/s]; así el resultado obtenido será la distancia en metros, del lugar de impacto del rayo que acabamos de observar. Si es posible repetir esta acción, nos puede indicar si la tormenta se mantiene a la misma distancia, o bien, se acerca hacia nosotros, o se aleja hacia otro lugar.

Así se calcularía dicha distancia:

$$T_{r-t} [s] * 340 \left[ \frac{m}{s} \right] = D_i [m]$$

Donde:

$T_{r-t}$  es el tiempo que transcurre entre el relámpago y el trueno, en [s].

340 [m/s] es la velocidad del sonido.

$D_i$  es la distancia del impacto con respecto a nuestra posición, en [m].

## **5.D.2) DURANTE: LOCALIZAR REFUGIO Ó REDUCIR NUESTRA ÁREA DE CONTACTO**



Se pueden tomar en cuenta las siguientes medidas de prevención y seguridad, como un complemento de protección ante el riesgo de las descargas atmosféricas, si bien la probabilidad de ser alcanzado por un rayo es casi mínima, se calcula de 1 entre 1,000,000; no deja de ser una probabilidad, la cual podemos reducir aún más. Seguramente si las personas que han sufrido por un día de tormenta, tuvieran la oportunidad de haber disminuido su riesgo y daño, no dudarían en realizar dichas acciones. Estas acciones se concentran en actividades realizadas a campo abierto, que presentan similitud a los campos deportivos, y pueden ser adaptadas a las características y elementos que se pueden encontrar en ambos lugares.

Algunos refugios adecuados y recomendaciones pueden ser:

- Si se va a realizar alguna actividad de campo o al aire libre, se recomienda acceder a la información meteorológica para conocer si existe probabilidad de lluvias y de tormenta, para programar adecuadamente dicha actividad.
- Cuando se ha formado la nube de tormenta, los primeros relámpagos preceden a los rayos a tierra, por unos 15 [min], tiempo suficiente para localizar un refugio apropiado. Si la distancia del impacto se calcula mayor a 800 [m] (entre 2 y 3 segundos de diferencia entre relámpago y trueno); existe un margen justo para localizar un refugio, tanto de la lluvia pero principalmente de las descargas atmosféricas.
- Edificios sólidos. Pueden contar con sistema de protección contra rayos, pero debe evitarse su contacto o cercanía a estas instalaciones, así como instalaciones eléctricas, líneas eléctricas o telefónicas, o cualquier objeto de metal que pueda atraer a los rayos.
- Automóviles ó autobuses. Completamente cerrados actúan como jaula de Faraday, esto quiere decir, que en caso de impacto, la corriente circulará



- solamente por el exterior del vehículo; también se debe procurar no tocar componentes metálicos en el interior.
- Sitio bajo. Aléjate de los sitios más altos, localizar la parte más baja del lugar, en caso de encontrarse árboles en esta zona, procurar que se encuentren en grupo y estén rodeados por otros árboles más elevados, para evitar ser el primer punto de contacto. Es obligatorio no destacar sobre el paisaje circundante.
  - Evite cubrirse de la lluvia en algún árbol asilado. Estos representan una posición prominente y pueden ser uno de los primeros puntos de encuentro entre cargas entre la nube y la tierra. Los árboles resinosos y las encinas son alcanzados con más frecuencia.
  - Evite continuar las actividades al aire libre, el correr, andar en bicicleta, motocicleta o cualquier vehículo abierto es peligroso.
  - Las tiendas de campaña, cabañas, cobertizos, gradas o bancas en campos deportivos, tampoco ofrecen seguridad ante los rayos. También evite aproximarse al alambrado metálico, muros húmedos, antenas y alumbrado.
  - Utilizar materiales aislantes en la vestimenta y calzado, puede ayudar a evitar un contacto más directo de la piel con la corriente. En el caso del calzado deportivo, si cuenta con parte metálicas, su uso puede ser de gran riesgo bajo estas condiciones.

Además del cielo nublado y grisáceo, las primeras señales que puedes percibir, son un hormigueo ó cosquilleo en la piel y se comenzarán a erizar los cabellos, o como popularmente se dice “con los pelos de punta”. Esta sensación te puede indicar que tienes la tormenta encima.

Cuando se presentan estos síntomas en el cuerpo, seguramente se ha reducido el intervalo de tiempo para el cálculo de la distancia de impacto, esto debe indicar



que la tormenta se encuentra muy próxima. En caso de no contar con el refugio adecuado y encontrarse a campo abierto, con el riesgo que esto implica al encontrarse debajo de la zona de tormenta, se sugiere adoptar una “posición de seguridad” y seguir las siguientes recomendaciones:

- Deshazte de los objetos metálicos que puedas llevar.
- Si se está en un grupo, es aconsejable caminar por separado para reducir el riesgo.
- Colócate en cuclillas, doblando el cuerpo hacia adelante, recogiendo la cabeza y manteniendo juntos los pies, como si fuera un solo punto de contacto con la tierra. Nunca debe acostarse de espaldas o pecho tierra a lo largo de su cuerpo, ¡es lo más peligroso que puede hacer!
- También podrías cubrir tus orejas, para proteger al oído de un daño mayor.

Lo más importante en cualquier situación, es evitar formar parte del circuito eléctrico de la descarga. Como se ha estudiado, una persona parada sobre la tierra, puede sufrir un grave daño si se crea una diferencia de potencial perjudicial entre partes de su cuerpo, lo que se conoce como tensión de paso. Y también, una persona cerca de un conductor de descarga puede sufrir una descarga lateral.

### **5.D.3) DESPUÉS DE LA TORMENTA VIENE EL AUXILIO**

Muchos de los accidentes con el rayo, ocurren cuando el núcleo principal de la tormenta ya ha pasado, pero los rayos continúan impactando a varios kilómetros de la misma, a causa de la sobra eléctrica que había formado en la tierra. Es recomendable que las actividades al aire libre no deban ser reiniciadas ni salir al campo abierto, sino hasta 30 [min] después de haber apreciado el último rayo, y movilizarse a un lugar seguro tan pronto haya pasado la amenaza.



En la mayoría de los casos y con las debidas precauciones, pasará la tormenta sin contra tiempos ni daños, pero en el caso de presentarse algún percance, si alguna persona fue alcanzada por un rayo, esta recibe una fuerte sacudida eléctrica y puede sufrir desde quemaduras de mayor o menor consideración hasta un paro cardio-respiratorio; pero no quedan cargadas de electricidad y pueden ser tocadas y atendidas sin ningún peligro para quien auxilia. Conocer esta información puede hacer la diferencia de salvar una vida con tan pocos segundos de enorme valor.

- La persona que recibe el impacto, puede ser atendida inmediatamente, pues ya no presenta carga alguna en su cuerpo. Estos breves instantes pueden ser la diferencia entre salvarle la vida o presenciar su muerte.
- Si la persona afectada se encuentra en estado de muerte aparente, se puede recurrir a la respiración artificial (boca a boca) y el masaje cardiaco (presionar el pecho de la víctima con ambas manos, en periodos de 3 [s]); estos métodos son lo más importante que podemos realizar en esos instantes, ya que las quemaduras podrán ser atendidas posteriormente por el equipo médico.
- Tener siempre presentes los números de ayuda, hospitales, bomberos, etc, para agilizar la solicitud de auxilio para las personas afectadas.
- Un tipo de daño diferente que esta situación produce, es el aspecto emocional. La sorpresa, angustia, desesperación y otras emociones, pueden afectar emocionalmente a las personas presentes; los daños psicológicos (que pueden llevar al shock o a la conmoción) pueden ser menores si se ha trabajado con prevención y con las recomendaciones mencionadas.

