

DISEÑO DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO PARA EDIFICACIONES
AISLADAS

ANDERSON RUCO GÓMEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI

2025

DISEÑO DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO PARA EDIFICACIONES AISLADAS

ANDERSON RUCO GÓMEZ

anderson.ruco@correounivalle.edu.co

Documento presentado a:

Programa de pregrado en Ingeniería Eléctrica 3746

como requisito para optar por el título de Ingeniero Electricista.

Directores: Ferley Castro Aranda PhD

Guillermo Aponte Mayor PhD

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

SANTIAGO DE CALI

2025

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la fortuna de disfrutar cada día, además de la oportunidad de vivir en constante crecimiento académico y la búsqueda del conocimiento y el entendimiento.

A mis padres Efraín Ruco Morales y Rosalinda Gomez Salinas, por su paciencia, su dedicación en la crianza, su entendimiento en la juventud y fortaleza para guiarme y acompañarme durante mi transitar por el mundo.

A mi pareja Camila Marcela Padillas Osorio, por ser esa gran fuente de ternura y cariño, mi eterna compañera en largas jornadas académicas y de vivencias de vida.

A mi hermana Andrea Ruco Gomez y hermano Reinel Ruco Gomez, por tenerme paciencia, por escucharme y brindarme su amor y comprensión, gracias por ese apoyo incondicional durante este largo proceso.

A mis directores el doctor Ferley Castro Aranda y el doctor Guillermo Aponte Mayor, por creer en mis capacidades y darme la posibilidad de continuar creciendo profesionalmente.

A todos los familiares y colegas que siempre estuvieron dispuestos a apoyarme en este camino del conocimiento y se tomaron el tiempo para escuchar mis hipótesis.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1 DETERMINACIÓN DEL ENTORNO	15
1.1 CLASIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS RURALES NACIONALES.....	15
1.2 FENOMENO DEL RAYO	22
1.1 CARACTERISTICAS DE DESCARGAS ATMOSFERICAS.....	24
1.1.1 Nivel ceráunico (NC).	24
1.1.2 Densidad de descargas a tierra (DDT).	26
1.2 NORMATIVIDAD COLOMBIANA	27
1.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO 1	28
2 ANALISIS DE RIESGO A LA VIVIENDA Y SU ENTORNO DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	29
2.1 CARACTERIZAR LA ESTRUCTURA	29
2.2 IDENTIFICAR Y CUANTIFICAR LA DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA DE LA REGIÓN.....	29
2.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS DAÑOS Y RIESGOS ASOCIADOS A LA VIVIENDA.	30
2.3.1 Fuente de daño	30
2.3.2 Tipo de daño.....	32
2.3.3 Tipo de pérdida	32
2.3.4 Riesgo.....	33
2.3.5 Riesgo por descargas atmosféricas	33
2.3.6 Componentes de riesgo	33
2.3.7 Composición de los componentes del riesgo en relación con la estructura	35
2.4 EVALUACIÓN DE LAS COMPONENTES DE RIESGO	36
2.5 EVALUACIÓN DE RIESGO TOLERABLE RT	43
2.6 RESUMEN DEL CAPÍTULO 2	44
3 MEDIDAS DE PROTECCIÓN	45
3.1 NIVEL DE PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO (NPR)	45
3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS	46
3.2.1 Sistema de captación.....	47

3.2.2	Sistema de bajantes	48
3.2.3	Sistema de puesta a tierra.....	54
3.2.4	Sistemas equipotenciales.....	56
3.2.5	Sistemas de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS)	57
3.3	RESUMEN DEL CAPÍTULO 3	58
4	CASO DE ESTUDIO.....	60
4.1	PASO 1	61
4.1.1	Identificar y caracterizar matemáticamente la vivienda	61
4.2	PASO 2	63
4.2.1	Identificar y cuantificar las descargas a tierra.....	63
4.3	PASO 3	63
4.3.1	Identificación de daños y riesgos.	63
4.4	PASO 4	63
4.4.1	Valoración de los riesgos asociados.....	63
4.5	PASO 5	65
4.5.1	Comparación de valores.....	65
4.6	PASO 6	65
4.6.1	Definir el nivel de protección.....	65
4.7	PASO 7	66
4.7.1	Aplicar el método de la esfera rodante.....	66
4.8	PASO 8	71
4.8.1	Instalar los conductores bajantes.....	71
4.9	PASO 9	72
4.9.1	Instalar el sistema de puesta a tierra.....	72
4.10	PASO 10	74
4.10.1	Valoración de los riesgos asociados.....	74
4.11	PASO 11	76
4.11.1	Comparación de valores.....	76
4.12	ANÁLISIS ECONOMICO	76
5	CONCLUSIONES	77
6	BIBLIOGRAFÍA	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características generales de las Viviendas de Interés Social Rural.	15
Tabla 2. Dimensiones en m2 y porcentaje de ocupación de área.	17
Tabla 3. Dimensiones en m2 y porcentaje de ocupación de área.	18
Tabla 4. Dimensiones en m2 y porcentaje de ocupación de área.	19
Tabla 5. Dimensiones en m2 y porcentaje de ocupación de área.	20
Tabla 6. Dimensiones en m2 y porcentaje de ocupación de área.	21
Tabla 7. Dimensiones en m2 y porcentaje de ocupación de área.	22
Tabla 8. Nivel cerámico promedio de Colombia a partir del año 2012 hasta el año 2017.	25
Tabla 9. Densidad de descargas promedio desde el año 2012 hasta el año 2017.	26
Tabla 10. RETE y NTC	27
Tabla 11. Protección contra rayos y evaluación de riesgos con RETIE.	28
Tabla 12. Diseño, implementación y componentes del sistema de protección contra rayos.	28
Tabla 13. Densidad de descargas a tierra más altas de las regiones del país.	30
Tabla 14. Fuente de daño, tipo de daños y tipo de pérdidas en función del punto de impacto.	32
Tabla 15. Componentes de riesgo según NTC 4552-2: 2023 [13].	33
Tabla 16. Componentes de riesgo según NTC 4552-2: 2023 [13] (Continuación).	34
Tabla 17. Factores con influencia en los componentes de riesgo.	35
Tabla 18. Factores con influencia en los componentes de riesgo (Continuación).	36
Tabla 19. Características de los niveles de protección.	46
Tabla 20. Características de los DPS.	58
Tabla 21. Componentes asociadas al riesgo de pérdida de vidas humanas.	64
Tabla 22. Fórmulas de pérdida de vidas humanas (R1).	65
Tabla 23. Características y dimensiones del sistema de captación.	70
Tabla 24. Características y dimensiones del sistema de conductores bajantes.	71
Tabla 25. Características y dimensiones del sistema de puesta a tierra.	72
Tabla 26. Características y dimensiones del barraje equipotencial.	73
Tabla 27. Especificaciones DPS	74
Tabla 28. Componentes asociadas al riesgo de pérdida de vidas humanas.	74
Tabla 29. Componentes asociadas al riesgo de pérdida de vidas humanas (Continuación)	75
Tabla 30. Fórmulas de pérdida de vidas humanas (R1).	75
Tabla 31. Costo económico de implementación	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Polaridad de descargas atmosféricas.	13
Figura 2. Tasa de mortalidad en Colombia por descargas atmosférica.	14
Figura 3. Diseño arquitectónico VRSA 1.	16
Figura 4. Diseño Arquitectónico VRSL1.	17
Figura 5. Diseño Arquitectónico VRST1.	18
Figura 6. Diseño Arquitectónico VRSC1.	19
Figura 7. Diseño arquitectónico VRSC2.	20
Figura 8. Diseño Arquitectónico VRSU1.	21
Figura 9. Tipos de descargas atmosféricas.	23
Figura 10. Red colombiana de detección total de rayos.	25
Figura 11. Corriente pico de un rayo negativo vs la probabilidad de ocurrencia entre CIGRE y cuatro sitios tropicales.	31
Figura 12. Diseño de un sistema de captación de acuerdo con el método de la esfera rodante.	48
Figura 13. Construcción de un SPCR con dos conductores bajantes y sus elementos.	49
Figura 14. Instalación de conductor sobre caballete en techo de vivienda.	50
Figura 15. Ejemplo de detalle de fijación en un techo plano y estructura metálica de edificación.	50
Figura 16. Sistema de protección contra rayos aislado para antenas en viviendas.	51
Figura 17. Sistema de protección contra rayos no aislado para antenas en viviendas.	52
Figura 18. Conexiones de los conductores bajantes y terminales de puesta a tierra mediante uniones de prueba.	54
Figura 19. Ejemplo de conexión de bajantes a electrodo.	55
Figura 20. Ejemplo de equipotencialización de los diferentes sistemas.	57
Figura 21. Mapa de muertes por rayos en regiones naturales para el periodo 1997-2017	60
Figura 22. Ubicación y coordenadas satelitales de la vivienda del caso de estudio.	61
Figura 23. Vista frontal de la vivienda	62
Figura 24. Vista lateral de la vivienda	62
Figura 25. Plano en AutoCAD de tres dimensiones.	66
Figura 26. Aplicación de método de esfera rodante en Vista realista.	67
Figura 27. Aplicación de método de esfera rodante en Vista en alambres.	67
Figura 28. Instalación de puntas captoras en techo.	68
Figura 29. Sistema de captación con puntas captoras tipo Franklin.	68
Figura 30. Esferas sobre el sistema de captación.	69
Figura 31. DPS y conexión en sistema Monofásico.	74

ACRONIMOS

DANE	Departamento administrativo nacional de estadística
CIE	Clasificación Internacional de Enfermedades
VRSA	Vivienda de interés social rural Tipología Alargada
VRSL	Vivienda de interés social rural Tipología en L
VRST	Vivienda de interés social rural Tipología en T
VRSC	Vivienda de interés social rural Tipología compacta
VRSU	Vivienda de interés social rural Tipología en U
DDT	Densidad de descargas a tierra
NC	Nivel cerámico
NTC	Norma técnica colombiana
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
RETIE	Reglamento técnico de instalaciones eléctricas
MVCT	Ministerio de vivienda ciudad y territorio
PNVISR	Plan Nacional de Construcción y Mejoramiento de Vivienda de Interés Social Rural
ZCIT	Zona de convergencia intertropical
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ODT	<i>Optical Transient Detector</i>
LIS	<i>Lightning Imagin Sensor</i>
AC	Altiplano Cundiboyacense
AP	Altiplano Popayán
AM	Alto Magdalena
AZ	Amazonia
CT	Catatumbo
LLC	Llanura Caribe
LLCP	Llanura Costera del Pacífico
LLG	Llanura Guajira
MC	Montaña Centro
MNE	Montaña Noreste

MNOE	Montaña Noroeste
MS	Montaña Sur
OQ	Orinoquia
PF	Pacífico
PA	Piedemonte Amazónico
PLL	Piedemonte Llanero
SB	Serranía del Baudó
SN	Sierra Nevada
VC	Valle del Cauca
VMM	Valle Magdalena Medio
SMMLV	Salario mínimo mensual legal vigente

RESUMEN

El estado colombiano promueva la ocupación de zonas rurales mediante las viviendas rurales de interés social (VRSA), en busca de fortalecer el agro y crear una sociedad más justa.

Por lo que es necesario contar con una metodología que permita realizar una estimación de los riesgos ante las condiciones de los fenómenos naturales y tomar medidas que permitan tener un nivel tolerable de protección ante el riesgo dentro de los valores establecidos en el territorio nacional.

Con ese objetivo se desarrolla este documento, que consta de 4 capítulos.

El primer capítulo está enfocado en presentar la normatividad vigente, como lo es el RETIE: 2024, la serie de NTC 4552-1: 2022, NTC 4552-2-3: 2023 (IEC 62305-1-2-3: 2010) y estudios realizados a lo largo del tiempo, que evidencian las particularidades del país debido a la ubicación geográfica y orográfica.

En el segundo capítulo se presenta el Flujograma 1, que plantea el procedimiento para caracterizar la estructura con sus dimensiones y áreas colindantes, cuantificar la densidad de descargas a tierra, el cual es un factor muy importante en todo el proceso, identificar los riesgos de la estructura a proteger, valorar los riesgos y en base a todas las etapas tener un valor numérico para comparar con los valores establecidos dentro de los de riesgo tolerables, lo que brinda un criterio de decisión en el proceso.

En el capítulo tres se presenta los valores de corriente estandarizados y el Flujograma 2 que plantea los procedimientos para definir el nivel de protección, el radio de la esfera rodante, la instalación del sistema de conductores bajantes, el sistema de puesta a tierra y una nueva evaluación del nivel de riesgo que permitirá definir si la vivienda cuenta con los dispositivos de protección necesarios para estar dentro de los valores de riesgo tolerable. En el capítulo cuatro se realiza un caso de estudio y se aplica la metodología desarrollada a lo largo del documento.

Palabras clave: Descargas atmosféricas, sistema de apantallamiento, riesgo, nivel de protección, sistemas de protección, densidad de descargas a tierra, equipotencialidad.

ABSTRACT

The Colombian state promotes the occupation of rural areas through rural housing of social interest (VRSA), in order to strengthen agriculture and create a fairer society.

Therefore, it is necessary to have a methodology that allows an estimation of the risks in the face of the conditions of natural phenomena and to take measures that allow a tolerable level of protection against the risk within the values established in the national territory.

This document is developed with this objective, which consists of 4 chapters.

The first chapter is focused on presenting the current regulations, such as the RETIE: 2024, the NTC 4552-1: 2022, NTC 4552-2-3: 2023 series (IEC 62305-1-2-3: 2010) and studies carried out over time, which show the particularities of the country due to the geographical and orographic location of the country.

In the second chapter, Flowchart 1 is presented, which proposes the procedure to characterize the structure with its dimensions and adjacent areas, quantify the density of land discharges, which is a very important factor in the whole process, identify the risks of the structure to be protected, assess the risks and based on all the stages have a numerical value to compare with the values established within the tolerable risk values. which provides a criterion for decision in the process.

Chapter three presents the standardized current values and Flowchart 2 that sets out the procedures to define the level of protection, the radius of the rolling sphere, the installation of the downpipe system, the grounding system and a new evaluation of the risk level that will define if the house has the necessary protection devices to be within the tolerable risk values. In chapter four, a case study is carried out and the methodology developed throughout the document is applied.

Keywords: Atmospheric discharges, shielding system, risk, level of protection, protection systems, density of ground discharges, equipotentiality.

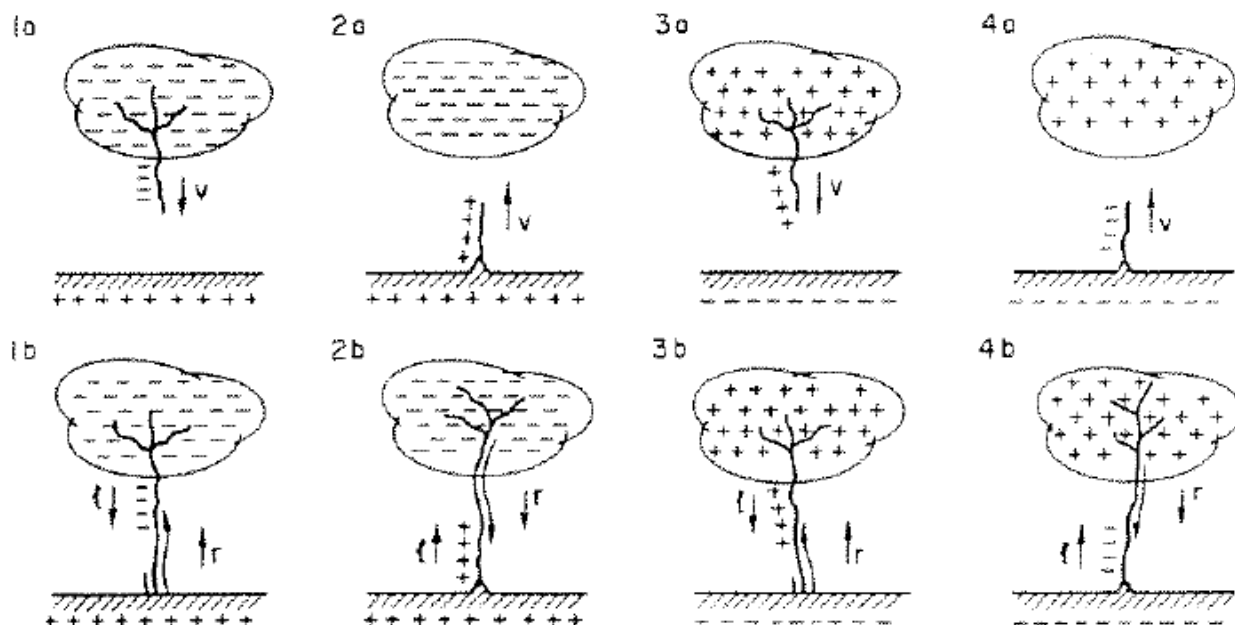
INTRODUCCIÓN

En la naturaleza existen fenómenos muy poderosos que hoy el hombre no puede medir de manera precisa, cuantificar ni controlar, entre ellos encontramos los rayos, los cuales en un principio fueron atribuidos a un dios, como es el caso en América en el tiempo de los Incas, donde el rayo se le atribuía al dios Illiapa un ser, con “una figura antropomorfa con una honda en la mano que al disparar un proyectil rompe un cántaro lleno de agua. El estruendo del impacto provocaría el trueno, el rayo sería la representación de las chispas generadas, y finalmente, el agua al verterse provocaría la lluvia” [1], pero, no fue hasta 1752, que Benjamín Franklin en Marly-la-Ville [2], elevó una cometa en un día de tormenta y mediante ese experimento demostró que en realidad **los rayos son una de las formas de la energía eléctrica**. Los fenómenos observados de los rayos y el estruendo del trueno es lo que conocemos a día de hoy como descargas atmosféricas, estas descargas atmosféricas que son debidas a **tormentas de arena, cambios bruscos de temperatura, erupciones volcánicas, entre otros**, obedecen principalmente, a la interacción de pequeñas partículas de agua y cristales de hielo al interior de la nube, que al ser movidas de un lugar a otro por el viento chocan entre sí y se cargan eléctricamente, dejando las cargas positivas en la parte superior, una región de cargas negativas en la parte del medio y otra parte positiva en la parte inferior [3], lo que causa la acumulación de potenciales muy elevados en las nubes con respecto al potencial de referencia, la tierra.

La acumulación de las cargas eléctricas de dos potenciales diferentes provoca la aparición de un campo eléctrico muy elevado el cual al superar los niveles críticos de intensidad, según [4] causan una serie de descargas atmosféricas, que pueden ser de polaridad positiva o negativa que buscan poner el entorno a un mismo potencial, estas descargas pueden presentarse entre las nubes, entre nubes contra ionosfera, entre tierra contra nubes y entre nubes contra tierra [4], estas últimas descargas son las que analizaremos, ya que suelen precipitarse a tierra mediante una descarga líder la cual suele ser positiva o negativa y pueden ser seguidos por un número n de descargas, dependiendo de la carga que se acumule (ver Figura 1), este fenómeno ocurre en menos de un segundo y sus impactos tienen

efectos significativos en el ambiente ya que representan riesgos para las personas, la fauna, la flora y las infraestructuras de la vivienda.

Figura 1. Polaridad de descargas atmosféricas.



Fuente: [5]

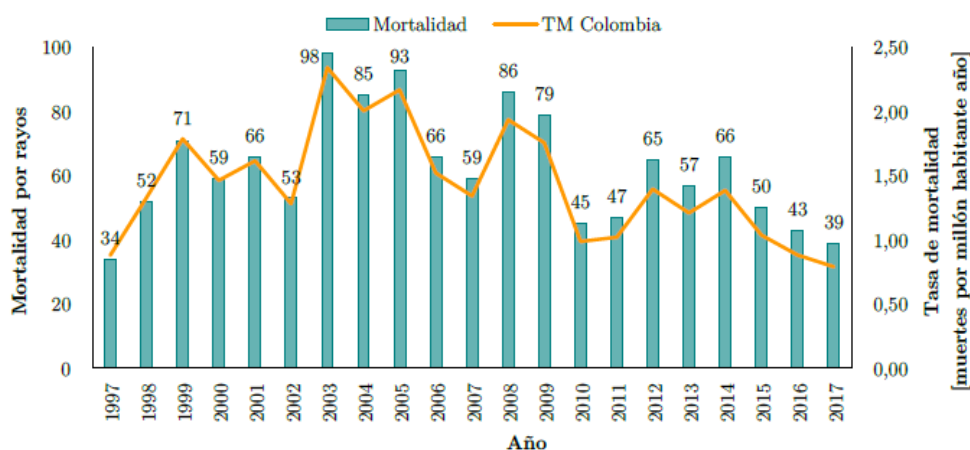
Al estar Colombia en una de las regiones con la actividad de rayos más activa en el mundo es propensa a que los rayos ocasionen accidentes que dejan lesiones graves, quemaduras y pérdidas de vidas. En estudios anteriores [4], se ha podido observar, que “muertes o heridos por rayos, tanto a nivel nacional como a nivel internacional, se han vuelto más frecuentes y visibles para la sociedad, especialmente en aquellas zonas donde las actividades diarias que realizan las personas son al aire libre y están expuestas a diferentes tipos de riesgos naturales (desde recibir los rayos ultravioletas del sol hasta ser impactados por un rayo)” [4].

El DANE (departamento administrativo nacional de estadística) es una institución gubernamental que recopila certificados de defunción ocurridos por diferentes causas en Colombia desde 1979. Dispone de datos sobre las muertes (accidentales o por enfermedad) utilizando los códigos proporcionados por la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE). De esta manera, las víctimas de rayos se clasifican con el código X33, lo que nos permite tener un estimado de las personas afectadas por

descargas atmosféricas en el territorio nacional. De la información recolectada en [4], para el período comprendido entre 1997-2017, se encontraron 1313 muertes por rayos.

La Figura 2 [4], muestra la tasa de mortalidad en Colombia por descargas atmosféricas mortales cada año. Se puede observar que los años con mayores eventos fueron 2003 y 2005 con 98 y 93 personas fallecidas. Mientras que, menos de 50 personas murieron en 1997 (34), 2010 (45) y 2011 (47) [4].

Figura 2. Tasa de mortalidad en Colombia por descargas atmosférica.



Fuente: [4].

En busca de preservar la vida y los bienes materiales del fenómeno natural de las descargas atmosféricas surge la pregunta de este trabajo de grado, ¿Cuáles deben ser los pasos metodológicos para el diseño de un sistema de apantallamiento para viviendas aisladas que permita proteger la vida y los bienes materiales contra las descargas atmosféricas?

Para ello se plantea una metodología para el diseño de un sistema de apantallamiento, tiene como finalidad mitigar el nivel de riesgo al que se encuentran expuestas las edificaciones rurales, a través del análisis de riesgo de descargas atmosféricas acorde a la norma NTC 4552-1: 2022, NTC 4552-2-3: 2023 (IEC 62305-1-2-3: 2010) con el cual se definirán los requerimientos técnicos y los dispositivos de apantallamiento que se pueden emplear, en busca de salvaguardar la vida de los habitantes, proteger la infraestructura y salvaguardar la vida animal.

