

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO
FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN



“EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE CAÍDA DE RAYO
Y VARIABLES ASOCIADAS A DECESOS POR MEDIO DE
ANÁLISIS GEOESPACIAL EN EL NOROESTE DE MÉXICO”

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN

PRESENTA:

M. C. GRISEL ALEJANDRA GUTIÉRREZ ANGUAMEA

DIRECTORES:

DRA. XOCHITL GUADALUPE TORRES CARRILLO
DR. CARLOS MANUEL MINJAREZ SOSA

CULIACÁN, SINALOA, MÉXICO, FEBRERO DEL 2024



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional





DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y ANTIPLAGIO

A través de la presente Yo: **GRISEL ALEJANDRA GUTIÉRREZ ANGUAMEA**, con número de cuenta: **1967153-09** y alumna del Programa de **Doctorado en Ciencias de la Información**, con sede en la Facultad de Informática Culiacán y Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

DECLARO QUE:

El trabajo de tesis que presento para su defensa y el cual se titula: **“EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE CAÍDA DE RAYO Y VARIABLES ASOCIADAS A DECESOS POR MEDIO DE ANÁLISIS GEOESPACIAL EN EL NOROESTE DE MÉXICO”**

- 1.- Es el resultado de un trabajo personal y constituye un documento original e inédito.
- 2.- Los documentos, artículos, informes, etc. Utilizados para la realización del trabajo están referenciados de forma clara, tanto en el texto principal como en el apartado de bibliografía de la presente tesis.
- 3.- Que las citas de las obras que aparecen reflejadas de forma literal y entre comillas, presentan clara especificación de la fuente (autor, año) d la que ha sido extraídas.
- 4.- Tengo conocimiento que no puedo asumir como propio el trabajo de tesis de otra persona, la copia de frases, párrafos e ideas de otro trabajo sin citar autoría, o cualquier otra acción de similares características conlleva a la realización fraudulenta del manuscrito de tesis y podrá implicar la suspensión del examen de grado en tanto no se corrija o bien la suspensión definitiva, esto acorde con el nivel en que se pudiese incurrir.
- 5.- Soy consciente de que pretender ser el autor de un trabajo, en parte o en su totalidad, escrito por otra persona constituye un delito con base en los artículos 424 y 427 del código penal federal, título vigesimosexto de los delitos en materia de derechos de autor en la República Mexicana.

Culiacán, Sinaloa a 20 de febrero de 2024

Grisel Alejandra Gutiérrez Anguamea
Nombre y Firma del alumno



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
REPOSITORIO INSTITUCIONAL BUELNA**

CESIÓN DE DERECHOS

A QUIEN CORRESPONDA. -

Ciudad de _____, a _____ de _____ de _____; quien suscribe:
C. _____ número de cuenta: _____, egresado
del programa de posgrado:

de la Unidad Académica: _____, en la Unidad
Regional _____ Manifiesto ser autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la
dirección de: _____ y de acuerdo al
artículo 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor, cedo y comparto los derechos de mi trabajo de
Tesis intitulado:

a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su publicación, difusión, y distribución en medios
impresos y digitales, con fines académicos y de investigación, la que será titular del mismo, en
forma conjunta o separada con el autor.

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de
Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta Tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas,
texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines
educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al autor del
presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o
modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será
perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

En apego al Art. 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor Cedo y comparto el derecho de
publicación, difusión, y distribución en medios impresos y digitales, con fines académicos y de
investigación a la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Grisel Alejandra Gutiérrez Anguamea

Nombre completo y firma

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad, la fuerza y la determinación, necesarias para alcanzar esta meta.

A mis padres, Martha y Mario, por su amor incondicional, paciencia, respaldo y valores inculcados, pues gracias a ellos criaron a tres seres humanos ejemplares, de gran corazón y ciudadanos responsables.

A mis hermanos, Martha Lorenia y Mario, por su amor, apoyo, compañía, complicidad y respaldo desinteresado, porque gracias a su ayuda cumplí mis propósitos.

A mis sobrinos, Ángel Isaac y Melissa Gabriela, por ser la alegría de mi vida y permitirme enseñarles que todo lo pueden lograr.

A mi nana Martha, siempre presente desde el cielo.

A mi familia, porque son mi motivación diaria para salir adelante ante cualquier adversidad y ser una mejor persona cada día.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme concluir con salud esta etapa, y a mi familia por ser mi motor para continuar. Gracias a ellos estoy aquí.

Agradezco profundamente al Posgrado en Ciencias de la Información (PCI) de la Universidad Autónoma de Sinaloa por la oportunidad y la confianza depositadas en una servidora.

Asimismo, gracias a la Universidad de Sonora (UNISON) por otorgar la Beca para Estudios Doctorales para Profesores(as) de Asignatura con Opción a Plaza de Profesor(a) Investigador(a) Indeterminado(a) de Tiempo Completo 2020-2/2021 y permitir la realización de esta investigación. Asimismo, extendiendo mi gratitud al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (Conahcyt) por el apoyo recibido a través de la beca 177248 y respaldar las actividades derivadas de dicha tesis doctoral.

Parte medular de la presente investigación fue el acompañamiento y el aporte de los miembros del comité evaluador durante toda su ejecución, muchas gracias al Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra, Dr. José Ramón Gaxiola Camacho, Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz y al Dr. Sergio Alberto Monjardín Armenta por su guía, consejos, sugerencias, indicaciones y correcciones precisas, pues al atenderlas es un hecho que los estudiantes podemos llegar a buen término.

Por supuesto a mis directores, a la Dra. Xochitl Guadalupe Torres Carrillo y al Dr. Carlos Manuel Minjarez Sosa por su dedicación, paciencia, empeño y confianza; quienes aún en momentos de incertidumbre se muestran dispuestos en apoyar e impulsar los proyectos de sus estudiantes. Gracias por dirigirme en esta etapa académica y enseñarme a creer en mis capacidades.

También, son muchos los docentes que han contribuido en mi formación académica y a todos ellos les agradezco por mostrarme el camino a seguir y las ideas que deseo transmitir a futuras generaciones, especialmente al M. C. José Ismael Minjárez Sosa, por ser mi mentor y ejemplo.

Por otro lado, es preciso agradecer a Vaisala Inc., por proporcionar el conjunto de datos sobre rayos (GLD360), información esencial para el desarrollo de esta investigación; a Ronald L. Holle, que desde un inicio mostró interés en este proyecto, y

fue el primer contacto con Vaisala Inc.; a Chris Vagasky, por su increíble apoyo y guía, también de Vaisala Inc.; a Julio Weissman y Adrián E. Vázquez, por su apoyo técnico.

Finalmente, me despidió con un especial y sentido agradecimiento hacia familiares, amigos y conocidos por sus oraciones y fe; a mi madre por su dedicación y cuidados; a Lidia y Pablo por su incondicional ayuda; a mis médicos, por su gran humanidad y humildad, enfermera(o)s, cuidadores, a todos aquellos que lucharon codo a codo y lograron ponerme de nuevo en pie para este día, GRACIAS.

RESUMEN

Las tormentas eléctricas son de los fenómenos más espectaculares de la naturaleza, ocurren por la separación de cargas eléctricas que suceden dentro de una nube debido a los diferentes procesos microfísicos y dinámicos que ocurren durante el ciclo de convección de una tormenta (Minjarez-Sosa y Waissman, 2017; Minjarez-Sosa et al., 2012).

Esta separación de cargas genera campos eléctricos, tanto al interior de la nube como entre la nube y el suelo; en consecuencia, las descargas eléctricas creadas se clasifican de acuerdo con su trayectoria como rayos nube-tierra (CG, por sus siglas en inglés) y rayos intranube (IC, por sus siglas en inglés), los primeros hacen contacto con el suelo y los segundos no.

Los rayos representan una amenaza latente y cuando dicha energía es atraída por puntos sobresalientes ubicados en la superficie terrestre ocasionan pérdidas económicas y humanas. A una escala global, se estiman aproximadamente entre 6,000 y 24,000 decesos, atribuidos a la caída de rayos (Holle y Cooper, 2016) y en una proporción diez veces mayor, las personas que sufren daños por esta misma causa.

Este trabajo de investigación propone desarrollar una metodología que permita evaluar la susceptibilidad al peligro de caída de rayo en el noroeste de México, mediante métodos de estadística multivariada y sistemas de información geográfica, donde se consideren otras variables, tanto hidrometeorológicas como geodemográficas. No sólo se obtienen las posibles regiones que pueden resultar afectadas y/o que son vulnerables ante la ocurrencia de tormentas eléctricas y a la vez producen decesos por la caída de rayos, sino que también abre camino para la modernización de políticas públicas en materia de protección civil e infraestructura.

ABSTRACT

Thunderstorms are among the most spectacular phenomena in nature, occurring due to electrical charges separation within a cloud by different microphysical and dynamic processes that occur during the convection cycle of a thunderstorm (Minjarez-Sosa and Waissman, 2017; Minjarez-Sosa et al., 2012).

This separation of charges generates electric fields, both within the cloud and between the cloud and the ground; consequently, electric discharges created are classified according to their trajectory as cloud-to-ground (CG) strokes and intracloud or in-cloud (IC) pulses, the former making contact with the ground and the latter not.

Lightning represents a latent threat and when such energy is attracted to outstanding points on the earth's surface, it causes economic and human losses. On a global scale, it is estimated between 6,000 and 24,000 CG stroke fatalities are attributed to strokes and ten times more people are injured as a result of them (Holle and Cooper, 2016).

This research proposes to develop a methodology to evaluate the susceptibility to lightning hazard in Northwestern Mexico, using multivariate statistical methods and geographic information systems, where other variables, both hydrometeorological and geodemographic, are considered. This will not only identify the possible regions that may be affected and/or vulnerable to thunderstorms and at the same time cause CG stroke fatalities, but also may contribute to public policy development, as civil protection and infrastructure.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
I.1.	Presentación del tema	1
I.2.	Antecedentes.....	3
I.3.	Área de estudio.....	11
I.4.	Planteamiento del problema	12
I.5.	Justificación.....	14
I.6.	Hipótesis	15
I.7.	Objetivos de la investigación.....	15
I.8.	Preguntas de la investigación	16
II.	MARCO TEÓRICO	17
II.1.	Definiciones importantes.....	17
II.2.	La estadística multivariada y el análisis de componentes principales.....	18
II.3.	Métodos de interpolación espacial.....	20
II.3.1.	Kriging/Cokriging	21
II.3.2.	Superposición ponderada	26
III.	METODOLOGÍA	28
III.1.	Descripción de los datos	29
III.1.1.	Datos poblacionales	30
III.1.2.	Base cartográfica.....	32
III.1.3.	Procesamiento	41
IV.	RESULTADOS.....	56
IV.1.	Nivel 1. Preprocesamiento	56
IV.1.1.	Muertes por caída de rayos a escala nacional y regional.....	56
IV.1.2.	Descargas eléctricas en el noroeste de México.....	61
IV.1.3.	Distribución de la población a escala municipal.....	68
IV.1.4.	Indicador de vulnerabilidad social (IVS)	69
IV.2.	Nivel 2. Visualización de distribuciones	72
IV.2.1.	Distribución de muertes por rayo	72
IV.2.2.	Distribución de descargas eléctricas, localidades y habitantes expuestos.....	75
IV.2.3.	Distribución de indicador de vulnerabilidad social.....	82
IV.2.4.	Análisis de componentes principales (ACP) en decesos por caída de rayo.....	84

IV.3. Nivel 3. Visualización de densidades	91
IV.3.1. Densidad de muertes por rayo.....	91
IV.3.2. Densidad de rayos nube-tierra (CG)	94
IV.4. Nivel 4. Correlación de factores	96
IV.4.1. Relación entre fisiografía, densidad de rayos nube-tierra (CG) y decesos.....	96
IV.4.2. Índice de Peligro	99
IV.4.3. Factor de Riesgo	107
IV.5. Susceptibilidad al peligro de caída de rayo	113
IV.5.1. Variables físico-sociales correlacionadas en la susceptibilidad al peligro de caída de rayo.....	113
IV.5.2. Grado de susceptibilidad a la caída de rayo.....	113
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
VI. CONTRIBUCIÓN Y FUTURA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	120
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
ANEXO A.....	130
ANEXO B.....	133
ANEXO C.....	149
ANEXO D.....	154

TABLAS

Tabla 1. Datos de entrada y disponibilidad.....	30
Tabla 2. Clases de pendiente del terreno.....	33
Tabla 3. Orientación del bloque de terreno en el área de estudio	37
Tabla 4. Niveles de procesamiento	43
Tabla 5. Fragmento de decesos nacionales, año 2015.....	46
Tabla 6. Decesos por año en el periodo 2015-2019.....	56
Tabla 7. Decesos por año en el área de estudio 2015-2019.....	58
Tabla 8. Sitios con mayor incidencia de muertes	58
Tabla 9. Vulnerabilidad Social por Municipio, 2010	70
Tabla 10. Rezago Social por Municipio, 2010	70
Tabla 11. Marginación Municipal, 2010.....	71

Tabla 12. Categorías del Indicador de Vulnerabilidad Social.....	71
Tabla 13. Ejemplo del Indicador de Vulnerabilidad Social por municipio.	71
Tabla 14. Decesos donde se logró el análisis geoespacial.....	77
Tabla 15. Decesos donde no se logró el análisis geoespacial.....	77
Tabla 16. Posibles localidades afectadas y población expuesta en 2015-2019.....	79
Tabla 17. Clasificación numérica decesos en 2015 y variables consideradas.	84
Tabla 18. Varianzas en las 5 dimensiones analizadas.	87
Tabla 19. Cosenos cuadrados en las 5 dimensiones analizadas.	89
Tabla 20. Correlación de variables.....	90
Tabla 21. Matriz de correlación entre las variables analizadas.....	91
Tabla 22. Errores de predicción del Factor de Peligro.....	102
Tabla 23. Errores de predicción del Factor de Riesgo.....	109
Tabla 24. Matriz de correlación de variables físico-sociales respecto a decesos por caída de rayo.....	114
Tabla 25. Porcentajes ponderados por variable físico-social.....	114

FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.....	12
Figura 2. Explicación gráfica de PCA.....	19
Figura 3. Semivariograma típico.....	22
Figura 4. Representación de umbral.....	25
Figura 5. Fragmento de descargas eléctricas GLD360.....	31
Figura 6. Modelo Digital de Elevación (MDE) del área de estudio.....	34
Figura 7. Pendiente del terreno en el área de estudio.....	35
Figura 8. Aspecto fisiográfico del área de estudio.....	38
Figura 9. Base geopolítica, vías de comunicación e imagen satelital en el área de estudio.....	41
Figura 10. Esquema metodológico para evaluación del peligro de caída de rayo en el noroeste de México.....	42
Figura 11. Decesos, posibles localidades y habitantes expuestos en 2015.....	53
Figura 12. Municipios con muertes por caída de rayo, 2015-2019.....	57

Figura 13. Municipios con mayor incidencia de muertes por caída de rayo, 2015-2019.....	59
Figura 14. Causa de defunción en víctimas por caída de rayo	60
Figura 15. Decesos por grupo de edad en víctimas por caída de rayo.....	61
Figura 16. Decesos por horario en víctimas por caída de rayo.....	61
Figura 17. Percepción de descargas eléctricas de GLD360 en el área de estudio.	62
Figura 18. Promedios de descargas eléctricas en el mes de julio de 2015	63
Figura 19. Descargas eléctricas del día 06 de julio del 2015.....	64
Figura 20. Descargas eléctricas en horas próximas a los decesos.....	64
Figura 21. Descargas eléctricas del 18 y 19 de julio del 2015	65
Figura 22. Descargas eléctricas en horas próximas al deceso 201575.....	65
Figura 23. Descargas eléctricas del día 23 de julio del 2015.....	66
Figura 24. Descargas eléctricas en horas próximas al deceso 201577.....	66
Figura 25. Municipios con mayor densidad poblacional y mayor frecuencia de decesos por caída de rayo.....	69
Figura 26. Inconsistencias en decesos atribuidos a caída de rayo	73
Figura 27. Condición legal de localidades en los decesos atribuidos a caída de rayo.....	74
Figura 28. Distribución de localidades con decesos por rayo en 2015-2019	75
Figura 29. Situación de localidades protegidas por Ley SNIEG (DOF, 2018).....	76
Figura 30. Resultados después del análisis geoespacial de GLD360	78
Figura 31. Rayos nube-tierra (CG), localidades y habitantes expuestos en decesos del 2018.....	81
Figura 32. Distribución del indicador de vulnerabilidad social	83
Figura 33. Plano principal de los individuos en el análisis de PCA.....	86
Figura 34. Círculo de correlación entre las variables.....	87
Figura 35. Superposición de planos	90
Figura 36. Decesos entre población por localidad afectada.....	92
Figura 37. Concentración de decesos.	93
Figura 38. Densidad promedio de rayos nube-tierra (CG) por kilómetro cuadrado por año.....	95
Figura 39. Superposición de decesos entre población por localidad afectada y densidad promedio de rayos nube-tierra (CG)	98