## 5.E) DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN





Nos hemos imaginado el campo 6 de la zona deportiva en Ciudad Universitaria, con gran participación de niños y niñas corriendo tras un balón, realizando actividades físicas o recreativas que indican los instructores. Nos figuramos un campo verde con pequeñas playeras de los PUMAS y banderines ondeando en las gradas y en sus alrededores del campo por parte de las familias. También percibimos el primer estruendo a lo lejos y las primeras gotas de lluvia sobre la cancha. Fantaseamos como incrementa la lluvia y los niños siguen corriendo, jugando, riendo y disfrutando de su partido bajo un aguacero. Ya escuchamos los gritos y regaños de las madres pidiendo que se acerquen a ellas para evitar el resfriado y las enfermedades. Soñamos todo esto porque también fuimos niños, también queríamos jugar bajo la lluvia, y porque también pisamos esos campos. Y ahora, como jóvenes universitarios, suponemos que estas escenas deberían permanecer sin riesgo sin daño, sin ningún inconveniente, que a pesar de ser muy poco probable, no deja de ser un riesgo que podría convertirse en tragedia. También nos imaginamos, cómo podríamos ayudar a evitarlo, porque además de la ingeniería que se puede estudiar y presentar en el trabajo, existe otro complemento para hacer más eficiente el éxito de evitar una desgracia, que va más allá del éxito de cualquier proyecto. Pensamos en una cultura de prevención que se arraigue como lo han hecho los simulacros de sismo.

Pero aún más que imaginar, lo que deseamos es que sigan esas sonrisas en los campos deportivos y estén preparadas para actuar en caso de una tormenta eléctrica, sepan cómo protegerse y cómo reaccionar en caso de una descarga atmosférica. Este es un complemento de nuestra propuesta de protección ante descargas atmosféricas, es la difusión de la información a los protagonistas y semillas de la UNAM, los PUMITAS.



---

# GLOSARIO

---

**Área expuesta:** Parte de una estructura o de una zona que exige una protección contra los efectos de los rayos.

**Bajada de SPR:** Parte del sistema de protección contra rayos destinada a conducir la corriente de rayo desde el captor a la toma de tierra del sistema de protección contra rayos.

**Campo electrostático:** Un campo estático de energía eléctrica.

**Canal del Rayo:** El irregular camino a través de la atmósfera a lo largo del cual ocurre una descarga eléctrica atmosférica. El canal del rayo se establece al empezar una descarga eléctrica por el crecimiento de un paso líder, el cual busca un camino de menor resistencia entre la fuente de la carga eléctrica y la tierra o entre dos centros de carga de polaridad opuesta a la de la nube de tormenta o entre el centro de carga de la nube y el aire que le rodea o entre los centros de carga de las nubes adyacentes.

**Captor ó pararrayos (terminal aéreo):** Parte del sistema de protección contra rayos destinada a interceptar los rayos.

**Carga eléctrica:** Es una propiedad de la materia que se manifiesta por la pérdida o ganancia de electrones.

**Carga estática:** Acumulada por inducción, o cargas estáticas dentro de los productos almacenados en contenedores metálicos (por ejemplo: petróleo dentro de tanques de almacenamiento, o municiones en contenedores). Cuando hay impactos de rayos cercanos, debido a que el contenedor está hecho de metal y normalmente conectado a una tierra física, cualquier carga inducida en el



contenedor de metal se descarga instantáneamente. Sin embargo, debido a que los productos dentro del contenedor pueden estar parcialmente aislados del contenedor por sí mismos, van a retener su carga, a esa carga se le llama “carga estática” (bound charge). Esta carga estática se disipará en un lapso de tiempo o instantáneamente si está adecuadamente puesta a tierra, sin embargo, si no se conecta a tierra correctamente y la “carga estática” es lo suficientemente intensa, se originará un arco eléctrico (chisporroteo) entre el techo flotante y la pared del tanque o entre las municiones y el contenedor. Esto puede ocasionar explosiones o incendios.

**Carga inducida a tierra:** Cuando una tormenta con nubes cargadas eléctricamente (ver separación de carga) se mueve sobre un área, induce una intensa carga eléctrica similar, de polaridad opuesta sobre la superficie de la tierra debajo. A medida que la tormenta madura, se intensifica la magnitud de la carga inducida a tierra.

**Conexión ó unión equipotencial:** Conexión eléctrica que pone masas y elementos conductores extraños a un potencial esencialmente igual.

**Contacto directo:** Contacto de las personas con las partes activas de una instalación eléctrica.

**Contacto indirecto:** Contacto de las personas con las masas puestas bajo tensión debido a una falla de aislamiento.

**Convección:** En la electricidad atmosférica, es un proceso de transferencia de carga vertical para transporte del aire contenido en una red carga espacio, o por el movimiento de otro medio (por ejemplo la lluvia) llevando la carga de la red. La difusión del remolino de aire conteniendo el gradiente de carga de la red también puede producir una corriente de aire.

**Corona:** Es un brillo débil envolviendo al electrodo inmerso en un alto campo electrostático, con frecuencia acompañado de flámulas (streamers) dirigidos hacia el campo electrostático-bajo del electrodo.



**Corriente de Corona:** La corriente eléctrica que es equivalente a la relación de la carga transferida al aire desde un objeto puntiagudo (o arreglo de objetos) experimenta una descarga corona. Por lo general, forma una corona sobre objetos terrestres unas veces por el paso de tormentas eléctricas y constituyen la transferencia de carga negativa del aire al objeto.

**Corriente de tierra, transitoria:** La corriente de tierra transitoria es el resultado directo del proceso de neutralización que sigue a la terminación del rayo. El proceso de neutralización es completado por el movimiento de la carga eléctrica a lo largo o cerca de la superficie de la tierra desde el sitio donde la carga es inducida al punto donde termina el rayo. Cualquier conductor (incluyendo alambrado eléctrico, tubería y plomería) enterrados dentro o cerca la carga eléctrica ofrecerá un camino más conductivo desde donde fue inducida en la tierra, hasta el punto más cercano a la terminación del rayo. Esto induce un voltaje en esos conductores. Ya que el proceso de descarga es muy rápido (20 microsegundos) y la relación de crecimiento al pico es tan pequeña como 50 nanosegundos, este voltaje transitorio inducido, aunque corto en tiempo, será muy alto.

**Corriente pico:** La máxima corriente medida en Kilo Amperes (KA) de la descarga eléctrica de un rayo está normalmente en el rango de entre 20 y 30 KA con un máximo de 310 KA.

**Densidad del rayo a tierra:** Es el número de rayos que inciden a tierra por kilómetro cuadrado por año, en una región específica.