1 DETERMINACIÓN DEL ENTORNO

1.1 CLASIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS RURALES NACIONALES

“En el marco de la formulación de la Política Pública de Vivienda Rural a cargo del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio – MVCT, se estructura un nuevo Plan Nacional de Construcción y Mejoramiento de Vivienda de Interés Social Rural – PNVISR; el cual, no solo tiene como base los lineamientos generales que son determinantes de la política sino también, lo dispuesto en el Decreto Ley 890 de 2017 y que recoge lo suscrito en materia de Vivienda Rural en el Primer Punto del Acuerdo Final para la Terminación del Conflicto y la Construcción de una Paz Estable y Duradera, firmado en el año 2016” [6].

Por tanto, se caracterizan las viviendas rurales obedeciendo los criterios nacionales establecidos para las edificaciones rurales nuevas, en la resolución, 0410 de 2 de agosto 2021, y su anexo, el documento técnico de parametrización [7], donde pautan seis diseños de tipologías de viviendas rurales para el país denominadas, Vivienda de Interés Social Rural (VISR) [6], las cuales deberán contar con las características generales denominadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características generales de las Viviendas de Interés Social Rural.

PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	DESCRIPCIÓN Y REQUERIMIENTOS	ÁREA
Espacio Múltiple:	Ambiente pensado como zona de socializar las ideas.	Se ha sugerido un área $12m^2$, lo que incluye parte de la zona de tránsito al interior de la vivienda.
Tres (3) Habitaciones:	Se considera una habitación, el espacio donde es posible instalar una cama, un armario o closet de guardar ropa, una ventana con vistas al exterior o interior, una puerta y un espacio de circulación.	Para cada espacio se ha adaptado un área $8m^2$, por habitación.
Cocina:	Área empleada con la finalidad de la preparación de alimentos, la cual deberá poseer un soporte (mesón) con lavaplatos, estufa y espacio para la nevera.	El área destinada para este fin será de $5,6m^2$.
Cuarto de herramientas:	Espacio de la vivienda pensado en el almacenamiento de herramientas y utensilios del hogar, acorde a las actividades de la familia.	El área destinada para esta labor será de $3m^2$.

Tabla 1. Características generales de las Viviendas de Interés Social Rural (**Continuación**).

Zona de Alberca/ Lavadero	Deposito artificial en material, ubicado en el exterior de la vivienda, cuya finalidad es almacenar agua para el lavado de ropa.	El área destinada para tal fin es de $2,4m^2$.
Baño/ Saneamiento básico:	Zona de la vivienda dedicada al aseo personal y las necesidades fisiológicas básicas de la familia.	El área óptima diseñada en pro de esta zona es de $2,7m^2$.
Solución manejo de excretas:	Sistema de tuberías de recolección que toma en cuenta las instalaciones internas y/o accesorios para dirigir las excretas a un repositorio destinado con tal fin.	El área sugerida para este sistema es de $12m^2$.

Fuente: adaptado de [7]

Las viviendas de interés social rural (VISR) están clasificadas como Vivienda rural saludable segura y sostenible (VRS) en 6 tipologías denominadas:

- **VRSA1**

La tipología A1 presenta una configuración alargada para optimizar la adaptación en parcelas estrechas y/o áreas de implantación que requieran preservar elementos del medio físico. Esta cuenta con un diseño de una expansión en el volumen de su fachada principal de amplias dimensiones, lo cual permite un mayor flujo del aire y una iluminación natural indirecta. Este acceso permite la adaptación de esta vivienda en climas cálidos o secos [7].

El diseño arquitectónico se presenta en la Figura 3 [7]; las dimensiones en m^2 y porcentaje de construcción que ocupa cada área en la vivienda se presentan en la Tabla 2 [7].

Figura 3.Diseño arquitectónico VRSA 1.



Fuente: [7]

Tabla 2. Dimensiones en m^2 y porcentaje de ocupación de área.

PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	m^2	% DE ÁREA
Espacio Múltiple	5,06	9,17
Habitación 1	7,43	13,46
Habitación 2	7,28	13,19
Habitación 3	7,28	13,19
Cocina	6,03	10,92
Lavadero	1,15	2,08
Baño	2,82	5,11
Cuarto de Herramientas	1,7	3,08
Circulación	10,04	18,19
Estructura y Muros	6,41	11,61
Terraza	5,39	
PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	55,2	100%
Dimensiones aprox. (L x A)	13 m	4,3 m

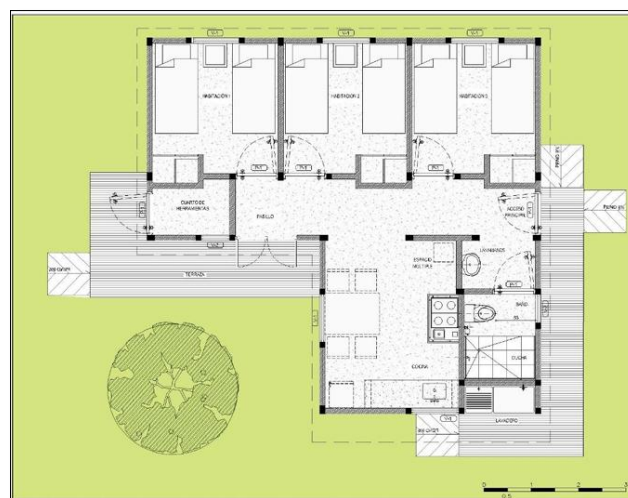
Fuente: [7]

- **VRSL1**

La configuración arquitectónica en “L1” de esta tipología tiene como finalidad, ser instalada en un terreno rectangular y contar con un solar o patio como consecuencia de la distribución del área de implantación. El acceso principal se hace a través del patio, el cual por la configuración de la vivienda ayuda a tener protección contra el viento. Por esta razón, la tipología es recomendable para climas fríos y con características boscosas [7].

El diseño arquitectónico se presenta en la Figura 4 [7], las dimensiones de área y porcentaje de construcción que ocupa cada área en la vivienda se presentan en la Tabla 3 [7].

Figura 4. Diseño Arquitectónico **VRSL1**.



Fuente: [7]

Tabla 3. Dimensiones en m^2 y porcentaje de ocupación de área.

PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	m^2	% DE ÁREA
Espacio Múltiple	5,5	10,42
Habitación 1	7,43	14,07
Habitación 2	7,28	13,79
Habitación 3	7,28	13,79
Cocina	5,33	10,09
Lavadero	2,29	4,34
Baño	2,16	4,09
Cuarto de Herramientas	1,7	3,22
Circulación	7,01	13,28
Estructura y Muros	6,82	12,92
Terraza	8,37	
PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	52,8	100%
Dimensiones aprox. (L x A)	8,30 m	8 m

Fuente [7]

- **VRST1**

Este diseño arquitectónico se ha configurado de manera agrupada, donde las habitaciones están distribuidas consecutivamente, el cual permite espacios flexibles en el caso de ser requerido.

Por tanto, se ha ubicado un espacio múltiple (comedor, cocina y sala) y el baño en el mismo volumen de la edificación, con la finalidad de mejorar la eficiencia de la distribución de las instalaciones de redes. Como adicional, se implementaron parámetros de accesibilidad como la inclusión de los espacios de terraza, las rampas de acceso, el ancho de los vanos, el espacio interior del baño y la ubicación de las instalaciones [7].

El diseño arquitectónico se presenta en la Figura 5 [7]; las dimensiones de área y porcentaje de construcción que ocupa cada área en la vivienda se presentan en la Tabla 4 [7].

Figura 5. Diseño Arquitectónico VRST1.



Fuente: [7]

Tabla 4. Dimensiones en m^2 y porcentaje de ocupación de área.

PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	m^2	% DE ÁREA
Espacio Múltiple	5,2	10,18
Habitación 1	8,41	16,46
Habitación 2	8,41	16,46
Habitación 3	8,09	15,84
Cocina	3,95	7,73
Lavadero	0,74	1,45
Baño	1,74	3,41
Cuarto de Herramientas	2,57	5,03
Circulación	5,06	10,96
Estructura y Muros	6,37	12,47
Terraza	3,8	
PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	51,08	100%
Dimensiones aprox. (L x A)	9,30 m	7 m

Fuente: [7]

- **VRSC1**

Es considerada la tipología más acertada en zonas donde el terreno es limitado y los espacios no brindan mucha libertad para la construcción.

Este diseño se planteó para organizar todo de manera compacta en el interior, de manera tal que las habitaciones son contiguas, mientras que del otro lado están las zonas comunes. Por otra parte, esta tipología también puede formularse en casos de vivienda rural dispersa [7].

El diseño arquitectónico se presenta en la Figura 6 [7]; las dimensiones de área y porcentaje de construcción que ocupa cada área en la vivienda se presentan en la Tabla 5 [7].

Figura 6. Diseño Arquitectónico **VRSC1**.



Fuente: [7]

Tabla 5. Dimensiones en m^2 y porcentaje de ocupación de área.

PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	m^2	% DE ÁREA
Espacio Múltiple	9,13	16,88
Habitación 1	7,29	13,48
Habitación 2	7,29	13,48
Habitación 3	7,57	14
Cocina	5,19	9,6
Lavadero	1,21	2,24
Baño	3,09	5,71
Cuarto de Herramientas	2,21	4,09
Circulación	4,34	8,02
Estructura y Muros	6,77	12,52
Terraza	4,75	
PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	54,09	100%
Dimensiones aprox. (L x A)	10 m	6 m

Fuente: [7]

- **VRSC2**

Es la configuración espacial más compacta predominando los espacios comunes en el centro y los espacios individuales a los lados, este diseño arquitectónico se adapta a zonas con terrenos reducidos o áreas de implantación que presenten dificultades como la pendiente. Este diseño cuenta distintas alturas en los espacios para garantizar el flujo del aire e iluminación natural indirecta [7].

El diseño arquitectónico se presenta en la Figura 7 [7]; las dimensiones de área y porcentaje de construcción que ocupa cada área en la vivienda se presentan en la Tabla 6 [7].

Figura 7. Diseño arquitectónico VRSC2.



Fuente: [7]

Tabla 6. Dimensiones en m^2 y porcentaje de ocupación de área.

PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	m^2	% DE ÁREA
Espacio Múltiple	9,31	16,76
Habitación 1	7,98	14,37
Habitación 2	7,81	14,06
Habitación 3	7,97	14,35
Cocina	5,19	16,09
Lavadero	1,21	1,64
Baño	3,09	5,87
Cuarto de Herramientas	2,21	3,64
Circulación	4,34	2,16
Estructura y Muros	6,77	11,14
Terraza	4,75	
PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	55,55	100%
Dimensiones aprox. (L x A)	9,30 m	6 m

Fuente: [7]

- **VRSU1**

Esté modelo arquitectónico es acorde con terrenos de grandes dimensiones ya que las habitaciones se encuentran distribuidas por toda la casa, lo que le aporta privacidad, adicionalmente cuenta con un espacio intermedio entre las habitaciones lo que permite la entrada de aire he iluminación natural, aumentando la eficiencia energética.

En este diseño se priorizo el flujo del aire e iluminación natural indirecta a través de las fachadas y el volumen alto que acompaña la circulación. Este diseño tiene una apertura entre dos de las habitaciones donde se puede dar un espacio para instalar una huerta que complementa el programa arquitectónico de la vivienda [7].

El diseño arquitectónico se presenta en la Figura 8 [7]; las dimensiones de área y porcentaje de construcción que ocupa cada área en la vivienda se presentan en la Tabla 7 [7].

Figura 8. Diseño Arquitectónico **VRSU1**.



Fuente: [7]

Tabla 7. Dimensiones en m^2 y porcentaje de ocupación de área.

PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	m^2	% DE ÁREA
Espacio Múltiple	6,76	12,3
Habitación 1	7,94	14,45
Habitación 2	7,94	14,45
Habitación 3	7,94	14,45
Cocina	4,16	7,57
Lavadero	1,74	3,17
Baño	3,24	5,9
Cuarto de Herramientas	2,48	4,51
Circulación	5,44	9,9
Estructura y Muros	7,3	13,29
Terraza	0	
PROGRAMA ARQUITECTÓNICO	54,94	100%
Dimensiones aprox. (L x A)	8,30 m	7,60 m

Fuente: [7]

Cada una de las tipologías con sus características responden a diferentes necesidades espaciales, climatológicas y de uso del terreno, buscando optimizar la funcionalidad, accesibilidad y adaptabilidad. Cada diseño se centra en necesidades específicas de las comunidades, como la circulación, la flexibilidad de los espacios y la integración con el entorno, garantizando soluciones arquitectónicas versátiles para la diversidad de contextos rurales.

De igual manera el ministerio de vivienda a través del Documento Técnico de Parametrización [7], define las alturas de las edificaciones en un rango, que van desde 2,30 m, hasta, 3,70 m, dependiendo de la altura de la región, el entorno y las condiciones del ambiente.

Entendiendo que el país posee diferentes pisos térmicos y que las necesidades socioculturales de cada territorio son particulares el país ha dado la posibilidad adaptar estos diseños.

1.2 FENOMENO DEL RAYO

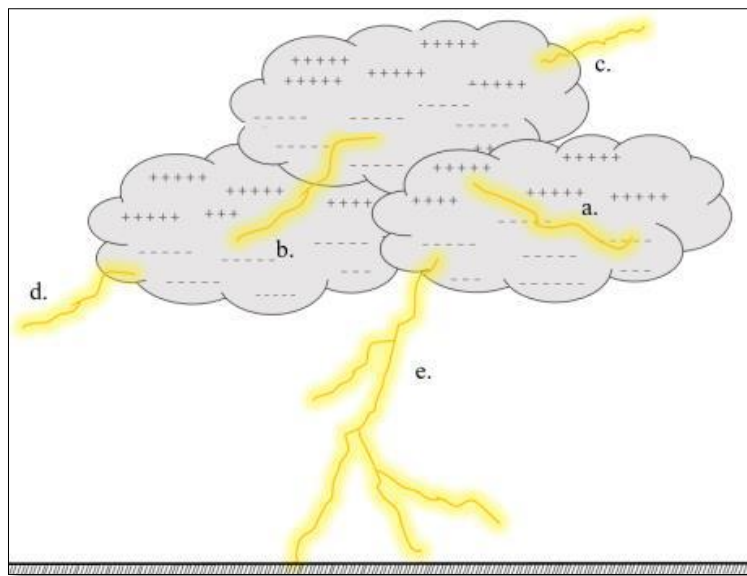
A nivel mundial estudiar los rayos ha sido labor de científicos e investigadores por muchos años, en Colombia el fenómeno del rayo es un tema fuerte en investigación y es debido a la ubicación geográfica, pues está en la zona de convergencia intertropical (ZCIT), donde se presenta la mayor actividad de rayos según los estudios realizados [3]. “La ZCIT se forma cuando los vientos cálidos y húmedos de las latitudes al norte y al sur del Ecuador (confluencia de los vientos alisios de ambos hemisferios) chocan formando un cinturón de nubes alrededor de la tierra sobre la región tropical generando bajas presiones y tormentas. Entre enero y febrero la zona inicia el recorrido de sur a norte y entre julio y agosto de norte a sur provocando temporadas lluviosas. De esta manera, en Colombia se presentan dos temporadas de lluvia: la primera se presenta entre abril-mayo y la segunda entre octubre-noviembre, lo cual afecta gran parte del país. Los meses restantes se conocen como temporadas secas. Debido a esto, los países que se encuentran dentro de la zona tropical del planeta no tienen estaciones como en las latitudes medias” [4].

Son las temporadas lluviosas las que influyen en mayor proporción para que se presenten las descargas atmosféricas, que son de igual manera conocidas como rayos, los cuales son un fenómeno

físico que se puede ver y escuchar a kilómetros de distancia, como lo define [4], los rayos se presentan por la acumulación de cargas eléctricas de polaridad negativa y positiva las cuales llegan a tener unas intensidades de campos eléctricos muy elevados con la capacidad de romper la rigidez dieléctrica del aire, es posible definirlos como la transferencia de grandes cantidades de cargas eléctricas lo que implica corrientes muy altas, transformando de esta manera una parte de la energía en energía lumínica (relámpago) y otra parte en energía audible (trueno), en la Figura 9 [4], se muestran los 5 tipos de rayos conocidos, de acuerdo con la dirección de transferencia de carga [4].

- a) Dentro de las nubes
- b) Entre nubes
- c) Entre nube e ionosfera
- d) Entre nube y aire
- e) Entre nube y tierra o entre tierra y nube

Figura 9. Tipos de descargas atmosféricas.



Fuente: [4]

En este trabajo nos centraremos en las últimas descargas (e), ya que son las que tienen un potencial de riesgo alto para causar afectaciones a la vida y la salud; como lo define el reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE), en el libro 3, Título 13 [8], es necesario tomar medidas de protección y prevención, a lo que, el ámbito académico y el sector energético han dado una respuesta muy oportuna ante estas necesidades, ya que, en el país se han instalado una serie de dispositivos de medición cuya finalidad es formar una red de localización.

La información obtenida en la red de localización de rayos se utilizó en su momento para el análisis del comportamiento de los parámetros espaciales y temporales del rayo en el país.

Dicha red “entrega información en bruto a través de un centro de procesamiento central con datos básicos de las descargas eléctricas atmosféricas detectadas (principalmente la ubicación espacial, latitud y longitud, y la amplitud de la corriente del rayo), lo que permite hacer análisis estadísticos y de minería de datos para caracterizar el fenómeno del rayo en una región dada” [9].

Una vez conocida la ubicación del fenómeno y donde se tiene mayor incidencia se hace necesario caracterizar dos parámetros principales:

- nivel cerámico (NC);
- densidad de descargas a tierra (DDT).

Para los cuales a nivel internacional se acepta el uso de ecuaciones que los relacionen. Con base en los resultados obtenidos por Younes & Torres [9], se propuso la Formula (1), la cual relaciona estos parámetros para emplearlos en la zona tropical, “donde N_g es la densidad de descargas a tierra en *flashes*/ km^2 /año y T_d es el número de días tormentosos por año” [10]. Esta ecuación se incorporó en las normas internacionales, como es el caso de la IEEE, 2011 y es más apropiada para el caso colombiano que, como se ha mencionado anteriormente, tiene características especiales desde el punto de vista orográfico y meteorológico, así como una alta actividad eléctrica atmosférica.

$$N_g = 0,0017 T_d^{1,56} [\text{flashes}/km^2/\text{año}] \quad (1)$$

Los resultados que se obtuvieron en Colombia en el 2002 en referencia a la caracterización de los parámetros del rayo evidenciaron la necesidad de evaluar el desempeño de las redes de localización de descargas atmosféricas con la finalidad de determinar si, los valores relativamente elevados de DDT (los cuales eran alarmantes debido a que en aquella época en la literatura científica internacional no se habían reportado), eran correctos.

Como para aquella época no existían otras redes de localización disponibles de descargas atmosféricas en el territorio nacional, se realizó la comparación con el apoyo de la “NASA y la información de dos misiones espaciales que emplearon sendos dispositivos de detección de rayos basados en la información y el procesamiento de imágenes ODT (*Optical Transient Detector*) y LIS (*Lightning Imagin Sensor*), se desarrolló una metodología utilizando series de tiempo para correlacionar y validar el sistema terrestre de localización de rayos que operaba entonces” [9].

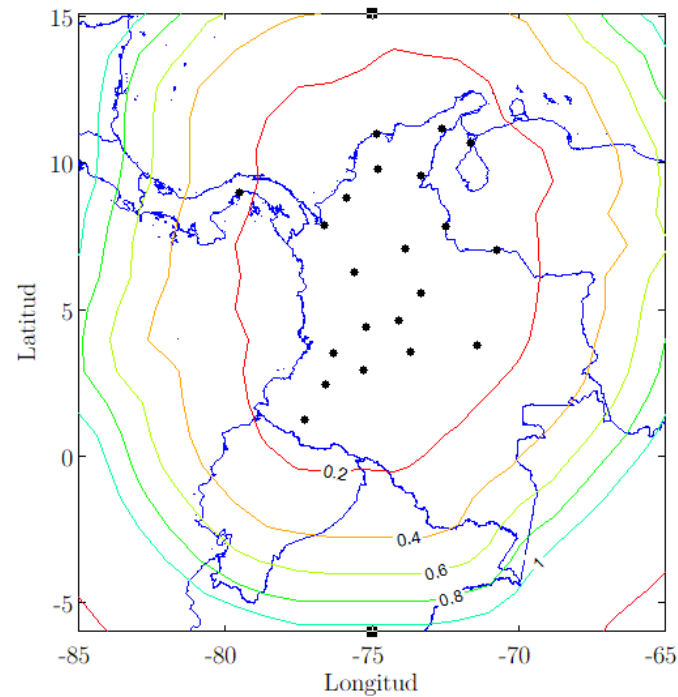
1.1 CARACTERISTICAS DE DESCARGAS ATMOSFERICAS

1.1.1 Nivel ceráunico (NC).

El nivel ceráunico se define como el número de días en un año en los cuales se observa un rayo o se escucha, a lo mínimo, un trueno en el lugar de ubicación.

Los niveles ceráunico tiene su representación en mapas isoceraunicos, o lo que es lo mismo, mapas con curvas del mismo nivel ceráunico. Para esto el país tuvo a disposición una red de detección de descargas atmosféricas desde 1997 como lo indica [9]. Posteriormente entró en operación una nueva red en el mes de septiembre del 2011 con un total de seis sensores sensibles de alta eficiencia los cuales han ido aumentando anualmente, lo que ha permitido ampliar la cobertura de la red. “De esta forma, actualmente cuenta con 20 sensores instalados (puntos negros) en diferentes partes del territorio colombiano” [4], como se observa en la Figura 10 [4]. “A la fecha, la red ha detectado más de 155 millones de rayos con corrientes superiores a 2 kA” [4], lo que ha permitido trazar el mapa isoceraunico del país.

Figura 10. Red colombiana de detección total de rayos.



Fuente: [4].

Basado en el estudio adelantado en [4], se presenta la Tabla 8 [4], la cual contiene el nivel cerámico promedio de Colombia a partir del año 2012 hasta el año 2017, el cual fue el periodo de evaluación de la información.

Tabla 8. Nivel cerámico promedio de Colombia a partir del año 2012 hasta el año 2017.