Figura 40. Semivariogramas de Factor de Peligro (rayos nube-tierra (CG) y decesos); a) no anisotropía; b) sí anisotropía.....	100
Figura 41. Predicción de indicadores de Factor de Peligro; a) no anisotropía; b) sí anisotropía.....	101
Figura 42. Distribución de probabilidades de ocurrencia de rayos nube-tierra (CG) y decesos; a) no anisotropía; b) sí anisotropía.	103
Figura 43. Distribución de probabilidades del Factor de Peligro con anisotropía	104
Figura 44. Distribución del Índice de Peligro con anisotropía sobre el aspecto fisiográfico.....	106
Figura 45. Semivariogramas de Factor de Riesgo (rayos nube-tierra (CG), vulnerabilidad social y decesos); a) no anisotropía; b) sí anisotropía.....	107
Figura 46. Predicción de indicadores del Factor de Riesgo; a) no anisotropía; b) sí anisotropía.....	108
Figura 47. Distribución de probabilidades del Factor de Riesgo; a) no anisotropía; b) sí anisotropía.	109
Figura 48. Distribución de probabilidades del Factor de Riesgo con anisotropía.....	111
Figura 49. Distribución de Factor de Riesgo con anisotropía e Indicador de Vulnerabilidad Social.....	112
Figura 50. Grado de susceptibilidad al peligro de caída de rayo.	116

Ecuaciones

Ecuación 1. Semivariograma.....	21
Ecuación 2. Kriging fórmula general	109
Ecuación 3. CoKriging de Indicadores.....	1114

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Presentación del tema

Dentro de los fenómenos hidrometeorológicos, las descargas eléctricas o rayos son unos de los eventos que más muertes y daños ocasionan, tanto a la infraestructura como a nivel social, directa o indirectamente (Cummins y Murphy, 2009).

En contexto, estas descargas eléctricas se dividen en dos tipos, dependiendo de su origen y destino (Cummins y Murphy, 2009); por un lado, unas ocurren al interior de la nube o entre nubes y se denominan rayos IC, otras son las descargas nube-tierra, las cuales se definen en este trabajo como rayos o relámpagos CG, y específicamente a estos últimos se refiere el desarrollo de esta tesis.

La naturaleza de las descargas mencionadas se puede explicar a partir del proceso de electrificación de la nube. Generalmente, en las nubes convectivas, que por su desarrollo vertical alcanzan y sobrepasan la isoterma de los cero grados, coexiste el agua en sus tres estados de agregación; la presencia de granizo y el proceso de sublimación del vapor genera que los primeros se formen con una molécula de agua con los hidrógenos (carga positiva) acomodados hacia la parte externa de dicho granizo (Takahashi, 1990). Cuando un granizo colisiona con otro, una pequeña parte de él se desprende y ésta es llevada por las corrientes convectivas hacia la parte más alta de la nube (yunque), provocando que esa región se cargue positivamente, mientras que la región del núcleo de la nube queda cargada negativamente.

Esta separación de cargas genera campos eléctricos muy intensos, tanto al interior de la nube como entre la nube y el suelo o con otras nubes, lo que produce descargas IC o rayos CG, en caso de que caigan a tierra. Los rayos también se pueden subdividir por su polaridad: negativa o positiva.

En cuanto a los patrones de comportamiento, la ocurrencia de rayos y sus consecuencias varían según la región del mundo donde suceden; por ejemplo, se estima que entre 6,000 y 24,000 personas mueren globalmente al año debido a la caída de un rayo y en una proporción diez veces mayor, es la cantidad de personas que sufren daños por esta misma causa (Holle y Cooper, 2016).

En consecuencia, existen varios estudios que han investigado la incidencia de muertes debido a la caída de un rayo (Biswas et al., 2020; Holle, 2008; Raga et al., 2014; Roeder et al., 2015), entre otros. Los resultados coinciden en que las muertes no sólo dependen de las condiciones climáticas (factores naturales) y de la densidad de población (Gomes y Kadir, 2011), sino que se disparan las cifras en regiones donde los factores antropogénicos están en proceso de crecimiento, como las actividades al aire libre o el grado de desarrollo económico.

Respecto a México, se ha reportado la ocurrencia de más de 7,300 muertes por caída de rayo entre los años 1979 al 2011 (Raga et al., 2014), con una variación en la tasa de defunción de 3.75 (1979-1998) a 1.2 (1998-2011) decesos por cada millón de habitantes; esto posiblemente en relación con lo mencionado en el párrafo anterior.

En lo que concierne al tema de pérdidas en vidas que genera la caída de rayos, en los últimos años se han desarrollado diversos estudios para evaluar de alguna forma la peligrosidad del fenómeno (Biswas et al., 2020; Holle, 2008; Holle y Cooper, 2016; Raga et al., 2014; Roeder et al., 2015).

Dentro de este marco, no existe una metodología consensada a nivel mundial para estudiar los elementos entorno a las muertes por caída de rayo y distintos estudios resaltan la necesidad de investigar el comportamiento espaciotemporal del fenómeno, con el objetivo de disminuir los daños derivados de su ocurrencia.

Existen diferentes formas para evaluar los efectos e impactos debidos a fenómenos o catástrofes naturales. El presente estudio tiene la esencial diferencia, respecto a otros realizados en el tema, de ceñirse a la definición y utilización de los conceptos de peligro, riesgo y vulnerabilidad, mismos que son abordados más adelante en el apartado de Marco Teórico; esto se considera indispensable para obtener una comprensión más clara del estudio a realizar. Además, se aplica una distribución acumulada en sustitución de cuentas discretas (Minjarez-Sosa et al., 2012), esto a fin de identificar el área de influencia de los rayos nube-tierra (CG) y no solo el sitio de impacto.

En México se reconoce la necesidad de análisis del fenómeno hidrometeorológico y con este trabajo de investigación se obtienen mapas de distribución y densidades de decesos y rayos, vulnerabilidad social, índice de peligro,

factor de riesgo y grado de susceptibilidad al peligro de caída de rayo. También se integra un Sistema de Información Geográfica que contiene los archivos digitales creados en el proyecto, pues su creación se considera un impacto favorable en la prevención de decesos y daños atribuidos a esta causa, lo cual será un precedente a nivel nacional e internacional en la investigación de este fenómeno.

A grandes rasgos, la superficie de análisis está delimitada en función de la disponibilidad de información y del comportamiento regional del fenómeno hidrometeorológico, específicamente en el primer cuadrante de los dominios operativos del Experimento del Monzón de Norteamérica (North American Monsoon Experiment, NAME), (Gutzler et al., 2005) y por la frecuencia de las tormentas con gran producción de rayos (Murphy y Holle, 2005; Minjarez-Sosa y Waissman, 2017; Minjarez-Sosa et al., 2012).

En definitiva, se estima que este proyecto de tesis contribuirá a la mejoría de políticas públicas, educación y protección civil, para la protección de la población y la infraestructura.

I.2. Antecedentes

Estudios sobre la relación entre la ocurrencia de rayos con otras variables se han analizado alrededor del planeta. Ejemplo de ello es la probabilidad de existencia de un control topográfico en la densidad de rayos, mismo que aún no está claro, ni estudiado del todo. El análisis del medio físico se ha propuesto como una herramienta ante la necesidad de evidenciar la influencia de los diversos agentes modeladores (endógenos y exógenos) durante la creación del paisaje (Hammond, 1954; Gutiérrez-Anguamea et al., 2016, 2017).

Investigaciones hechas en los Estados Unidos mencionan una posible influencia del relieve sobre la densidad de rayos en regiones montañosas (Vogt y Hodanish, 2016; López, R. y Holle, 1986; Burrows et al., 2002) y otros reportan una mínima densidad de rayos (Orville et al., 2002).

En este sentido, el foco de análisis ha sido el papel del terreno sobre la ocurrencia de rayos en distintas regiones del mundo en numerosas investigaciones. Bourscheidt et al. (2009) analizaron la actividad de rayos considerando elevaciones de 0 a 1000 msnm

en Brasil; Bhavika (2007) evaluó densidades de rayos en sitios superiores a los 3,000 msnm en Sudáfrica; Dissing y Verbyla (2003), estudiaron la densidad de ocurrencia a 2,000 msnm en Alaska; Schulz y Diendorfer (1999) y Smorgonskiy et al. (2013) en Los Alpes.

Similar a los anteriores, Aranguren et al. (2017) estudiaron la relación entre la densidad de rayos y el gradiente de altitud, y observaron una dependencia en las montañas colombianas; simultáneamente, Dos Santos et al. (2017) presentaron una evaluación estadística-temporal para la ocurrencia de rayos nube-tierra en el sureste de Brasil. Asimismo, Kotroni y Lagouvardos (2008), investigaron la posible relación entre rayos, elevación, pendiente de la cuesta y vegetación en el Mediterráneo.

Contrario a lo reportado por los autores que declaran hallazgos positivos de influencia topográfica, Mushtaq (2018) encontró una correlación negativa en la región montañosa de Los Himalaya, específicamente los estados de Jammu y Kashmir. En esta región, la actividad de rayos decrece con el incremento de la elevación, de acuerdo con los datos analizados de 2001-2013. Mushtaq reporta la existencia de mayor actividad de rayos en el intervalo de 1,600-2,000 msnm, le sigue 800-1,000 msnm y finalmente el intervalo que se encuentra en tercer lugar de actividad registrada es de 2,000-2,400 msnm; sin embargo, la zona de menor actividad de rayos se ubica en altitudes mayores, específicamente de los 4,000-8,000 msnm. Esto significa que, Mushtaq en parte coincide con las afirmaciones de Dissing y Verbyla (2003), quienes respaldan una fuerte asociación positiva entre la elevación y los rayos a una altitud máxima de 1,100-1,200 msnm, al menos en el caso de Alaska.

Lo anterior corresponde con lo explicado por Schulz y Diendorfer (1999), en Austria, donde la densidad de rayos se intensifica a elevaciones que se extienden desde los 500 a los 2,000 msnm.

Otras líneas de investigación estudian la ocurrencia de rayos en presencia de humedad atmosférica. En relieves montañosos con una disponibilidad de abundante humedad, se propicia un aumento en la actividad de rayos y decrece en regiones donde existe un bloqueo de humedad por el arreglo del terreno. Asimismo, se menciona que las interacciones entre la configuración del terreno, los niveles de humedad y la actividad de rayos, están reflejadas en la distribución de los sitios donde ocurren los

rayos; además, se manifiesta que en elevaciones más altas, se experimenta actividad una hora antes que las zonas montañosas más bajas adyacentes y más de 3 horas antes que las regiones más planas de Colorado durante el periodo 2003-2012 (Vogt y Hodanish, 2016).

En referencia a la Sierra Madre Occidental, investigaciones mencionan que en su cima ocurre convergencia del vapor de agua y convección por la tarde, que subsecuentemente se propaga hacia el Oeste y cuesta abajo al final de la tarde y comienzo de la noche (Johnson et al., 2007; Nesbitt et al., 2008). Por su parte, Serra y coautores reportaron un aumento de la actividad convectiva por las tardes, relacionado con una disminución en la temperatura de la cresta de la nube desde los 295-300 °K hasta los 210-215 °K (85-90 °K, aproximadamente), y una intensificación de ocurrencia de rayos entre 3 y 9 PM. Asimismo, el vapor de agua precipitable aumentó ligeramente de 3.0-3.5 cm a 4.7-5.4 cm (0.5-0.7 cm, aproximadamente), para después normalizarse conforme los rayos disminuyen entrada la noche (Serra et al., 2016).

En resumen, el repunte más agudo en ocurrencia de rayos y vapor de agua precipitable, a lo largo de la bajada oeste de la Sierra Madre Occidental, también refleja una fuerte conexión entre los efectos topográficos impulsados por el día y la actividad convectiva. Estos resultados confirman que el vapor de agua precipitable en el ciclo diurno convectivo más amplio (incluida la temperatura fría de la cresta de la nube) se intensifica a lo largo de la bajada oeste de la Sierra Madre Occidental y hacia el pie de la ladera montañosa, lo que sugiere condiciones más favorables para la organización convectiva (Gochis et al., 2004; Nesbitt et al., 2008; Rowe et al., 2008).

Por otro lado, estudios sobre la muerte por caída de rayo se han desarrollado en diversas partes del mundo (Murphy y Holle, 2005; Holle, 2008; Gomes y Kadir, 2011; Raga et al., 2014; Yi et al., 2014; Holle y Murphy, 2015; Roeder et al., 2015; Holle y Cooper, 2016; Biswas et al., 2020). Al respecto, resalta la investigación realizada por Murphy y Holle (2005), estos autores publicaron un trabajo donde demuestran que el noroeste de México es particularmente activo en la incidencia de rayos, su objetivo fue estudiar la distribución de la actividad del fenómeno mediante la densidad de rayos nube-tierra sobre el NW de México. Derivado de este estudio, se identificó un valor máximo de 33.9 rayos por km² al año, cerca de Mazatlán, Sinaloa y otra región

destacable en el SE de Sonora y NE de Sinaloa, con 18 a 30 rayos por km² al año en promedio. Estos resultados excedieron 2 veces lo observado por Zajac y Rutledge (2001) en las cercanías de Tampa, Florida, USA, con 14.5 rayos por cada km² al año para el periodo 1995-1999.

Posteriormente, Holle y Murphy (2015) confirmaron una mayor incidencia de rayos en los estados que se encuentran dentro de la región del Monzón de Norteamérica con la herramienta de una red global de detección (GLD360). En este punto resulta lógico que, el acceso a una detección más eficiente de la ocurrencia de rayos totales (IC + CG), como la ofrecida por GLD360, facilita su uso en tasas de rayos empleados en modelos de pronóstico y permite su aplicación en estimación de precipitación; inclusive, el hecho de que durante la temporada de lluvias del monzón norteamericano ocurra la mayor densidad de rayos, lo coloca como un elemento climático mayor en el continente y válido para estudiar el comportamiento del fenómeno.

Es fundamental mencionar que, el 18 de agosto del 2015 ocurrió la liberación del algoritmo mejorado de detección de rayos (Said y Murphy, 2016), lo que se manifiesta en un aumento en las tasas de detección a nivel global. Además, se ha demostrado que más del 50% los rayos nube-tierra (CG) pueden tener distintos contactos con el suelo en distancias horizontales entre el primer sitio donde cayó el rayo y las subsecuentes descargas en un canal preexistente (Stall et al., 2009). También, se ha descrito que en el mecanismo de rayos ocurre el desvío ocasional del canal preexistente por el que descienden las descargas eléctricas hacia el suelo y el radio de búsqueda de dicho canal (Holle y Cooper, 2016).

Respecto al tema de ocurrencia de rayos y la vulnerabilidad ligada a ellos, la tasa de muerte per cápita es muy baja en países desarrollados por la disponibilidad de estructuras, vehículos seguros y menos labores intensas de agricultura, al contrario de lugares donde la gente trabaja y vive en situaciones no seguras contra rayos; además, la condición de vulnerabilidad es un catalizador para el desarrollo del peligro (Holle y Cooper, 2016).

En relación con lo anterior, Roeder y coautores (2015) mencionan que la subestimación del fenómeno recae en el problema inicial de no reportar los casos en su totalidad, debido a que aproximadamente el 90% de las muertes y lesiones son a una

sola persona, de tal modo que la tendencia indica menor reporte en aquellos eventos donde resultan múltiples damnificados.

Algo semejante sucede en la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA en www.lightningsafety.noaa.gov), donde sólo se registra el 70% de lesionados porque no se reportan las damnificaciones secundarias por rayos. Ejemplo de esto, son las casas incendiadas por impacto de rayo, clasificadas como incendio casero y no por caída de rayo nube-tierra (CG).