**Descarga Corona:** Es luminosa, y a menudo audible, la descarga eléctrica que es por naturaleza intermediaria entre la descarga de una chispa (normalmente, con su canal de descarga) y un punto de descarga (con su difusa, reposada y no luminosa característica). Esto ocurre desde objetos, especialmente puntiagudos, cuando la densidad del campo eléctrico cerca de estas superficies alcanza un valor cercano a los 100 000 volts por metro de elevación. Las Aero Naves volando



a través de tormentas eléctricas activas, a menudo desarrollan la descarga corona, flámulas (streamers) desde antenas y propelas, y aún desde el fuselaje completo y la estructura de las alas. Resultados que son llamados precipitación estática. Son vistos también, durante tiempo tormentoso, saliendo de las cubiertas y los mástiles de las embarcaciones en el mar.

**Descarga de rayo negativa:** Una descarga de nube a tierra la cual empieza en una región negativa de la nube y efectivamente baja algunas decenas de coulombs de carga eléctrica negativa a la tierra. Más del 90% de los rayos de nube a tierra son de este tipo.

**Descarga de rayo positivo:** Una rara descarga de nube a tierra la cual comienza en una región positiva de la nube (desde una de las pequeñas regiones localizadas o una gran región invertida) y termina temporalmente inducida en un área negativa debajo de la tierra.

**Descarga eléctrica atmosférica:** Es la transferencia de cargas eléctricas entre nube y nube, y nube a tierra.

**Descarga eléctrica de Tierra a Nube:** Una descarga eléctrica de rayo en la cual el proceso del paso líder original empieza en forma ascendente desde algún objeto sobre la tierra, de manera opuesta a la mayoría de las más comunes descargas de Nube a Tierra. Las descargas de Tierra a Nube con frecuencia emanan de los picos de montañas altas, o de estructuras altas, y siendo equipotencial a la tierra, puede tener intensidades de campo eléctrico muy fuertes cerca de su extremo superior para iniciar el paso líder ascendente. Son muy raros los relámpagos de rayo ascendentes, se les conocen como centellas.

**Descarga eléctrica:** Es el flujo de corriente generada entre dos cuerpos con diferencia de potencial cuando se rompe el dieléctrico del aire entre ambos.

**Efectos de deflagración:** Canal del rayo que provoca una dilatación del aire y una compresión de hasta unos 10m de distancia. Efecto de onda que rompe



vidrios y tabiques y puede proyectar personas o animales a algunos metros de distancia. Esta onda se transforma al mismo tiempo en un efecto sonoro: trueno.

**Efectos electrodinámicos:** Corrientes de rayo que circulan por los conductores paralelos creando fuerzas de atracción o repulsión entre los cables y provocando roturas o deformaciones mecánicas.

**Efectos térmicos:** Fusión en los puntos de impacto del rayo y efecto Joule debido a la circulación de corriente eléctrica pudiendo provocar incendios.

**Electricidad estática:** Son cargas eléctricas que se almacenan en los cuerpos.

**Electrificación de la nube:** Proceso por medio del cual se cargan eléctricamente las nubes. Este proceso separa las cargas eléctricas positivas y negativas y desarrolla diferencias de potencial, ocasionalmente lo suficientemente altas para generar el rayo.

**Electrodo de tierra anular:** Electrodo de tierra que forma un lazo cerrado alrededor de la estructura.

**Elemento conductor extraño:** Parte conductora que no pertenece a la instalación eléctrica y que puede introducir un potencial eléctrico, generalmente aquel de una tierra local. Se consideran elementos conductores extraños los elementos metálicos utilizados en la construcción de edificios, las canalizaciones metálicas de gas, agua, calefacción, etc., y los aparatos no eléctricos que estén conectados a las mismas, así como los pisos o paredes no aislantes.

**Flámula (Streamer):** Un canal sinuoso (trayecto que tiene curvas, ondulaciones o recodos) de muy alta densidad de ionización la cual se propaga por si misma como un gas que establece una continua avalancha de electrones justo arriba de su punta de emisión. En la descarga de rayo el paso líder, el líder difuso, el contra líder y el rayo de retorno, todos ellos constituyen tipos especiales de flámulas.

**Índice cerámico:** Cantidad de días de tormenta con actividad eléctrica por año.





**Interrupción o colapso:** El proceso por medio del cual es impulsado eléctricamente el aire, es transformado desde un aislador a un conductor. A la interrupción le precede el desarrollo del rayo o un proceso de transportación de elevadas corrientes durante los relámpagos del rayo.

**Líder:** La descarga eléctrica que inicia cada rayo de retorno en una descarga de rayo de nube a tierra. Es un canal de alta ionización que se propaga a través del aire por el rompimiento del dieléctrico, producido por la carga eléctrica descendente. El paso líder inicia el primer impacto en un rayo de nube a tierra y establece el canal para los rayos siguientes de una descarga eléctrica atmosférica. Las fotografías de alta velocidad muestran que los pasos líder tienen normalmente un (1) microsegundo de duración, decenas de metros en longitud, y que el lapso de tiempo entre los pasos es de 20 a 50 microsegundos. El rápido movimiento del líder inicia más rayos subsecuentes. Con la misma rapidez con la que empiezan los pasos líder, terminan o desaparecen. El inicio de este proceso en la descarga de las nubes es con frecuencia llamado líder pero sus propiedades no son bien medidas.

**Masa:** Toda parte conductora de un equipo eléctrico que puede ser tocada y que normalmente no está bajo tensión pero que puede ser puesta bajo tensión en caso de falla de aislamiento principal (gabinete metálico de los tableros eléctricos, canalizaciones metálicas de los conductores activos, carcasa metálica de motores, transformadores u otros equipos eléctricos).

**Ng:** Es la densidad media anual de descargas directas de rayo en la tierra, por km<sup>2</sup>, por año. Es una característica de cada región, que se determina a partir del índice cerámico (I).

**Nivel cerámico:** Número promedio anual de días de tormenta eléctrica de un lugar geográfico.



**Parte activa:** Todo conductor o toda parte conductora destinada a estar bajo tensión en servicio normal (conductores de fase, conductor de neutro y bornes de conexión del equipamiento).

**Paso líder:** El líder inicial o primero de una descarga de rayo; una intermitente columna avanzando de una elevada ionización y carga, la cual establece el canal para el primer rayo de retorno. La característica particular de este tipo de líder es su paso-firme creciendo a intervalos de veinte a cincuenta a cien microsegundos. La velocidad de crecimiento durante los breves intervalos de avance, son de solamente cerca de un microsegundo de duración, es bastante alto (cerca de  $5 \times 10^7$  m/s), pero las largas fases estacionarias reducen su velocidad de propagación efectiva hacia abajo, a solamente cerca de 2 a  $5 \times 10^5$  m/s. Para ayudar a explicar su modo de avance, se sugirió originalmente el concepto de una flámula piloto pero ha sido suplantado por una analogía por un reciente trabajo sobre un largo chisporroteo en laboratorio. Un paso líder completamente desarrollado puede bajar efectivamente la carga de la nube por 10 Coulombs o más de la carga negativa hacia la tierra en décimas de milisegundo. Los pasos líder tienen pulsos de corriente pico de al menos un KA.

**Protección exterior:** Es la parte del SPR integrada por el sistema de terminales aéreos, sistema de bajadas y puesta a tierra. Debe disponerse para que sea capaz de recibir el impacto de rayo, derivar la corriente por el camino más adecuado y dispersar rápidamente la corriente a tierra mediante una puesta a tierra adecuada.