Subregión Natural	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Altiplano cundiboyacense	141	106	100	90	135	153
Altiplano Popayán	165	152	124	172	203	206
Alto Magdalena	129	107	101	103	133	167
Amazonia	124	89	97	125	140	147
Catatumbo	204	154	125	144	174	200
Llanura Caribe	182	121	111	151	175	204
Llanura costera del Pacífico	150	99	79	173	144	165
Llanura Guajira	56	30	33	39	104	78
Montaña centro	167	132	127	145	161	176
Montaña noreste	170	127	125	139	163	172
Montaña noroeste	239	199	194	219	223	240
Montaña sur	96	75	64	95	113	158
Orinoquia	139	91	87	126	134	138
Pacífico	236	187	196	243	204	216
Piedemonte Amazónico	116	99	86	107	126	164
Piedemonte llanero	132	97	87	100	127	130
Serranía del Baudó	212	159	167	216	190	200
Sierra nevada	145	93	96	130	165	176
Valle del Cauca	206	171	159	216	220	215
Valle del Magdalena	207	177	167	183	193	209
medio						

Fuente: [4]

En la tabla se encuentran resaltados con color rojo los datos en los cuales se presentó cada año el máximo NC. Con “este análisis se definió, para el periodo analizado, que el NC más alto se presentó en el año 2015 cuya subregión es la del Pacífico con 243 días de tormenta, y el menor se presentó, en la Llanura Guajira donde se evidencian 30 días de tormenta durante el año 2013” [4].

Las regiones con un promedio superior e inferior en cuanto al NC son la Montaña Noroeste y la Llanura Guajira respectivamente, en donde se presentaron 219 y 57 días de tormenta al año. Por otra parte, la “Montaña Noroeste, el Pacífico, la Serranía del Baudó y el Valle del Cauca presentaron tres o más años con Nivele Ceráunico por encima de 200 días de tormentas al año” [4].

1.1.2 Densidad de descargas a tierra (DDT).

La NTC 6593: 2023, la define como, “el número de rayos por kilómetro cuadrado al año” [11], de igual manera hace la claridad en que, se calcula en función de la descarga total o de las descargas individuales [11]. Para ello en [10], se presenta un nivel ceráunico con una resolución de $10 \times 10 \text{ km}^2$, pero para el análisis de este parámetro tomaremos como referencia la densidad de descargas a tierra presentada en [4], la cual posee una resolución superior de $3 \times 3 \text{ km}^2$.

En la Tabla 9 [4], se presentan los datos de densidad de descarga a tierra promedio calculados en [4], para cada una de las de subregiones naturales, donde se resaltan en color rojo las densidades de descarga a tierra presentadas como las más elevadas en cada año.

Este parámetro se calculó a partir de los valores de la DDT obtenida en cada uno de los cuadros de $3 \times 3 \text{ km}^2$, que hacen parte de las subregiones naturales [4].

Tabla 9. Densidad de descargas promedio desde el año 2012 hasta el año 2017.

Subregión Natural	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Altiplano cundiboyacense	6	7	5	3	5	5
Altiplano Popayán	11	11	10	17	22	17
Alto Magdalena	9	10	9	7	9	10
Amazonia	6	5	6	8	9	9
Catatumbo	40	19	18	25	22	32
Llanura Caribe	32	16	13	22	24	26
Llanura costera del Pacífico	11	6	4	15	8	10
Llanura Guajira	10	5	4	3	12	9
Montaña centro	11	10	9	10	10	9
Montaña noreste	13	9	9	9	10	10
Montaña noroeste	30	21	20	28	24	24
Montaña sur	3	3	2	4	4	6
Orinoquia	11	7	6	9	12	11
Pacífico	43	28	30	58	35	34
Piedemonte Amazónico	4	5	3	5	5	9
Piedemonte llanero	8	7	5	5	8	7
Serranía del Baudó	28	17	15	33	23	19
Sierra nevada	18	8	8	14	19	18
Valle del Cauca	13	14	11	17	17	13
Valle del Magdalena medio	36	32	27	35	30	29

Fuente: [4]

1.2 NORMATIVIDAD COLOMBIANA

En Colombia, la normatividad referente a la protección contra descargas atmosféricas se encuentra principalmente en el RETIE, cuya actualización más reciente, la resolución 40117 de 2024, establece los parámetros técnicos y legales que deben cumplir las instalaciones eléctricas para protegerse contra las descargas atmosféricas.

“Las instalaciones objeto del RETIE, deben contar con una evaluación del nivel de riesgo frente a rayos, basada en procedimientos establecidos en la norma técnica **NTC 4552-2: 2023** o normas técnicas internacionales como la **IEC 62305-2: 2010** o de reconocimiento internacional (siempre y cuando sean aplicables a las condiciones para descargas atmosféricas de Colombia). Esta evaluación, debe considerar la posibilidad de pérdidas de vidas humanas, pérdida del suministro de energía y otros servicios esenciales, pérdida o graves daños de bienes, pérdida cultural, así como los parámetros del rayo para la zona tropical, donde está ubicada Colombia y las medidas de protección que mitiguen el riesgo” [8]. En la Tabla 10, se relacionan las normas por la aplicación en la protección contra descargas atmosféricas que busca proteger la vida y los bienes.

Tabla 10. **RETE y NTC**

Reglamentos o normas	Aplicación
RETIE (Resolución 40117 de 2024)	- Libro Primero: Disposiciones generales.
	-Libro tercero: Protección Contra Rayos y sobretensiones transitorias.
NTC 4552-1	- Protección contra el Rayo parte 1: Principios generales [12].
NTC 4552-2	- Protección contra el Rayo parte 2: Evaluación del riesgo [13].
NTC 4552-3	- Protección contra el Rayo parte 3: Daños físicos a estructuras y riesgos a la vida [14].

Fuente: Elaboración propia

De igual manera, el título 13 de [8], establece las disposiciones relacionadas con la protección contra rayos y sobretensiones transitorias. Este capítulo regula la evaluación del riesgo de rayos, el diseño de sistemas de protección, y los componentes necesarios en pro garantizar la seguridad de las instalaciones eléctricas y las edificaciones.

A continuación, se presentan dos tablas que resumen los puntos clave de este título: la primera aborda la evaluación del riesgo de rayos y sus aplicaciones (Tabla 11), mientras que la segunda detalla el diseño, implementación y los componentes necesarios para los sistemas de protección (Tabla 12).

Tabla 11. Protección contra rayos y evaluación de riesgos con **RETIE**.

Artículo	Descripción
3.13.1. Protección contra rayos	Colombia, al estar en una zona de alta actividad de rayos, requiere protección especial en edificaciones e instalaciones eléctricas.
3.13.1.1. Evaluación del nivel de riesgo	Las instalaciones eléctricas bajo RETIE deben tener la evaluación del riesgo de rayos según NTC 4552-2 o IEC 62305-2, considerando pérdidas humanas, daños a bienes y servicios.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Diseño, implementación y componentes del sistema de protección contra rayos.

Artículo	Descripción
3.13.1.2. Diseño e implementación	El sistema de protección debe ser integral, usando la metodología NTC 4552-3 o IEC 62305-3, con base en el método electro geométrico, para mitigar los riesgos por rayos.
3.13.1.3. Componentes del sistema	Los componentes del sistema de protección deben garantizar conexión eléctrica permanente y mantenimiento periódico.
3.13.1.3.1. Terminales de captación	Elementos metálicos como antenas o torres deben ser considerados como terminales de captación si cumplen con los requisitos de conducción y continuidad eléctrica (IEC 62305-3).
3.13.1.4.	Comportamiento frente a Rayos.

Fuente: Elaboración propia.

1.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO 1

En este primer capítulo se ha logrado evidenciar que el país cuenta con un “Plan Nacional de Construcción y Mejoramiento de Vivienda de Interés Social Rural (PNVISR)” [6], el cual busca incentivar que las familias habiten las zonas rurales del territorio colombiano, de igual manera se ha evidenciado la existencia del fenómeno de descargas atmosféricas, se han presentado las características y la normatividad que existe para hacer frente a este fenómeno en busca de salvaguardar la vida y los bienes materiales. En los próximos capítulos abordaremos el estudio de riesgo y describiremos el procedimiento para realizar un análisis de riesgo a la vivienda y su entorno, además de determinar los pasos para el dimensionamiento del sistema de apantallamiento.

2 ANALISIS DE RIESGO A LA VIVIENDA Y SU ENTORNO DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para llevar a cabo el análisis de riesgo de una vivienda y su entorno ante descargas atmosféricas se plantea en este documento un procedimiento de 5 pasos:

2.1 CARACTERIZAR LA ESTRUCTURA

En este apartado se analiza las condiciones de la estructura, si prestara servicio al público, si prestara servicio de almacenamiento y que almacenara, si existen estructuras cercanas, si prestara servicio de vivienda, cuantas personas la habitaran la vivienda y cual es tiempo en que están en la vivienda.

De igual manera es necesario parametrizar las dimensiones espaciales de la estructura a proteger, por tanto, en este paso se busca definir la altura, el largo y ancho de la estructura, con el fin de calcular el área de recolección (A_D). Para esto se emplea.

$$A_D = L * W + 2(3H)(L + W) + \pi(3H)^2 \quad (2)$$

Donde:

L Longitud

W Ancho

H Altura

Como se observó en el capítulo 1, el país se ampliará con 6 modelos de viviendas rurales con un entorno adaptativo y unas dimensiones establecidas las cuales no tendrán en consideración edificaciones adicionales. Pero si es importante para el análisis tener en cuenta el factor de localización (C_D) de la estructura en relación con los objetos que la rodean. Dichos valores se encuentran definidos en la **Tabla A.1** de [13].

2.2 IDENTIFICAR Y CUANTIFICAR LA DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA DE LA REGIÓN

La expansión de los habitantes hacia las zonas rurales puede realizarse en cualquier departamento, por tanto, es necesario conocer el índice de densidad de descargas a tierra en las regiones, en busca de realizar la evaluación del riesgo con alusión a las descargas atmosféricas.

Estos valores de densidad de descargas a tierra fueron presentados en [4]. Para este documento se toman los valores históricos máximos registrados desde 2012 hasta 2017, en busca de tener el valor máximo presentado de DDT (ver Tabla 13).

Tabla 13. Densidad de descargas a tierra más altas de las regiones del país.

REGIÓN	DDT
AC	7
AP	22
AM	10
AZ	9
CT	40
LLC	32
LLCP	15
LLG	12
MC	11
MNE	13
MNOE	30
MS	6
OQ	12
PF	58
PA	9
PLL	8
SB	33
SN	19
VC	17
VMM	36

Fuente: Elaboración propia

2.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS DAÑOS Y RIESGOS ASOCIADOS A LA VIVIENDA.

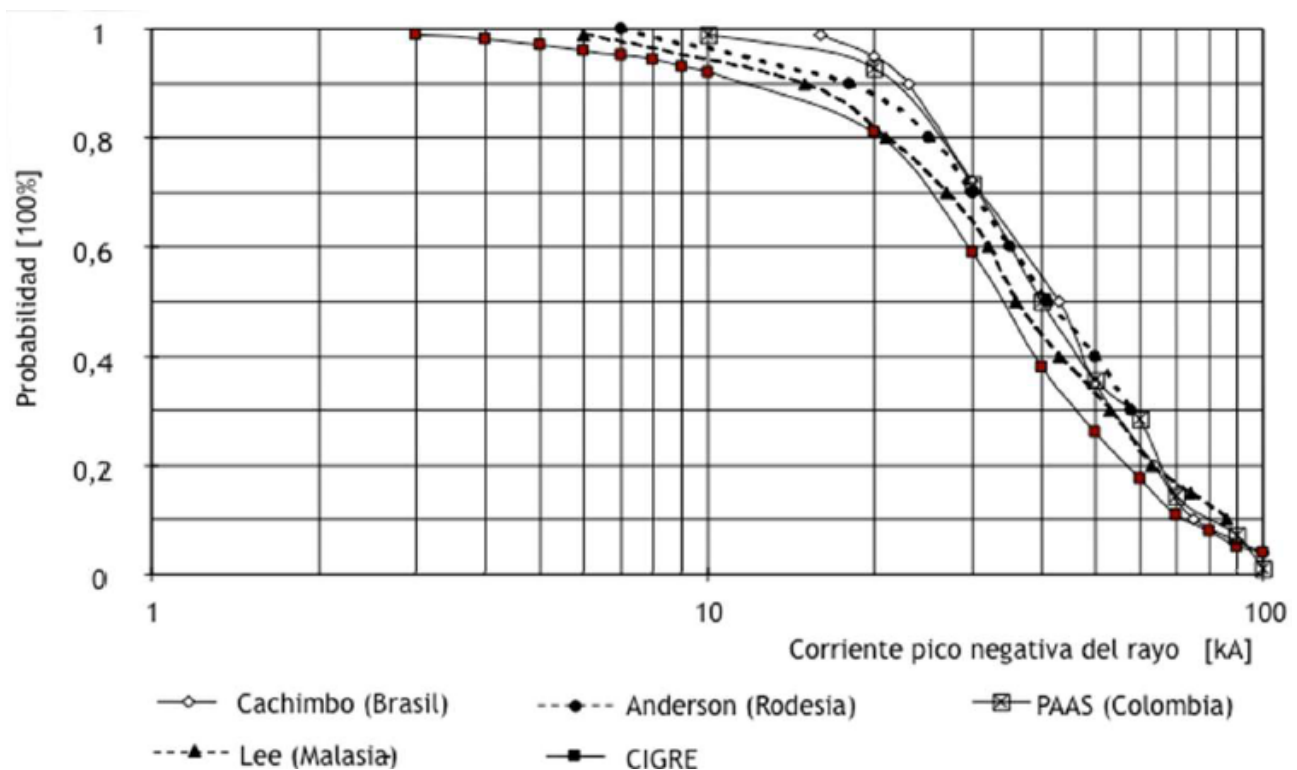
Para salvaguardar la vida al interior de la vivienda, es necesario conocer los posibles daños que pueden presentarse y los riesgos a los que se encuentra expuesta las viviendas:

2.3.1 Fuente de daño

Como se relacionó anteriormente, la característica más importante en este procedimiento es la caracterización de la amplitud de la corriente del rayo, ya que está, es la causa principal de daño y las afectaciones físicas a las personas.

Pero este valor no está establecido de manera uniforme, dada la variabilidad de sus parámetros, por tanto, se hace necesario expresar este valor en la probabilidad de exceder un valor como se indica en [9], [14] (Figura 11 [3]), este valor obedece a las múltiples investigaciones realizadas a través de los años para zonas ubicadas en regiones tropicales,

Figura 11. Corriente pico de un rayo negativo vs la probabilidad de ocurrencia entre CIGRE y cuatro sitios tropicales.



Fuente: [3]

Este gráfico muestra de manera comparativa, los niveles de la corriente del rayo y su probabilidad de ocurrencia para una descarga negativa, las cuales son las de mayor ocurrencia en nuestro país con un índice del 90 %.

En ella se puede apreciar que la corriente pico negativa del rayo está alrededor de 43 kA, con una probabilidad del 50 % de ocurrencia. Tomando como punto de partida ese valor, se empleará para el análisis una corriente negativa de 50 kA.

En cuanto a los niveles de corriente de la polaridad positiva, no comparten suficientes características para producir una forma de corriente media aceptable, como lo define [15], esto debido a su menor probabilidad, alrededor del 10 %.

En estudios recientes se presentan corrientes típicas menores a 20 kA, con aparición de valores incluso de los 200 kA, como se evidencia en la **Tabla 3** de [12], es de aclarar que estos valores tan elevados son muy escasos, pero pueden llegar a presentarse.

La corriente que aparece en esa transferencia de energía es la que se toma como la fuente de los daños, que estará clasificada según su punto de impacto. Estas fuentes se clasifican como:

S1	descarga en una estructura	[13]
S2	descarga cerca de una estructura	[13]
S3	descarga en una línea	[13]
S4	descarga cerca de una línea	[13]

2.3.2 Tipo de daño

Los tipos de daños estarán dados en función de las dimensiones en la estructura que se pretende proteger, por tanto, de ellas se tiene en cuenta la ubicación, el tipo de construcción y el uso que se le dará a la misma, estos daños están definidos como:

D1	lesiones en los seres vivos por descarga eléctrica	[13]
D2	daños físicos	[13]
D3	fallas de los sistemas eléctricos y electrónicos	[13]

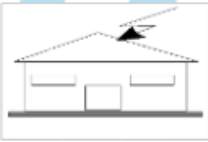
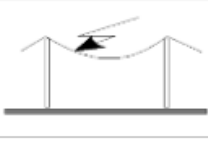
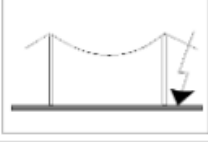
2.3.3 Tipo de pérdida

Estos daños se pueden dar al interior de la estructura y existirán casos en los que puedan extenderse hacia el exterior, causando adicionalmente diferentes tipos de pérdidas, estas pérdidas estarán dadas en función del contenido de la estructura y sus alrededores. La NTC 4552-2: 2023, las define como:

L1	pérdida de vida humana (incluyendo lesiones permanentes)	[13]
L2	pérdida de servicio público	[13]
L3	perdida de patrimonio cultural;	[13]
L4	pérdida de valor económico (estructura y su contenido, pérdida de actividad)	[13]

Estos factores (fuente de daño, tipo de daño y tipo de pérdida) en función del punto de impacto se ven reflejados en la Tabla 14 [13].

Tabla 14. Fuente de daño, tipo de daños y tipo de pérdidas en función del punto de impacto.

Descarga de rayo		Estructura	
Punto de impacto	Fuente del daño	Tipo de daño	Tipo de pérdidas
	S1	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S2	D3	L1 ^b , L2, L4
	S3	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S4	D3	L1 ^b , L2, L4
^a Solo para propiedades donde puedan producirse pérdidas de animales. ^b Solo para estructuras con riesgo de explosión y para hospitales o estructuras en las que las fallas de los sistemas internos dan lugar a un riesgo inmediato para la vida humana.			

Fuente: [13]

2.3.4 Riesgo

Para la definición de riesgo, se tomará *“La probabilidad de que ocurra un evento ocasionando pérdidas o lesiones en seres humanos los cuales dependen de factores como la peligrosidad, vulnerabilidad y exposición”* [4].

2.3.5 Riesgo por descargas atmosféricas

Para la definición del riesgo por descargas atmosféricas se toma como referencia la NTC 4552-2 (IEC 62305-2), la cual define el riesgo como: *“el valor de pérdida media probable anual (personas bienes) debida al rayo, depende de: el numero anual de descargas atmosféricas que afecten a la estructura, la probabilidad de daños debidos a una descarga atmosférica y el costo promedio de las pérdidas consecuentes”* [13][16].

Se entiende que en las zonas rurales la exposición de las edificaciones al fenómeno de las descargas atmosféricas es elevada, de igual manera se concibe que se encuentran expuestas a las condiciones naturales, por tanto, es necesario evaluar el riesgo de ser impactadas por una descarga atmosférica.

2.3.6 Componentes de riesgo

Son aquellos componentes relacionados directamente con aquello considerado como fuente de daño, dichas componentes del riesgo están definidas en la NTC 4552-2: 2023 [13], para una mayor facilidad en la comprensión y implementación en el análisis de riesgo se han organizado en la Tabla 15.

Tabla 15. Componentes de riesgo según NTC 4552-2: 2023 [13].

Componentes del riesgo en una estructura por descargas en la estructura	RA	Componente relacionado con lesiones en los seres vivos producto de las descargas eléctricas debidas a las tensiones de contacto y de paso en el interior de la estructura y en el exterior en una zona de hasta 3 m de la estructura. Pueden aparecer pérdidas de tipo L1 y, en el caso de estructuras tipo L4 con posibles pérdidas de animales. NOTA: en estructuras consideradas especiales, los ocupantes pueden estar sometidos a riesgo de impacto directos.	[13]
	RB	Componente relacionado con daños físicos producto de las chispas peligrosas en el interior de la estructura, causantes de fuegos o de explosiones que también pueden afectar al medioambiente. Pueden presentarse todos los tipos de pérdidas (L1, L2, L3 y L4).	[13]
	RC	Componente relacionado con las fallas de los sistemas internos debidos al impulso electromagnético radiado. En todos los casos podrían producirse pérdidas del tipo L2 y L4 junto con pérdidas del tipo L1 en aquellos casos de estructuras con riesgo de explosión y hospitales u otras estructuras en las que la falla de los sistemas internos ponga en peligro inmediato la vida humana	[13]

Tabla 16. Componentes de riesgo según NTC 4552-2: 2023 [13] (Continuación).

Componentes de riesgo de una estructura por descargas cercanas a la estructura	RM	Componente relacionado con las fallas de los sistemas internos debidos al impulso electromagnético radiado. En todos los casos podrían producirse pérdidas del tipo L2 y L4, junto con pérdidas del tipo L1 en el caso de estructuras con riesgo de explosión y hospitales u otras estructuras en las que la falla de los sistemas internos ponga en peligro inmediato la vida humana.	[13]
Componentes de riesgo de una estructura por descargas en una línea conectada a la estructura	RU	Componente relacionado con lesiones en los seres vivos producidas por las descargas eléctricas debidas a las tensiones de contacto en el interior de la estructura, originadas por la corriente inyectada en una línea que entra en la estructura. Pueden ocurrir pérdidas de tipo L1 y, en el caso de propiedades agrícolas, podrían ocurrir también pérdidas de tipo L4 por posibles pérdidas de animales	[13]
	RV	Componente relacionado con los daños físicos producidos por la corriente del rayo transmitida a través de las líneas entrantes (fuego o explosión generados por chispas peligrosas producidas, generalmente en el punto de entrada de la línea en la estructura, entre la instalación externa y las partes metálicas). Puede ocurrir cualquier tipo de pérdidas (L1, L2, L3 y L4).	[13]
	RW	Componente relacionado con las fallas de los sistemas al interior de la vivienda producidos por sobretensiones inducidas en las líneas que entran y transmitidos a la estructura. En todos los casos podrían producirse pérdidas del tipo L2 y L4, junto con pérdidas del tipo L1 en el caso de estructuras con riesgo de explosión y hospitales u otras estructuras en las que la falla de los sistemas internos ponga en peligro inmediato la vida humana NOTA 1 Las líneas que se tienen en consideración en esta valoración, son solamente las que entran en la estructura. NOTA 2 Las descargas que se producen en tuberías o próximas a ellas no se consideran fuente de daño en base a su conexión con una barra equipotencial. Si no está prevista una barra equipotencial, debería considerarse esta amenaza de daño	[13]
Componentes de riesgo de una estructura por descargas cercanas a una línea conectada a la estructura	RZ	Componente relacionado con las fallas de los sistemas internos causados por sobretensiones inducidas en las líneas que entran y se transmiten a la estructura. En todos los casos podrían producirse pérdidas del tipo L2 y L4, junto con pérdidas de tipo L1 en el caso de estructuras con riesgo de explosión y hospitales u otras estructuras en las que la falla de los sistemas internos ponga en peligro inmediato la vida humana. NOTA 1 Las líneas que se tienen en consideración en esta valoración, son solamente las que entran en la estructura. NOTA 2 Las descargas que se producen en tuberías o próximas a ellas no se consideran fuente de daño si están unidas con una barra de conexión equipotencial. Si no está prevista una barra de conexión equipotencial, debería considerarse esta amenaza de daño.	[13]

Fuente: Elaboración propia

2.3.7 Composición de los componentes del riesgo en relación con la estructura

Para cada estructura, los componentes de riesgo tienen sus variaciones por ello, se hace necesario discriminar y tomar en cuenta cada tipo de pérdida por separado, entre las cuales tenemos:

- R1 Riesgo de pérdida de vida humana [13]:

$$R_1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1}^{(1)} + R_{M1}^{(1)} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1}^{(1)} + R_{Z1}^{(1)} \quad (3)$$

- 1) Aplica solo para estructuras con riesgo de explosión y hospitales con equipos de reanimación eléctrica u otras estructuras en las que la falla de los sistemas internos ponga en peligro inmediato la vida humana [13].