Es conveniente acotar que, la tasa de decesos en países desarrollados manifiesta 2 comportamientos desde la época de los 1900's. Los registros de la United States National Weather Service (USNWS) señalan que el porcentaje de población rural decreció del 60% en 1900 a menos del 20% al presente; esto contribuye a que la tasa de muertes disminuya, un ejemplo es la tasa de mortalidad de 32 personas al año por cada millón en el periodo 2000-2010 en los Estados Unidos. Esta disminución de tasa de mortalidad en países desarrollados se relaciona con el cambio de agricultura intensiva a otras actividades, a la mejora de viviendas con cableado y estructuras metálicas, al uso de vehículos con cubierta de metal y al avance en el sistema de salud e información meteorológica; condiciones que son muy distintas en lugares no desarrollados (Holle y Cooper, 2016).

Por su parte, diversos autores mencionan que las muertes por caída de rayos están directamente relacionadas con la densidad de rayos y la densidad de población (Gomes y Kadir, 2011), además de la superficie sobre la que sucede el fenómeno (Yi et al., 2014). Un ejemplo de esta tendencia de investigación es el mapa de *riesgo* de muerte por caída de rayos para Estados Unidos, desarrollado por Roeder et al. (2015). Un mapa donde se muestra la densidad de rayos para el periodo 2003-2012 con datos de National Lightning Detection Network TM (NLDN), la densidad de población del año 2000 y las muertes por rayo sucedidas en 47 años para correlación visual. Los autores consideran que el método puede ser empleado en países donde los registros de decesos son escasos y como apoyo en materia de seguridad.

Frecuentemente, se piensa que el impacto directo de un rayo es el único modo en que se producen daños y muertes; por el contrario, estudios recientes demuestran

con estadística la existencia de 6 mecanismos principales de lesiones y muertes por rayos (Holle y Cooper, 2016).

Estos mecanismos de lesiones se identifican como:

- 1. Corriente de tierra (40-50%), cuando el rayo golpea la superficie de la tierra y se esparce cerca de la gente y puede afectar a un gran número de personas.
 - 2. Descarga lateral (20-30%), cuando los árboles, torres y otros objetos no son necesariamente altos, una porción del rayo brinca a una persona cercana.
 - 3. Contacto (15-25%), estando en contacto con una línea conductual como la plomería o cableado fuera de casa o dentro de estructuras que pueden ser peligrosas cuando son golpeadas por un rayo nube-tierra.
 - 4. Línea ascendente o descarga ascendente (10-15%), cuando es conducida desde una persona y se eleva para encontrarse con la descarga descendente de la nube a la tierra.
 - 5. Golpe directo (3-5%), el mecanismo menos común.
6. Traumatismo cerrado, ocurre con o por separado de todos estos mecanismos cuando una persona es arrojada o cuando está demasiado cerca de donde cae el rayo (Blumenthal y West, 2015).

En otras líneas de investigación, los trabajos derivados del estudio de desastres en México han sido enfocados en la descripción de los fenómenos perturbadores y en evaluaciones de peligro de situaciones específicas; ejemplo de éstos son los realizados por Alcántara (2004), Arreygue (2002), Minjárez *et al.*, (2007); Minjárez *et al.*, (2008), entre otros.

En efecto, Dependencias Gubernamentales como SEDESOL, han impulsado la ejecución de estos tipos de estudios, mediante la implementación de sistemas de información geográfica porque facilitan la integración y modificación de bases de datos, imágenes, modelos digitales y permiten hacer proyecciones a futuro del evento de interés (Minjárez *et al.*, 2007).

CENAPRED, por su parte, se ha encargado del desarrollo de atlas de riesgo estatales (Minjárez *et al.*, 2008) y ha propuesto una serie de metodologías para aplicarse a distintos fenómenos (CENAPRED y SEGOB, 2014c, 2014a, 2014d, 2014b, 2016).

Dentro de este marco, existe un trabajo llamado Evaluación del Grado de Peligro por Tormentas Eléctricas, realizado por el Gobierno de México, vigente, que se puede consultar a través de la liga <https://datos.gob.mx/busca/dataset/centro-nacional-de-prevencion-de-desastres/resource/49b24111-2304-42a1-8b94-8d92a1483800>. El índice de peligro aquí mostrado se construyó por la ocurrencia de tormentas eléctricas, tomado de estaciones climatológicas a escala municipal y empleando el mapa del Nuevo Atlas de México (Vidal, 2007).

En esta perspectiva y de acuerdo a la Secretaría de Gobernación (Guía de Contenido Mínimo Para La Elaboración Del Atlas Nacional de Riesgos, 2016), en el Diario Oficial de la Federación (DOF) se manifiesta que, la construcción de los Atlas de Riesgos Nacionales, Estatales y Municipales se rigen por los criterios homogéneos estipulados para la formulación de dichos Atlas (términos de referencia, TR). Lo establecido en el DOF es con la finalidad de llevar a cabo la evaluación del riesgo por análisis de frecuencia de descargas eléctricas para identificar los daños causados por periodos de retorno e integrar los componentes mínimos que establece el Reglamento de la Ley General de Protección Civil, en su artículo 112.

Específicamente, en la Guía de Contenido Mínimo para la Elaboración del Atlas Nacional de Riesgos (2016), se identifica al peligro del fenómeno hidrometeorológico como el registro de tormentas y la probabilidad de ocurrencia. En este mismo documento, se aclara que, el riesgo lo define el análisis de las afectaciones, el costo del daño y la población potencialmente afectable; mientras que, la vulnerabilidad la traducen en daños producidos por el efecto del meteoro y la relación tormenta-daño causado en porcentaje por año.

En relación con la importancia que representa, Jiménez et al., (2012) para CENAPRED, en la elaboración de mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos explica que: *“debido a la alta exposición de la población en el país a este meteoro, como se verá más adelante, y a la falta de una metodología para conocer el peligro por tormentas eléctricas, se propone una metodología para calcular el índice de peligro por tormentas eléctricas”*. En este documento sus autores manifiestan que aún no se conoce el peligro derivado de este fenómeno.

En la construcción de dicho índice de peligro por tormenta eléctrica (a nivel municipal) se usaron datos de estaciones climatológicas de 1970 al 2002 y fue evaluado en función de 4 factores: 1. Asignar valor de isolínea más alta próximo al municipio; 2. Definición de intervalos de días de tormentas eléctricas; 3. Asignación de valores máximos-mínimos de días registrados con tormenta eléctrica y categoría por la ocurrencia; 4. Población expuesta.

Respecto al tema en cuestión, tanto en el portal oficial del Gobierno de México (www.gob.mx), como en los Atlas de Riesgos Nacional, Estatales y Municipales, expedidos y avalados por CENAPRED, no se muestra una metodología definida bibliográficamente y manifiestan la falta de conocimiento en cuanto al peligro que representan las tormentas eléctricas (CENAPRED y SEGOB, 2014b, 2014a, 2014d, 2014c, 2016; Jiménez et al., 2012). En su defecto, el material presentado resulta ser una evaluación del riesgo por análisis de frecuencia de descargas para identificar los daños con PR (periodo de retorno); es decir, a grandes rasgos los estudios podrían considerarse como una combinación entre peligro y riesgo.

En México, las muertes por caída de rayo son oficialmente registradas por personal médico capacitado a través de un certificado de defunción (INEGI, 2016), donde se indica la hora del fallecimiento, causa de muerte y demás información sobre el individuo.

En cuanto a la estimación de las tormentas, se han desarrollado métodos basados en GIS para la construcción de mapas de alta resolución de precipitación y temperatura media estacional (Agnew y Palutikof, 2000). También, se ha avanzado en el desarrollo de un módulo de GIS que integró distintos métodos de interpolación para facilitar la estimación de precipitación espacial automática por la lámina de agua (Zhang y Srinivasan, 2009).

En consecuencia, se ha comparado la ejecución de distintos métodos de interpolación evaluados por examinación de la precipitación estimada cartografiada y validación cruzada (Lloyd, 2005). La metodología de comparación de diversos métodos de interpolación puede aplicarse a estudios con una distribución espacial de escala más fina y con otras variables climáticas, incluso para la temperatura (Wang et al., 2014).

I.3. Área de estudio

El noroeste de México se caracteriza por la ocurrencia de precipitaciones intensas, derivadas del Monzón de Norteamérica (Gutzler et al., 2005) y la mayor frecuencia de las tormentas con gran producción de rayos sucede durante esta época del año (Murphy y Holle, 2005; Minjarez-Sosa et al., 2012; Minjarez-Sosa y Waissman, 2017).

Relativo a lo anterior, el área de estudio está definida en una porción del noroeste de México en base a la disposición de información y al diagrama esquemático de los dominios operativos del Experimento del Monzón de Norteamérica (North American Monsoon Experiment, NAME), dentro del primer cuadrante de esta regionalización y bajo la influencia del régimen de precipitaciones monzónicas (Gutzler et al., 2005); además, resulta evidente la frecuencia de las tormentas con gran producción de rayos durante esta época del año (Murphy y Holle, 2005; Minjarez-Sosa y Waissman, 2017; Minjarez-Sosa et al., 2012). Por estas razones, las coordenadas extremas del área de estudio son -109.800 W, 32.047 N; -102.095 W, 24.128 N; -106.140 W, 20.826 N; -113.370 W, 29.524 N (Figura 1).



Figura 1. Área de estudio.

I.4. Planteamiento del problema

En la actualidad, la poca experiencia en el análisis del desarrollo de la caída de rayos dificulta la capacidad de identificación del peligro que representa y de la estimación del daño causado. La subestimación de este fenómeno tiene lugar porque no se reporta el total de damnificados directos e indirectos y en múltiples ocasiones el suceso se clasifica como un fenómeno distinto, lo que beneficia las bajas tasas de mortalidad (Roeder et al., 2015).

Es un hecho que, de los eventos reportados, la tasa de mortalidad en países desarrollados ha disminuido por el cambio de actividades agrícolas a otro tipo de dinámicas, a la mejora de viviendas y condiciones más seguras, así como el acceso a la información (Holle y Cooper, 2016).

Por otro lado, se ha verificado que la incidencia de rayos por km² por día en el noroeste de México es comparable con la región más activa en los Estados Unidos (Murphy y Holle, 2005; Holle y Murphy, 2015).

En referencia a esa actividad, en México la cantidad de descargas eléctricas suceden en un tiempo más corto que las que ocurren en aquel País. Esto es importante e implica que el peligro, en otras palabras, la probabilidad de que se presenten rayos nube-tierra (CG) y se produzcan daños y/o lesiones asociadas, se multiplica durante los meses del Monzón de Norteamérica en el noroeste de México.

En relación con esta problemática y derivado del análisis realizado en la sección I.2. Antecedentes, es evidente que el fenómeno hidrometeorológico ha sido abordado desde distintas perspectivas. Desafortunadamente, el avance global reportado hasta el momento se enfoca en la regionalización y ocurrencia de rayos en relación con la producción de muertes (Vidal, 2007; CENAPRED y SEGOB, 2014b, 2014a, 2014d, 2014c, 2016; Raga et al., 2014; Roeder et al., 2015; Holle y Cooper, 2016).

En efecto, diversos trabajos representan un avance en el estudio de la distribución de muertes por caída de rayo (Raga et al., 2014; Roeder et al., 2015); sin embargo, éstos se restringen únicamente en identificar la estadística y ubicación de los decesos reportados durante un lapso, distinto de los periodos de las observaciones de rayos.

Esta correlación visual entre la ocurrencia de rayos y fallecimientos atribuidos a esta causa, dejan de lado variables que intervienen en el estudio del fenómeno mencionado, como la geolocalización de los rayos nube-tierra (CG), la densidad de población y superficie de afectación (Gomes y Kadir, 2011; Yi et al., 2014), las condiciones meteorológicas regionales y locales (Murphy y Holle, 2005; Minjarez-Sosa et al., 2012; Serra et al., 2016; Mushtaq et al., 2018), la configuración del terreno y la susceptibilidad de la población (Murphy y Holle, 2005; Holle y Cooper).

En este sentido, el problema que prevalece en torno al fenómeno de rayos es la falta de una metodología para conocer el peligro por tormentas eléctricas (Jiménez et al., 2012). En consecuencia, en esta tesis se propone una metodología de evaluación del peligro de caída de rayo a través de la obtención de mapas de índice de peligro, factor de riesgo y grado de susceptibilidad a caída de rayo; dicha evaluación permitirá descubrir y determinar las áreas más expuestas y propensas ante la ocurrencia del fenómeno.

Además, respecto al sitio de impacto de los rayos nube-tierra (CG), los 6 mecanismos descritos por Holle y Cooper (2016) obedecen a eventos que se refieren más al área de influencia y/o afectación, que al punto de caída del rayo en sí. Esta investigación abordará este problema no tomando sólo las cuentas discretas, se propone una distribución a cambio; de este modo se destaca la importancia del área de influencia donde el rayo nube-tierra (CG) hace contacto y su reconocimiento en la producción de muertes y daños.

1.5. Justificación

Uno de los principales objetivos de la ciencia básica es que ésta pueda ser aplicada para el beneficio de la sociedad y una de las premisas fundamentales de la política científica es la aplicación de la ciencia básica para tal efecto.

Si bien es cierto que, las investigaciones sobre el análisis de la ocurrencia de rayos y sus daños producidos han avanzado hacia en el análisis de la incidencia de rayos y estudios de vulnerabilidad, estas no abordan el peligro de caída de rayo.

Actualmente, en México no se tiene registro de la existencia de un mapa de peligro de caída de rayo ni de una metodología establecida para tal propósito (CENAPRED y SEGOB, 2014d, 2016; INEEL y Montoya Tena, 2020; Jiménez et al., 2012), a pesar de tratarse de una región con alta incidencia de rayos y evidentemente vulnerable al fenómeno, lo cual representa un área de oportunidad atractiva dentro del campo de la investigación del mismo.

En función de lo planteado, realizar una evaluación del peligro de caída de rayo permitirá determinar las áreas más expuestas y propensas ante su ocurrencia; como se

mencionó en el apartado anterior. El objetivo de dicha evaluación es aportar al conocimiento del estudio del fenómeno y disminuir-prevenir pérdidas humanas y económicas.

Otra aportación destacable de este trabajo es la definición de las variables asociadas a la ocurrencia de decesos y/o daños por esta causa. Asimismo, derivado de esta investigación, se integrará un sistema de información geográfica que puede emplearse para proveer a los organismos tomadores de decisión la información necesaria para protección civil, políticas de construcción, rutas de aviación, incluso prevención de incendios forestales, en todos los niveles de gobierno.

En resumen, la evaluación del peligro de caída de rayo en el noroeste de México estará compuesta de tres principales directrices, con la finalidad de abordar tanto los elementos establecidos y recomendados por los autores consultados, así como los propuestos por esta investigación. En primer lugar en este estudio se espera disminuir la ambigüedad en el uso de los términos peligro y riesgo (CENAPRED y SEGOB, 2014b; Jiménez et al., 2012; Raga et al., 2014; Roeder et al., 2015). En segundo lugar, se obtendrá la distribución y densidad de los rayos nube-tierra (CG) y decesos. En tercer lugar, se integrará un sistema de información geográfica y se generarán mapas de indicador de vulnerabilidad social con un enfoque para este tema, índice de peligro, factor de riesgo y grado de susceptibilidad en el área bajo estudio.

I.6. Hipótesis

Se pueden obtener las variables asociadas a los decesos por rayo con análisis de componentes principales (ACP) y evaluar el peligro de caída de rayo por interpolación espacial en el noroeste de México.

I.7. Objetivos de la investigación

Objetivo general

- Evaluar el peligro de caída de rayo utilizando métodos de estadística espacial para definir las variables asociadas en los decesos ocurridos por esta causa en el noroeste de México.

Objetivos específicos

- Crear un SIG con la evaluación del peligro de caída de rayo en el noroeste de México.
- Definir distribución y densidad de rayos nube-tierra (CG) y decesos en el área de estudio.
- Identificar el comportamiento de la incidencia de rayos respecto a la ocurrencia de decesos.
- Definir las variables relacionadas con los decesos por caída de rayo.
- Definir un indicador de vulnerabilidad social con enfoque de caída de rayo.
- Obtener el índice de peligro y el factor de riesgo a caída de rayo.
- Obtener el grado de susceptibilidad a caída de rayo.
- Crear una metodología para evaluación del peligro de caída de rayo.