**Protección interior:** Es la parte del SPR que abarca la medida de conexión equipotencial y/o la aislación eléctrica de la protección exterior. Incluye todas las medidas destinadas a proteger la instalación y los equipos frente a las perturbaciones electromagnéticas.



**Puenteo ó unión:** Es el conductor confiable para asegurar la conductividad eléctrica requerida entre partes metálicas que requieren ser conectadas eléctricamente.

**Puesta a tierra del SPR:** Puesta a tierra cuyo objetivo es conducir y dispersar en la tierra la corriente de rayo.

**Pulsos Electromagnéticos (EMP):** Los pulsos electromagnéticos son un efecto secundario de un impacto directo de rayo y son el resultado de los campos magnéticos transitorios que se forman del flujo de una corriente transitoria intensa a través del canal de descarga del rayo.

**Punto de impacto:** Punto del terreno, estructura o sistema de protección contra rayos en el que el rayo incide.

**Rayo a tierra (rayo):** Descarga eléctrica de origen atmosférico entre una nube y tierra, que puede comprender más de un impulso de transferencia de carga.

**Rayo de nube a tierra:** Un rayo ocurriendo entre un centro de carga en la nube y la tierra. Partiendo de estadísticas anuales, la carga negativa que es descargada a tierra es por medio de cerca del 95% de los rayos, y el 5% restante son rayos de carga positiva que son descargados a tierra. Este tipo de rayos, los cuales pueden ser comparados con un rayo entre nubes o con un rayo entre nube y nube, consiste de uno o más rayos de retorno. El primer rayo de retorno empieza con un “paso líder” seguido de un intenso rayo de retorno el cual es la principal fuente de luminosidad y transferencia de carga. La mayoría de los rayos de retorno siguen el mismo canal a tierra. El intervalo de tiempo entre uno y otro rayos de retorno es normalmente de 40 milisegundos.

**Rayo de retorno:** Los pulsos de corriente que transfieren carga a largo de canales muy luminosos entre la nube y la tierra durante un impacto de rayo de nube a tierra. La intensa luz que se propaga de la tierra a la base de la nube en la última fase de cada impacto de rayo de una descarga de nube a tierra. En un rayo típico, el primer rayo de retorno asciende tan pronto como el paso líder descendente



hace contacto eléctrico con la tierra, a menudo ayudados por pequeñas flámulas (streamers) saliendo de la tierra. El segundo y los subsecuentes rayos de retorno se diferencian únicamente en que son iniciados por un rápido líder en movimiento y no es un paso líder. Este es el rayo de retorno el cual produce también toda la luminosidad y la transferencia de carga en la mayoría de los rayos de nube a tierra.

**Rayo en línea:** Comúnmente un rayo de nube a tierra que parece propagarse horizontalmente dentro de una raya de líneas paralelas luminosas cuando está soplando un viento muy fuerte en ángulos rectos a la línea de vista del observador. Impactos sucesivos de rayo son entonces desplazados por pequeñas cantidades angulares y pueden parecer al ojo o a la cámara como diferentes caminos. El mismo efecto se crea fácilmente artificialmente por un movimiento transversal rápido de una cámara durante la exposición de una película.

**Rayo en Zigzag:** La forma común de una descarga eléctrica de nube a tierra visualmente siempre se presenta en mayor o menor grado con varias ramificaciones (brazos), en forma descendente desde el canal principal del rayo (paso líder). En general, de las muchas ramificaciones del paso líder, solamente una se conecta eléctricamente a la tierra definiendo al paso líder primario, con un brillante rayo de retorno y los otros canales o ramificaciones incompletas desaparecen después del primer rayo de retorno.

**Rayo intra nube:** Una descarga de rayo que ocurre entre una zona cargada positivamente y una zona cargada negativamente, cuando ambas cargas se encuentran en la misma nube. El tipo más frecuente de descarga intra nube es el que se da entre la zona cargada positivamente y la zona cargada negativamente. Los relámpagos tienden a ser más numerosos que los de nube a tierra. En general, el canal de un relámpago de la nube será totalmente alrededor de la nube. Aquí, la luminosidad del canal, normalmente produce una luz difusa cuando se ve desde el exterior, la nube y su luz dispersa se llama “rayo difuso” “sheet



lightning”, también es llamado “rayo intra nube”, y “rayo de nube a nube”. Ocurren entre 5 y 10 repeticiones del rayo violentamente como si fueran muchos rayos entre “nube y nube”, de la misma manera como ocurre cuando el rayo es entre “nube y tierra”.

**Red de puesta a tierra:** Es un conjunto de conductores, electrodos, accesorios y otros elementos metálicos enterrados que, interconectados entre sí, tienen por objeto drenar a tierra las corrientes de rayo y las generadas por las cargas eléctricas estáticas.

**Relámpago:** A la descarga eléctrica atmosférica completa, de nube a tierra, o de tierra a nube, se le llama relámpago. Un relámpago puede ocurrir dentro de una nube, entre nubes, o entre nube y tierra (de nube a tierra o de tierra a nube). Un relámpago incluye uno o más rayos y pulsos de corriente muy alta llamados rayos de retorno. La duración de un relámpago es normalmente menor a un segundo. Por lo general es de medio segundo.

**Separación de carga:** El proceso físico que origina la electrificación o carga eléctrica de la nube. El proceso puede incluir las colisiones de partículas con la transferencia de carga selectiva y la captura de partículas de pequeños iones a la escala de las partículas. El proceso puede incluir el impulso-gravitacional, movimientos diferenciales de partículas, y transporte convectivo de espacios de aire cargados a la escala de la nube.

**Sistema de pararrayos:** Es el conjunto de terminales aéreas, conductores de bajada y red de puesta a tierra.

**Sistema de protección contra rayos (SPR):** Sistema completo que permite proteger una estructura o zona contra los efectos de los rayos.

**Sistema de protección contra rayos aislado de la estructura a proteger:** Sistema de protección contra rayos en el que el captor y las bajadas se colocan de tal forma que la trayectoria de la corriente de rayo no tiene ningún contacto con la estructura a proteger.

**Sistema de protección contra rayos no aislado de la estructura a proteger:**

Sistema de protección contra rayos en el que el captor y las bajadas se colocan de tal forma que la trayectoria de la corriente de rayo puede estar en contacto con la estructura a proteger.

**Tensión de aislamiento:** Es la diferencia de potencial que aparece debido a un defecto de aislamiento entre dos partes conductoras simultáneamente accesibles.

**Trueno:** El sonido es generado a lo largo de la longitud del canal del rayo debido a que la atmósfera se calienta por la descarga eléctrica en el orden de los 20 000 °C (3 veces la temperatura de la superficie del sol). Esto comprime el aire circundante produciendo una onda de choque, la que entonces decrece a una onda acústica que se propaga lejos del canal del rayo. Aunque el relámpago y el trueno resultante ocurren al mismo tiempo, la luz viaja a 186 000 millas en un segundo, también un millón de veces la velocidad del sonido. El sonido viaja relativamente a paso de tortuga, una quinta parte de una milla en el mismo tiempo. Por esta razón el relámpago no se oscurece por las nubes, es visto antes de que se escuche el trueno. Contando los segundos entre el relámpago y el trueno hay que dividir entre 5, para estimar la distancia en millas donde pudo haber terminado (caído) el rayo.