- R2 Riesgo de pérdida de un servicio público [13]:

$$R_2 = R_{B2} + R_{C2} + R_{M2} + R_{V2} + R_{W2} + R_{Z2} \quad (4)$$

- R3 Riesgo de pérdida de patrimonio cultural:

$$R_3 = R_{B3} + R_{V3} \quad (5)$$

- R4 Riesgo de pérdida de valor económico:

$$R_4 = R_{A4}^{(2)} + R_{B4} + R_{C4} + R_{M4} + R_{U4}^{(2)} + R_{V4} + R_{W4} + R_{Z4} \quad (6)$$

- 2) Aplica para propiedades en las que se pueden presentar pérdida de vidas de animales [13].

Los factores de las componentes del riesgo y las fuentes de daño están relacionados en la **Tabla 2** de [13].

En ella se evidencian los factores que afectan a una estructura, “de igual manera las medidas posibles de protección, las cuales estarán en función de las diferentes condiciones del entorno” [13]. En la Tabla 17, se presentan los factores que tiene influencia en las componentes de riesgo.

Tabla 17. Factores con influencia en los componentes de riesgo.

Características de la estructura o de los sistemas internos	R _A	R _B	R _C	R _M	R _U	R _V	R _W	R _Z
Medidas de protección								
Área de recolección	X	X	X	X	X	X	X	X
Resistividad del terreno	X							
Resistividad del suelo	X				X			
Restricciones físicas, aislamiento, avisos, equipotencialización del terreno	X				X			
SPCR	X	X	X	X _a	X _b	X _b		
Conexión de DPS	X	X			X	X		
Interfases aislantes			X _c	X _c	X	X	X	X

Tabla 18. Factores con influencia en los componentes de riesgo (**Continuación**).

Características de la estructura o de los sistemas internos Medidas de protección	RA	RB	RC	RM	RU	RV	RW	RZ
Coordinación de los DPS			X	X			X	X
Blindaje espacial			X	X				
Blindaje de las líneas externas					X	X	X	X
Blindaje de las líneas internas			X	X				
Precauciones en el trazado			X	X				
Red equipotencial			X					
Precauciones contra incendios		X				X		
Sensibilidad al fuego		X				X		
Peligro especial		X				X		
tensión nominal soportada al impulso			X	X	X	X	X	X
^a Solo para SPCR externos mallados ^b Debido a la conexión equipotencial ^c Solo si pertenece al equipo								

Fuente: [13]

2.4 EVALUACIÓN DE LAS COMPONENTES DE RIESGO

Las componentes de riesgo R_A , R_B , R_C , R_M , R_U , R_W y R_Z , es posible expresarlas en:

$$R_X = N_X * P_X * L_X \quad (7)$$

Para la cual:

N_X es el número anual de eventos peligrosos: está afectado por la densidad de descargas a tierra (N_G) y por las características físicas del objeto a proteger, las de sus alrededores, las de las líneas conectadas y las del terreno [13].

P_X es la probabilidad de daños en una estructura: está afectada por las características de la estructura a proteger, las de las líneas conectadas y por las medidas de protección adoptadas [13].

L_X es la pérdida consiguiente: está afectada por el uso asignado a la estructura, la presencia de personas, el tipo de servicio prestado al público, el valor de las cosas afectadas por el daño y las medidas tomadas para limitar el grado de las pérdidas [13].

2.4.1.1 Evaluación de las componentes de riesgo por descargas en una estructura (S1)

Esta evaluación es posible mediante 3 ecuaciones (8, 9, 10):

Para relacionar la componente de las lesiones en los seres vivos (D1) [13] tenemos:

$$R_A = N_D * P_A * L_A \quad (8)$$

En la cual:

- N_D es el número de eventos peligrosos para la estructura y está dada por:

$$N_D = N_G * A_D * C_D * 10^{-6} \quad (9)$$

Donde:

- N_G es la densidad de descargas atmosféricas a tierra ($1/km^2$ *año, Tabla 13) [10].

- A_D es el área de recolección de la estructura (m^2), se determina por (1).
- C_D denominado factor de localización de la estructura [13], su valor esta dado en la **Tabla A.1** de [13].
- P_A es la probabilidad de que una descarga que cae en la estructura produzca lesiones en los habitantes, debidas a descargas eléctricas [13], esta probabilidad está dada por:

$$P_A = P_{TA} * P_B \quad (10)$$

De la cual, conocemos:

- P_{TA} depende de las medidas de protección adicionales tomadas para reducir las tensiones de paso y tensiones de contacto [13], estos valores están se presentan en la **Tabla B.1** de [13].
- P_B es la probabilidad de que una descarga que impacta en la estructura cause daños físicos, esté depende del nivel de protección[13], su valor esta dado por la **Tabla B.2** de [13].
- L_A es el valor medio relativo del tipo de pérdida en la estructura [13]:

$$L_A = r_t * L_T * \frac{n_z}{n_t} * \frac{t_z}{8760} \quad (11)$$

- r_t es uno de los factores reductores de las pérdidas de vidas humanas, el cual se encuentra en función del tipo de terreno [13], su valor esta dado en la **Tabla C.3** de [13].
- L_T es el valor medio típico en porcentaje del número de víctimas lesionadas por la descarga eléctrica debido a un evento peligroso [13] su valor esta dado por la **Tabla C.3** de [13].
- n_z es el número de personas en la zona [13].
- n_t es el número de personas total en la estructura [13].
- t_z es el número anual de horas que las personas están presentes en la zona [13].

En relación con la componente de los daños físicos (D2) [13] tenemos:

$$R_B = N_D * P_B * L_B \quad (12)$$

Sabemos:

- N_D es el número de eventos peligrosos para la estructura y está dada por (9).
- P_B es la probabilidad de que una descarga que impacta en la estructura cause daños físicos, depende del nivel de protección contra el rayo [13], estos valores están establecidos en la **Tabla B.2** de [13].
- L_B es el valor medio relativo del tipo de pérdida en la estructura [13], está definida por:

$$L_B = L_V = r_p * r_f * h_z * L_F * \frac{n_z}{n_t} * \frac{t_z}{8760} \quad (13)$$

Del cual se conoce:

- r_p es un factor reductor de pérdidas por daños físicos en función de las medidas tomadas para reducir los efectos del fuego [13] , este valor se encuentra en la **Tabla C.4** de [13].
- r_f es un factor reductor de las pérdidas por daños físicos en función del riesgo de incendio o de explosión de la estructura [13] , este valor se encuentra en la **Tabla C.5** de [13].
- h_z es un factor amplificador de las pérdidas por daños físicos cuando se presenta un daño especial [13] , este valor se encuentra en la **Tabla C.6** de [13].
- L_F es el valor medio típico relativo del número de usuarios no atendidos, resultado de las afectaciones físicas debidas a un evento de peligro [13], este valor se encuentra en la **Tabla C.8** de [13].
- n_z es el número de personas en la zona [13].
- n_t es el número de personas total en la estructura [13].
- t_z es el número anual de horas que las personas están presentes en la zona [13].

Por último, la relación de las componentes de fallas en los sistemas internos (D3) [13],

$$R_C = N_D * P_C * L_C \quad (14)$$

De la cual, conocemos:

- N_D es el número de eventos peligrosos para la estructura y está dada por (9).
- P_C es la probabilidad que una descarga que impacte directamente en la estructura cause fallos en los sistemas internos [13], se puede encontrar mediante:

$$P_C = P_{DPS} * C_{LD} \quad (15)$$

Donde:

- P_{DPS} es el valor de probabilidad en función del nivel de protección para el cual se han diseñado los DPS [13]. Este valor se encuentra establecido en la **Tabla B.3** de [13].
- C_{LD} es un factor que tiene dependencia en las condiciones de blindaje, puesta a tierra y aislamiento de la línea a la que se conecta el sistema interno [13]. Este valor se encuentra establecido en la **Tabla B.4** de [13].
- L_C es el valor medio del tipo de pérdida dependiendo de la zona [13], el cual está dado por:

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_o * \frac{n_z}{n_t} * \frac{t_z}{8760} \quad (16)$$

Donde:

- L_o es el valor medio típico en porcentaje del número de víctimas por fallas en los sistemas internos debido a un evento peligroso [13]. Este valor se encuentra establecido en la **Tabla C.2** de [13].
- n_z es el número de personas en la zona [13].
- n_t es el número de personas total en la estructura [13].
- t_z es el número anual de horas que las personas están presentes en la zona [13].

2.4.1.2 Evaluación de las componentes de riesgo por descargas cerca de una estructura (S2)

En esta componente de riesgo se toman en cuenta las afectaciones que puedan presentarse por sobretensiones debidas a impactos cercanos a la estructura, por tanto, se empleara la componente relacionada con las fallas de los sistemas internos (D3) [13]:

$$R_M = N_M * P_M * L_M \quad (17)$$

Sabemos:

- N_M es el valor medio anual de eventos peligrosos por descargas cerca de una estructura [13], y está dado por:

$$N_M = N_G * A_M * 10^{-6} \quad (18)$$

- N_G es la densidad de descargas atmosféricas a tierra ($1/km^2 \cdot \text{año}$) [10], ver Tabla 13.
- A_M es el área de recolección de descargas que impactan cerca de la estructura (m^2) [13].

$$A_M = 2 * 500(L + W)500^2 \quad (19)$$

Donde:

L es longitud
W es ancho

- P_M es la probabilidad de que una descarga cercana a la estructura cause fallas en los sistemas internos, pero cuando no se provee un sistema coordinado de DPS [13], el valor de $P_M = P_{MS}$, el cual estará dado por:

$$P_M = P_{MS} = (K_{S1} * K_{S2} * K_{S3} * K_{S4})^2 \quad (20)$$

Donde:

- K_{S1} tiene en cuenta la eficacia del blindaje de la estructura, el PSCR u otros blindajes situados en la zona de protección contra rayos [13]. Como no existen blindajes en los conductores de los alimentadores rurales se tomará el valor máximo permitido, 1 (uno).
- K_{S2} tiene en cuenta la eficacia del blindaje de los blindajes internos de la estructura en el límite de la ZPCR [13]. Como no existen blindajes de la estructura se tomará el valor máximo permitido, uno (1).
- K_{S3} Tiene en cuenta las características del cableado interno [13] (revisar **Tabla B.5** de [13]).
- K_{S4} tiene en cuenta la capacidad, del sistema a proteger de soportar impulsos de tensión [13]. Como no se conocen los equipos a utilizar se tomará el valor máximo que está limitado a uno (1).
- L_M es el valor medio del tipo de pérdida dependiendo de la zona, $L_M = L_C$.

2.4.1.3 Evaluación de las componentes de riesgo por descargas en una línea conectada a la estructura (S3)

En este caso las afectaciones se verán reflejadas por sobre tensiones causadas por descargas sobre la línea, las cuales pueden afectar los equipos eléctricos y electrónicos. Para evaluar estas componentes de riesgo se emplean las siguientes tres ecuaciones:

1. Para las componentes relacionadas con lesiones en los seres vivos (D1) [13].

$$R_U = (N_L + N_{DJ})P_U * L_U \quad (21)$$

De la cual conocemos:

- N_L es el número de sobretensiones de amplitud no inferior a 1 kV (año) en la sección de la línea [13], este valor estará definido por:

$$N_L = N_G * A_L * C_I * C_E * C_T * 10^{-6} \quad (22)$$

- N_G es la densidad de descargas atmosféricas a tierra ($1/km^2*$ año) [10], Tabla 13.
- A_L es el área de recolección para descargas en una línea [13], cuyo valor está en dado por:

$$A_L = 40 * L_L \quad (23)$$
- L_L es la longitud de la sección de la línea [13].

Nota: si se desconoce el valor de la sección de la línea es posible estimar 1000 m.

- C_I es el factor de instalación de la línea [13] (revisar **Tabla A.2** de [13].).
- C_E es el factor medio ambiental de la línea [13] (revisar **Tabla A.4** de [13]).
- C_T es el factor del tipo de la línea [13] (revisar **Tabla A.3** de [13]).
- N_{DJ} es el número de eventos peligrosos para una estructura adyacente [13], en este caso la vivienda, su valor está determinado en:

$$N_{DJ} = N_G * A_{DJ} * C_{DJ} * C_T * 10^{-6} \quad (24)$$

Del cual sabemos:

- N_G es la densidad de descargas atmosféricas a tierra ($1/km^2 \cdot \text{año}$) [10], Tabla 13.
- A_{DJ} es el área de recolección de la superficie adyacente (m^2) [13].
- C_{DJ} es el factor de localización de la estructura adyacente [13] (revisar **Tabla A.1** de [13]).
- C_T es el factor del tipo de la línea [13] (revisar **Tabla A.3** de [13]).
- P_U es la probabilidad de que una descarga en una línea produzca lesiones a los seres vivos por descarga eléctrica [13], su valor esta dado por:

$$P_U = P_{TU} * P_{EB} * P_{LD} * C_{LD} \quad (25)$$

Donde:

- P_{TU} son los valores de probabilidad por una descarga en una línea entrante que produciría impacto sobre los seres vivos por tensiones de contacto peligrosas [13] (revisar **Tabla B.6** de [13]).
- P_{EB} son los valores de probabilidad como función del nivel de protección contra rayos, depende de la conexión de equipotencialidad frente al rayo, según la Norma IEC 62305-3 y del nivel de protección (NPR) para el que se han diseñado los DPS [13]. Los valores de P_{EB} están dados en la **Tabla B.7** de [13].
- P_{LD} es la probabilidad de falla de los sistemas internos por una descarga en una línea conectada, que depende de las características de la línea [13]. Los valores de P_{LD} están dados en la **Tabla B.8** de [13].
- C_{LD} es un factor en función de las condiciones de blindaje, puesta a tierra y aislamiento de la línea [13]. Este valor se encuentra establecido en la **Tabla B.4** de [13].
- L_U valores de pérdidas por lesiones en los seres vivos por descarga eléctricas [13], su valor se determina mediante:

$$L_U = r_t * L_T * \frac{n_z}{n_t} * \frac{t_z}{8760} \quad (26)$$

- r_t es un factor reductor de las pérdidas de vidas humanas en función del tipo de terreno o del suelo [13] (revisar **Tabla C.3** de [13]).
- L_T es el valor medio típico en porcentaje del número de víctimas lesionadas por la descarga eléctrica debido a un evento peligroso [13] (revisar **Tabla C.3** de [13]).
- n_z es el número de personas en la zona [13].

- n_t es el número de personas total en la estructura [13].
- t_z es el número anual de horas que las personas están presentes en la zona [13].

2. En relación con la componente de los daños físicos (D2) [13],

$$R_V = (N_L + N_{DJ})P_V * L_V \quad (27)$$

De donde sabemos:

- N_L es el número de sobretensiones de amplitud no inferior a 1 kV (año) en la sección de la línea [13], este valor está definido por (22).
- N_{DJ} es el número de eventos peligrosos para una estructura adyacente [13], en este caso la vivienda, su valor está determinado por (24).
- P_V es la probabilidad de que una descarga en una línea produzca de daños físicos [13], cuyo valor está determinado por:

$$P_V = P_{EB} * P_{LD} * C_{LD} \quad (28)$$

Del cual conocemos:

- P_{EB} son los valores de probabilidad como función del nivel de protección contra rayos, depende de la conexión de equipotencialidad frente al rayo, según la Norma IEC 62305-3 y del nivel de protección (NPR) para el que se han diseñado los DPS [13]. Los valores de P_{EB} están dados en la **Tabla B.7** de [13].
- P_{LD} es la probabilidad de falla de los sistemas internos por una descarga en una línea conectada, que depende de las características de la línea [13]. Los valores de P_{LD} están dados en la **Tabla B.8** de [13].
- C_{LD} es un factor en función de las condiciones de blindaje, puesta a tierra y aislamiento de la línea [13]. Este valor se encuentra establecido en la **Tabla B.4** de [13].
- L_V es el valor medio relativo del tipo de pérdida en la estructura que es igual al valor L_B [13] y está dada por (13)

3. Para la relación de la componente de las fallas en los sistemas internos (D3) [13].

$$R_W = (N_L + N_{DJ}) * P_W * L_W \quad (29)$$

Del cual conocemos:

- N_L es el número de sobretensiones de amplitud no inferior a 1 kV (año) en la sección de la línea [13], este valor está definido por (22).
- N_{DJ} es el número de eventos peligrosos para una estructura adyacente [13], en este caso la vivienda, su valor está determinado por (24).
- P_W es la probabilidad de que una descarga en una línea produzca fallas en los sistemas internos [13], la cual está dada por:

$$P_W = P_{DPS} * P_{LD} * C_{LD} \quad (30).$$

De donde

- P_{DPS} es el valor de probabilidad en que depende del nivel de protección para el que se han diseñado los DPS [13]. Este valor se encuentra establecido en la **Tabla B.3** de [13].

- P_{LD} es la probabilidad de falla de los sistemas internos por una descarga en una línea conectada, que depende de las características de la línea [13]. Los valores de P_{LD} están dados en la **Tabla B.8** de [13].
- C_{LD} es un factor en función de las condiciones de blindaje, puesta a tierra y aislamiento de la línea [13]. Este valor se encuentra establecido en la **Tabla B.4** de [13].
- L_W es el valor medio del tipo de pérdida dependiendo de la zona ($L_W = L_C$) [13], este valor está dado por (16).

2.4.1.4 Evaluación de las componentes del riesgo por descargas cerca una línea conectada a la estructura (S4)

En esta componente de riesgo se toman en cuenta las afectaciones que puedan presentarse por sobretensiones debidas a impactos cercanos a la línea, por tanto, se empleara la componente relacionada con las fallas de los sistemas internos (D3) [13], el cual está dado por:

$$R_Z = N_L * P_Z * L_Z \quad (31)$$

Del cual sabemos:

- N_L es el número de sobretensiones de amplitud no inferior a 1 kV (año) en la sección de la línea [13], este valor está definido por (22).
- P_Z es la probabilidad de que una descarga cerca de una línea entrante produzca fallas en los sistemas internos [13], para determinarla empleamos:

$$P_Z = P_{DPS} * P_{LI} * C_{LI} \quad (32)$$

Donde:

- P_{DPS} es el valor de probabilidad en función del nivel de protección para el que se han diseñado los DPS [13]. Este valor se encuentra establecido en la **Tabla B.3** de [13].
- P_{LI} es la probabilidad de falla de los sistemas internos por una descarga cerca de una línea conectada, que depende de las características de la línea y del equipamiento [13] (revisar **Tabla B.9** de [13]).
- C_{LI} es un factor en función de las condiciones de blindaje, puesta a tierra y aislamiento de la línea a la que se conecta el sistema interno [13]. Este valor se encuentra establecido en la **Tabla B.4** de [13].
- L_Z es el valor medio del tipo de pérdida dependiendo de la zona ($L_Z = L_C$) [13]. Este valor se encuentra establecido en (16).

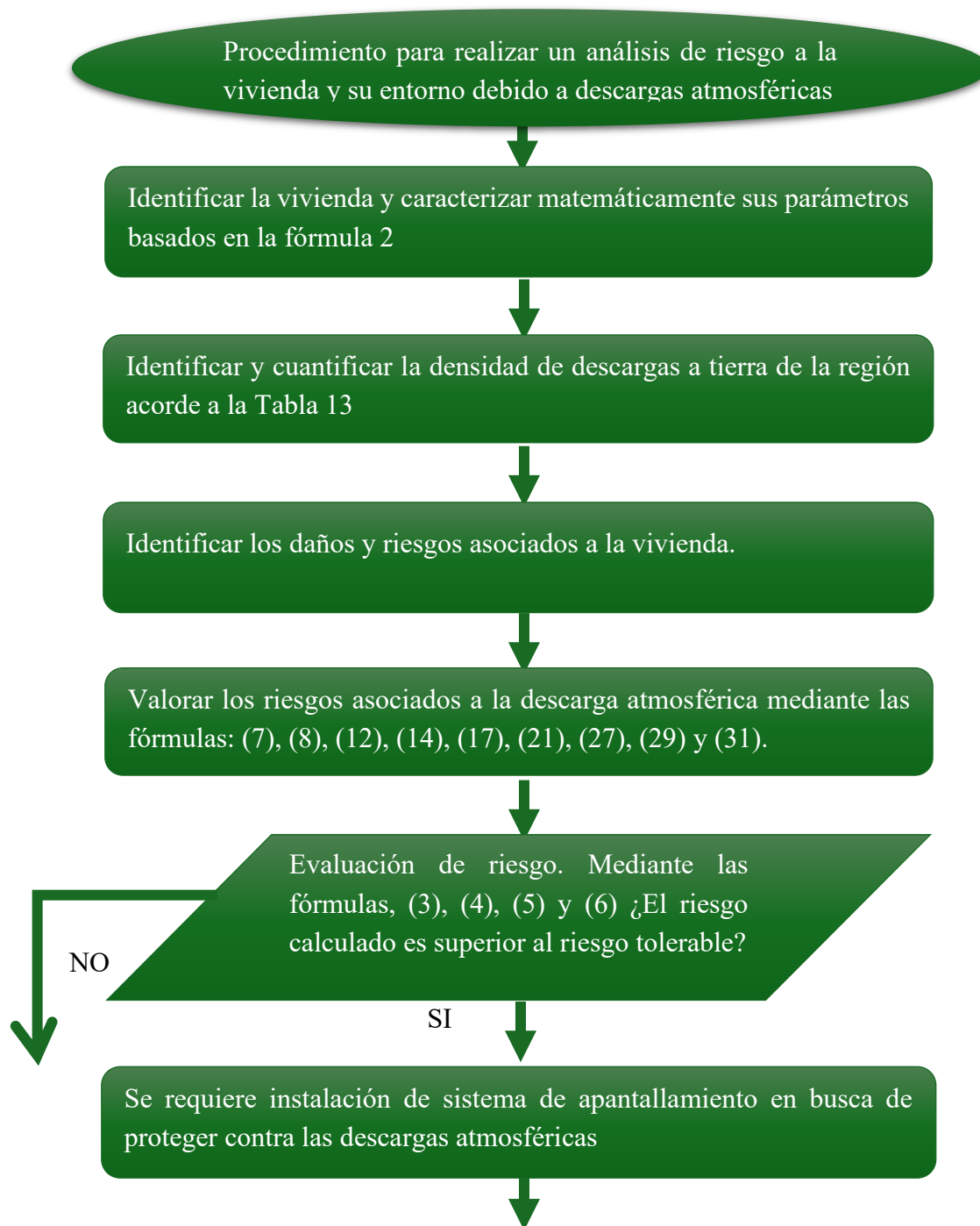
2.5 EVALUACIÓN DE RIESGO TOLERABLE R_T

El riesgo tolerable por descargas atmosféricas es presentado en la **Tabla 4** de la NTC 4552-2: 2023 [13] y pauta los valores típicos del riesgo tolerable para el territorio nacional, si ese valor es excedido por los riesgos calculados se deben instalar medidas de protección y reevaluar el riesgo para verificar que las medidas tomadas cumplan con la condición de riesgo tolerable.