I.8. Preguntas de la investigación

- ¿Se puede evaluar el peligro de caída de rayo aplicando métodos de estadística espacial en la región en cuestión?
- ¿Se puede utilizar el análisis de componentes principales para definir las variables relacionadas con los decesos por caída de rayo?
- ¿Es posible obtener un indicador de vulnerabilidad social con enfoque de caída de rayo?

II. MARCO TEÓRICO

II.1. Definiciones importantes

En las investigaciones de caída de rayo se revelan las condiciones de vulnerabilidad, las distribuciones espaciales de los rayos y las tasas de mortalidad a través de sus derivadas afectaciones (Holle y Cooper, 2016; Murphy y Holle, 2005; Raga et al., 2014; Roeder et al., 2015).

Un punto en común en todas estas investigaciones es el empleo de los términos peligro y riesgo, que hasta cierto punto muestran un deje de ambigüedad al lector; también, se acostumbra a incluir secciones que describen la vulnerabilidad de la comunidad.

Por ello y para efectos de esta investigación, se considera una característica indispensable definir los conceptos para obtener una comprensión más clara del estudio realizado.

En este sentido, se entiende por peligro a la probabilidad de ocurrencia de fenómenos potencialmente desastrosos dentro de un periodo específico en un área determinada (Varnes, 1984); también, se reconoce como una amenaza latente asociada con un fenómeno físico (natural o tecnológico), que puede presentarse en sitio y tiempo específicos (Martínez Haros, 2014).

El riesgo por su parte, involucra el análisis de las afectaciones, los costos del daño causado y la población potencialmente afectable (CENAPRED y SEGOB, 2014b; Jiménez et al., 2012) y está directamente relacionado con las condiciones sociales, físicas, económicas y ambientales de la población que enfrenta este fenómeno hidrometeorológico, es decir su vulnerabilidad (CENAPRED y SEGOB, 2014d, 2014c, 2014b; Holle y Cooper, 2016; Raga et al., 2014).

Además, a la debilidad o grado de exposición de una comunidad, objeto o sistema, debido a la incapacidad de resistencia ante un fenómeno devastador, se le conoce como vulnerabilidad y está ligada al nivel de preparación y protección ante el fenómeno hidrometeorológico (Martínez Haros, 2014).

Entonces, si se conceptualiza al rayo como una amenaza latente asociada a las tormentas eléctricas, se habla de la estimación del peligro a la caída de rayo a través de

su probabilidad de ocurrencia y se reconocen a las condiciones con las que cuenta la comunidad para hacerle frente o resistencia al fenómeno como vulnerabilidad.

II.2. La estadística multivariada y el análisis de componentes principales

La estadística multivariada es una herramienta viable para realizar el análisis de un vasto conjunto de datos, como lo es el análisis de descargas eléctricas nube-tierra, para lograr una organización y búsqueda de relación entre las lecturas a una forma más sencilla de digerir tal cantidad de volumen (González García y Tabora Londoño, 2015).

Los análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés, Principal Component Analysis) son parte de la estadística multivariada e implica una técnica de reducción dimensional de los datos originales en un subconjunto de variables, conocidas como componentes principales para poder observar el comportamiento de los datos, manteniendo calidad y acceso a éstos (de la Fuente, 2011; González García y Tabora Londoño, 2015; Montanero Fernández, 2019; Plazas-Nossa et al., 2017).

Otras técnicas de la estadística multivariada son el análisis multivariable de varianza (MANOVA), regresión múltiple, análisis factorial (ejes principales), análisis discriminante, análisis de grupos (cluster analysis), escalamiento multidimensional, modelos causales (path analysis) (Plazas-Nossa et al., 2017).

La estadística multivariada implica la observación y análisis de más de una variable al mismo tiempo y su aplicación se denomina análisis multivariado; cuya base es la correlación de dichas variables. Estas variables contienen a los datos u observaciones y a través de éstas se describe e infiere el comportamiento de los valores en sitios donde no se tiene registro, a partir de los que sí se tiene.

Respecto al número de variables, es importante reducir su número para tener menor variabilidad; en otras palabras, más información se relacionará con una mayor variabilidad.

En términos sencillos, el análisis de componentes principales (PCA) puede definirse como una técnica de extracción de características, implementada como etapa de preprocesamiento o reducción de la dimensión de matrices de datos (González García y Tabora Londoño, 2015).

El análisis de componentes principales es una técnica estadística usada para reducir la dimensionalidad de un conjunto de variables en el análisis exploratorio de datos (Kottegoda y Rosso, 2008). Es decir, determina un conjunto de variables m que permiten explicar n variables, al minimizar el error de reconstrucción bajo las restricciones de reconstrucción lineal y factores ortogonales, mientras que maximiza la varianza de las variables originales.

Un ejemplo de lo anterior es un diagrama de dispersión entre 2 variables (X e Y), con una relación de tipo lineal y de proporcionalidad directa (Figura 2), donde se definen 2 nuevos ejes para representar los datos (líneas continua y discontinua).

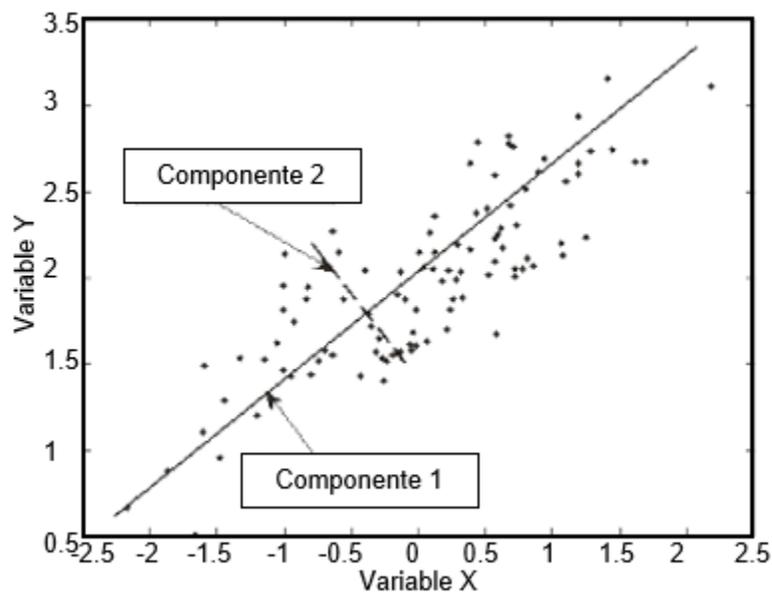


Figura 2. Explicación gráfica de PCA. Fuente: Moreno-Sánchez y García-Cabrejo, 2003.

De la figura mostrada, se entiende la existencia de un eje que representa una mayor variación de los datos (línea continua o componente 1) y otro eje de variación menor que el anterior (línea discontinua o componente 2), (Moreno-Sánchez y García-Cabrejo, 2003).

La dirección de los nuevos ejes, llamados componentes, sobre los que se proyectará la información, correspondería a los vectores propios y la extensión de éstos

estaría dada por los respectivos valores propios (García-Cabrejo y Moreno-Sánchez, 2006).

II.3. Métodos de interpolación espacial

Muchas de las variables en el espacio se conocen con puntos de muestreo y con ellas se pretende predecir valores en zonas no muestreadas (Burrough y McDonnell, 1998). Es probable que los valores de puntos cercanos sean más equivalentes entre éstos, que con valores de puntos más lejanos; por ende, la interpolación espacial se centra en el análisis y simulación de una muestra de datos, así como su comportamiento en el espacio e influencia en otros puntos (Gomariz-Castillo, 2013).

La interpolación espacial de datos es una parte de la geoestadística que se basa en el cálculo de los valores desconocidos de una variable espacial a partir de otros valores cuyo valor es conocido. Este cálculo es uno de los principales análisis geoestadísticos que se llevan a cabo cuando se trabaja con datos espaciales y modelos predictivos.

Los métodos de interpolación se clasifican en determinísticos y geoestadísticos. Entre los primeros se encuentran IDW (Inverse Distance Weighting, Ponderación Inversa a la Distancia), GPI (Global Polynomial Interpolation, Interpolación Polinomial Global), LPI (Local Polynomial Interpolation, Interpolación Polinomial Local) y RBF (Radial Basis Function, Función de Base Radial), que crean superficies continuas a partir de puntos medidos aprovechando fórmulas matemáticas que determinan el grado de similitud o el grado de suavizado.

Los métodos geoestadísticos, como el OK (Ordinary Kriging, Kriging Ordinario) y UK (Universal Kriging, Kriging Universal), utilizan modelos estadísticos que cuantifican la autocorrelación espacial y las relaciones estadísticas entre los puntos medidos (Johnston et al., 2001).

En referencia a lo anterior, algunas investigaciones han sido conducidas comparando distintos métodos de interpolación en una variedad de situaciones y las técnicas de interpolación basadas en Sistemas de Información Geográfica (Geographic Information System, GIS, por sus siglas en inglés) han sido reconocidas como una poderosa herramienta para crear superficies de puntos medidos (Wang et al., 2014).

Las técnicas de interpolación espacial son esenciales para crear una superficie continua o predicción a partir de una nube de valores de muestra y una variedad de ellas han sido estudiadas utilizando variables para cartografía climática (Atorre et al., 2007; Candiani et al., 2013; Eldrandaly y Abu-Zaid, 2011; Hiemstra et al., 2010; Hijmans et al., 2005; Price et al., 2000; Vicente-Serrano et al., 2003; Yan et al., 2005).

II.3.1. Kriging/Cokriging

Dentro de los métodos geoestadísticos basados en modelos que incluyen autocorrelación se encuentra Kriging. Este método busca las relaciones estadísticas entre los puntos medidos, produce superficies de predicción y proporciona una medida de certeza o precisión de las predicciones Matheron (1965, 1971).

En Kriging se presupone que la distancia o la dirección entre los puntos reflejan una correlación espacial para explicar la variación en la superficie. En este caso ajusta una función matemática a dichos puntos de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. En el método Kriging se puede realizar un análisis exploratorio de los datos, modelado de semivariogramas, creación de superficie y exploración de la superficie de varianza. Además, se utiliza cuando existe una influencia direccional o de la distancia (correlacionada espacialmente) en los datos. También se usa en edafología, geología, minería, climatología, precipitaciones, etc.

El semivariograma muestra la degradación de la correlación espacial entre dos puntos cuanto aumenta la distancia entre ellos y se define como en la ecuación 1:

$$\gamma(S_i, S_j) = 1/2 \text{ var}(Z(S_i) - Z(S_j)) \quad (1)$$

Donde var es la varianza.

Si dos ubicaciones, S_i y S_j , están a una distancia cercana de $d(S_i, S_j)$, se espera que sean similares, por lo que la diferencia en sus valores, $Z(S_i) - Z(S_j)$, será pequeña. A medida que, S_i y S_j se alejan, son menos similares y la diferencia en sus valores, $Z(S_i) - Z(S_j)$, es mayor.

El semivariograma representa la autocorrelación espacial de los puntos de muestra medidos; de tal manera que, las ubicaciones de muestra separadas por

distancias más cortas que el rango (distancia a la que el modelo comienza a aplanarse) están autocorrelacionadas espacialmente, mientras que aquellas ubicaciones mayores al rango no lo están. El umbral corresponde a la altura que alcanza el semivariograma al nivelarse y a su vez está compuesto por la discontinuidad en el origen (pepita) y el umbral parcial (Figura 3). El efecto pepita representa la variación de los datos cuando están a distancia nula y lo integran la suma del error de medición y la variación de microescala.

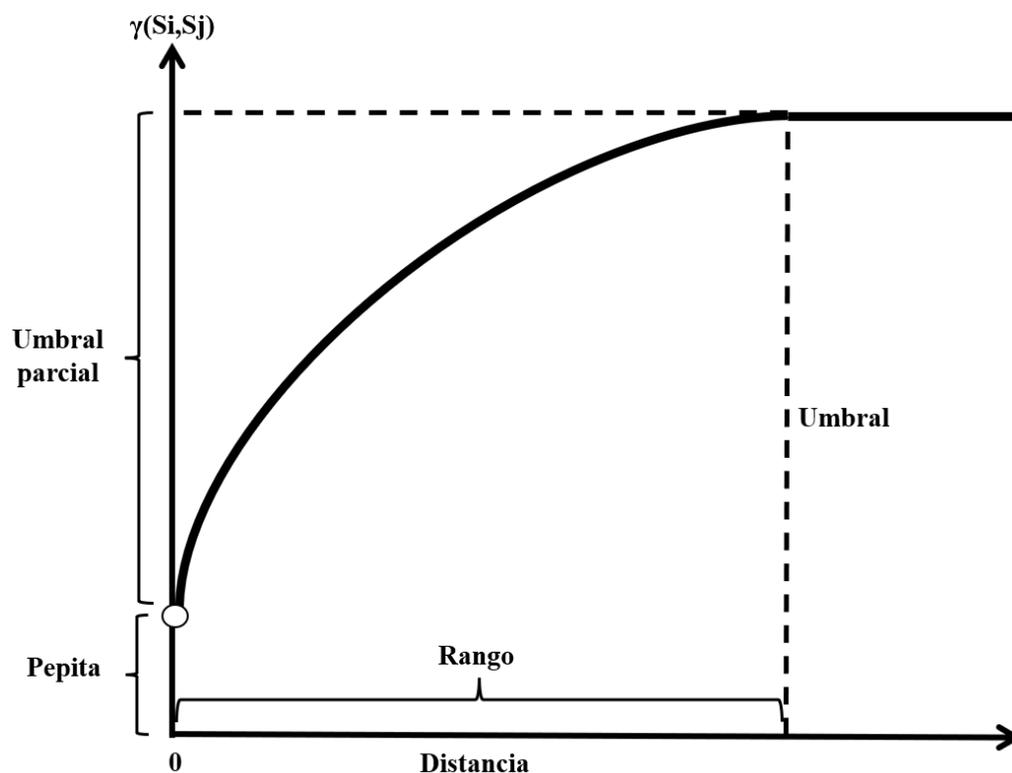


Figura 3. Semivariograma típico. Fuente: modificado de Cañada, 2004.

Similar a otros métodos de interpolación, Kriging pondera los valores medidos circundantes o geoespacialmente relacionados para calcular una predicción de una ubicación donde no se tiene valor o registro de medición (Oliver y Webster, 1990). Principalmente se aplica en la predicción de los valores de atributo en las ubicaciones que no fueron muestreadas; la elección del modelo a utilizar depende de la autocorrelación espacial de los datos y el conocimiento del fenómeno.

A diferencia del IDW que utiliza un algoritmo simple basado en la distancia, las ponderaciones provienen de un semivariograma, producto de las observaciones de la naturaleza espacial de los datos de entrada. Básicamente para crear una superficie continua del fenómeno, se hacen predicciones para el centro de cada celda de ubicación, basadas en el semivariograma y la disposición espacial de los valores medidos cercanos. La fórmula general es una suma ponderada de los datos en la ecuación 2:

$$\hat{z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (2)$$

donde:

$Z(S_i)$ = el valor medido en la ubicación n.º i

λ_i = un peso desconocido para el valor medido en la ubicación n.º i

s_0 = la ubicación de la predicción

N = el número de valores medidos

Las ponderaciones no sólo se basan en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de los puntos medidos; por ello la correlación espacial debe estar cuantificada.

En el caso de los métodos donde se utilice información sobre varios tipos de variables, que son espacialmente interdependientes y aquellos valores que no se desean estimar no se muestrean tan intensamente como las otras con las que está correlacionada, se tienen a los CoKriging. En Myers (1982), McBratney y Webster (1986), Vauclin et al., (1983) y Leenaers et al., (1989) se encuentra la descripción del método y ejemplos. En este grupo de métodos la principal variable de interés es Z1, y tanto su autocorrelación como las correlaciones cruzadas entre Z1 y los otros tipos de variables se emplean para hacer mejores predicciones. Al incluir más variables con valores, CoKriging requiere más estimación, la implicada en la estimación de la autocorrelación para cada variable y las correlaciones cruzadas. El inconveniente es el aumento de la variabilidad con la estimación de parámetros de autocorrelación desconocidos (www.esri.com; 2021).