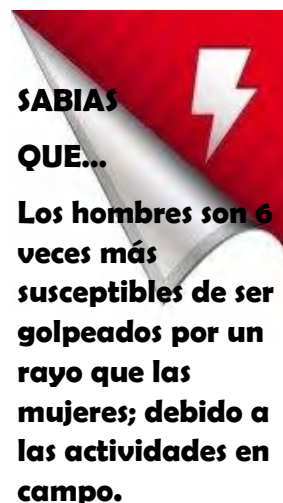


# APÉNDICE 2

## NOTICIAS DE ACCIDENTES PROVOCADOS POR LOS RAYOS EN CAMPOS DEPORTIVOS



Esta sección, apéndice 2, muestra algunos hechos de accidentes y lamentables pérdidas de vidas humanas alrededor del mundo, debido a la participación en actividades relacionadas a un campo deportivo, de entrenamiento o partidos de fútbol. Todos los continentes, todos los países, pueden contar con historias similares.



### CONTENIDO

**MÉXICO: PUERTO VALLARTA (JALISCO). 1992**

**MALASIA: SUNGKAI. 1993**

**CAMERÚN: RAYO MATA A JUGADORES EN ÁFRICA. 1993**

### **MÉXICO: PUERTO VALLARTA (JALISCO). 1992**

<http://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/>

En 1992 hubo un accidente en Puerto Vallarta, cuando dos jugadores perdieron la vida y cinco fueron heridos por culpa de un rayo caído durante el encuentro disputado entre los equipos Holiday Inn y Cazadores.



**HONDURAS: TRAGEDIA EN  
PUERTO LEMPIRA. 1995**

**HONDURAS: MUEREN DOS  
ESCOLARES POR UN RAYO.  
1998**

**CONGO. UN RAYO MATA  
EQUIPO DE FUTBOL 1998**

**COLOMBIA:  
GIOVANNI CÓRDOBA Y  
HERMÁN GAVIRIA. 2002**

**MALASIA: SUNGKAI. 1993**

<http://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/>

En un partido de futbol entre los equipos El Tigre de Berantai y El Hijo de Sekinchan, mueren cuatro jugadores en el encuentro a causa de un rayo que cayó en el campo.

**CAMERÚN: RAYO MATA A JUGADORES EN ÁFRICA.  
1993**

<http://de10.com.mx/wdetalle4636.html>

En 1993, durante un partido de la liga "B" de Camerún, cayó un rayo en la cancha, mató a tres jugadores y lastimó a otros cinco, todos del mismo equipo. El conjunto perjudicado acusó al otro de brujería.

{ “El conjunto perjudicado, acusó al otro de  
brujería” }

**HONDURAS: TRAGEDIA POR RAYO EN PUERTO LEMPIRA. 1995**

<http://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/>

En 1995 una tragedia por un rayo ocurrió cuando 14 personas murieron y 36 resultaron heridas mientras presenciaban un juego de futbol en Puerto Lempira.

**HONDURAS: MUEREN DOS ESCOLARES POR UN RAYO. 1998**

<http://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticial>

Años más tarde, en 1998, los escolares hondureños, uno en Tegucigalpa y el otro cerca de San Pedro Sula, murieron por causa de las quemaduras provocadas por el alcance de sendos rayos sobre ellos. El primero iba a recoger el balón que había salido fuera del campo; el segundo se protegía de la tormenta bajo un árbol.



## **CONGO: UN RAYO MATA A UN EQUIPO DE FÚTBOL, BRUJERÍA EN CANCHA. 29 DE OCTUBRE 1998**

<http://www.elmundo.es/1998/10/29/deportes/29N0105.html>

Los once jugadores del Bena Tshadi, un equipo de fútbol de la República Popular de El Congo, murieron durante un partido el pasado fin de semana alcanzados por un rayo que, asombrosamente, no afectó en absoluto a los jugadores del equipo contrario que resultaron ilesos, debido a que sus zapatos eran con puntas de goma a diferencia del equipo contrario que eran de metal.

Los jugadores cuyas edades oscilaban entre los 20 y los 35 años, disputaban en ese momento el partido que registraba un empate a uno.

El mismo fin de semana durante los partidos realizados en El Congo, una treintena de personas han sufrido quemaduras por los efectos de los rayos. El pasado domingo, la caída de un rayo obligó a suspender el partido de Liga que enfrentaba en Sudáfrica al Africa Swallows con el Cosmos.

Dos jugadores fueron hospitalizados y otros siete tuvieron que ser atendidos debido a diversas conmociones producidas por el fenómeno.

Los dirigentes y simpatizantes del equipo afectado han responsabilizado a la brujería del trágico suceso. Las poblaciones rurales africanas culpan muy a menudo a la brujería y a la llamada magia negra de muchos de los males causados por fenómenos naturales o enfermedades incurables y algunos equipos de fútbol contratan a hechiceros para que influyan con sus oficios en el resultado de los partidos.

## **COLOMBIA: GIOVANNI CÓRDOBA Y HERMÁN GAVIRIA. 24 DE OCTUBRE 2002**

<http://www.elcolombiano.com/proyectos/copamustang/10-27-2002/idolos.html>

En "la Casona", campo de entrenamiento del Deportivo Cali en Colombia, cayó un rayo que provocó la muerte de dos jugadores y la atención médica de otros tres.

"Gaviria estaba un poco separado del grupo y la descarga le cayó a él. Los zapatos (de fútbol) le estallaron, quedó un agujero en el piso y el pasto que lo rodeaba se quemó completamente" (Fig. A2.1); expresó en tono dramático su entrenador argentino Oscar Quintabani. "Se escuchó un estruendo muy fuerte, pero yo no sentí nada físicamente. De golpe, vimos caer a varios jugadores. Gaviria se tumbó fulminado y Córdoba, que estaba como a 30 metros, dijo que iba a socorrerlo, pero dio unos pasos y se derrumbó", indicó también Quintabani.

*“A mí no me va a partir un rayo”*. Lo dijo Hermán Gaviria mientras entregaba al utilero del equipo su anillo, cadena y reloj para ir a la práctica.



*Fig. A2.1. Carlos Castillo (izq.), Óscar Quintabani (centro) y Jorge López Caballero (der.), tratan de auxiliar a Hermán “Carepa” Gaviria después de que el rayo impactó en su cuerpo, pero las lesiones internas fueron mortales.*

En declaraciones a la agencia estatal argentina Télam, el orientador agregó: "yo estaba a unos 20 metros de Gaviria y apenas cayó boca abajo corrí hacia él para reanimarlo. Lo di vuelta y noté que le salían sangre y humo por la nariz. Le grité pero no reaccionaba", dijo con voz quebrada.

Hermán Gaviria de 32 años, falleció al instante, mientras que su compatriota Giovanni Córdoba de 24 años, murió tras 71 horas de permanecer conectado a un respirador artificial a raíz de los daños irreversibles en múltiples órganos que le provocó el rayo.

El último día se presentaron complicaciones renales, pulmonares, cardiovasculares y cerebrales que lo llevaron a la muerte sin que fuera posible evitarlo. (Fig. A2.2).