2.6 RESUMEN DEL CAPÍTULO 2

En este segundo capítulo se presentó el procedimiento para el análisis de riesgo el cual se plantea llevar a cabo en 5 pasos, que contienen la caracterización de la estructura, identificar y cuantificar la DDT, definición del riesgo, los factores que influyen en el análisis de riesgos, las afectaciones causadas por el tipos de daño, las diferentes tipos de pérdida y la formulación matemática requerida para obtener un valor que permita cuantificar y comparar el riesgo de la vivienda con los valores establecidos por el país ante el riesgo por descargas atmosféricas, lo cual nos permitirá avanzar en la búsqueda de las medidas necesarias para brindar una protección adecuada a la vivienda.

Este procedimiento se presenta como un paso a paso en el flujograma 1.



3 MEDIDAS DE PROTECCIÓN

Seleccionar las medidas de protección obedece a los lineamientos expuestos en [13], el cual busca cumplir con los aspectos técnicos que garanticen la integridad y la seguridad de las personas, como se ha establecido en [14].

Por tanto, tomando como punto de partida los resultados del análisis de riesgos realizado en el capítulo anterior y tomando para el análisis las componentes de riesgo más críticas, para la aplicación de las medidas de protección existentes en la normatividad, se buscará distribuir esas componentes de riesgo en los elementos de protección.

Entendiendo que para cada tipo de pérdidas evidenciadas existen diferentes medidas de protección, las cuales, individualmente o combinadas, satisfacen la condición de $R \leq RT$,

Donde:

R Riesgo calculado

RT Riesgo tolerable

Se procede a dimensionar el sistema de apantallamiento adecuado que cumpla con los requerimientos técnicos y brinde seguridad y protección a las personas en zona rural.

A partir de ahora se procede a caracterizar los niveles de protección, los sistemas de protección y sus componentes, partiendo de la corriente nominal establecida para el rayo como se indicó en la capítulo anterior (fuente de daño), todo con la finalidad de garantizar el adecuado dimensionamiento técnico de los dispositivos eléctricos necesarios para proteger una vivienda rural, teniendo en cuenta el análisis de riesgo realizado anteriormente acorde a la NTC 4552-3: 2023 (IEC 62305-3) [14], [17].

3.1 NIVEL DE PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO (NPR)

La NTC 4552-3, define que: “una protección ideal para las estructuras sería envolver el objeto a proteger con una pantalla continua perfectamente conductora, de espesor conveniente, puesta a tierra, y realizar, en el punto de entrada a la pantalla, una conexión equipotencial adecuada” [14] de las líneas que entran en la estructura. Esto impediría la penetración en la estructura de la corriente del rayo y del campo electromagnético asociado, evitando los peligrosos efectos térmicos y electrodinámicos de la corriente, así como las chispas y las sobretensiones, peligrosas para los sistemas internos [14].

Pero en la aplicación se encuentran limitaciones para lograr la total protección, ya que:

- en las estructuras reales la falta de continuidad en las pantallas se ve reflejada por las puertas (en algunas ocasiones no son metálicas), las ventanas (poseen vidrios, los cuales no son un material conductor) y los espacios de ventilación, los cuales debilitan la efectividad de la pantalla;
- en los conductores la continuidad y el espesor de los materiales se ven afectados por los efectos térmicos de la corriente del rayo, adicionalmente al estar expuestos a la intemperie en ocasiones se ven afectados por la oxidación;
- los edificios son formas irregulares, complejas y de formas variables, lo que hace que algunos puntos sean más propensos a impactos que otros.

Entendiendo estas limitaciones y atendiendo la necesidad de protección para las estructuras se han definido en [14], cuatro niveles de protección los cuales se presentan en la Tabla 19, con sus características.

Tabla 19. Características de los niveles de protección.

NIVEL DE PROTECCIÓN	CARACTERISTICAS
I	Protección para estructuras de alto riesgo (ej.: plantas químicas, hospitales). Diseñado para rayos de 200 kA, con radio de esfera rodante de 20 m. Eficacia del 98%, usando sistemas robustos (múltiples bajadas, tierras profundas). Prioriza evitar daños catastróficos.
II	Para edificios industriales o infraestructura crítica. Soporta 150 kA, con radio de esfera rodante de 30 m. Eficacia del 95%. Usa pararrayos con configuración equilibrada entre coste y protección. Mitiga incendios y fallos eléctricos graves.
III	Aplicable en edificios públicos o comerciales. Resistencia a 100 kA, con radio de esfera rodante de 45 m. Eficacia del 90%. Sistemas estándar con conductores y tierras básicas. Balancea seguridad y viabilidad económica.
IV	Protección mínima para viviendas o estructuras pequeñas. Soporta 50 kA, con radio de esfera rodante de 60 m. Eficacia del 80%. Soluciones simplificadas (pararrayos puntuales, tierras sencillas). Adecuado para zonas con baja actividad de rayos.

Fuente: Elaboración propia

3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

Para cumplir con el objetivo de este capítulo, es necesario determinar el sistema de protección contra rayos (SPCR), cuya función principal es interceptar las descargas que se dirijan hacia la estructura y conducir las altas corrientes del rayo hacia el suelo, donde se podrá dispersar mediante las varillas del sistema de puesta a tierra.

El sistema de puesta a tierra tiene la tarea de dispersar la corriente sin causar daños, térmicos, electrodinámicos o mecánicos, tampoco deberán producirse chispas eléctricas que puedan iniciar un fuego o una explosión [3].

Para ello, existen dos tipos de sistemas de protección de uso exterior: el primero se encuentra aislado eléctricamente de la estructura y el segundo se encuentra unido a la estructura.

El tipo de protección a emplear está ligado al riesgo de explosión o incendio en función de los elementos que se guarden en la estructura y el punto de impacto de la descarga atmosférica.

Mas para este trabajo de grado se tomará el segundo sistema de protección, basados en la concepción de que una vivienda rural no posee estructuras con paredes combustibles ni áreas con peligros de explosión y que los equipos al interior no son sensibles al campo electromagnético de la descarga del rayo.

El sistema de protección externa completo está compuesto de 3 partes:

3.2.1 Sistema de captación

Es el componente primario de un sistema de protección contra rayos, este se encarga de interceptar las descargas atmosféricas para prevenir el impacto directo sobre la estructura a proteger, entregando la corriente al sistema de bajantes.

El sistema de captación debe implementarse mediante tres configuraciones principales, como lo indica [14], [17].

- Cables colgantes: empleado en estructuras extensas, como líneas eléctricas, donde requiere de mayor espacio y alturas elevadas [13].
- Mallas de conductores: empleadas en techos con estructuras planas, donde se forma una red equipotencial para distribuir la corriente [13].
- Varillas incluidos mástiles individuales: son ideales para edificaciones sencillas con techos inclinados de alturas inferiores a 10 metros [13].

Para el caso de las viviendas rurales, las varillas tipo Franklin representan una solución viable, debido a su efecto punta que maximiza la probabilidad de captación frente a otros elementos y al ser colocada en las cumbres y esquinas crea un volumen de protección eficiente, adicionalmente posee gran facilidad en la instalación, una efectividad comprobada, bajo nivel de mantenimiento y bajo costo.

En la instalación es necesario que las varillas en la superficie del techo estén conectadas entre sí, formando un anillo perimetral, garantizando una trayectoria controlada y equipotencialidad tal como se recomienda en [14].

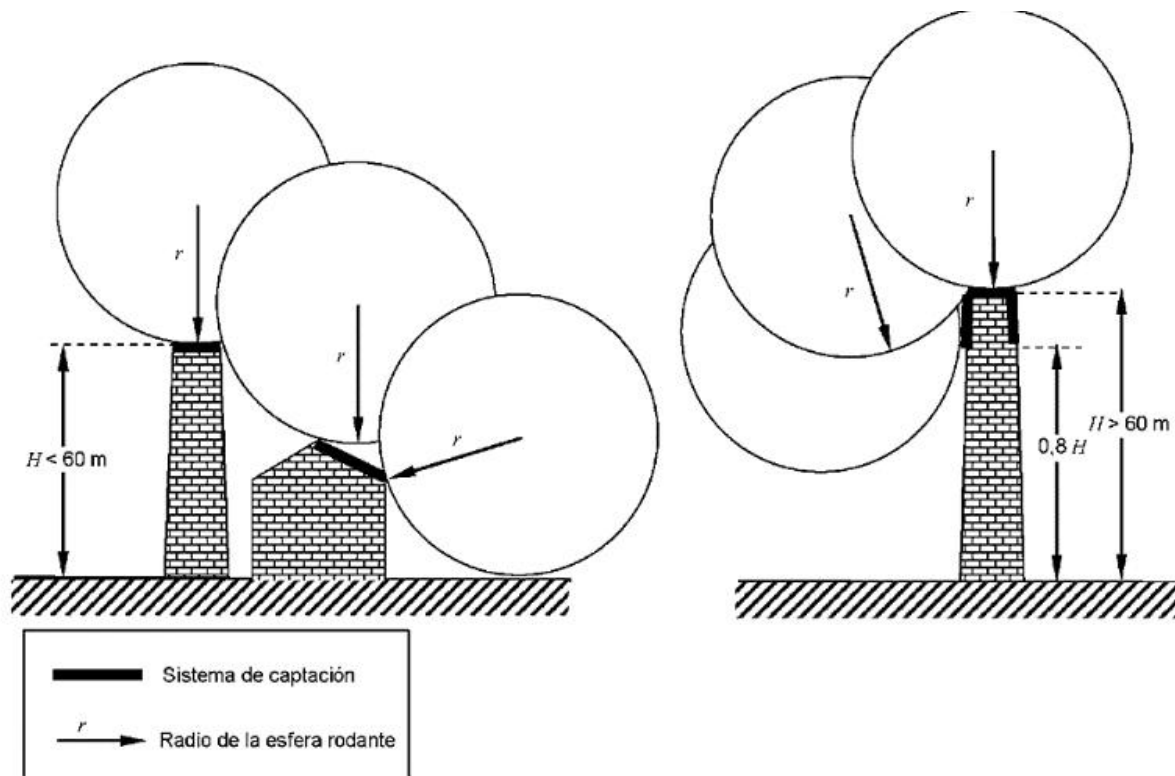
Para la instalación de las puntas captoras en la estructura es necesario que cumpla con alguno de los tres métodos:

- Método del Angulo de protección: es el más indicado para edificios con formas simples, pero está limitado por la altura.
- Método de la esfera rodante: el cual es el más empleado en todos los casos.
- Método de la malla: es el más adecuado para proteger superficies planas.

Todos ellos basados en el modelo electro geométrico. Entre ellos el más aceptado es el método de la esfera rodante, el cual aplicaremos para el posicionamiento de las varillas.

El método consiste en rodar una esfera de un radio r , el valor de este radio depende del nivel de protección a emplear. Los valores de estos radios están definidos en, [14], [17]. La metodología del método está basada en rodar la esfera alrededor y sobre la estructura en todas las direcciones posibles de manera que permita definir los puntos de contacto en la estructura y los puntos que sean tangentes entre la estructura, la esfera y a la superficie terrestre, como se observa en la Figura 12.

Figura 12. Diseño de un sistema de captación de acuerdo con el método de la esfera rodante.



Fuente: [14]

Una vez conocidos los puntos de contacto se procede a instalar las puntas tipo franklin en la estructura, buscando reducir los puntos de contacto, posteriormente, se rueda nuevamente la esfera alrededor y sobre la estructura verificando que la esfera solamente haga contacto con el sistema de captación.

Las puntas captoras pueden fijarse al techo o la estructura por medio de espaciadores y elementos de fijación conductores o no conductores [13], cuando se empleen soportes conductores a la lámina del techo, estos deberán soportar la corriente del rayo.

Los materiales empleados en las puntas tipo Franklin y las dimensiones están dadas en la **Tabla 6** de [14].

3.2.2 Sistema de bajantes

Es un conjunto de conductores continuos, cuyo objetivo es conducir de manera segura las corrientes de rayo desde las puntas captoras hacia el sistema de puesta a tierra. Para ello los conductores deben instalarse de manera tal que cumplan con 3 condiciones:

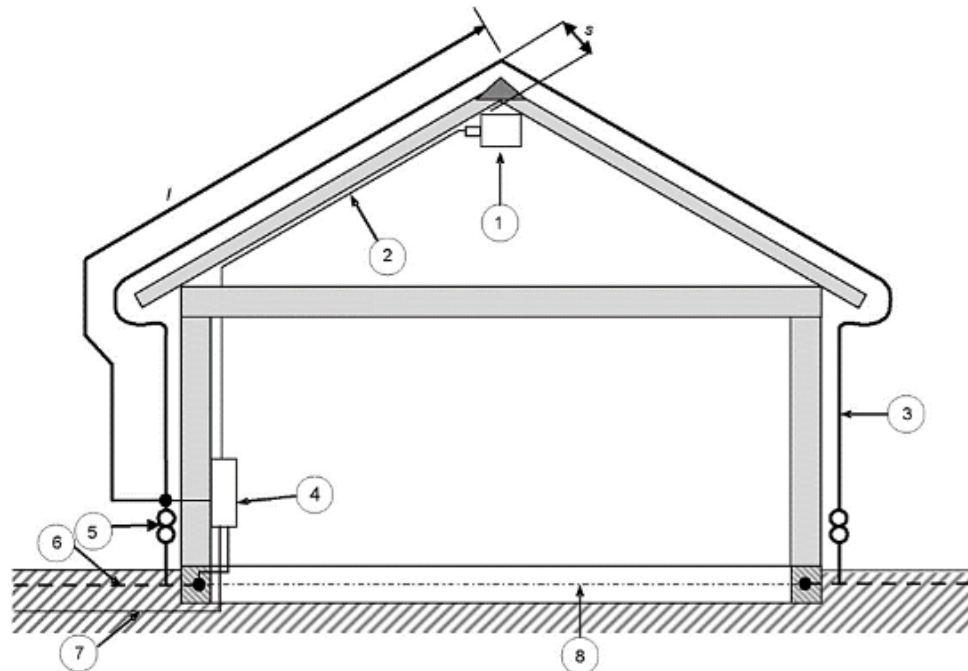
- La existencia de varios caminos paralelos para la corriente
- La longitud de los conductores debe ser lo más corta posible
- Debe existir la equipotencialización entre las partes conductoras

La instalación debe realizarse obedeciendo los lineamientos técnicos establecidos por[14]:

- los elementos de captación y los conductores bajantes deben fijarse firmemente para que las fuerzas mecánicas electrodinámicas o accidentales no produzcan ruptura o aflojamiento de los materiales [14];
- es necesario instalar anillos conductores como conductores equipotenciales que unan las varillas de captación [14];

- las varillas de refuerzo de las paredes o de las columnas de concreto y el armazón estructural de acero de una vivienda pueden utilizarse como conductores bajantes naturales, siempre y cuando cumplan con el diámetro mínimo de 8 mm y que posean una superficie lisa para diferenciarlas de las demás. De no ser posible se deberán instalar conductores bajantes naturales [14].
- el número de bajantes no debe ser inferior a dos y deben estar distribuidos por el perímetro de la estructura a proteger, ver Figura 13;

Figura 13. Construcción de un SPCR con dos conductores bajantes y sus elementos.

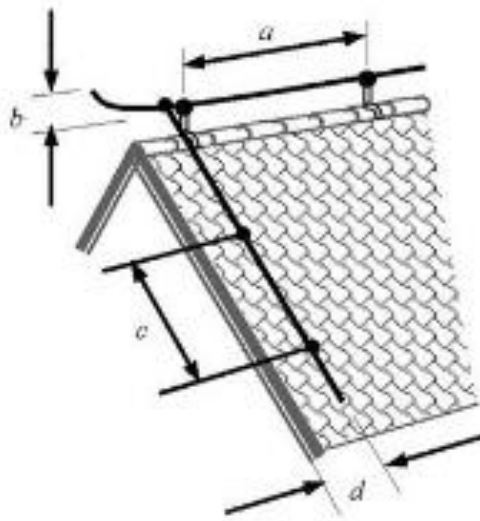


Fuente: [14]

- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1 equipos eléctricos | 2 conductores eléctricos internos |
| 3 conductor de SPCR (bajante) | 4 tablero distribución baja tensión |
| 5 unión de prueba | 6 sistema de puesta a tierra |
| 7 cable de alimentación baja tensión | 8 electrodo en cimentación |
| S distancia de separación | L longitud en pro de evaluar la distancia de separación |

- la distribución de los conductores bajantes se prefiere con una distribución de distancias como la dada en la **Tabla 4** de [14]
- siempre que sea posible debe instalarse un conductor en cada esquina expuesta de la estructura [14].
- la instalación de los conductores debe ser lo más recto posible, evitando la formación de lazos o curvaturas y en caso de existir no deben ser menores a un ángulo de 90° [14].
- en los techos que contengan caballetes, se deberá instalar un conductor sobre el caballete, como lo indica la Figura 14.

Figura 14. Instalación de conductor sobre caballete en techo de vivienda.

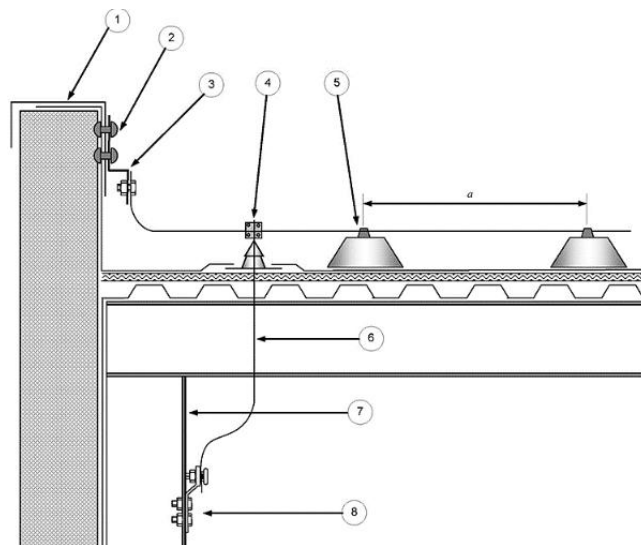


Fuente: [14]

Donde:

- a y c hacen referencia a las distancias de sujeción de 1 m, como lo indica la tabla 4 de [14].
 - B es la curva de dobles del conductor, la cual no debe tener un ángulo inferior a 90° .
 - d hace referencia a la distancia del bajante al techo, la cual debe ser tan próxima como sea posible.
- en estructuras con techos planos y estructuras de acero, los conductores del perímetro deberán instalarse tan cerca como sea posible de los bordes exteriores del techo [14], ver Figura 15.

Figura 15. Ejemplo de detalle de fijación en un techo plano y estructura metálica de edificación.

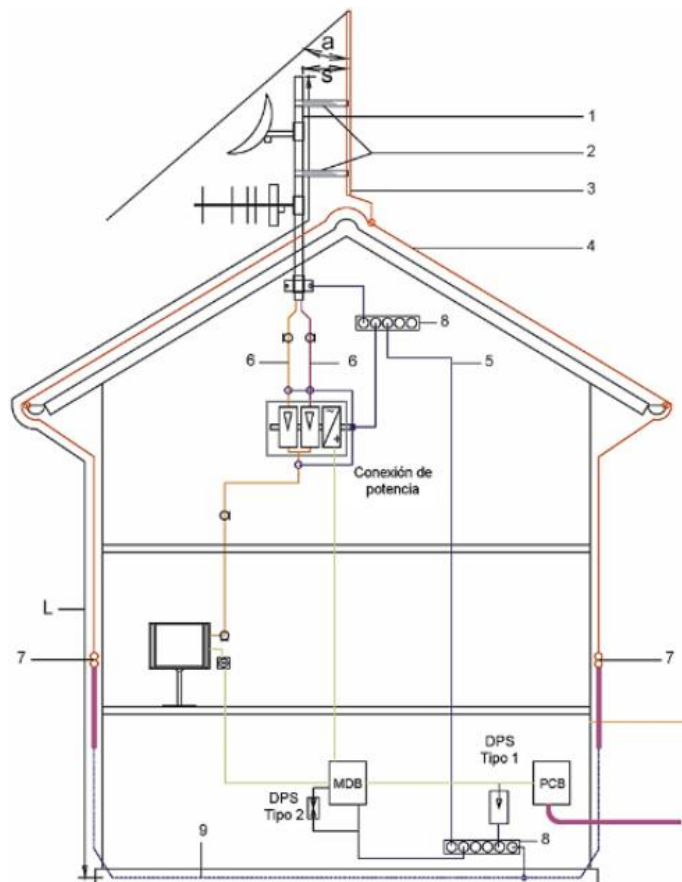


Fuente: [14]

Donde:

- a hace referencia a las distancias de sujeción de 1 m, como lo indica la tabla 4 de [14].
 - 1 parapeto del techo
 - 2 unión equipotencial entre parapeto y sistema de protección contra rayos.
 - 3 conductor
 - 4 conector en T
 - 5 fijación de conductor de captación
 - 6 bajante de sistema de protección contra rayos pasante y sellado herméticamente
 - 7 viga de acero
 - 8 unión equipotencial entre sistema de protección contra rayos y estructura metálica de edificación.
- no deben instalarse bajantes en canales o tubería de drenaje, aunque se encuentren cubiertos con material aislante y aunque los conductores estén aislados, ya que la humedad de los bajantes afecta la resistencia del material y ocasionara corrosión [14].
 - las antenas situadas en los techos de la estructura deberán protegerse contra los impactos directos de las descargas del rayo instalando la antenna dentro de un volumen ya protegido, en caso de no ser posible puede emplearse un sistema de protección contra rayos externo aislado [14], Figura 16, no aislado Figura 17.

Figura 16. Sistema de protección contra rayos aislado para antenas en viviendas.