Dentro de los métodos CoKriging, el CoKriging de Indicadores puede implementar varios umbrales (uno por cada conjunto de datos) y después usar los datos binarios en cada umbral para predecir el umbral de interés principal. Es similar a la versión de Probabilidad, pero puede ser menos sensible a los valores atípicos y otros datos erráticos (www.esri.com; 2021).

La autocorrelación es expresada por semivariogramas o covarianzas y la correlación cruzada por la covarianza cruzada. El CoKriging de Indicadores asume la expresión 3:

$$I(s) = \mu + \varepsilon(s) \quad (3)$$

donde μ es una constante desconocida y $I(\mathbf{s})$ es una variable binaria.

La creación de datos binarios puede ser mediante el uso de un umbral para datos continuos o puede ser que los datos observados sean 0 ó 1. Por ejemplo, en el caso que nos ocupa, la información puede pertenecer a una clase (No hay rayo o Sí hay rayo), donde la variable binaria indica pertenencia a una clase.

En la Figura 4, los datos han sido convertidos a valores binarios utilizando un umbral.

Los datos binarios observados están dados por los cuadrados abiertos, mientras que la media desconocida para todas las variables indicadoras está dada por la discontinuidad (μ), y también se asume que $\varepsilon(\mathbf{s})$ está autocorrelacionado.

Al ser las variables indicadoras 0 y 1 (es decir, pertenencia o no pertenencia a una clase), las interpolaciones estarán entre 0 y 1, entonces las predicciones del CoKriging Indicador pueden interpretarse como probabilidades de que la variable sea 1 o pertenezca a la clase indicada por 1. Si se establece un umbral que permita crear una variable indicadora, el mapa resultante mostrará, por método de interpolación, las probabilidades a exceder (o por debajo) del mencionado umbral.

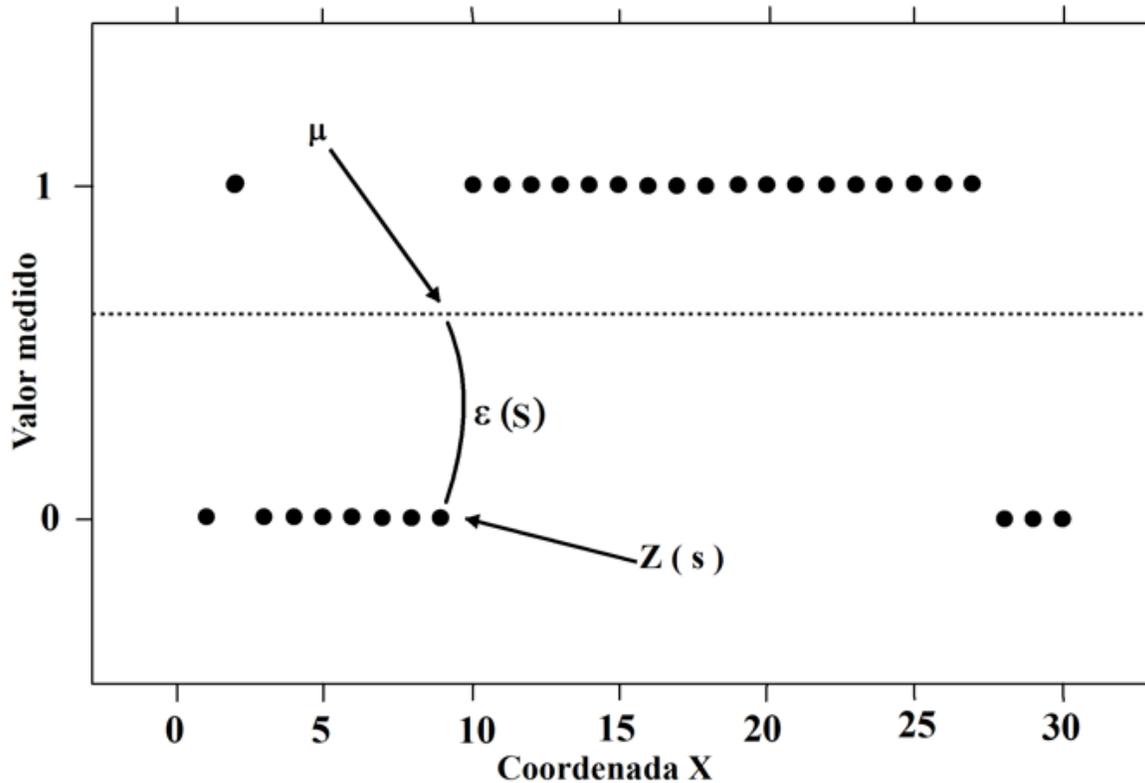


Figura 4. Representación de umbral. Fuente: modificado de esri.com, 2021.

Asimismo, para un conjunto de datos es viable crear múltiples variables indicadoras al escoger múltiples umbrales. En CoKriging un umbral crea la variable indicadora principal y las otras variables indicadoras se convierten en variables secundarias; en rayos, la variable principal es “Sí hay rayo”, dado por exceder el umbral de 0.

En resumen, CoKriging indicador puede ser útil para obtener una correlación entre variables, especialmente con la selección de distintos umbrales para cada una de dichas variables y así conocer la distribución espacial de la correlación; además, no requiere el ajuste de los datos a una distribución particular y los valores de dichos datos se convierten en 0's y 1's, en correspondencia o pertenencia a una clase dada, esto gráficamente se percibe si se encuentran por debajo o por encima del umbral establecido.

II.3.2. Superposición ponderada

Una técnica popular incluida en el enfoque de evaluación multicriterio es el análisis de la superposición ponderada (Weighted Overlay), donde se aplica la selección del sitio y los modelos de idoneidad para resolver dichos problemas multicriterio (Mayfield, 2016). El análisis de superposición es una técnica que aplica una escala común de valores a distintas capas de entrada para crear un análisis integrado.

Los modelos de idoneidad identifican las ubicaciones más viables donde puede suceder un fenómeno específico; como parte de la planeación del uso de tierra sustentable, suelen crearse evaluaciones que emplean metodologías de decisión multicriterio para asegurar que tanto los factores ambientales y socioeconómicos sean considerados en la evaluación final (Carver, 1991).

Otros ejemplos donde es recurrente el uso de la superposición ponderada son en la identificación de las mejores áreas para la localización de nuevas viviendas o el crecimiento económico de una región, en la definición de las zonas más aptas para el hábitat de una especie animal (KianiSadr et al., 2019) y de aquellas más susceptibles ante la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, como lo son los deslizamientos de tierra (Basharat et al., 2016; Shit et al., 2016); entre muchos otros (Abdekareem et al., 2022; Atak et al., 2019; Awanda et al., 2017; Chaudhari et al., 2018; Karimzadeh y Matsuoka, 2018; Nowreen et al., 2021; Pani et al., 2016).

Este tipo de clasificación suele utilizarse para uso y tipo de suelo en ráster de tipo entero. Reclasifica los valores de archivos con formato ráster en una escala de evaluación común, riesgo o alguna escala unificadora similar; los valores de cada píxel son multiplicados por el peso de importancia dado y con los valores resultantes produce un ráster de salida (Collins, Steiner y Rushman, 2001).

Con la superposición ponderada es posible ubicar áreas adecuadas por el modelado de idoneidad y los valores más altos indican que dicha posición es la más adecuada o congruente donde se relacionan las variables superpuestas (Chingombe et al. 2015).

La herramienta de superposición ponderada escala los datos de entrada a una escala definida, pondera los rásteres de entrada y los suma. Las ubicaciones más favorables para cada criterio de entrada se reclasificarán a los valores más altos

(Mayfield, 2016). Los pesos asignados a los rásteres de entrada deben ser iguales al 100 %, las capas se multiplican por el multiplicador adecuado y para cada píxel, los valores resultantes se suman. La superposición ponderada asume que los factores más favorables dan como resultado valores más altos en el ráster de salida, por lo que identifica estas ubicaciones como las mejores.

III. METODOLOGÍA

En esta investigación se propone una evaluación del peligro de caída de rayo y encontrar las variables asociadas a los decesos atribuidos a esta causa en el noroeste de México (Figura 1). El área de estudio se acotó a su límite definitivo después de llevar a cabo un análisis exploratorio de la variación de las condiciones meteorológicas, densidad poblacional, grado de desarrollo social y topografía en el País.

Propiamente dicho, evaluar el peligro de caída de rayo significa analizar la distribución de la ocurrencia y densidad de rayos nube-tierra (CG), ubicar los decesos con esta causa de muerte, identificar los posibles habitantes afectados, definir las variables asociadas a los decesos ocurridos, determinar la condición de vulnerabilidad social centrada en el fenómeno y estudiar una factible correlación de éstos con el aspecto fisiográfico, para finalmente delimitar las zonas geográficas más susceptibles al peligro de caída de rayo en el noroeste de México.

La distribución espacio-temporal de los rayos nube-tierra (CG) se registra por los sitios de impacto en el suelo por medio de las coordenadas, latitud y longitud, así como por el tiempo en el cual la red de detección reporta que ocurrió el impacto; en otras palabras, se tiene una serie de puntos distribuidos en una superficie que representan la localización del impacto del rayo nube-tierra (CG). El hecho de mostrar el impacto del rayo nube-tierra (CG) por una coordenada única, desestima el área alrededor de dicho punto de impacto.

Esta forma de registro, hasta cierto punto discreta, no refleja ni representa el peligro de muerte o daño alrededor del sitio de impacto de los rayos nube-tierra (CG). Es importante recordar que no sólo el impacto directo produce muertes y lesiones, también las corrientes de tierra, las descargas laterales, por contacto y las corrientes ascendentes, entre otros (Holle y Cooper, 2016). También, llama la atención el hecho de que, las tormentas eléctricas con rayos poco frecuentes crean la ilusión de una amenaza disminuida (Hodanish, 2012).

Es por lo anterior que, en este trabajo se propone retomar la idea de Minjarez-Sosa y co-autores (2012), donde en lugar de representar cada rayo como un punto único, se utiliza una distribución gaussiana que representa mejor el área de afectación de la caída de un rayo nube-tierra (CG). Esta metodología coincide con Stall et al. (2009),

la cual demuestra que los rayos pueden tener distintos puntos de contacto con el suelo en distancias horizontales entre la primera descarga y las subsecuentes en un canal preexistente; por lo que, en esta evaluación de peligro de caída de rayo se considera que un rayo nube-tierra (CG) es peligroso hasta 2 km de distancia a partir del sitio de impacto, de acuerdo con el desvío ocasional del canal preexistente de las descargas subsecuentes y el radio de búsqueda dentro del mecanismo de rayos descrito por Holle y Cooper (2016).

En referencia a la exploración de métodos viables que pueden emplearse en la evaluación del peligro de caída de rayo, la estadística multivariada, a través de los componentes principales y diversos métodos de interpolación, ha sido empleada para el manejo de grandes cantidades de datos por su accesibilidad en la visualización global y utilidad en la inferencia de datos donde no se tiene registro.

En este sentido, realizar un análisis de componentes principales (PCA) permite comparar la vulnerabilidad social respecto a la incidencia de rayos, la época del año asociado al régimen de lluvia y/o temporada de lluvias, a la edad, ocupación, el género y el tipo de población. Con estos resultados se obtienen las variables que determinan en mayor proporción la ocurrencia de muertes por caída de rayo en el área de estudio.

III.1. Descripción de los datos

La información que sustenta esta investigación en la evaluación del peligro de caída de rayo está organizada en dos bloques principales, denominados datos poblacionales y base cartográfica.

Los formatos de los datos de entrada son bases en estado crudo, vectorial y ráster, obtenidos de la Dirección General de Información en Salud (DGIS et al., 2020) a través de la Secretaría de Salud y elaborada con información del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Vaisala Inc., el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2011), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2010; 2014) y el Consejo Nacional de Población CONAPO 2010 (Tabla 1).

Tabla 1. Datos de entrada y disponibilidad.

	DATOS DE ENTRADA		DISPONIBILIDAD
DATOS POBLACIONALES	Muertes por caída de rayos* (1) GLD360 descargas eléctricas ene2015-dic2019* (2) Población por localidad**(3) Grado vulnerabilidad social por municipio, 2010** (4) Grado de rezago social por municipio, 2010** (5) Grado de marginación social municipal, 2010** (6) Índice de desarrollo humano**(7) Índice de marginación**(7)	FUENTES	(1) DGIS, SSA, INEGI, 2020 (2) Vaisala Inc., 2020 (3) INEGI, 2021 (4) CENAPRED, 2011 (5) CONABIO, 2014 (6) CONABIO, 2010 (7) CONAPO, 2010 (8) Aster GDEM v2 Worldwide Elevation Data (1arc-second resolution), 2011 (9) INEGI, 2019 (10) World Imagery TIFF (Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN y Comunidad de Usuarios GIS, 2017); Datum WGS84, x=100m y=100m (11) Propia
BASE CARTOGRÁFICA	Curvas de nivel 50 m** (8) División política municipal** (3) División política estatal** (3) Localidades de la República Mexicana**(9) Red nacional de caminos**(9) Imagen satelital*** (10) Límite del área de estudio**(11)	TIPO DE DATOS	Base de datos crudos* Vector** Raster***

III.1.1. Datos poblacionales

Este apartado lo conforman las bases de datos en estado crudo, que corresponden a las muertes por caída de rayo y a las descargas eléctricas de GLD360; esta última contiene los rayos intranube (IC) y los rayos nube-tierra (CG) (Vaisala Inc., 2020). En cuanto a los conjuntos de datos en archivos tipo vector, consisten en la población por localidad, grado de vulnerabilidad social por municipio, grado de rezago social por municipio, grado de marginación social municipal, índice de desarrollo humano e índice de marginación.

Se recibió la base de datos de decesos a escala nacional con folio [0001200450120](#) a través de la Unidad de Transparencia de la Secretaría de Salud, de la cual se extrajo solamente el periodo 2015-2019. Resultó que, de un total de 3,514,876 decesos ocurridos en este intervalo de tiempo, 359 casos coinciden en que la causa de muerte es atribuible a la caída de rayo en México.

En coincidencia temporal con los anteriores, el registro de rayos comprende del 1º de enero del año 2015 al 31 de diciembre del 2019 y un dominio espacial de gran parte del territorio nacional, aproximadamente 1, 661, 645.02 km². Esta base de datos de rayos contiene fecha (columna 1), hora (columna 2), latitud (columna 3), longitud (columna 4) y corriente pico (columna 5) o máximo de corriente que transmitió el rayo durante la descarga (Figura 5).

El amplio registro de dichas descargas eléctricas y la capacidad de los sensores GLD360 de detectar rayos sobre el continente y el océano (Vaisala Inc., 2020), permite muestrear regiones con diferentes climatologías, densidades poblacionales y grados de desarrollo social; por lo que, este análisis representa una base de datos única e ideal para realizar este estudio en nuestro País.

Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Corriente Pico (A)
2015-01-01	17:49:38.026770247	26.0778	-109.9338	-31.7
2015-01-01	17:49:38.082890357	26.0825	-109.8886	-19.9
2015-01-01	17:49:38.116536534	26.0921	-109.9014	-5.0
2015-01-01	17:49:38.187316965	26.0828	-109.9644	-9.3
2015-01-01	20:17:30.876020136	26.7110	-109.2636	+234.0
2015-01-01	20:17:30.940847670	26.7070	-109.3031	-21.1
2015-01-01	20:47:19.298176370	27.4011	-105.6559	-23.9
2015-01-01	21:33:07.785496676	26.6388	-109.2484	-96.8
2015-01-01	21:46:41.199108355	26.8119	-109.2737	-74.7
2015-01-01	21:46:41.203779664	26.8500	-108.9944	-60.4
2015-01-01	21:46:41.222068959	26.8525	-108.9716	-30.8
2015-01-01	21:46:41.239300563	26.8406	-108.9666	-6.1
2015-01-01	21:46:41.274850235	26.9491	-108.9048	+13.2
2015-01-01	21:46:41.547757060	26.8793	-108.9649	-39.4
2015-01-01	21:46:41.599950585	26.9904	-108.9421	-12.9
2015-01-01	22:29:14.431451531	26.6844	-108.7846	-46.4
2015-01-01	22:29:14.437991446	26.6129	-108.5417	-58.9
2015-01-01	22:29:14.460487646	26.6389	-108.5113	-13.5
2015-01-01	22:29:14.532889555	26.5482	-108.5614	-11.4
2015-01-01	23:06:56.530007834	26.6301	-107.9986	+25.8
2015-01-01	23:06:57.018399353	26.6570	-107.9973	+3.6
2015-01-01	23:13:56.095230152	26.7090	-107.9289	+4.8
2015-01-01	23:13:56.339952008	26.7060	-107.9091	-11.8
2015-01-01	23:13:56.580195032	26.6944	-107.9237	-24.4
2015-01-01	23:23:18.729612305	26.6727	-107.9407	-18.1
2015-01-01	23:25:21.390717734	26.7277	-107.8725	-18.1
2015-01-01	23:34:03.409580601	26.7240	-108.9556	-219.2
2015-01-01	23:34:03.429353487	26.7099	-109.0663	-25.8
2015-01-01	23:34:03.455039795	26.6843	-109.0723	-29.3
2015-01-01	23:34:03.467069576	26.6998	-109.0429	-3.4
2015-01-01	23:34:03.488308968	26.6998	-109.0779	-24.7
2015-01-01	23:34:03.578966788	26.7162	-109.0593	-24.7
2015-01-01	23:44:54.053530788	26.8096	-108.8963	+29.0
2015-01-01	23:44:54.191269505	26.8027	-108.9826	-23.3
2015-01-01	23:47:08.548744945	26.7963	-108.9151	+18.4
2015-01-01	23:47:08.597490606	26.7455	-108.9081	-36.8
2015-01-02	00:17:15.258793618	26.6575	-108.1996	-25.4
2015-01-02	00:32:37.330237189	27.2266	-107.0948	+39.7
2015-01-02	00:32:37.346650771	27.2018	-107.0550	+5.4
2015-01-02	00:32:37.361704938	27.2412	-107.0459	+4.0
2015-01-02	00:32:37.420411370	27.1921	-107.0954	+50.8
2015-01-02	00:32:37.451817661	27.2034	-107.0822	-5.1
2015-01-02	00:36:30.367896989	27.1980	-107.0176	+14.0
2015-01-02	00:36:30.384226371	27.2058	-107.0396	+3.6
2015-01-02	00:40:33.738568849	27.2688	-106.9907	+20.9
2015-01-02	00:40:33.763814606	27.2320	-106.9779	+15.8
2015-01-02	00:45:57.565286039	27.3009	-106.8864	+5.0
2015-01-02	00:45:57.732222230	27.3018	-106.8370	+1.5
2015-01-02	00:47:46.716766594	27.3004	-106.8144	+3.2

Figura 5. Fragmento de descargas eléctricas GLD360. Fuente: Vaisala Inc., 2020.

Los rayos están contenidos en un sistema de localización de rayos (Lightning Location System, LLS) con sensores de banda ancha que detectan descargas eléctricas en el rango de muy bajas frecuencias (VLF; 3-30 kHz) en todo el mundo, tanto en superficie continental como en el océano, denominado Red Global de Detección de Rayos (Global Lightning Detection, GLD360) (Said et al., 2010, 2016, 2017).

En contexto, Said y Murphy (2016) validaron la eficiencia de detección relativa de los sensores GLD360 en un 75-85% aproximadamente, de todos los rayos nube-tierra (CG), en comparación con los datos recopilados por la National Lightning Detection Network TM (NLDN); mientras que, en los rayos intranube (IC) la eficiencia de detección relativa fue calculada en un 40-50%. En cuanto a la precisión de localización media, descubrieron que oscila entre 2.4 y 1.8 km en los rayos nube-tierra (CG) sobre el territorio de los Estados Unidos.

En el caso de los conjuntos de datos en archivos tipo vector, la población por localidad (INEGI, 2021) se consiguió a través del Sistema Nacional de Información sobre la Biodiversidad (SNIB), Portal de Geoinformación 2020.

La obtención de la vulnerabilidad se contempló en dos opciones; la primera, conformada por el grado de vulnerabilidad social por municipio (CENAPRED, 2011), grado de rezago social por municipio (CONABIO, 2014) y grado de marginación social municipal (CONABIO, 2010) del mencionado portal del SNIB y la segunda, por el índice de desarrollo humano y el índice de marginación del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2010).

III.1.2. Base cartográfica

La base cartográfica de esta investigación está compuesta de archivos de tipo vector y ráster, como las curvas de nivel, el Modelo Digital de Elevación, MDE o DEM (por sus siglas en inglés, Digital Elevation Model), la pendiente, la dirección de ladera, la base geopolítica, las vías de comunicación y la imagen satelital en el área de estudio.

Modelo Digital de Elevación (MDE)

El MDE y las curvas de nivel fueron obtenidas del ASTER GDEM v2 Worldwide Elevation Data, con una resolución de 1 arcosegundo (NASA Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos y METI Ministerio de Economía, 2011).

ASTER GDEM v2 reúne un conjunto de datos generados a partir de 1.5 millones de escenas adquiridas entre 2000 y 2010, cubre las superficies terrestres entre 83°

norte y 83° sur con una resolución espacial de un arco segundo, lo que significa aproximadamente 30 m, y una cobertura de alrededor del 99% del área continental de la Tierra (NASA Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos y METI Ministerio de Economía, 2011).

En resumen, el MDE con una resolución espacial a 30 m y las curvas de nivel con isovalores a cada 50 metros fueron obtenidos al límite del área de estudio. Ambos se incluyen en el Sistema de Información Geográfica (Figura 6).

Pendiente del terreno

En esta evaluación del peligro de caída de rayo, una variable de análisis es la fisiografía para descubrir una posible influencia topográfica en el tema, a través de la pendiente general del terreno y la dirección de ladera de los lomeríos y montañas presentes en el área de estudio.

Con la utilidad de ArcMap 10.8.1, el archivo del Modelo Digital de Elevación (NASA Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos y METI Ministerio de Economía, 2011), fue modificado de formato ASCII a ráster para posteriormente generar las pendientes generales del terreno con la misma resolución del MDE (Figura 7).

Dentro de este marco fisiográfico, se establecieron 5 clases de pendientes del terreno (Tabla 2), nombradas de acuerdo a la amplitud del relieve (modificado de Zinck, 2012).

Tabla 2. Clases de pendiente del terreno. Fuente: modificado de Zinck, 2012.

Grados de inclinación	Amplitud del relieve
0 - 2	Muy baja
2.1 - 10	Baja
10.1 - 20	Moderada
20.1 - 30	Alta
30.1 - 80	Abrupta

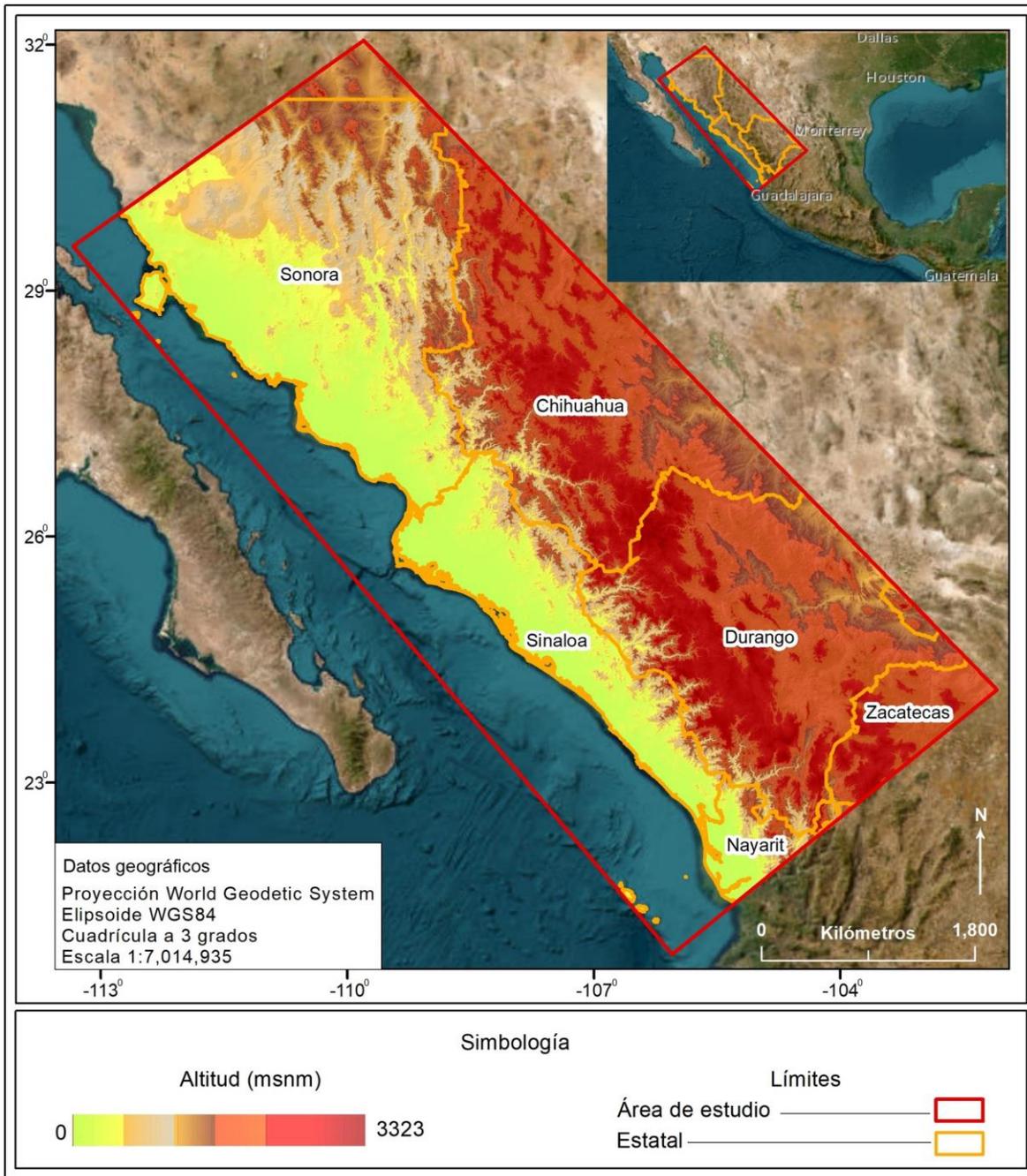


Figura 6. Modelo Digital de Elevación (MDE) del área de estudio.

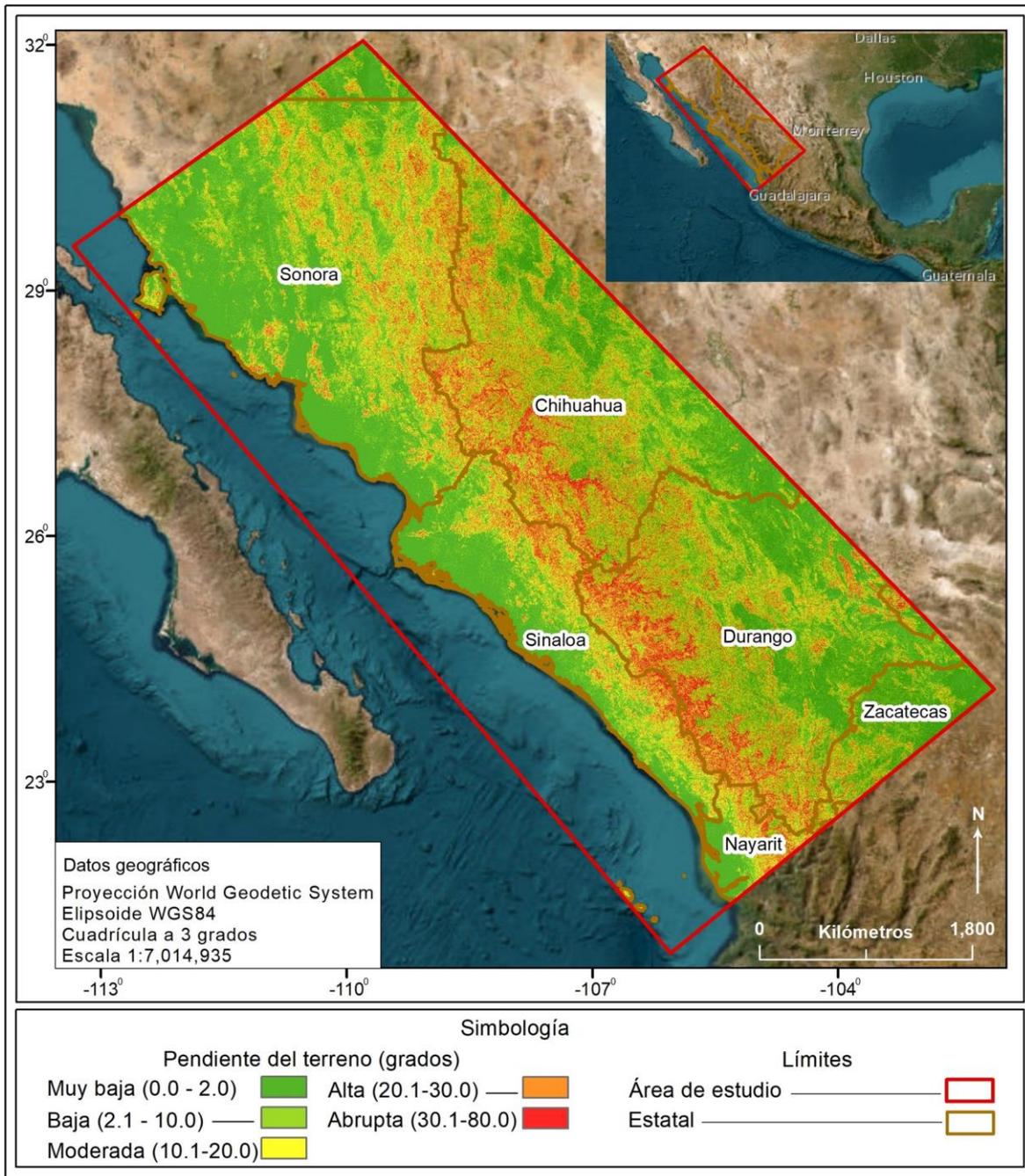


Figura 7. Pendiente del terreno en el área de estudio.

Aspecto fisiográfico

El noroeste de México presenta una diversidad topográfica muy amplia, desde los terrenos planos en la región costera del Golfo de California en el oeste hasta las altas cumbres de la Sierra Madre Occidental (SMO) en el este; siendo la cima más alta a los 3,323 msnm (metros sobre el nivel del mar) (NASA Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos y METI Ministerio de Economía, 2011).

En un recorrido de oeste a este, a grandes rasgos la fisiografía en su parte más baja se compone de planicies de tipo aluvial, fluvial, deltaicas, eólicas, de inundación por mareas y de origen fluvial, entre otras. En la región central, se ubican terrenos de pendiente escalonada como lomeríos y montañas de distintas alturas relativas, embebidos en piedemontes sinuosos, donde el rasgo fisiográfico más dominante es la SMO. En el extremo este, las alturas relativas comienzan a decrecer hasta montañas bajas y lomeríos ondulados, sumergidos en un piedemonte sinuoso y extenso contiguo a las altas planicies de los estados de Chihuahua y Durango.

Respecto a la orientación del bloque de terreno o cuesta, una posibilidad es que la dirección de la inclinación de los altos topográficos influya de alguna manera en la formación de tormentas y generación de rayos, además de la pendiente del relieve. Por ello, se realizó una interpretación de los rasgos del terreno y definió la orientación del bloque de terreno.

Entiéndase por ladera a la cuesta de un alto topográfico y la orientación de dicha cuesta indica la dirección de la pendiente descendente; esta última puede obtenerse en grados respecto al norte (0-360 grados en superficies inclinadas y -1 para zonas planas) y es utilizada para múltiples estudios que involucran una caracterización del paisaje.

Después de llevar a cabo la interpretación de la configuración del terreno, se declaró que el área de estudio está compuesta por relieves de altura relativa variada, desde planicies hasta montañas altas (0-3,323 msnm), con una ligera curvatura desde el SE al NE. La disposición general de los altos topográficos fue NW-SE con valles intermontanos que funcionan como colectores hídricos de orientación principal hacia

el SW y, ocasionalmente en la porción norte y centro, en dirección norte-sur, lo que indica un arreglo estructural.