El “Carepa” Gaviria se murió de la forma en la que muchos quisiéramos, haciendo lo que más nos gusta. A él le gustaba jugar al fútbol y fue en una cancha de fútbol donde se le vio con vida por última vez. Una de sus últimas frases fue “un rayo no me va a matar”, y como presintiendo lo que le iba a ocurrir, precisamente fue un rayo lo que le cegó la vida a un hombre que siempre se caracterizó por su alegría dentro y fuera de las canchas.

La noticia del joven Córdoba, se dio a conocer después del homenaje rendido en el campeonato colombiano a “Carepa” Gaviria, más de 20,000 personas dieron un último adiós a Córdoba en el Estadio Pascual Guerrero de Cali. (Fig. A2.3).



Fig. A2.2. (Arriba). El féretro de Giovanni Córdoba es llevado al Estadio Pascual Guerrero donde fue velado.



Fig. A2.3. (Derecha). Los aficionados recibiendo el cuerpo de Hermán "Carepa" Gaviria.

## CONTENIDO

**COLOMBIA: JESÚS RAMÍREZ. 2002**

**SINGAPUR: JIAN TAO. 2004**

**ESPAÑA: LO MATO UN RAYO. 2005**

**GUATEMALA: MATA RAYO A JUGADORES. 2005**

**COLOMBIA: UN RAYO MATA A 5 PERSONAS. 2006**

**BRASIL: AL ÁRBRITO LO MATÓ UN RAYO. 2006**

**ALEMANIA. CUATRO FUTBOLISTAS HERIDOS POR UN RAYO. 2008**

## COLOMBIA: JESÚS RAMÍREZ. 27 DE OCTUBRE 2002

[http://www.elpais.com/articulo/deportes/COLOMBIA/Rayos/mortales/Colombia/elpepidep/20021029elpepidep\\_4/Tes/](http://www.elpais.com/articulo/deportes/COLOMBIA/Rayos/mortales/Colombia/elpepidep/20021029elpepidep_4/Tes/)

Un futbolista aficionado, Jesús Ramírez de 32 años, fallece a mitad del campo de fútbol en la localidad colombiana de Fusagasugá, situada a 60 km al suroeste de Bogotá. Esto debido a recibir una descarga en medio de un torrencial aguacero.

"De inmediato fuimos a auxiliarlo, pero de su cuerpo sólo salía humo", dijo un testigo a los periodistas. Ramírez llegó sin signos vitales al hospital de Fusagasugá, donde falleció a pesar de los esfuerzos de los doctores para reanimarlo.

Uno de los médicos que atendió a la víctima mortal señaló que tenía signos de quemaduras "que venían desde la parte superior del tórax, continuando una línea hacia las extremidades inferiores por donde al parecer salió la descarga".





## **SINGAPUR: JIAN TAO. 10 DE OCTUBRE 2004**

<http://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/77875.fallece-jugador-chino-durante-entrenamiento.html>

Un futbolista chino con tan solo 18 años, murió fulminado por un rayo durante un entrenamiento de su equipo SinChi TV de la liga de Singapur.

Medios radiofónicos aseguraron después de presenciado el hecho que Jiang Tao era víctima de un rayo el cual lo habría derribado y privado de la vida de manera instantánea; sus compañeros de equipo intentaron reanimarlo pero

## **ESPAÑA: LO MATÓ UN RAYO MIENTRAS JUGABA UN PARTIDO DE FUTBOL. 8 DE**

<http://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/149391.mata-rayo-a-jugadores-de-futbol-en-guatemala.html>

Era una noche en la que los amigos se habían juntado para jugar, y a pesar de la lluvia todos estuvieron de acuerdo en organizar el partido de fútbol. Comenzaron a jugar en medio de truenos y relámpagos en la localidad de San Antonio de Benagéber, en la provincia de Valencia, España.

Todo iba bien hasta que una luz fulminante impactó sobre un joven de 25, y un segundo más tarde se sintió el ruido ensordecedor del trueno. Los amigos lo vieron tirado en el piso, llamaron a emergencias y aunque fue trasladado, los médicos no pudieron reanimarlo a pesar de los esfuerzos.

## **GUATEMALA: RAYO MATA A JUGADORES DE FUTBOL. 18 DE MAYO 2005**

<http://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/149391.mata-rayo-a-jugadores-de-futbol-en-guatemala.html>

Dos jugadores aficionados, Edgar López de 38 años, y José Luis Mejía de 36, unieron sus nombres a la larga lista de víctimas de este fenómeno de la naturaleza que han muerto, especialmente en las canchas de futbol de todo el mundo.

Los dos guatemaltecos murieron calcinados por un rayo en el municipio sureño de Villa Nueva, poco después de que ambos se refugiaron bajo un árbol debido a la fuerte lluvia que obligó a suspender el choque que disputaban.

## **COLOMBIA: UN RAYO MATA A CINCO PERSONAS DURANTE UN PARTIDO DE FUTBOL. 20 DE NOVIEMBRE 2006.**

<http://www.terra.com/deportes/articulo/html/fox331756.html>

Un rayo mató a cinco personas y causó quemaduras a otras cuarenta en los alrededores de un campo de fútbol del noreste de Colombia en el que se jugaba la final de un campeonato campesino, según informaron autoridades locales.





Los muertos y heridos eran aficionados que se protegían bajo una carpa de las lluvias torrenciales que caían en la zona el caserío de El Llano del Pozo, que pertenece a la localidad de Abrego, cerca de la frontera con Venezuela.

Tres mujeres y dos hombres murieron en la tragedia y más de cuarenta sufrieron quemaduras de diversos grados. "Cuando cayó el rayo tembló todo y sentimos que la tierra se hundía", dijo el lugareño Carlos Pérez a un corresponsal de la cadena bogotana Radio Caracol.

## **BRASIL: AL ÁRBITRO LO MATÓ UN RAYO. FEBRERO 2006**

[http://adnargentina.com/argentina/deportes/cuatro\\_futbolistas\\_heridos\\_graves\\_rayo\\_alemania\\_futbol\\_08\\_08\\_08\\_deportes.html](http://adnargentina.com/argentina/deportes/cuatro_futbolistas_heridos_graves_rayo_alemania_futbol_08_08_08_deportes.html)

Un rayo fulminó a un árbitro en pleno partido en la ciudad de Monte Aprazível, Brasil, a unos 475 kilómetros de San Pablo, el equipo de veteranos local con el de Bady Bassin Depois. El árbitro Celestino Cicotti Junior de 41 años, se disponía a pitar el reinicio del juego, tras un gol del equipo local cuando un rayo lo mató.

## **ALEMANIA: CUATRO FUTBOLISTA HERIDOS GRAVES POR UN RAYO. 8 DE FEBRERO 2005**

[http://adnargentina.com/argentina/deportes/cuatro\\_futbolistas\\_heridos\\_graves\\_rayo\\_alemania\\_futbol\\_08\\_08\\_08\\_deportes.html](http://adnargentina.com/argentina/deportes/cuatro_futbolistas_heridos_graves_rayo_alemania_futbol_08_08_08_deportes.html)

Jugadores del SV Eintracht Waldmichelbach, equipo de una liga regional alemana, fueron ingresados al hospital con heridas graves, después de que un rayo cayera en el lugar de entrenamiento. Alrededor de 25 personas entre jugadores y aficionados fueron atendidas en el lugar por los equipos de emergencia, sin contar con pérdidas humanas que lamentar.