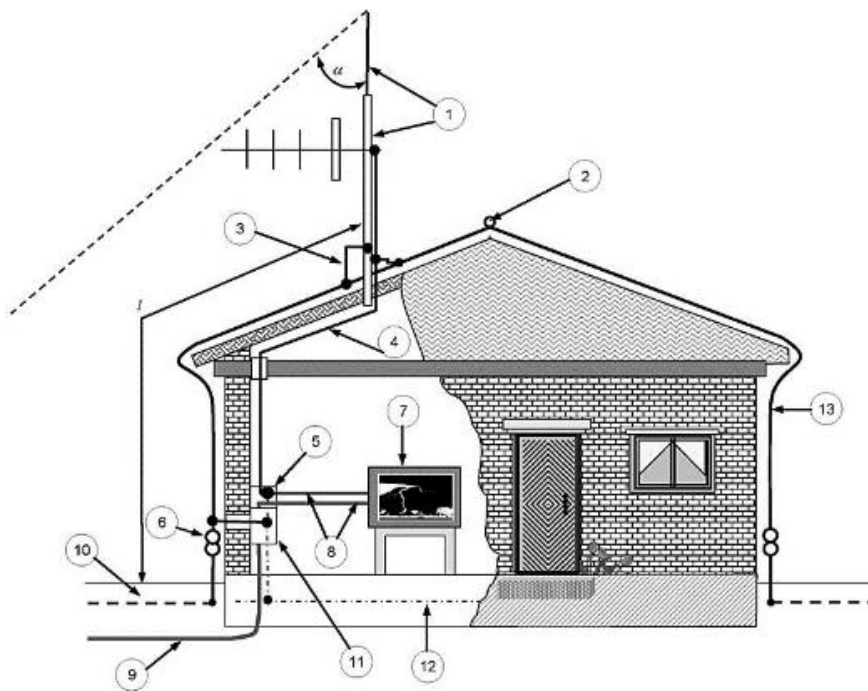


Fuente: [14]

Donde:

- | | |
|---|---|
| 1 mástil metálico (soporte) | 2 aisladores |
| 3 varilla de captación | 4 conductor del sistema de captación |
| 5 conductor de unión equipotencial | 6 cable de antena |
| 7 unión de prueba | 8 barraje de unión equipotencial |
| 9 electrodo de cimentación del SPT | α ángulo de protección |
| S distancia de separación | MDB caja principal de distribución |
| PCB caja de conexión de baja tensión | |

Figura 17. Sistema de protección contra rayos no aislado para antenas en viviendas.



Fuente: [14]

Donde:

- | | |
|---|--|
| 1 mástil metálico | 2 conductor del sistema de captación en el caballete del techo |
| 3 conexión entre el sistema de captación del techo y el mástil metálico de la antena | 4 cable de antena |
| 5 barraje principal de equipotencialidad, se debe conectar la pantalla metálica del cable de la antena | 6 unión de prueba |
| 7 TV | 8 conductores paralelos de los cables de la antena y de los de potencia |
| 9 cable de alimentación baja tensión | 10 sistema de puesta a tierra |
| 11 caja principal de distribución de energía con DPS | 12 electrodo en la cimentación |
| 13 conductor del SPCR | α ángulo de protección |

En el sistema de protección no aislado, el cable de la antena deberá entrar a la estructura, preferiblemente por la entrada común de todos los servicios o cerca del barraje principal de equipotencialidad del SPCR, la cubierta conductora del cable de la antena deberá conectarse al sistema de captación a nivel del techo y a la pantalla conductora de sus equipos eléctricos.

- los conductores pueden colocarse en la superficie de una pared si la pared es de material no combustible, los centros de fijación recomendados para estos conductores están indicados en la **Tabla E.1** de [14].
- la distancia de separación entre bajantes y estructuras metálicas conductoras como puertas y ventanas debe cumplir con la ecuación:

$$S \geq \frac{K_i}{K_m} K_c * l \quad (\text{m}) \quad (16)$$

Donde:

K_i depende del nivel de protección del sistema de protección contra rayos elegido [13] (**Tabla 10** [14])

K_m depende del aislamiento eléctrico de los materiales [13] (**Tabla 11** [14])

K_c depende de la corriente (parcial) que circula por el terminal de captación y por los conductores bajantes [13] (**Tabla 12** [13])

- las conexiones con la puesta a tierra deben ser seguras mediante soldaduras de cobre o latón, prensado, sujeción con abrazaderas, atornillado [14].

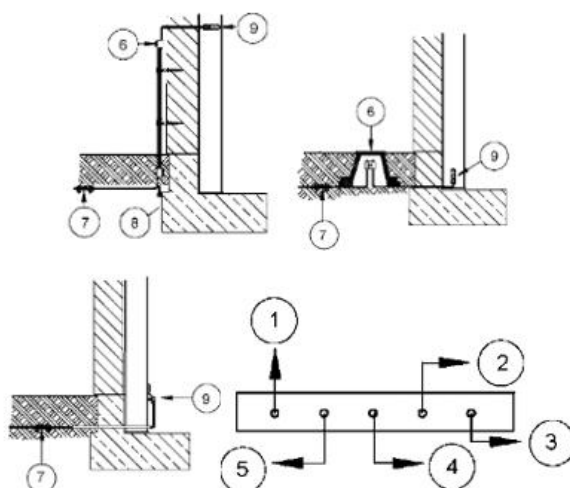
De igual manera, expertos [18], recomiendan que no se deben instalar bajantes en áreas donde se consagren o transiten personas frecuentemente.

Para la implementación de este sistema, los materiales permitidos y las dimensiones mínimas de las secciones de los conductores están dados en la **Tabla 6** de [14].

Cada conductor bajante debería tener en el punto de conexión con la puesta a tierra una **unión de prueba** excepto en los casos de los conductores bajantes naturales en combinación con electrodos de cimentación, estas uniones deberán permanecer cerradas y deberán poderse unir o separar mediante el uso de una herramienta. El conductor deberá permanecer en una caja de inspección que podrá ir en la pared o en el terreno.

El uso principal de estas uniones es servir de referencia en la medición y mantenimiento de los sistemas de apantallamiento, para mayor comprensión en la Figura 18 se dan ejemplos de instalación.

Figura 18. Conexiones de los conductores bajantes y terminales de puesta a tierra mediante uniones de prueba.



Fuente: [14]

Donde:

- | | |
|---|--|
| 1 conductor bajante | 2 electrodo de tierra tipo B si aplica |
| 3 electrodo de tierra tipo A si aplica | 4 electrodo de tierra de la cimentación |
| 5 conexión equipotencial del SPCR interno | 6 unión de prueba en la pared |
| 7 conexión en T, en el suelo, resistente a la corrosión | 8 conexión, en el suelo, resistente a la corrosión |
| 9 conexión entre el conductor del rayo y la viga de acero | |

3.2.3 Sistema de puesta a tierra

Es fundamental en los sistemas de protección contra rayos y en los sistemas eléctricos en general, ya que, es la encargada de recibir la corriente de falla o del rayo desde los bajantes y distribuirla por todo el terreno mediante un arreglo de conductores y varillas destinados en el terreno, por tanto, se recomienda en la norma [14], que la puesta a tierra posea un valor de resistencia de 10 que es un valor conservador, aunque siempre es preferible que sea lo más bajo posible.

Un buen sistema de puesta a tierra garantiza:

- Protección de vidas humanas al limitar las tensiones de paso y de contacto a valor que no sean perjudiciales
- Protección de instalaciones contra daños por rayo
- La compatibilidad electromagnética al limitar las perturbaciones electromagnéticas
- El correcto funcionamiento de la red de energía al servir como referencia universal de la tensión [14].

Pero la resistencia de puesta a tierra presenta un comportamiento diferente cuando tiene que ver con las corrientes del rayo, ya que, a 50 Hz o 60 Hz, normalmente la resistencia disminuye con la corriente, mientras que con la componente de alta frecuencia de la corriente del rayo aumenta la reactancia, esto provoca variaciones en la impedancia global de puesta a tierra por lo que su valor puede ser mayor o menor, dependiendo de las componentes del rayo.

Por lo anterior un concepto importante para tener en cuenta es reducir la impedancia de los sistemas de protección contra el rayo, para suplir esta necesidad, en [14] se recomienda la instalación de dos tipos de distribución para el sistema de puesta a tierra:

Arreglo tipo A: formado por electrodos horizontales o verticales que se instalan en la parte exterior de la estructura que se pretende proteger, adicionalmente están conectados con cada conductor bajante sin formar un bucle cerrado [14].

En este tipo de arreglo el número de electrodos de puesta a tierra (varilla de cobre), no debe ser inferior a dos.

Arreglo tipo B: en este arreglo se consideran dos formas:

- Un anillo conductor exterior a la estructura a proteger el cual debe tener un contacto del 80 % con el suelo. De igual manera deberán conectarse al anillo los electrodos en cada bajante y el número de electrodos no deberá ser inferior a dos.
- Un electrodo de cimentación con un radio r_e , el cual no debe ser inferior al radio l_1 indicado en la figura 3 de [14].

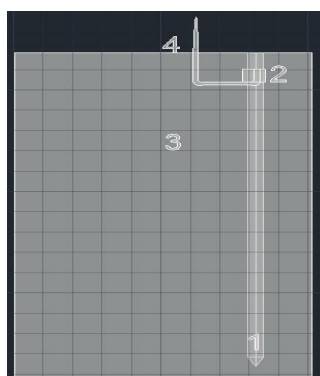
Para el sistema de una edificación de vivienda rural en [14], se ha recomendado trabajar con un nivel de protección tipo IV, por tanto, para dicho nivel se trabajará en este documento con un **arreglo tipo A**.

NOTA: Si la vivienda rural tendrá otros usos diferentes al alojamiento de personas, se deberán contemplar otros factores, los cuales no están dentro del alcance de este trabajo de grado.

Para este arreglo:

- los electrodos deberán estar conectados a cada conductor bajante y deberán tener una conexión permanente con el suelo a lo largo de su vida (ver Figura 19), adicionalmente los electrodos no deberán ser inferiores a dos;

Figura 19. Ejemplo de conexión de bajantes a electrodo.



Fuente: Elaboración propia

Donde:

1 varilla de puesta a tierra
3 suelo

2 grapa de unión del conductor a varilla
4 conductor de puesta a tierra

- los electrodos de puesta a tierra deberán estar distribuidos de la manera más uniforme posible, buscando minimizar los efectos de acoplamiento eléctrico en la tierra [14];
- se dará prioridad a los electrodos verticales ya que reduce las diferencias de potencial en relación con la superficie del terreno, reduciendo las tensiones de paso además del peligro para los seres vivos circundantes [14];
- los electrodos deberán tener separación suficiente respecto a cables y tuberías metálicas existentes en el terreno [14];
- los electrodos deberán estar enterrados a una profundidad mínima de 50 cm, en su parte superior y poseer una caja de registro;
- deberá realizarse la equipotencialización del SPCR y las demás partes conductoras de la edificación mediante barrajes equipotenciales.
- Se procurará que el sistema de puesta a tierra perdure, para ello se debe buscar que los electrodos a instalar y la posición de instalación minimicen los efectos de corrosión y de la sequedad del suelo, para de esta manera conseguir estabilizar la resistencia convencional a tierra [14].
- El SPCR debería construirse con materiales resistentes a la corrosión tales como el cobre, el aluminio, el acero inoxidable y el acero galvanizado. Los materiales de las varillas de captación y de los cables de los sistemas de captación deberían ser compatibles electroquímicamente con los materiales de los componentes de los elementos de conexión y montaje, y deberían tener una buena resistencia a la corrosión en una atmósfera corrosiva o húmeda [14].
- Deberían evitarse las conexiones entre diferentes materiales, de lo contrario tienen que protegerse [14].
- Las partes de cobre nunca deberían instalarse por encima de partes galvanizadas o de aluminio a menos que todas estas partes estén provistas de protección contra la corrosión [14].
- De las partes de cobre se desprenden partículas muy finas, lo que da lugar a daños severos de corrosión sobre las partes galvanizadas, incluso cuando las partes de cobre y galvanizadas no estén en contacto directo [14].
- Los conductores de aluminio no deberían fijarse directamente a las superficies calcáreas de los edificios, tales como concreto calizo o yesos, y no deberían emplearse nunca en el suelo [14].

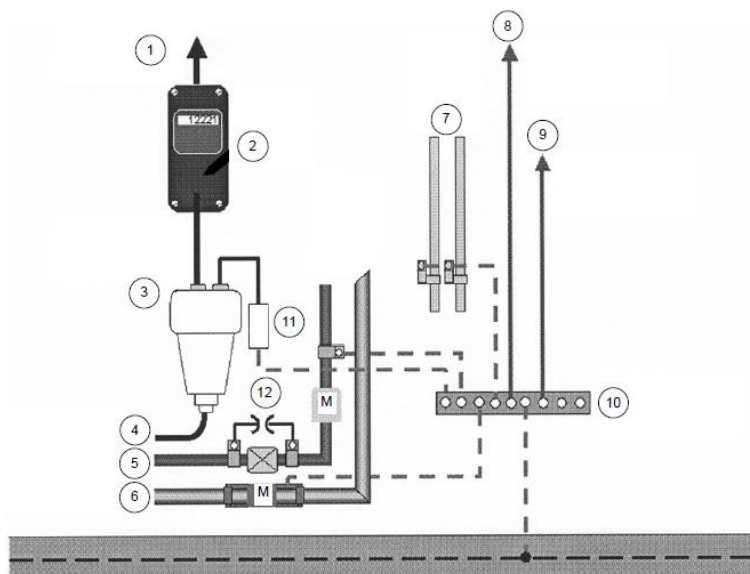
Las dimensiones mínimas de los electrodos de puesta a tierra están definidas en la **Tabla 7** de [14], de igual manera se recomienda que cumplan con los requisitos y ensayos de la serie de normas IEC 62561.

Los tres sistemas mencionados, sistema de captación, sistemas bajantes y sistema de puesta a tierra en conjunto brindan protección referente las corrientes de los rayos, pero es importante considerar de igual manera las sobretensiones que se puedan presentar en los equipos eléctricos al interior de la edificación debido a estas corrientes y para eso se contemplan dos tipos de sistemas adicionales, los sistemas equipotenciales y los sistemas de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS).

3.2.4 Sistemas equipotenciales

La equipotencialización es el proceso de conexión del SPCR con las partes conductoras externas, sistemas internos, las líneas conectadas a la estructura, sistemas eléctricos los cuales deberán conectar sus partes activas mediante dispositivos de protección contra sobretensiones DPS en las partes activas, sistemas de comunicaciones, sistemas de estructuras metálicas, sistemas de redes de acueducto cuando son metálicas, sistemas de tubería de gas. Formando así una red equipotencial común (ver Figura 20), que permita un camino de baja impedancia para el flujo de corrientes limitado de manera exitosa las tensiones indeseadas.

Figura 20. Ejemplo de equipotencialización de los diferentes sistemas.



Fuente: [17]

Donde:

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1 potencia eléctrica para el usuario | 2 medidor de energía eléctrica |
| 3 caja de conexión | 4 potencia eléctrica de la red |
| 5 gas | 6 agua |
| 7 sistema central de calefacción | 8 aparatos electrónicos |
| 9 pantalla del cable de la antena | 10 barraje equipotencial |
| 11 DPS | 12 explosor de aislamiento ISG |
| M medidor | |

Al realizar las conexiones estamos permitiendo una circulación de corriente a través de los elementos, es por esto por lo que los conductores equipotenciales deberán ser capaces de soportar la corriente que circulara a través de ellos, para garantizar una continuidad eléctrica. Las dimensiones para dichos conductores están especificadas en las **Tablas 8 y 9** de [14].

Adicionalmente:

- En un SPCR externo no aislado, las conexiones equipotenciales al rayo deben instalarse en la base o aproximadamente a nivel del suelo [14].
- Los conductores equipotenciales deben conectarse a un barraje equipotencial, construido e instalado de manera que permita un acceso fácil para su inspección [14].
- El barraje equipotencial debe estar conectado al sistema de puesta a tierra [14].

Ya que una buena equipotencialización es la principal ventaja del sistema de puesta a tierra por lo que el valor de la resistencia tiende a ser lo menos importante [14].

3.2.5 Sistemas de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS)

Los DPS son dispositivos de protección empleados para uniones equipotenciales de diferentes elementos dentro de un circuito eléctrico que actúan como un interruptor al momento de presentarse una corriente elevada o un pico de tensión conduciéndola a tierra a través de él y al pasar el pico de sobretensión o corriente elevada vuelve a su posición no conductora quedando a la espera de otro evento.

Para realizar una adecuada protección contra el rayo, todos los conductores de cada línea con potencial deberán estar equipotencializados con el sistema de puesta a tierra mediante DPS, de igual manera:

- Los DPS deberían soportar, sin dañarse, la posible parte de la corriente del rayo que pase a través de ellos [14].
- Los DPS también deberían tener la capacidad de extinguir la corriente subsiguiente del sistema de potencia si está conectado a los conductores de potencia [14].

Sus características obedecen a las necesidades de protección y la forma de onda, por tanto, existen 3 tipos diferentes como se puede observar en la Tabla 20.

Tabla 20. Características de los DPS.

TIPO	USOS	UBICACIÓN	FORMA DE ONDA
1	Descarga directa de rayos	Entrada de servicio	10/350 μ s
2	Sobretensiones residuales maniobra	Tablero principal	8/20 μ s
3	Sobretensiones residuales muy localizadas	Directamente en equipos sensibles	8/20 μ s

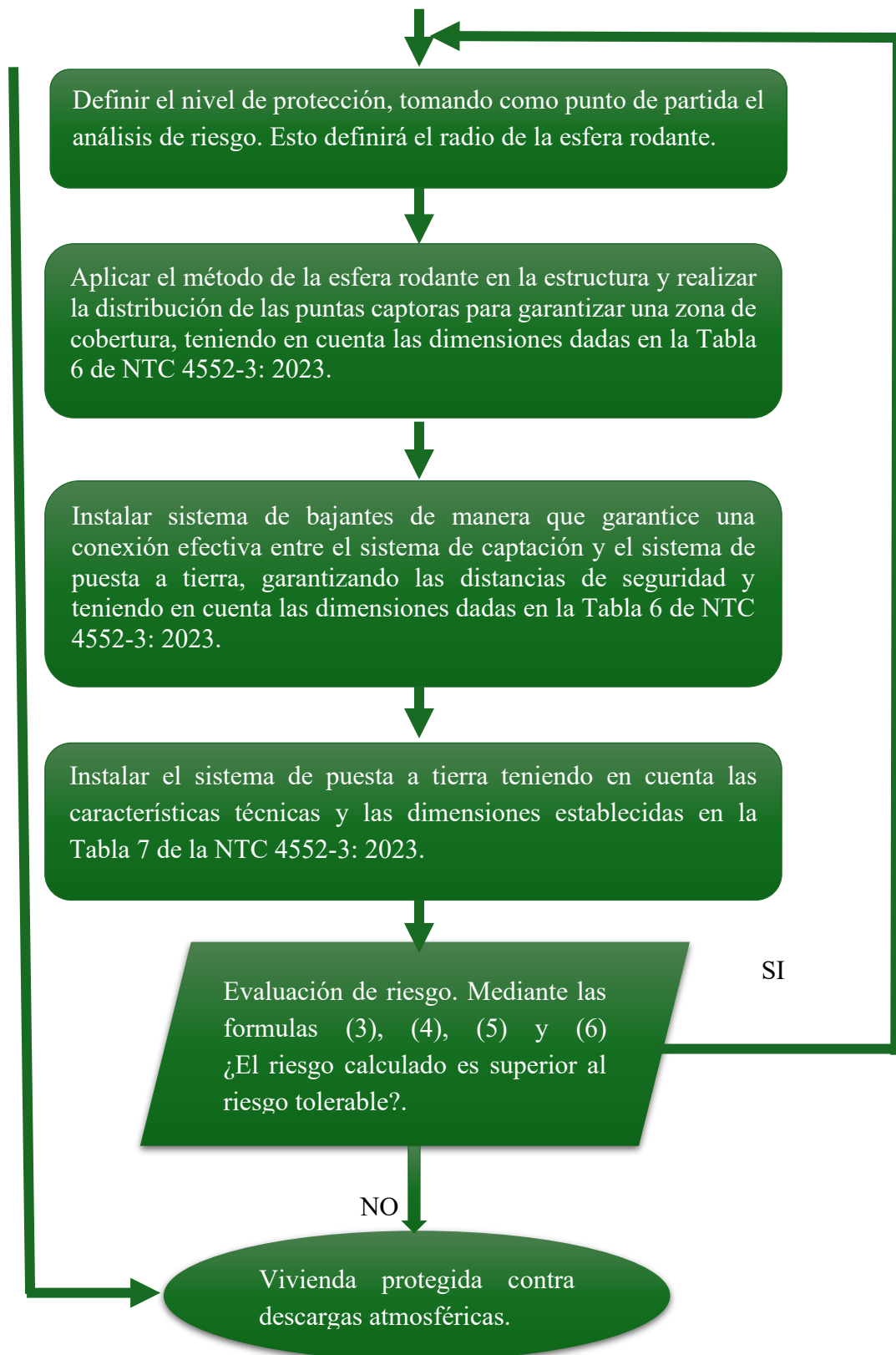
Fuente: Elaboración propia.

La operación continua del DPS causara desgaste en sus elementos conductores y por este es necesario realizar un seguimiento y mantenimiento debido a las corrientes del rayo. La selección y dimensionamiento deberá realizarse acorde a la norma IEC 62305-4: 2024.

3.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO 3

Una vez determinado el nivel de riesgo en el capítulo 2 y establecida la necesidad de un sistema de apantallamiento para la vivienda, en este capítulo se definieron los valores de corriente estandarizados y los niveles de protección empleados para el dimensionamiento técnico de los dispositivos eléctricos de protección, como lo son las puntas captoras, los sistemas de bajantes y el sistema de puesta a tierra, de igual manera se definió la equipotencialización y su importancia en los SPCR, además de los DPS como protección adicional para los sistemas eléctricos internos de la edificación.