En cuanto a la dirección de los bloques de terreno, en el flanco izquierdo de la Sierra Madre Occidental se distinguió una preferencia NE-SW y en el derecho SW-NE; debido al evidente dominio estructural de la región, en menor proporción se presentaron direcciones de ladera E-W (Tabla 3).

Tabla 3. Orientación del bloque de terreno en el área de estudio.

Dirección	Elementos
NE	73
E	12
SE	70
SW	144
W	19
NW	65

Específicamente con relación al tema de evaluación del peligro de caída de rayo, el aspecto fisiográfico combina características esenciales que pueden favorecer las condiciones meteorológicas que conducen a la generación de rayos, tales como la configuración topográfica, la pendiente y la dirección de ladera u orientación del bloque de terreno. Es un hecho que, en la ladera oeste de la SMO se distingue una marcada inclinación de pendiente NE-SW, mientras que en el este se manifiesta en dirección SW-NE, con algunos bloques E-W debido a dominio estructural. En la Figura 8 se muestra la distribución del aspecto fisiográfico del noroeste de México.

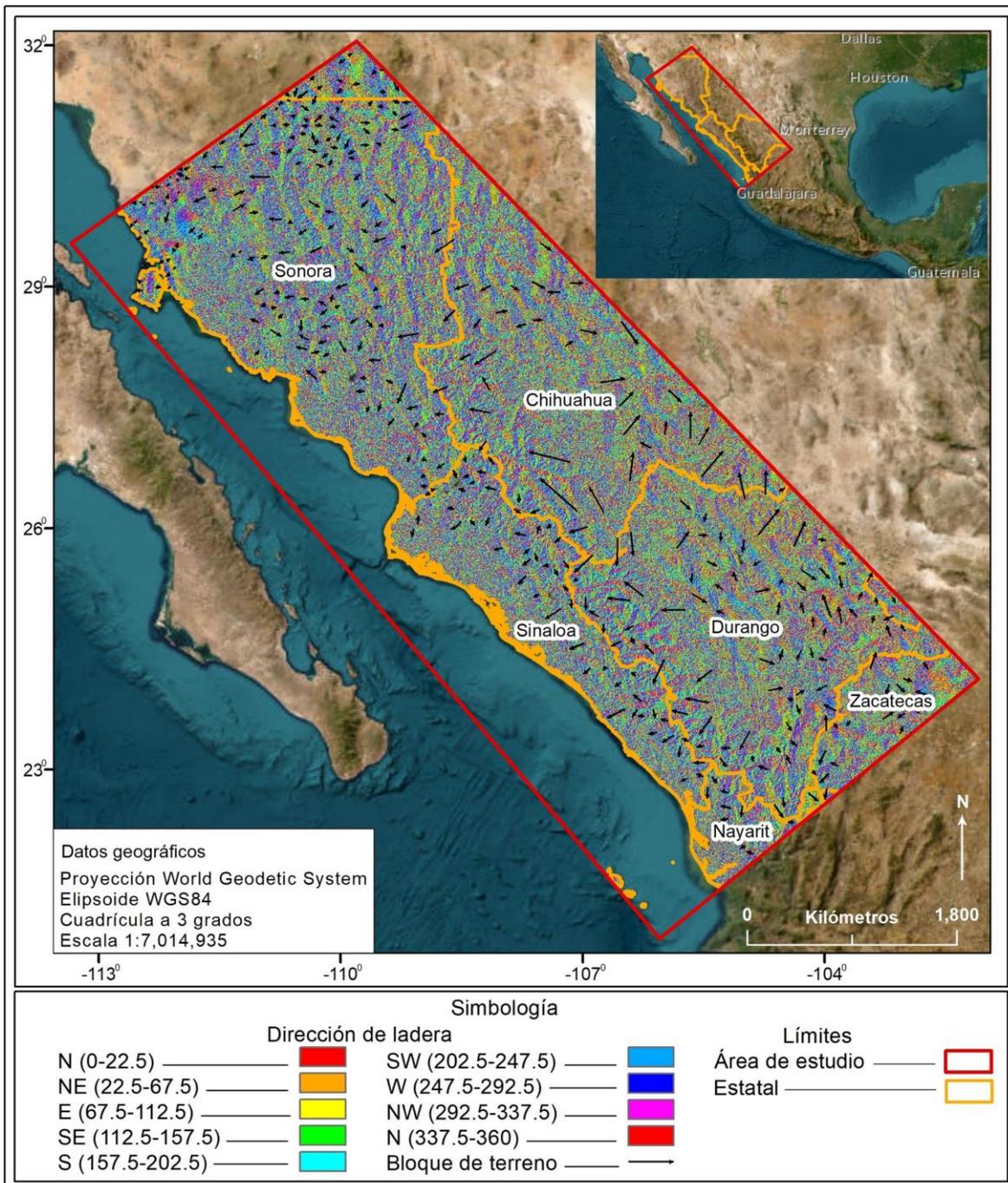


Figura 8. Aspecto fisiográfico del área de estudio.

Base geopolítica y vías de comunicación

La base geopolítica de esta investigación está conformada por las divisiones políticas estatal, municipal y local; por su parte, el Marco Geoestadístico (MG) integra

información de índole vectorial, tablas de atributos y catálogos; muestra la división del territorio nacional en sucesivos niveles de desagregación, dada por límites geoestadísticos de sustento legal y pueden coincidir con los límites político-administrativos oficiales.

En lo que respecta a la división política estatal o áreas geoestadísticas estatales, esta fue descargada a una escala 1:250, 000. El archivo en formato vectorial y de tipo polígono contiene campos de información como clave de entidad federativa, nombre geográfico de la entidad, clave de la capital de la entidad federativa, nombre geográfico de la capital de la entidad, perímetro de polígonos y área de polígonos en hectáreas (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2021b).

Al igual que la división estatal, las áreas geoestadísticas municipales y localidades (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2019, 2021a), también se obtuvieron a escala 1:250,000. Otra fuente de datos es la población por localidad (CONABIO, 2014), todos distribuidos por el Sistema Nacional de Información sobre la Biodiversidad (SNIB), del Portal de Geoinformación 2020.

En cuanto a las áreas geoestadísticas municipales, están contenidas en un archivo vectorial de tipo polígono con datos referentes a la clave de entidad federativa, clave del municipio, clave geoestadística concatenada, nombre geográfico de la entidad, nombre geográfico del municipio, perímetro de cada polígono y área de cada polígono en hectáreas (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2021a).

Por otro lado, las localidades de la República Mexicana pertenecen a un archivo vector de tipo punto y contiene campos de información con clave geoestadística concatenada, identificador único relacionado con la entidad federativa, identificador único relacionado con el municipio, identificador único relacionado a las localidades rurales y urbanas, clave del área geoestadística básica urbana y rural asignada a nivel municipio, clave asignada a la manzana, nombre de la entidad federativa, municipio o localidad, estatus de ameznamiento, nombre de la entidad y nombre del municipio (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2019).

En el caso de la población por localidad, también es un archivo vector de tipo punto reúne campos de información referente a la clave única de identificación de la entidad federativa, clave municipal, clave de la localidad, nombre de la entidad federativa, nombre del municipio, nombre de la localidad, población total de la localidad, población femenina y masculina por intervalo de edades (CONABIO, 2014).

Además, las vías de comunicación empleadas en este trabajo de tesis forman parte de la Red Nacional de Caminos (RNC) en su versión 2019; ésta es una red vial modelada a gran detalle en formato vectorial y conforman las vías de comunicación que permiten el tránsito de vehículos automotores por carreteras, terracerías, brechas y principales vialidades urbanas (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2019). La información contenida en la red vial utilizada es el tipo de vialidad, nombre de la vialidad, número de carriles, estatus, condición, peaje, circulación, escala de visualización, velocidad, longitud, ancho y fecha de activación.

Todos los archivos vectoriales, con coordenadas geográficas y Datum WGS84, fueron acotados al límite del área de estudio. Con fines de ilustración, sólo se muestran las localidades con población superior a los 1,000 habitantes, el archivo vectorial dentro del Sistema de Información Geográfica (SIG) presenta el total de localidades con su población y grupos de edad (Figura 9).

Imagen satelital

En contexto, la última actualización de World Imagery ocurrió en marzo de 2017 y provee imágenes de un metro o mejores en muchas partes del globo terrestre y de resolución inferior alrededor del mundo. Incluye imágenes TerraColor de 15 m a pequeña y mediana escalas, y de tipo SPOT a 2.5 m. La resolución espacial base de World Imagery se presenta en $x= 0.1493$ m, e $y= 0.1493$ m (Esri et al., 2017).

La imagen de satélite del noroeste de México fue obtenida del World Imagery (Esri et al., 2017) con una resolución espacial de 100 m en formato TIFF e integrada al Sistema de Información Geográfica (SIG) (Figura 9).

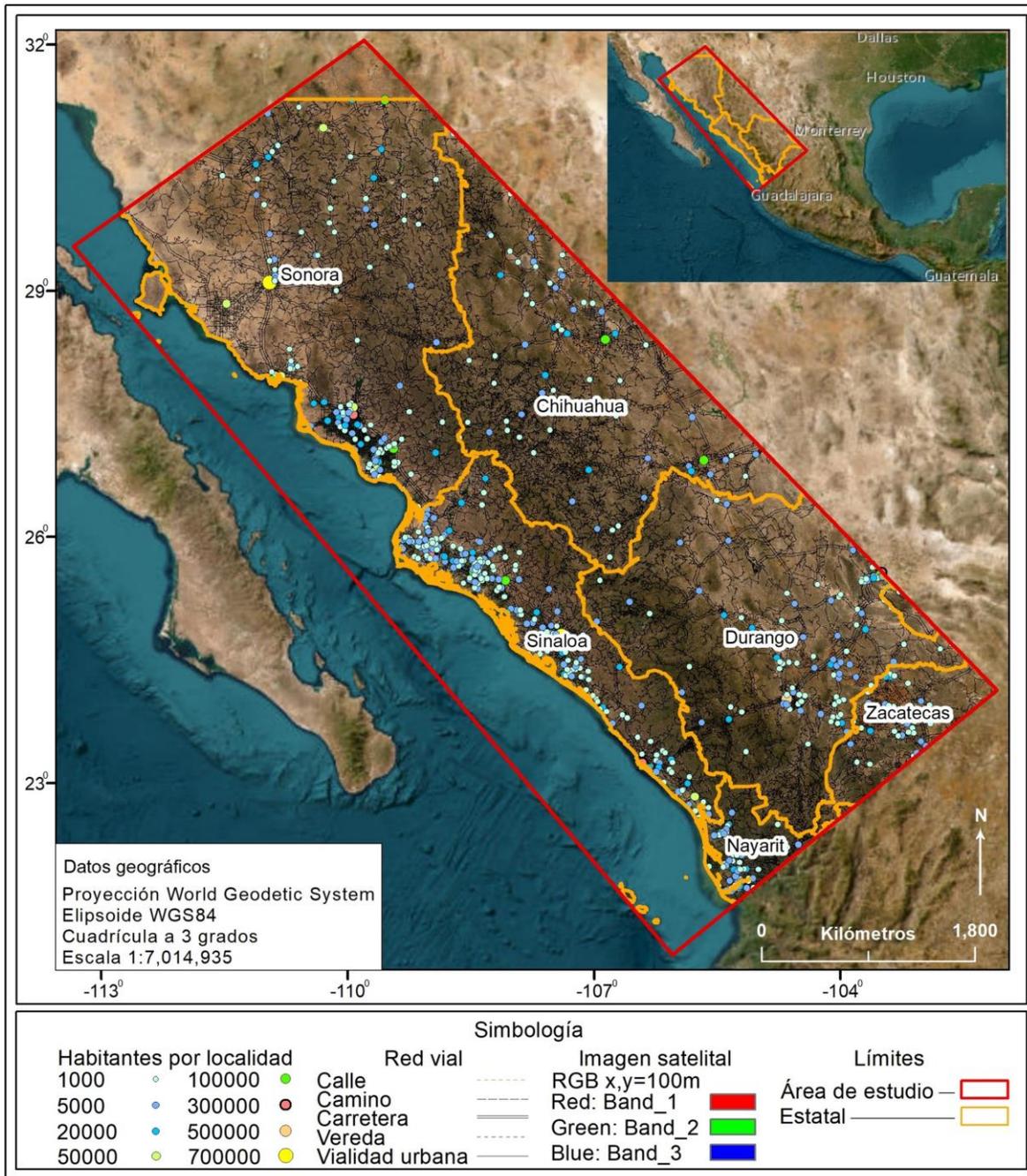


Figura 9. Base geopolítica, vías de comunicación e imagen satelital en el área de estudio.

III.1.3. Procesamiento

Los principales resultados obtenidos en este estudio son el mapa de Grado de Susceptibilidad al Peligro de Caída de Rayo y la metodología construida para tal propósito; lo cual significa abordar el problema desde varios puntos, como la

ocurrencia, la distribución y la densidad de los rayos nube-tierra (CG) y los decesos por esta causa, las condiciones de vulnerabilidad social y su interrelación con la fisiografía (Figura 10).

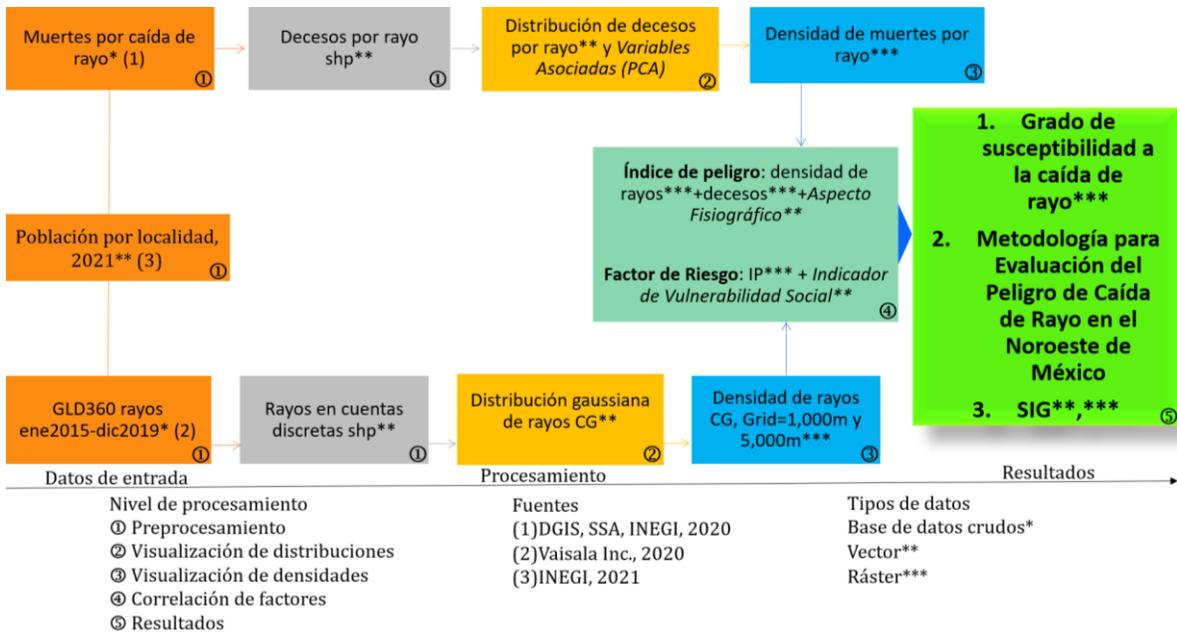


Figura 10. Esquema metodológico para evaluación del peligro de caída de rayo en el noroeste de México.

Lo anterior se refiere a contestar 3 preguntas básicas: 1) ¿dónde cae el rayo?, 2) ¿cuál es el área que se encuentra en riesgo?, 3) ¿cuántas personas pueden resultar afectadas?

Para responder estas preguntas, se trabajó en 5 etapas subsecuentes de procesamiento de información y a la par, con los productos tipo vector y ráster obtenidos en cada una de ellas, se integró un sistema de información geográfica (SIG). Esta investigación depende del acceso a datos confiables y actualizados de las muertes por caída de rayo, así como de la vulnerabilidad respecto al fenómeno. Las etapas de procesamiento se explican a detalle en párrafos posteriores.