## **BRASIL: ADOLESCENTES MUEREN FULMINADOS POR UN RAYO. 17 DE MAYO 2009**

<http://www.lavozdegaliccia.com/mundo/2009/05/17/00031242583197637956813.html>

Cuatro adolescentes de entre 13 y 16 años murieron el domingo 17 de mayo fulminados por un rayo cuando practicaban fútbol durante un aguacero en una hacienda en el estado brasileño de Pernambuco. Los jóvenes fueron socorridos por otros jugadores y trasladados a una clínica en la ciudad de Carpina, donde llegaron ya sin vida. Las víctimas son Cosmo Martins da Silva de 14, Otavio Bezerra dos Santos de 16, Romario Medeiros Maciel de 14 y Edson José de Freitas Filho de 13 años.



## CONTENIDO

**BRASIL: ADOLESCENTES MUEREN FULMINADOS. 2009**

**SAN SALVADOR: MUEREN FUTBOLISTAS FULMINADOS POR RAYOS. 2009**

**MÉXICO: DOS NIÑAS MUEREN AL CAERLES UN RAYO. 2009**

**MÉXICO: RAYO FULMINA A FUTBOLISTA. 2009**

**MÉXICO: MUERE UN MENOR POR IMPACTO DE RAYO. 2009**

**MÉXICO: RAYO MATA A FUTBOLISTA EN EL DF. 2010**

## **SAN SALVADOR: MUEREN FUTBOLISTAS FULMINADOS POR RAYOS. 28 DE JUNIO 2009**

<http://en.kiosko.net/es/2009-07-02/np/1-v.html>

Dos jugadores de las ligas menores del fútbol salvadoreño murieron al ser fulminados por un rayo que cayó en el campo donde disputaban un partido, informó la Policía Nacional Civil. El encuentro se desarrollaba en la cancha de la ciudad de El Sauce, a 189 kilómetros al noreste de San Salvador, en el departamento oriental La Unión. Las víctimas son Iginio Álvarez de 40 años y Alexis Robles de 22 años de edad. Ambos fueron trasladados al hospital de Santa Rosa de Lima donde llegaron sin vida. Las víctimas integraban el equipo Saprissa del pueblo de Canires en el departamento de La Unión. Cristino Robles, tío de Robles, declaró que todo transcurría con normalidad en el partido e indicó que “solo se veía que iba a llover”. “No sé cómo explicar lo que pasó, solo oímos la explosión y vimos que los dos caían al suelo”, aseguró.

## **MÉXICO: DOS NIÑAS MUEREN AL CAERLES UN RAYO EN CHIAPAS. 17 DE AGOSTO 2009**

*El Universal; Tuxtla Gutiérrez*

Al menos dos niñas murieron y otros cuatro pequeños quedaron heridos de gravedad tras ser alcanzados por un relámpago en el sur de México. Las autoridades indicaron que unos 80 niños que acudieron a un retiro espiritual se habían reunido el lunes en la cancha cuando una tormenta eléctrica azotó el área.

Funcionarios del estado de Chiapas dijeron que dos niñas de 12 y 14 años fallecieron mientras estaban en un campo de fútbol durante un evento religioso en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, capital estatal.



**SABIAS QUE...**

**Alrededor de 100 rayos alcanzan la Tierra cada segundo. Cuando el “lado nocturno” del planeta se observa desde el espacio exterior, es posible ver el espectáculo de miles de rayos rasgando la atmósfera terrestre.**



## MÉXICO: RAYO FULMINA A FUTBOLISTA EN VERACRUZ. 7 DE SEPTIEMBRE 2009

*El Universal; Ciudad de México.*

La tormenta eléctrica que se registrara aproximadamente a las 17:30 horas de este domingo 6 de septiembre, dejó un saldo rojo con la muerte de un joven futbolista al caer un rayo en pleno centro del campo número dos de la unidad deportiva Los Pinos, esto cuando se llevaba a cabo un partido de fútbol de la liga local de Loma Bonita entre los equipos del Deportivo Calzado y el equipo Agroloma.

De acuerdo al reporte policiaco, previo al partido, el árbitro advirtió a los futbolistas acerca del peligro de la tormenta, pero "ellos quisieron jugar sin importarles las inclemencias del tiempo". En el minuto 55 ocurrieron tres descargas eléctricas consecutivas, una de las cuales derribó a los 18 jugadores en el terreno; mató a Efraín Peña de 24 años y dejó lesionados a Octavio Corsino de 22 años de edad, Felipe de Jesús Contreras de 31 y Ezequiel Alfonsín de 35 años, (Fig. A2.4).



*Fig. A2.4. Efraín Peña de 24 años, (ingeniero civil) fue el jugador fulminado.*

Según las primeras investigaciones, el rayo le entró por la boca a Efraín Peña y le salió por la pierna derecha falleciendo fulminado.

## MÉXICO: MUERE UN MENOR EN MUNICIPIO DE SALAMANCA, POR IMPACTO DE RAYO. 9 DE SEPTIEMBRE 2009

*Xochitl Álvarez; El Universal, León, Gto.*

La tarde de hoy un rayo cayó sobre un grupo de jugadores de fútbol en los campos de la Unidad Deportiva Norte en Salamanca, el accidente ocurrió aproximadamente a las 18:00 horas.

En lugar quedo fulminado Ángel Daniel López Medrano, de 12 años, informó el subprocurador de Justicia, Ricardo Zavala Rodríguez.



El menor había acudido a la deportiva acompañado de su padre Roberto López, quien declaró que su hijo iba a presentar pruebas con la aspiración de jugar en el equipo de fútbol Atlas de Guadalajara, detalló el fiscal.

Otra adolescente, Luis David Almanza, sufrió quemaduras leves por la descarga del rayo en el momento que observaba las prácticas deportivas bajo una intensa lluvia. Fue trasladado a los servicios de urgencias.

La Procuraduría de Justicia del Estado inició la averiguación 586/09 por la muerte del menor deportista.

## MÉXICO: RAYO MATA A FUTBOLISTA EN EL DF. 22 DE AGOSTO 2010

SIPSE.COM >NACIONAL

Una persona de 25 años perdió la vida al caerle un rayo mientras disputaba un encuentro de fútbol en el deportivo Vivanco, ubicado en Tlalpan, en la ciudad de México, según publica Milenio.

Cerca de las 18:30 horas el relámpago impactó en uno de los jugadores y derribó a los demás dejando lesiones de diversos grados en varios de ellos. El percance provocó crisis nerviosas en los presentes que asistieron al partido, (Fig. A2.5).