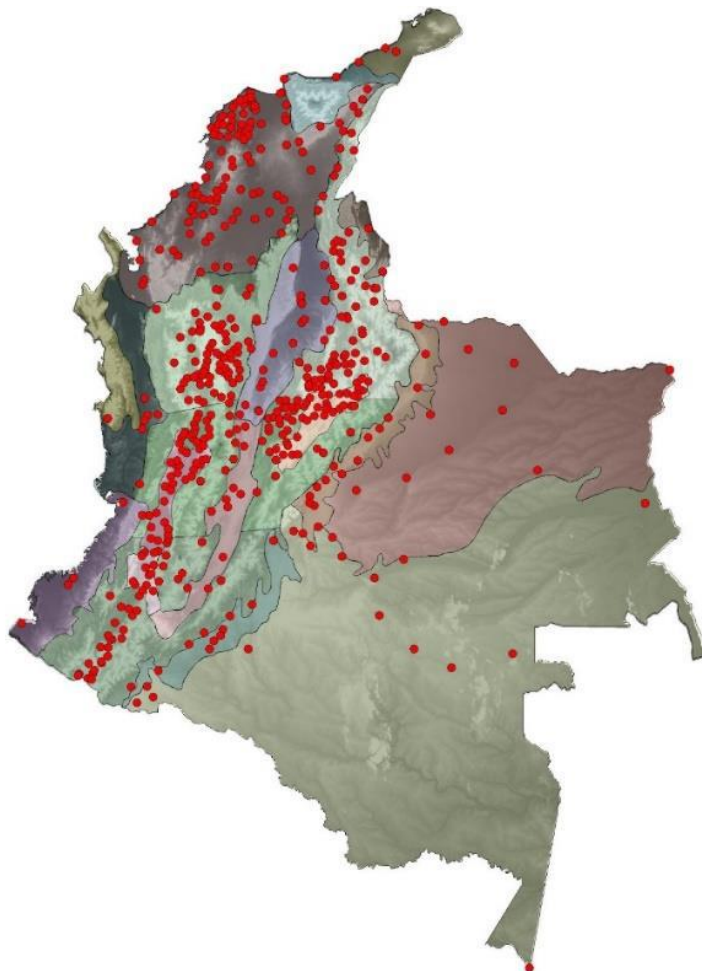
Los pasos desarrollados en este capítulo se presentan en el Flujograma 2 y dan continuidad al proceso de la metodología del sistema de protección. El cual estará conformado por el Flujograma 1 y el Flujograma 2.



4 CASO DE ESTUDIO

En estudios realizados en [4], se logró identificar las regiones del país con mayor número de muertes por rayos en un periodo comprendido entre 1997 y 2017 (Figura 21).

Figura 21. Mapa de muertes por rayos en regiones naturales para el periodo 1997-2017



Fuente: [4]

En la figura se presentan unos puntos rojos, los cuales señalan la ubicación de los casos más no cada uno de los casos reportados en cada región, de ella se puede observar que el departamento del Cauca es una región donde se presentan constantemente casos relacionados con el fenómeno de las descargas atmosféricas.

En base a esa concurrencia, para el caso de estudio se seleccionó la zona rural de la vereda Pueblo Nuevo, ubicada en el departamento del Cauca, la cual en sus cercanías posee antecedentes de descargas atmosféricas, con pérdidas de vidas humanas como se evidencia en el reporte de este año presentado por Keraunos [19].

A partir de ahora se seguirán los pasos establecidos en el flujograma 1 y flujograma 2 para aplicar la **metodología del diseño de un sistema de apantallamiento para viviendas aisladas**, como último apartado se analizará el costo de la vivienda versus el costo de la implementación.

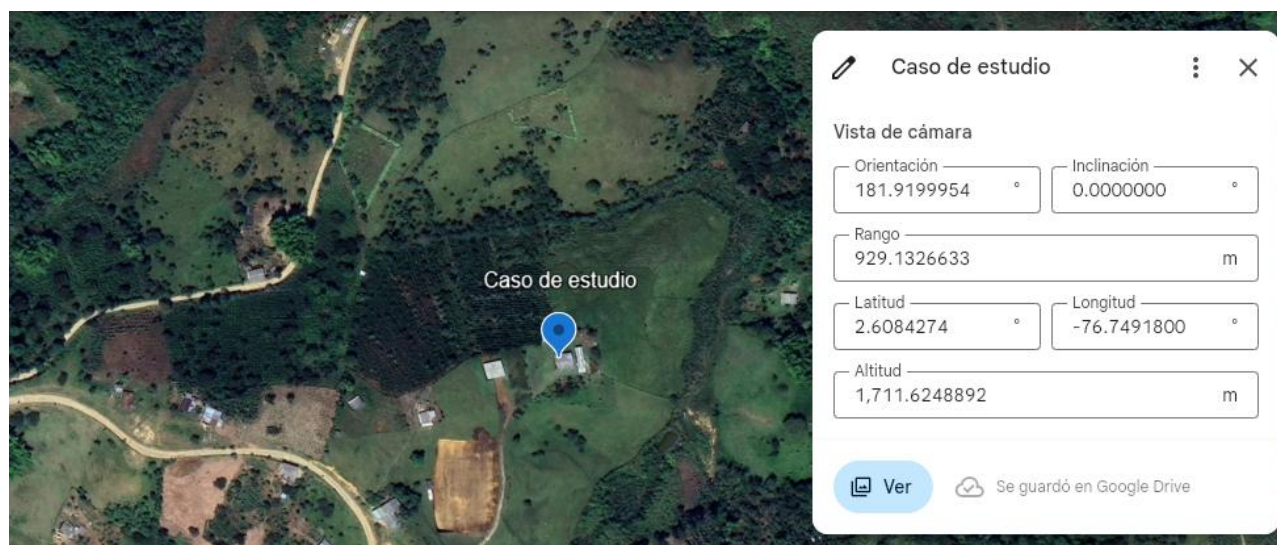
4.1 PASO 1

4.1.1 Identificar y caracterizar matemáticamente la vivienda

El modelo arquitectónico de la vivienda será parecido al modelo VRSC2 al cual la propietaria le ha realizado modificaciones, la vivienda está ubicada en zona rural con longitud 2,60 y latitud -76,75, a una altura de 1700,65 msnm (Figura 22), no posee estructuras conductoras cercanas ni árboles cercanos (ver Figura 23 y Figura 24), se conoce que en la vivienda habitan 4 personas.

La vivienda no tiene riesgo de incendio ni posee elementos que puedan iniciar el fuego con chispas, tampoco posee servicios de internet ni telefonía alámbrica.

Figura 22. Ubicación y coordenadas satelitales de la vivienda del caso de estudio.



Fuente: *Google Earth*

Figura 23. Vista frontal de la vivienda



Fuente: Autor

Figura 24. Vista lateral de la vivienda



Fuente: Autor

Para la estimación del área de recolección empleamos la fórmula (2).

$$A_D = L * W + 2(3H)(L + W) + \pi(3H)^2 \quad (2)$$

Las características técnicas de la vivienda son:

$$L = 10,35$$

$$W = 8,20$$

$$H = 2,96$$

Al reemplazar en la fórmula:

$$A_D = 10,35 * 8,20 + 2(3 * 2,96)(10,35 + 8,20) + \pi(3 * 2,96)^2$$

Por tanto, área de recolección (A_D) será: $662,05 \text{ m}^2$

4.2 PASO 2

4.2.1 Identificar y cuantificar las descargas a tierra

Una vez determinadas las dimensiones de la vivienda y su área de recolección de la descarga, procedemos a definir la densidad de descargas a tierra (DDT) de la región, tomando como base los valores dados en la Tabla 13.

Para el Altiplano Popayán en el departamento del Cauca

$$DDT = 22$$

4.3 PASO 3

4.3.1 Identificación de daños y riesgos.

La vivienda rural es propensa a las descargas atmosféricas debido a su ubicación y las condiciones ambientales referentes a la DDT, esta situación tiene la probabilidad de ocasionar efectos negativos asociados a lesiones a los seres vivos por descarga eléctrica (D1), lo que podría causar pérdidas de vidas humanas (L1) con sus componentes asociadas.

Por tanto, el riesgo asociado a la vivienda está relacionado a las pérdidas de vidas humanas (R1).

Los riesgos asociados a pérdidas de un servicio público (R2) y las pérdidas de valor económico (R4), no causan afectaciones significativas, de igual manera pérdidas de patrimonio cultural (R3), no son relevantes, por lo que no se toman en consideración para el análisis de riesgo.

4.4 PASO 4

4.4.1 Valoración de los riesgos asociados

Para evaluar las componentes de daños D1 y D2, asociadas el riesgo pérdida de vidas humanas R1 se emplean las componentes relacionadas en la Tabla 21.

Tabla 21. Componentes asociadas al riesgo de pérdida de vidas humanas.

Formula	Componente	Valor	Origen
R_A	N_G	22	Tabla 13
	C_D	1	Tabla A.1 de [13]
	P_{TA}	1	Tabla B.1 de [13]
	P_B	1	Tabla B.2 de [13].
R_B	r_p	1	Tabla C.4 de [13]
	r_f	10^{-3}	Tabla C.5 de [13]
	h_z	1	Tabla C.6 de [13]
	L_F	10^{-2}	Tabla C.2 de [13]
	n_z	4	Datos del estudio
	n_t	4	Datos del estudio
	t_z	8760	Datos del estudio
R_U	L_L	1000	Valor recomendado por [13]
	C_I	1	Tabla A.2 de [13]
	C_E	1	Tabla A.4 de [13]
	C_T	1	Tabla A.3 de [13]
	A_{DJ}	-	Datos del estudio
	C_{DJ}	1	Tabla A.1 de [13]
	P_{TU}	1	Tabla B.6 de [13]
	P_{EB}	1	Tabla B.7 de [13]
	P_{LD}	1	Tabla B.8 de [13]
	C_{LD}	1	Tabla B.4 de [13]
	r_t	10^{-2}	Tabla C.3 de [13]
	L_T	10^{-2}	Tabla C.2 de [13]
R_V	L_V	$10 * 10^{-6}$	Sale de formula (13)

Fuente: Elaboración propia

Para la estimación matemática del riesgo R1 se emplea la fórmula 3

$$R_1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1}^{(1)} + R_{M1}^{(1)} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1}^{(1)} + R_{Z1}^{(1)} \quad (3)$$

Donde solo se toma en consideración las componentes:

R_{A1} Componente relacionada con lesiones a los seres vivos D1

R_{B1} Componente relacionada con los daños físicos D2

R_{B1} Componente relacionada con lesiones en los seres vivos D1

R_{V1} Componente relacionada con fallas de los sistemas internos D3

Las otras componentes no se toman en cuenta debido a que en esta estructura no existe riesgo de explosión ni equipos especiales que al fallar pongan en riesgo la vida humana.

La fórmula 4 es la resultante de la suma de fórmulas complementarias, las cuales para hacer más fácil su comprensión y entendimiento han sido relacionadas en la Tabla 22.

En la columna cuatro se calcula el resultado de cada componente para ser sumadas al final y así obtener el valor de riesgo calculado para la edificación.

Tabla 22. Fórmulas de pérdida de vidas humanas (R1).

Formula general	Formula de componentes	Resultado componentes	Resultados formula general
$R_A = N_D * P_A * L_A$	$N_D = N_G * A_D * C_D * 10^{-6}$	$14,565 * 10^{-3}$	$1456,5 * 10^{-9}$
	$P_A = P_{TA} * P_B$	1	
	$L_A = r_t * L_T * \frac{n_z}{n_t} * \frac{t_z}{8760}$	$100 * 10^{-6}$	
$R_B = N_D * P_B * L_B$	$L_B = L_V = r_p * r_f * h_z * L_F * \frac{n_z}{n_t} * \frac{t_z}{8760}$	$10 * 10^{-6}$	$145,65 * 10^{-9}$
$R_U = (N_L + N_{DJ})P_U * L_U$	$N_L = N_G * A_L * C_L * C_E * C_T * 10^{-6}$	0,88	$88 * 10^{-6}$
	$A_L = 40 * L_L$	40000	
	$N_{DJ} = N_G * A_{DJ} * C_{DJ} * C_T * 10^{-6}$	$22 * 10^{-6}$	
	$P_U = P_{TU} * P_{EB} * P_{LD} * C_{LD}$	1	
	$L_U = r_t * L_T * \frac{n_z}{n_t} * \frac{t_z}{8760}$	$100 * 10^{-6}$	
$R_V = (N_L + N_{DJ})P_V * L_V$	$P_V = P_{EB} * P_{LD} * C_{LD}$	1	$8,8 * 10^{-6}$
R_1			$9,840 * 10^{-5}$

Fuente: Elaboración propia

4.5 PASO 5

4.5.1 Comparación de valores

El valor establecido como tolerable para el país es:

$$R_T = 10^{-5}$$

El valor calculado fue:

$$R_1 = 9,840 * 10^{-5}$$

En este caso $R_1 > R_T$, por tanto, se requiere un sistema de apantallamiento para la vivienda.

4.6 PASO 6

4.6.1 Definir el nivel de protección

En el análisis de riesgos se evidencio que en la formula R_A que es la componente relacionada con lesiones a los seres vivos se puede reducir tomando acciones sobre la componente de P_B que son altos debido a la falta de sistema de apantallamiento por tanto al mitigar este factor estaremos contribuyendo a la mejora del factor P_A y mitigando el riesgo R_A , brindando protección a la vivienda.

En este caso aplicaremos un nivel de protección IV, que dicta un radio de 60 metros para el radio de la esfera rodante, que es el método con el que se realizara el análisis para la ubicación de las puntas captoras.

De igual manera se observa que los valores P_U son muy altos debido a la falta de un sistema de DPS, lo que afecta negativamente los factores de R_U y R_V , por lo que se plantea hacer equipotencial el sistema de alimentación en la acometida de entrada a la vivienda mediante DPS, además de poner al mismo potencial todos los equipos y estructuras conductoras.

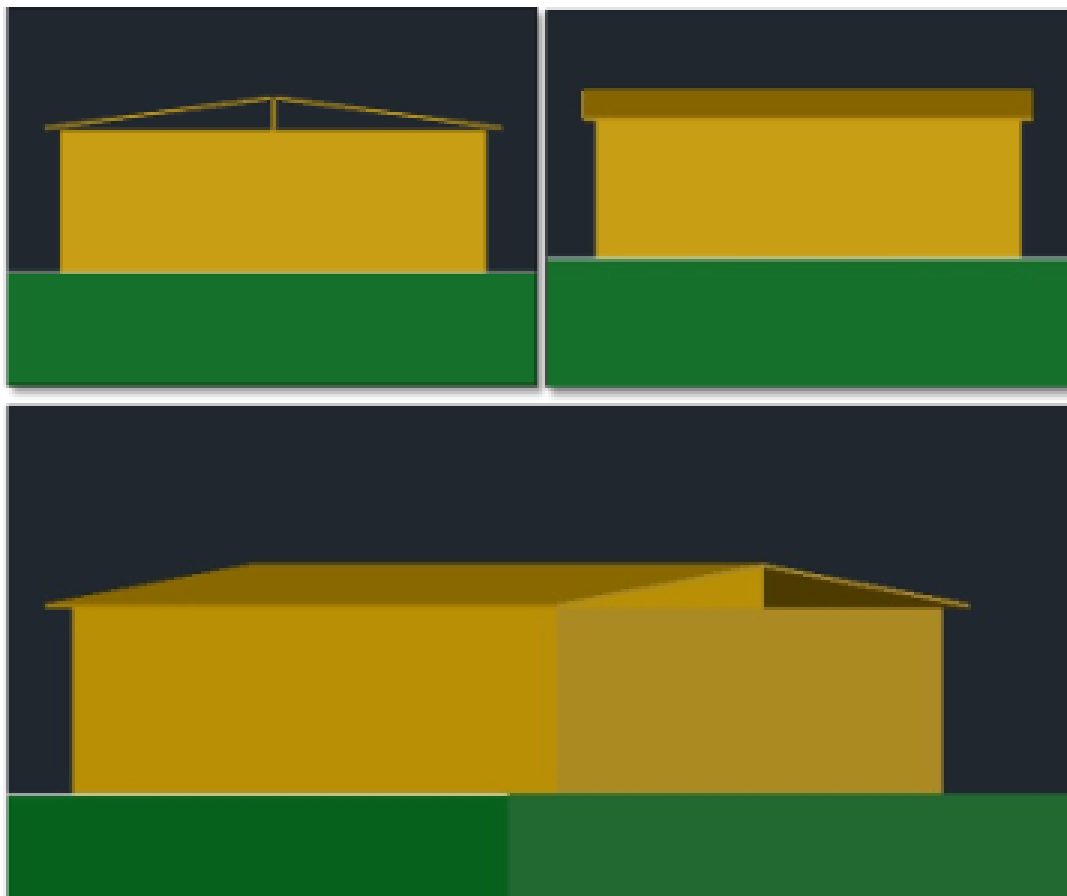
Para esta corrección tomaremos en cuenta los criterios de [13], que expresa que para este caso es suficiente con una instalación de los DPS de acuerdo con [17].

4.7 PASO 7

4.7.1 Aplicar el método de la esfera rodante

Para aplicar el método dibujamos el plano de la vivienda en 3 dimensiones con ayuda del software AutoCAD, con las medidas reales de la vivienda, Figura 25.

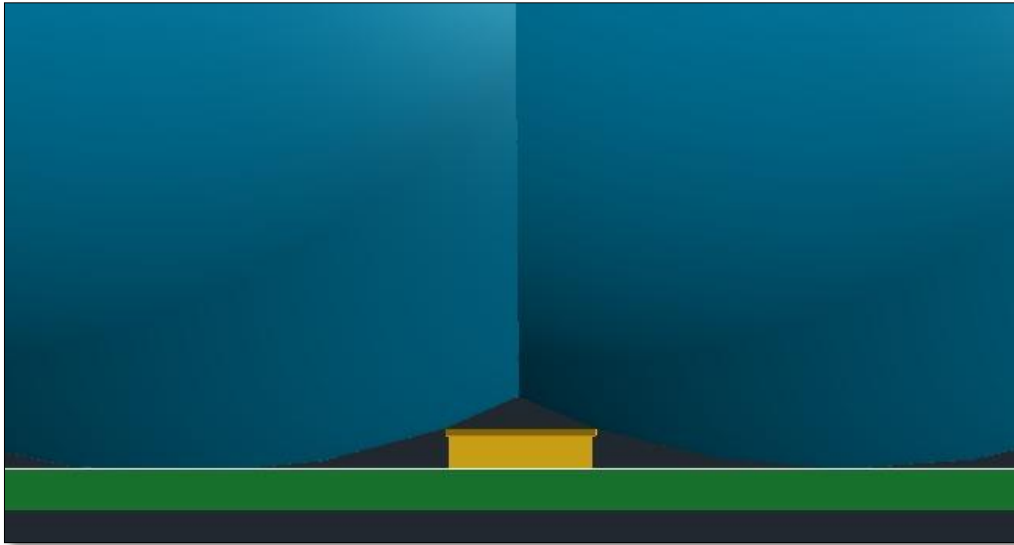
Figura 25. Plano en AutoCAD de tres dimensiones.



Fuente: Elaboración propia

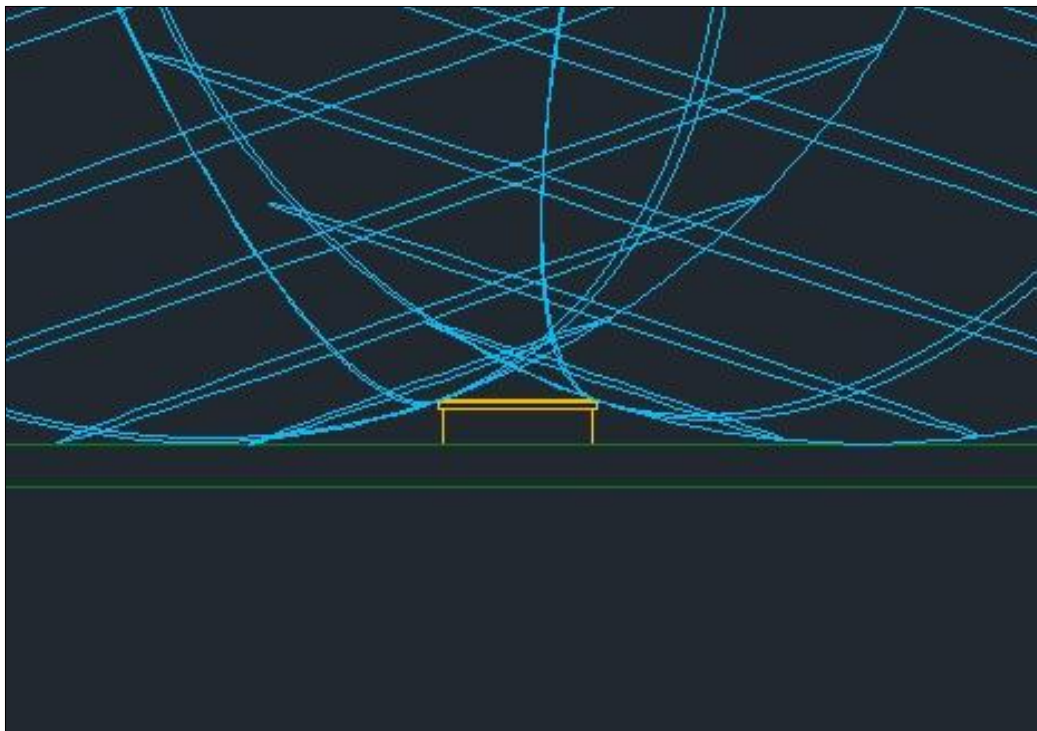
A partir de ese modelo se crea una esfera de un radio de 60 m que es el definido por el nivel de protección seleccionado (IV) y se rota por la superficie superior de la vivienda (ver Figura 26 y Figura 27), lo que permite estimar los puntos de contacto de la estructura, la esfera rodante y el terreno.

Figura 26. Aplicación de método de esfera rodante en Vista realista.



Fuente: Elaboración propia

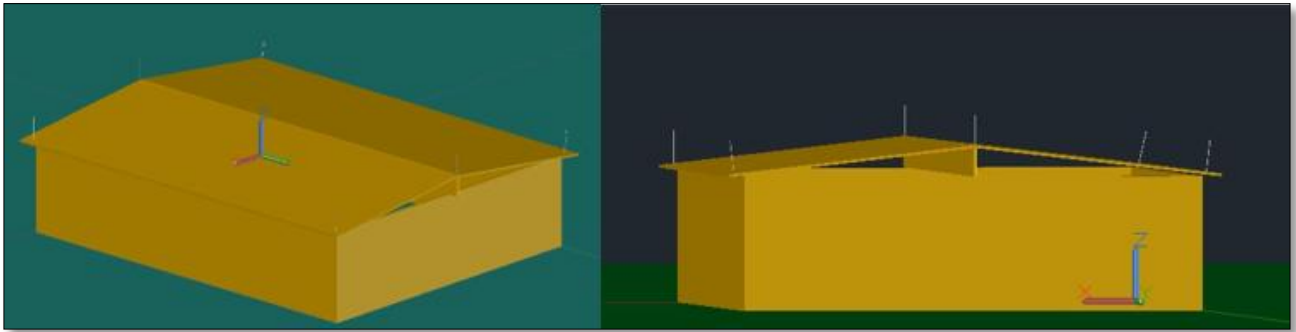
Figura 27. Aplicación de método de esfera rodante en Vista en alambres.