*Fig. A2.5. Al lugar acudieron elementos de Seguridad Pública, así como bomberos y Protección Civil, quienes no revelaron la identidad del occiso.*



## CONTENIDO

### **MÉXICO: MATA RAYO A JOVEN QUE JUGABA EN TEKIT. 2011**

### **ARGENTINA: RAYO CAUSA MUERTE A MASAJISTA DE RACING. 2011**

## **MÉXICO: MATA RAYO A JOVEN QUE JUGABA FUTBOL EN TEKIT. 16 DE JULIO 2011.**

SIPSE.COM >YUCATÁN

Auténtico drama se escribió ayer en Tekit, cuando un joven de 17 años falleció tras recibir la descarga de un relámpago, según información emitida por la Fiscalía General del Estado. De acuerdo a los agentes comisionados en Ticul, desde la clínica del Seguro Social de Tekit se reportó la entrada de un joven en estado inconsciente y a los pocos minutos de haber sido ingresado falleció.

El padre del menor explicó que ayer viernes a las 4 de la tarde su hijo (C. J. K. M.) salió a jugar futbol con los amigos del rumbo de su vivienda sin importar la recomendación del progenitor que no lo hiciera pues estaba lloviendo.

Un par de horas después le avisaron que un rayo había alcanzado al muchacho y que había quedado inconsciente, por lo que acudió al sitio, cargó a su vástago y lo trasladó a la clínica antes citada donde falleció al poco tiempo. El reporte médico indica que la causa de la muerte fue por fibrilación consecuente de la descarga eléctrica producida por un rayo.

## **ARGENTINA. RAYO CAUSA MUERTE DE MASAJISTA DE RACING. 11 DE ENERO 2011**

<http://www.eluniverso.com/2011/01/11/1/1372/rayo-causa-muerte-masajista-racing-argentina.html>

El masajista de Racing Club César Nardi murió a consecuencia de un rayo que cayó el martes en el complejo "Open Door" donde se realizaban los trabajos de pretemporada del equipo de la primera división del fútbol argentino.

Nardi de 61 años, (Fig.A2.6), recibió el impacto cuando fue a recoger una pelota que había quedado cerca de un grifo de agua de los que se usan para regar la cancha, informaron medios locales. El masajista conocido como "Chechu", quien se había incorporado a Racing en el 2001, fue trasladado a un hospital de la zona de Luján pero a pesar de los esfuerzos de reanimación cardiopulmonar no se pudo evitar su fallecimiento.



Fig. A2.6. César Nardi, masajista de Racing club (Q.E.P.D.)





En el mismo impacto, varios jugadores sufrieron los efectos de la descarga pero todos se encuentran a salvo. Así mismo, esa tarde en otros puntos de Buenos Aires se registraron más muertes por las tormentas eléctricas.

*"Lamentamos poner en conocimiento de nuestros socios y simpatizantes el fallecimiento de nuestro empleado Cesar Nardi "Chechu", en ocasión de desarrollarse el entrenamiento del plantel profesional en el día de la fecha en Open Door. Este infausto suceso enluta a la familia racinguista, que despide a un empleado ejemplar, querido por todos, al que siempre se recordará por su sonrisa permanente y su amplia predisposición al trabajo. La C.D., el plantel profesional y cuerpo técnico, y todos los estamentos de la entidad acompañan a su familia en esta triste hora", expresa el comunicado del Club.*





CONCLUSIONES



---

# CONCLUSIONES

---

Es necesario un Sistema de Protección contra descargas atmosféricas debido a la ubicación geográfica en que se encuentra asentada la Universidad Nacional Autónoma de México, ya que la incidencia de rayos es muy elevada, lo que representa un riesgo para sus ocupantes cuando hay amenaza de tormenta. Muchos estudios coinciden en que los espacios abiertos son los lugares más peligrosos, en lo que se refiere a personas se calcula que de cada 10 víctimas de accidentes con rayos 1 muere y que las demás quedan gravemente lesionadas.

Para dicha protección se consideraron 3 propuestas a llevar a cabo, dos de ellas mediante el cálculo de Sistemas de Tierra y una en base a la utilización del método de la Esfera Rodante, la cual se tomó en cuenta por el aprovechamiento de los árboles alrededor de la cancha, ya que encontramos que sin dañar los árboles podíamos colocar los pararrayos. Sabiendo esto establecimos una metodología que no fuera en contra del medioambiente y que no se dañaran las ramas de los árboles, además que bajaba el costo de instalación del Sistema considerablemente.



CONCLUSIONES

---



El motivo por el cual se hace uso de cobre es que el acceso a la cancha es controlado y esto hace que sea seguro y se eviten robos de material conductor.

Con esta Propuesta de protección se toma conciencia de los riesgos que representan las descargas atmosféricas en espacios abiertos, en este trabajo en particular, campos de futbol. Así mismo, consideramos que esta investigación puede adaptarse a cualquier otra zona del campus Universitario, cumpliendo así es objeto propuesto al inicio de este trabajo.



INTRODUCCIÓN



---

# BIBLIOGRAFÍA

---

Actualización de la Norma Oficial Universitaria. Instalaciones eléctricas. Proyectos de ahorro de Energía (PAE), Facultad de Ingeniería, UNAM. D.F., 2009.

Antonio de Montoliu Gili. El fuego y la electricidad en instalaciones de baja y alta tensión. Editorial MAPFRE. Madrid, España. 2001.

Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM. UNITAMOS.  
<http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>

Dirección General de Actividades Deportivas y Recreativas.  
<http://www.deportes.unam.mx/Dirección>

Dirección General de Obras y Conservación.  
<http://www.obras.unam.mx>

Guillermo López Monroy. Sistema de tierras en redes de distribución. Facultad de Ingeniería, UNAM. México D.F., 2013.

Jahasiel Concepción Tavera Hurtado. Servicio de Medición, Evaluación, Diagnóstico y Rehabilitación del Sistema de Tierra Física de Subestaciones Eléctricas. Facultad de Ingeniería, UNAM. México D.F., 2013.

La red mundial de localización de rayos en tiempo real: WWLLN (World Wide Lightning Location Network).  
<http://www.tiempo.com/ram/491/la-red-mundial-de-localizacin-de-rayos-wwlln-world-wide-lightning-location-network/>

Ley Federal sobre metrología y normalización.

Manuel Jiménez Redondo. Diccionario de física. Ediciones Rioduero/Ediplusa. España.



INTRODUCCIÓN



National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).  
<http://www.noaa.gov>

Norma Mexicana Ance NMX-J-549-ANCE-2005; sistemas de protección contra tormentas eléctricas. Especificación, materiales y métodos de medición. México. 2005.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2005, Instalaciones Eléctricas (utilización). México. 2005.

Norma Oficial Mexicana NOM-022-STPS-1999; Electricidad estática en los centros de trabajo, condiciones de seguridad e higiene. México. 1999.

Pararrayos protegen al ganado de descargas eléctricas. Agencia de Noticias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín 2009.  
<http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/nc/detalle/article/pararrayos-protegen-al-ganado-de-descargas-electricas>

Pumitas CU Futbol A.C.  
<http://www.pumitasfutbol.unam.mx>

Raúl Pando . Aspectos Básicos de las Descargas Atmosféricas. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. Argentina. 2006.

Revista En Contacto No. 116 Vol. 10. Aguascalientes, Ags. y León, Guanajuato. 2007.  
<http://www.ruelsa.com/cime/boletin/2007/b116.html>

Revista Facultad de Ingeniería No. 30 y 31. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2004.

Stephen Pople. Física Razonada. Editorial Trillas. México. 1997.

WWLLN. World Wide Lightning Location Network.  
[wwlln.net](http://wwlln.net)