Fuente Elaboración propia

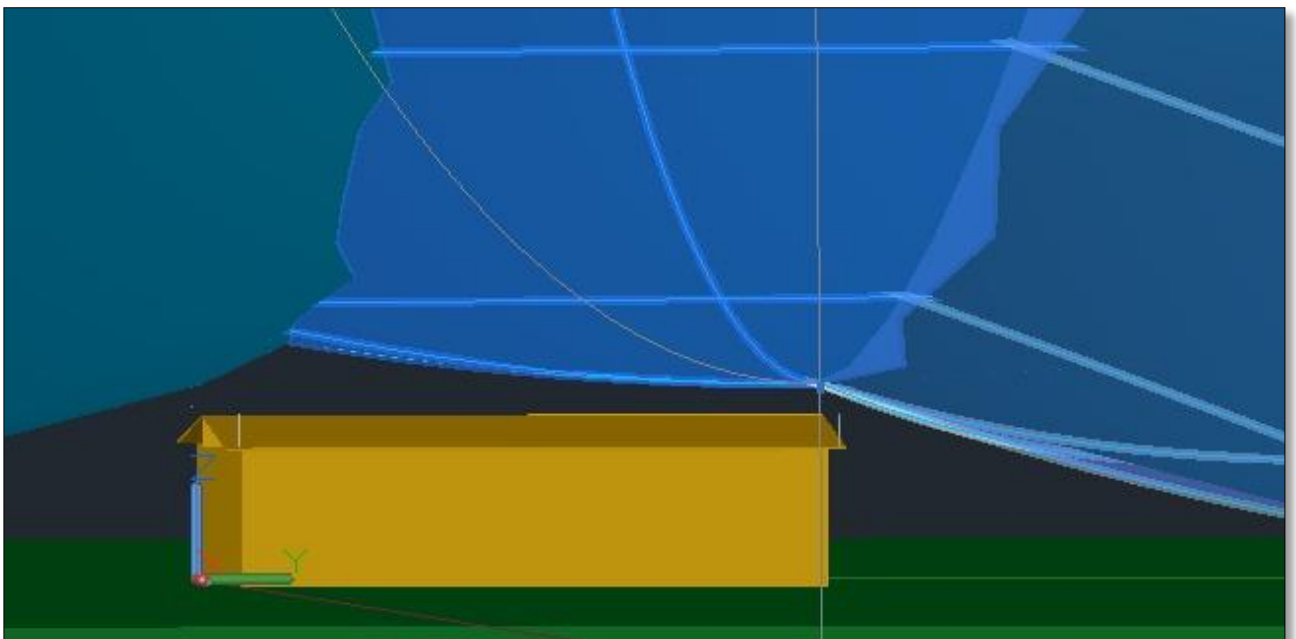
Con la información obtenida se procedió a designar la instalación de las puntas captoras tipo Franklin en las esquinas del techo y en la parte superior de la cumbrera (ver Figura 28), buscando que la esfera no toque la estructura, dando como resultado un total de 6 varillas que fungirán de sistema de captación (ver Figura 29)

Figura 28. Instalación de puntas captoras en techo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Sistema de captación con puntas captoras tipo Franklin.



Fuente: Elaboración propia

Como evaluación final del diseño se realizaron 6 esferas de 60 m de radio alrededor de la edificación (ver Figura 30) y en ellas se puede observar que la vivienda queda completamente cubierta por la zona de protección de las varillas, ya que las esferas no tocan la superficie del techo en ningún punto.

Figura 30. Esferas sobre el sistema de captación.



Fuente Elaboración propia

En el techo:

El sistema de varillas de puntas captoras deberá estar conectado de manera que se garantice su posición ante la ocurrencia de una descarga.

El sistema de captación (las puntas tipo Franklin) deberán estar interconectadas, garantizando la equipotencialidad.

Los conductores de unión entre las varillas deberán ir fijados cada metro sobre el techo.

Las varillas tipo Franklin, las bases, los soportes, los conductores y las uniones a emplear se relacionan en la Tabla 23.

Tabla 23. Características y dimensiones del sistema de captación.

Dispositivo	Especificaciones	Referencia	Cantidad	Unidades	Costo Unidad \$	Costo Total \$
Punta captora tipo Franklin	Punta captora en configuración de conductor redondo sólido, con rosca, en aluminio, de 0.6 metros de longitud y 16 mm de diámetro.	101/ALU-600-DX	6	N/A	88.100	528.600
Soporte punta captora	Base de aluminio redonda para punta captora de 16 mm de diámetro.	T32BAS000	4	N/A	36.950	147.800
Base soporte punta captora	Base metálica para Punta Captadora Aluminio de 5/8 Ecualizable	T64BASE01	4	N/A	84.700	338.800
Conductor equipotencial	Conductor redondo solido (alambrón de aluminio) de 8mm para apantallamiento	140003000001 140004000008	50	m	3.350	167.500
Grapa de uniones	Grapa universal en T o en cruz, de aluminio para conductor de 8 mm	T32GDA008	6	N/A	18.921	113.526
Soporte en techo	Soporte de conductor con clip de sujeción, Diámetro conductor 8 mm	T65UN0008	30	N/A	5.950	178.500
Total						1.474.730

Fuente: Elaboración propia

Los elementos relacionados cumplen con las dimensiones mínimas de las secciones de los conductores y las varillas de captación como se indica en la **Tabla 6** de la NTC 4552-3: 2023 [14].

4.8 PASO 8

4.8.1 Instalar los conductores bajantes

El sistema de captación deberá unirse con el sistema de puesta a tierra mediante el sistema de conductores bajantes, para ello se tomaron en cuenta las recomendaciones dadas por la NTC 4552-3: 2023 y se definió:

- Se deberán instalar cuatro conductores bajantes, cada uno asociado a las varillas de las esquinas lo que brinda varios caminos para la conducción de la corriente.
- Los conductores bajantes se instalarán sin bucles innecesarios.
- Los conductores no tocan el canal de aguas lluvias.
- Los conductores del sistema deberán ir asegurados cada metro con grapas de fijación.
- En los conductores bajantes se instalarán uniones de prueba que permitirán la desconexión del sistema de puesta a tierra y el de bajantes, con la finalidad de realizar las mediciones del sistema de puesta a tierra y los mantenimientos.
- Las uniones de prueba se instalarán dentro de una caja de inspección de 10 x 10, soportada sobre la pared a una altura de 1 metro sobre el terreno.
- En la caja de inspección se realizará el cambio del material del conductor bajante de aluminio por un conductor de cobre, mediante una grapa universal bimetálica el con el fin de proteger el sistema de bajantes del fenómeno de sulfatación ya que el cobre posee mayor resistencia en la tierra.
- La unión de prueba deberá ser bimetálica para evitar la corrosión galvánica.

En la Tabla 24, se relacionan las características técnicas de los elementos para la fijación del sistema.

Tabla 24. Características y dimensiones del sistema de conductores bajantes.

Dispositivo	Especificaciones	Referencia	Cantidad	Unidades	Costo Unidad \$	Costo Total \$
Conductor bajante	Conductor redondo solido (alambrón de aluminio) de 8mm para apantallamiento	140003000001 140004000008	9	m	3.350	30.150
Cajas de Registro unión de prueba	Caja de paso plástica de 10 x 10 PVC blanca	Caja de paso 15x15x11	4	N/A	25.000	100.000
Unión de prueba	Grapa universal en cruz paralela de 8 mm bimetálica	T32GDC008	4	N/A	52.955	211.820
Soporte de fijación	Soporte de fijación para conductor de 8 mm	T65UN0008	2	N/A	5.950	11.900
Conductor de cobre	Cable de cobre N°1/0 AWG 19 hilos desnudo	CB1/0D	12	m	39.923	479.076
Total						832.946

Fuente: Elaboración propia

Los elementos relacionados cumplen con las dimensiones mínimas de las secciones de los conductores bajantes como se indica en la **Tabla 6** de la NTC 4552-3: 2023 [14].

4.9 PASO 9

4.9.1 Instalar el sistema de puesta a tierra

La configuración que se empleara en este caso es el sistema de puesta a tierra tipo A, la cual es recomendada por [18], para viviendas y edificaciones aisladas.

Este sistema deberá dispersar y disipar la corriente de rayo en el terreno en el menor tiempo posible, para ello se enterrarán varillas en el terreno.

Los electrodos que se recomiendan en la instalación de puesta a tierra son los comerciales de 5/8 por 2.40 m, en cobre por sus propiedades de resistir la corrosión, adicionalmente estos electrodos cumplen con los requerimientos dados por norma respecto a las dimensiones.

Será necesario verificar que tengan certificado RETIE y que cumpla los requisitos de ensayos.

El conductor bajante mínimo 30 cm antes de llegar al suelo y 30 cm después de la pared deberá ir cubierto con un tubo protector de PVC, el tubo deberá ir soportado a la pared con grapas de soporte.

La instalación de las varillas se realizará a una distancia de 1 metro de la pared de la estructura y se instalará una caja de registro en cada varilla para posteriormente realizar labores de mantenimiento.

La conexión del sistema bajante al electrodo de puesta a tierra se deberá realizar mediante soldadura exotérmica, para de esta manera garantizar la resistencia mecánica y la continuidad aun a altas temperaturas causadas por la circulación de la corriente a través de la unión.

Sus características y dimensiones al igual que las de todos los dispositivos se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25. Características y dimensiones del sistema de puesta a tierra.

Dispositivo	Especificaciones	Referencia	Cantidad	Unidades	Costo Unidad \$	Costo Total \$
Conductor de cobre	Cable de cobre N°1/0 AWG 19 hilos desnudo	CB1/0D	12	m	39.923	479.076
Electrodo de puesta a tierra	Varilla cobre de 5/8 por 2,40 m	770001058240	4	N/A	222.450	889.800
Tubo protector	Tubo PVC de ¾	PVC-DB 3/4	1	N/A	5.300	5.300
Grapas soporte	Abrazadera grapa metálica doble Ala ¾	PVC 496 4	4	N/A	200	800
Molde grafito	Unión en T de varilla 5/8 con cable 1/0	50003215810	1	N/A	164900	164900
Soldadura exotérmica	Carga de reacción química y cobre de 90 gramos	650001000090	5	N/A	14750	73750
Total						1.613.626

Fuente: Elaboración propia

Los elementos relacionados cumplen con las dimensiones mínimas de las secciones de los conductores bajantes como se indica en la tabla 7 de la NTC 4552-3:2023 [14].

Con el fin de garantizar la equipotencialidad en los equipos eléctricos y reducir el riesgo causado por las descargas que impactan en la línea de alimentación de tensión para la vivienda, se instalara un barraje de equipotencialización que cubra todos los sistemas de tierra de la vivienda y un sistema de DPS de clase IV.

El barraje equipotencial se instalará con una derivación de un bajante y en él se harán equipotenciales todos los equipos internos y los DPS.

Los dispositivos que se emplearán se presentan en la Tabla 26, con sus características técnicas.

Tabla 26. Características y dimensiones del barraje equipotencial.

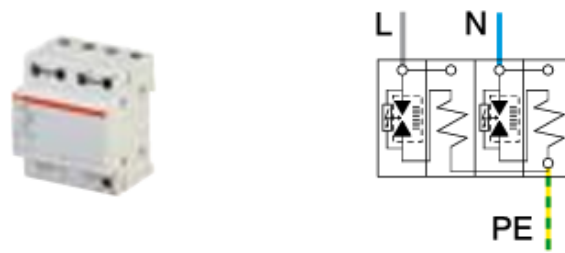
Dispositivo	Especificaciones	Referencia	Cantidad	Unidades	Costo Unidad \$	Costo Total \$
Conductor de cobre	Cable de cobre N°1/0 AWG 19 hilos desnudo	CB1/0D	2	m	39.923	79.846
Grapa de fijación	Grapa universal en cruz paralela de 8 mm bimetálica	T32GDC008	1	N/A	52.955	52.955
Soporte y barraje equipotencial de tierras	Conjunto de soportes con aisladores que soportan pletina de cobre (listo para instalar)	Batería Equipotencial De Barra Colectora De Conexión A Tierra	2	N/A	178.146	356.292
Total						489.093

Fuente Elaboración propia

Los DPS deberán instalarse en el tablero general de la vivienda con su respectivo cable de conexión de tierra al barraje equipotencial.

Los DPS deberán tener la capacidad de proteger contra las formas de onda 10/350 μ s que obedecen a las descargas directas sobre la línea y 8/20 μ s que obedecen a las sobretensiones inducidas por descargas cercanas. Un esquemático de conexión se presenta en la Figura 31 y la tabla de características se presenta en la Tabla 27.

Figura 31. DPS y conexión en sistema Monofásico.



Fuente: [20]

Tabla 27. Especificaciones DPS

Dispositivo	Especificaciones	Referencia	Cantidad	Unidades	Costo Unidad \$	Costo Total \$
DPS TIPO 1	Supresor de transitorios tipo 1 + 2; 120 V L-N, capacidad de derivar corrientes 12,5 kA.	formas de onda 10/350 μ s + 8/20 μ s	1	N/A	1.404.900	1.404.900
Total						1.404.900

Fuente Elaboración propia

4.10 PASO 10

4.10.1 Valoración de los riesgos asociados

Para evaluar los niveles de riesgo con las medidas de protección aplicadas a la vivienda es necesario calcular nuevamente las componentes asociadas al riesgo pérdida de vidas humanas R_1 con los valores de las nuevas medidas adoptadas, estos componentes se relacionan en la Tabla 28, 29.

Tabla 28. Componentes asociadas al riesgo de pérdida de vidas humanas.

Formula	Componente	Valor	Origen
R_A	N_G	22	Tabla 13
	C_D	1	Tabla A.1 de [13]
	P_{TA}	1	Tabla B.1 de [13]
	P_B	0,2	Tabla B.2 de [13].
R_B	r_p	1	Tabla C.4 de [13]
	r_f	10^{-3}	Tabla C.5 de [13]
	h_z	1	Tabla C.6 de [13]
	L_F	10^{-2}	Tabla C.2 de [13]
	n_z	4	Datos del estudio
	n_t	4	Datos del estudio
	t_z	8760	Datos del estudio

Tabla 29. Componentes asociadas al riesgo de pérdida de vidas humanas (Continuación)

R_U	L_L	1000	Valor recomendado por [13]
	C_I	1	Tabla A.2 de [13]
	C_E	1	Tabla A.4 de [13]
	C_T	1	Tabla A.3 de [13]
	A_{DJ}	-	Datos del estudio
	C_{DJ}	1	Tabla A.1 de [13]
	P_{TU}	1	Tabla B.6 de [13]
	P_{EB}	0,05	Tabla B.7 de [13]
	P_{LD}	1	Tabla B.8 de [13]
	C_{LD}	1	Tabla B.4 de [13]
	r_t	10^{-2}	Tabla C.3 de [13]
	L_T	10^{-2}	Tabla C.2 de [13]
R_V	L_V	$10 * 10^{-6}$	Sale de formula (13)

Fuente: Elaboración propia

Para la evaluación emplearemos la Tabla 30, que posee las fórmulas y en la columna cuatro se calcula el resultado de cada componente para ser sumadas al final y así obtener el nuevo valor de riesgo calculado para la edificación.

Tabla 30. Fórmulas de pérdida de vidas humanas (R_1).

Formula general	Formula de componentes	Resultado componentes	Resultados formula general
$R_A = N_D * P_A * L_A$	$N_D = N_G * A_D * C_D * 10^{-6}$	$14,565 * 10^{-3}$	$291,3 * 10^{-9}$
	$P_A = P_{TA} * P_B$	0,2	
	$L_A = r_t * L_T * \frac{n_z}{n_t} * \frac{t_z}{8760}$	$100 * 10^{-6}$	
$R_B = N_D * P_B * L_B$	$L_B = L_V = r_p * r_f * h_z * L_F * \frac{n_z}{n_t} * \frac{t_z}{8760}$	$10 * 10^{-6}$	$29,13 * 10^{-9}$
$R_U = (N_L + N_{DJ})P_U * L_U$	$N_L = N_G * A_L * C_I * C_E * C_T * 10^{-6}$	0,88	$4,4 * 10^{-6}$
	$A_L = 40 * L_L$	40000	
	$N_{DJ} = N_G * A_{DJ} * C_{DJ} * C_T * 10^{-6}$	$22 * 10^{-6}$	
	$P_U = P_{TU} * P_{EB} * P_{LD} * C_{LD}$	0,05	
	$L_U = r_t * L_T * \frac{n_z}{n_t} * \frac{t_z}{8760}$	$100 * 10^{-6}$	
$R_V = (N_L + N_{DJ})P_V * L_V$	$P_V = P_{EB} * P_{LD} * C_{LD}$	0,05	$440 * 10^{-9}$
R_1			$5,16 * 10^{-6}$

Fuente Elaboración propia

4.11 PASO 11

4.11.1 Comparación de valores

El valor establecido como tolerable para el país es:

$$R_T = 10^{-5}$$

El nuevo valor calculado con las medidas de protección fue:

$$R_1 = 5,16 * 10^{-6}$$

En este caso $R_1 \leq R_T$, por tanto, **se considera que la vivienda está dentro del rango de riesgo tolerable establecido para el país.**

4.12 ANALISIS ECONOMICO

En la Tabla 31 se presenta el costo de los materiales presentados en las tablas 23-27.

Tabla 31. Costo económico de implementación

Tabla	Descripción	Costo \$
23	Características y dimensiones del sistema de captación	1.474.730
24	Características y dimensiones del sistema de conductores bajantes.	832.946
25	Características y dimensiones del sistema de puesta a tierra.	1.613.626
26	Características y dimensiones del barraje equipotencial.	489.093
27	Especificaciones DPS	1.404.900
Total		5.815.295

Fuente Elaboración propia.

Nota aclaratoria: Las cotizaciones de los precios de los materiales se realizaron mediante la búsqueda de los dispositivos en páginas web que ofertan los productos.

De [21], se puede observar que el valor promedio para una vivienda de interés social en el año 2020 es de 39 salarios mínimos mensuales legales vigentes (SMMLV), lo que corresponde a \$34.12 Millones de pesos colombianos, lo que para el año actual (2025), sería un aproximado de \$55.516.500 (cincuenta y cinco millones quinientos dieciséis mil quinientos pesos colombianos).

Lo que deja ver que la inversión para proteger la vivienda está alrededor del 10% del valor total de la vivienda.

5 CONCLUSIONES

Este trabajo de grado presenta una herramienta con lo esencial para la evaluación de riesgo he instalación de un sistema de apantallamiento que cumpla con los niveles mínimos de riesgo establecidos para viviendas aisladas.

La mejor forma de proteger las comunidades y los ciudadanos es realizar brigadas de capacitación e información relevante de como disminuir la probabilidad de riesgo por descargas atmosféricas.

En el caso de estudio se realizó un análisis para una vivienda de un piso, pero la metodología está diseñada para servir de análisis y dimensionamiento de un sistema de protección para cualquier vivienda rural con usos residenciales.

Es necesario indagar en otras formas de protección contra el rayo, ya que las actuales implican conducir el rayo hacia las edificaciones para que se descargue a tierra lo más rápido y seguro posible, sin embargo, esto tiene consecuencias peligrosas para los equipos electrónicos ya que los campos electromagnéticos son muy grandes en la zona de impacto y pueden radiarse hasta 1 km de distancia, lo que causaría pérdidas económicas cada vez que caiga un rayo, adicionalmente el sistema se dimensiona para valores estandarizados, pero, los rayos son una fuerza de la naturaleza que no se puede controlar ni estimar y podrían presentarse valores superiores al de los valores estimados, causando afectaciones graves a la estructura y personas que puedan habitar esas estructuras.

Proteger la vivienda tiene un costo que ronda el 10% del valor total de la vivienda, él cual es un valor bajo comparado con la posibilidad de salvaguardar la vida de las personas que habitan en esta zona rural del territorio colombiano.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Illiapa”.
- [2] “PARARRAYOS Sesión 1 y 2.”
- [3] H. Torres Sánchez, *Protección contra Rayos*, Segunda Edición. Bogotá D.C.: Icontec, 2010.
- [4] A. Soley and C. Bernal, “Evaluación del riesgo por rayos para Colombia,” 2019.
- [5] L. P. De, L. A. Foudre, E. N. Vue, and M. K. H. Schneider, “ELr-ciL L du Comité d’Etudes n 33 (Surtensions et Coordination de l’isolement) Rapport publié à la demande du Président du Comité.”
- [6] “Plan Nacional de Construcción y Mejoramiento de Vivienda Social Rural-PNVISR REPÚBLICA DE COLOMBIA MINISTERIO DE VIVIENDA CIUDAD Y TERRITORIO-MVCT Dirección de Vivienda Rural PLAN NACIONAL DE CONSTRUCCIÓN-AVANCE.” [Online]. Available: www.minvivienda.gov.co
- [7] D. Técnico De Parametrización Del Sfvr -Anexo *et al.*, “DOCUMENTO TÉCNICO DE PARAMETRIZACIÓN Subsidio Familiar de Vivienda Rural-SFVR Vivienda Nueva de Interés Social Rural y Mejoramientos de Vivienda REPÚBLICA DE COLOMBIA MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO-MVCT Dirección de Vivienda Rural Política Pública de Vivienda de Interés Social Rural 2021.” [Online]. Available: www.minvivienda.gov.co
- [8] ““Por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas-RETIE” MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA LIBRO 3 INSTALACIONES OBJETO DEL RETIE REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS-RETIE.”
- [9] F. K. de la Rosa Cummins *et al.*, “CHARACTERIZATION OF LIGHTNING FOR APPLICATIONS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS CHARACTERIZATION OF LIGHTNING FOR APPLICATIONS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS Lightning Location Systems " Lightning Location Systems ",” 2000.
- [10] C. Younes-Velosa, “Characterization of lightning parameters in Colombia based on terrestrial and satellite lightning locating systems, a 20 years analysis,” *Rev Acad Colomb Cienc Exactas Fis Nat*, vol. 44, no. 173, pp. 960–973, Dec. 2020, doi: 10.18257/RACCEFYN.1171.
- [11] ICONTEC, *Sistema de alerta de tormentas. Protección contra rayos*, PRIMERA. BOGOTA: 2023, 2023.
- [12] ICONTEC, *NTC 4552-1*, SEGUNDA. BOGOTA: 2023, 2022.
- [13] ICONTEC, *NTC 4552-2*, SRGUNDA. BOGOTA: 2023, 2023.
- [14] ICONTEC, *NTC 4552-3*, SEGUNDA. BOGOTA, 2023.

- [15] K. Berger, R. B. Andebson, and H. Kri5ninger, "N" 41 ELECTRA 23 LT COMMUNICATIONS PARAMÈTRES DES COUPS DE FOUDRE."
- [16] IEC - International Electrotechnical Commission, *Protection against lightning - Part 2: Risk management*, 3.0. 2024, 2010.
- [17] *Protection against lightning. Part 3, Physical damage to structures and life hazard.* International Electrotechnical Commission, 2010.
- [18] "HoracioTorres_UN".
- [19] "69-4-muertes-2-heridos-campo-futbol-femenino-Cajibio-Cauca".
- [20] G. Ovr, "Protección contra Sobretensiones."
- [21] "fichas-tecnicas-vivienda-nueva-vivienda-rural".