En cuanto al Grado de Susceptibilidad a la Caída de Rayo, se obtuvo por medio de la superposición ponderada de las variables físico-sociales, tales como la densidad de rayos nube-tierra (CG), la vulnerabilidad social con enfoque de caída de rayo, el aspecto, la pendiente y la elevación del terreno; derivado de ello, se identificó la

relevancia de los factores bajo análisis y las zonas más susceptibles ante la ocurrencia del peligro de caída de rayo.

Cabe mencionar el inconveniente de que los indicadores sociales se presentan a escala municipal y esto implica una pobre representación de las condiciones sociales a nivel localidad en el área de estudio, lo que crea un falso nivel de vulnerabilidad ante la ocurrencia del evento.

Es importante aclarar que, el volumen de información generada en esta tesis requiere una organización y visualización práctica del evento hidrometeorológico. En esta tarea, el SIG permitirá concebir el desarrollo o comportamiento del peligro de caída de rayo con el medio físico (Chuvienco et al., 2010); sin dejar de lado que, el principal obstáculo es la falta de información o la inconsistencia de las bases de datos (Holle y Cooper, 2016; Holle y Murphy, 2015; Raga et al., 2014).

La organización de las etapas o niveles subsecuentes de procesamiento y los resultados se muestran explícitamente en la Tabla 4, las fuentes y tipos de datos corresponden a lo mostrado en la Tabla 1.

Tabla 4. Niveles de procesamiento.

PROCESAMIENTO				
NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4	NIVEL 5
Preprocesa- miento	Visualización de distribuciones	Visualización de densidades	Correlación de factores	Resultados
Muertes por rayos shp**	Distribución de muertes por rayo** y análisis de variables (PCA)*	Densidad de muertes por rayo***	Índice de peligro: cruce de densidad de muertes y densidad de rayos con aspecto fisiográfico***	Grado de susceptibilidad a la caída de rayo***
Descargas eléctricas shp**	Distribución de rayos nube-tierra (CG) en	Densidad de rayos nube-tierra (CG)***		

Distribución población shp**	cuentas continuas**			
Vulnerabilidad integrada** (opción1)	Distribución del Indicador de Vulnerabilidad Social**		Factor de Riesgo: cruce de Índice de Peligro con Indicador de Vulnerabilidad Social***	Metodología para evaluación del peligro de caída de rayo
Vulnerabilidad integrada** (opción2)				
Modelo digital del terreno (MDT)***, Pendiente del terreno***, Dirección de ladera**	Aspecto fisiográfico**			SIG**,***
Base geopolítica y vías de comunicación** Imagen TIFF***				

Nivel 1. Preprocesamiento.

En esta primera parte del procesamiento, las bases de datos crudos de las muertes por caída de rayo (DGIS et al., 2020) y los rayos de GLD360 (Vaisala Inc., 2020) fueron editados y convertidos a formato shp.

Respecto a las muertes por rayo, dicha información se obtuvo a través de la Unidad de Transparencia de la Secretaría de Salud (SSA) (folio 0001200450120), contiene un total de 3,514,876 decesos ocurridos en el intervalo de tiempo establecido para este estudio y fue decodificada parcialmente a partir de los códigos oficiales proporcionados por la Dependencia Gubernamental en términos más entendibles (DGIS et al., 2020).

Es relevante señalar que, la información sobre los decesos atribuidos a la caída de rayo en México está resguardada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y en el Marco Metodológico de las Estadísticas de Defunciones Generales (INEGI, 2016) se especifican las variables recomendadas por la ONU, contenidas en el certificado de defunción y presentadas por INEGI. También, la Secretaría de Salud clasifica 10 distintas opciones para víctima de rayo, de acuerdo con las condiciones en que sucede el evento. Estas categorías indican si el registro pertenece a una víctima de rayo en vivienda, en institución residencial, en escuelas, otras instituciones y áreas administrativas públicas, en áreas de deporte y atletismo, en calles y carreteras, en comercio y áreas de servicios, en área industrial y de la construcción, en granja, en otro lugar especificado y en lugar no especificado.

Cabe aclarar que, en muchas ocasiones la clasificación es subjetiva por parte del personal técnico por la dificultad de identificar la causa de muerte y depende en gran medida de las evidencias y percepción del especialista que registra el caso. La certeza en la identificación y una clasificación apropiada para dicho evento recae directamente sobre la preparación y capacidad de discernimiento del técnico especialista; esto puede ocasionar una disminución en el nivel de confiabilidad sobre la base de datos nacional, lo que a su vez podría derivar en inconsistencias u omisiones al construir una base de datos tan extensa.

A nivel nacional, se confirmaron 359 casos oficialmente registrados como defunciones por caída de rayo. Estos decesos fueron extraídos y organizados por año, cada uno con un compendio de información especificada en 37 campos distintos, tales como causa de defunción, edad, escolaridad, localidad de ocurrencia, etcétera, que a su vez se encuentran en códigos asignados por la SSA.

En base a las necesidades del proyecto, los campos fueron seleccionados y decodificados en su totalidad en una segunda vuelta; estos campos contienen información sobre entidad, municipio y, ocasionalmente, localidad de ocurrencia, también causa de defunción, sexo, día, mes y año de ocurrencia, día, mes y año del registro, día, mes y año de nacimiento de la víctima, ocupación, escolaridad, si la muerte ocurrió mientras realizaba su trabajo, si contaba con asistencia médica, nacionalidad, programa inscrito como derechohabiente, horas y minutos del deceso, tipo de área (urbana o rural), edad agrupada y el dominio de lengua indígena.

En consecuencia, se identificaron 50 decesos atribuidos a caída de rayo dentro del área de estudio y para su posterior procesamiento fueron convertidos de formato *.xlsx a *.shp. En la Tabla 5 se ejemplifica un fragmento de la base de datos del IMSS con los códigos traducidos del año 2015.

Tabla 5. Fragmento de decesos nacionales, año 2015. Fuente DGIS et al., 2020.

Entidad	Municipio	Localidad	Causa de defunción	Sexo
Guerrero	Atlixnac	Xalpitzáhuac	Víctima de rayo en calles y carreteras	Hombres
Puebla	Zacapoaxtla	Xalticpac	Víctima de rayo en calles y carreteras	Hombres
Sonora	Cajeme	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en otro lugar especificado	Hombres
México	Tecámac	Tecámac de Felipe Villanueva	Víctima de rayo en granja	Mujeres
México	San Felipe del Progreso	San Juan Coté Centro	Víctima de rayo en vivienda	Mujeres

Veracruz de Ignacio de la Llave	Espinal	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	Hombres
Guerrero	José Joaquín de Herrera	Apanguito	Víctima de rayo en calles y carreteras	Mujeres
Chihuahua	Guachochi	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	Hombres
Oaxaca	San Miguel Quetzaltepec	Santa Margarita Huitepec	Víctima de rayo en vivienda	Hombres
Oaxaca	Santiago Juxtlahuaca	Santos Reyes Zochiquilazola	Víctima de rayo en calles y carreteras	Hombres
Ocurrencia-trabajo	Derechohabiencia	Horas	Minutos	Tipo-área
No	Seguro popular	13	45	Rural
No	Seguro popular	18	30	Rural
No especificado	Ninguna	No especificado	99	Urbano
No	Ninguna	21	0	Urbano
No	Seguro popular	17	0	Rural
Si	Seguro popular	15	0	Rural
No	Otra	14	0	Rural
No	Seguro popular	13	0	Rural
No especificado	IMSS oportunidades	23	20	Rural
No	No especificado	15	30	Rural

En relación con los rayos de GLD360 (Vaisala Inc., 2020), se realizó la extracción de los millones de registros de descargas eléctricas acotados al área bajo estudio en formato *.xlsx desde Python y su posterior conversión a *.shp permitió el despliegue a nivel regional de los rayos en cuentas discretas.

La ubicación espaciotemporal de los rayos, hasta este punto totales (IC + CG), hace posible comparar su ocurrencia con otras variables, como por ejemplo con la configuración del terreno y el posicionamiento de los decesos.

Respecto a la distribución de la población (CONABIO, 2012), este archivo vectorial contiene información a escala 1:250,000 con datos estadísticos del año 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); en él se presenta la población total (Poto10), el número de localidades (Tl10), la densidad de población (Dp10), la superficie del municipio (Sup10), entre otros.

Posteriormente, para obtener la posible población afectada en fecha y hora por cada uno de los decesos a nivel municipal en formato vectorial, se combinó la distribución de la población por localidad (INEGI, 2021) con las 50 defunciones atribuidas a esta causa (DGIS et al., 2020).

En referencia a los indicadores sociales, es conocido que estos se evalúan a una escala municipal, lo que da pie a que la vulnerabilidad social se obtenga al mismo detalle. Además, se reconoce una carencia en la cartografía de vulnerabilidad que manifieste las condiciones con las que cuenta la población para hacerle frente al fenómeno de caída de rayo.

Por estas razones, se construyó un archivo de vulnerabilidad (cluster) en formato vectorial con datos de CENAPRED (2011), CONABIO (2014) CONABIO (2010), en atención a lo establecido por Holle y Cooper (2016), donde la vulnerabilidad a los rayos implica múltiples factores educativos, económicos, laborales, de acceso a los servicios de salud, infraestructura de casa-habitación y culturales.

Se determinó fusionar estos archivos, por ser la opción que mejor se ajusta al caso de estudio y con ellos se construyó un indicador de vulnerabilidad social con el enfoque de peligro de caída de rayo. Además, la base de datos municipales del CONAPO e INEGI, en su edición 2010, forman parte fundamental del Grado de Vulnerabilidad

Social por Municipio (CENAPRED, 2011), Grado de Rezago Social por Municipio (CONABIO, 2014a) y Grado de Marginación Municipal (CONABIO, 2010).

De acuerdo al Grado de Vulnerabilidad Social por Municipio, también llamado Índice de Vulnerabilidad Social Asociado a Desastres (IVS), permite ubicar geográficamente a los municipios que tienen una mayor susceptibilidad de sufrir desastres ante el impacto de diferentes fenómenos, según sus condiciones socioeconómicas y no incluye información de capacidad de respuesta y percepción local del riesgo, necesarios para un mejor análisis de vulnerabilidad social (CENAPRED, 2011).

El IVS fue elaborado por la Subdirección de Estudios Económicos y Sociales del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), a partir de una diversidad de indicadores relacionados con salud, educación, vivienda, población, empleo e ingresos; utilizando fuentes como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía Informática (INEGI, 2010) y el Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2010). El archivo en formato vectorial contiene datos que estima CENAPRED para el Grado de Vulnerabilidad Social Municipal y las Áreas Geoestadísticas Municipales de INEGI (2010).

En el caso del Grado de Rezago Social por Municipio, el Índice de Rezago Social (IRS) es una medida que ordena de mayor a menor el grado de rezago social del territorio mexicano, considerando el rezago educativo, el acceso a los servicios de salud, el acceso a los servicios básicos, de calidad y espacios en la vivienda, así como activos en el hogar.

El IRS fue calculado a través de Componentes Principales, permitiendo combinar información de carencias que sintetiza de manera numérica la dimensión de la pobreza. El archivo vectorial se construyó con los datos del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) y las Áreas Geoestadísticas Municipales de INEGI (2010).

En lo que respecta al Grado de Marginación Social Municipal, este índice permite diagnosticar las desigualdades socioeconómicas y espaciales de México; refleja el impacto global de las carencias que padece la población, derivado de la falta de acceso a la educación, la residencia en viviendas inadecuadas, la percepción de ingresos

monetarios insuficientes y las relaciones con la residencia en localidades pequeñas. En la construcción del archivo vectorial, los datos fueron tomados de los Índices de Marginación por Entidad Federativa y Municipio (CONAPO, 2010).

Sin duda alguna, debido a lo relevante que resulta la superficie donde ocurren las muertes por caída de rayo (Holle y Cooper, 2016; Roeder et al., 2015; Yi et al., 2014) y respecto a los elementos relativos al medio físico, a partir de las curvas de nivel (NASA Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos y METI Ministerio de Economía, 2011) se obtuvo el Modelo Digital del Terreno (MDT) a escala 1:500,000, la pendiente del terreno se clasificó como muy baja, baja, moderada, alta y abrupta (Zinck, 2012) y la dirección de ladera indica la orientación de los bloques de terreno respecto al norte; los primeros dos se construyeron en formato ráster y el último en vector.

Por su parte, la división política municipal/estatal (INEGI, 2021), las localidades de la República Mexicana (INEGI, 2019) y la red nacional de caminos (INEGI, 2019) integran la base geopolítica y vías de comunicación de tipo vector. Por último, la imagen satelital de referencia es en formato TIFF con una resolución espacial de 100 m (Esri et al., 2017).

Nivel 2. Visualización de distribuciones.

A partir de lo generado en el nivel 1, en esta sección se visualizó la distribución geoespacial de los decesos, los rayos, el indicador de vulnerabilidad social y el aspecto fisiográfico; también, se ejecutó un análisis de componentes principales para definir las principales variables asociadas a las muertes ocurridas.

En los decesos por caída de rayo, se confirmó la distribución de los 50 decesos clasificados por año y municipalidad en cuentas discretas y formato vectorial; derivado de ellos se identificó la frecuencia y fecha de ocurrencia de las muertes. Procedente del análisis de los decesos (DGIS et al., 2020), se obtuvieron los casos con localidad oficial y localidad posible.

En el caso de los rayos de GLD360 (Vaisala Inc., 2020), se aplicó una función gaussiana a modo de representar la incertidumbre en la localización de los 80,775,585 rayos en el área de estudio y obtener así su distribución (Minjarez Sosa, 2012); esto en

respuesta a los distintos mecanismos de afectación descritos por Holle y Cooper (2016) y en concordancia con Stall y coautores (2009). Asimismo, con este subconjunto de datos y de acuerdo con el procedimiento planteado por Said y Murphy (2016) se realizó la extracción de los rayos nube-tierra (CG) con un $I_{min} + -30$ kA.

En referencia a lo anterior, se llevó a cabo una tercera extracción y conversión de rayos nube-tierra (CG) por mes, día y 30 minutos antes y después en relación con la hora oficial de los 50 decesos en formatos *.csv, *.xlsx y *.shp para facilitar la manipulación y despliegue de su distribución en cuentas continuas (gaussianas).

En relación a los rayos nube-tierra (CG), los decesos ocurridos y en atención a la problemática que representan los casos resguardados por la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG) (DOF, 2018), donde la información sobre la localidad donde sucedió el hecho no está disponible al público, se desarrolló una propuesta metodológica que permite aumentar la escala de análisis a un nivel local para obtener la identificación de las posibles localidades y la cantidad de habitantes expuestos durante dichas tormentas eléctricas.

Si bien es cierto, el resultar afectado por este fenómeno atmosférico depende en gran medida de la vulnerabilidad y de las actividades que se realizan al aire libre, ninguno se encuentra realmente exento de sufrir algún tipo de daño debido a esta causa.

En contexto, en esta evaluación del peligro de caída de rayo la estimación de la población expuesta es complicada por varias razones. Por un lado, es factible que la hora del impacto difiera de la hora del deceso y por otro, la presencia del error humano en la construcción de la base de datos nacional de muertes; también, se debe considerar el traslado de la persona afectada para recibir atención médica a un centro de salud.

En base a lo planteado, en esta tesis se aplicó una metodología básica, expresamente propuesta para tratar de identificar las localidades comprometidas durante las tormentas eléctricas de las que resultaron los decesos oficiales. Dicha metodología consta de la sobreposición de información geolocalizada de capas que contengan información relevante y aplicable a este problema, como son los límites estatales (INEGI, 2021b), límites municipales (INEGI, 2021a), las localidades (INEGI, 2019), la población por localidad (CONABIO, 2014; CONABIO, 2012), la red vial de la Red Nacional de Caminos (INEGI, 2019) y los rayos nube-tierra (CG) (Vaisala, Inc.,

2020); las capas de información en formato vectorial fueron acotadas al límite del área de estudio.

La definición de las posibles poblaciones y los habitantes expuestos se realizó por coincidencia geoespacial de la distribución de las capas mencionadas, en base a la hora oficial de cada deceso; también, se atendió la especificación de la causa de muerte, según la clasificación dada por la SSA (DGIS, 2020), debido a que ésta puede funcionar como una pista o indicio sobre el sitio donde ocurrió el impacto del rayo (Figura 11).

A modo de ejemplo, en el caso 201509 los factores que ayudaron a identificar las posibles localidades son las descargas eléctricas sobre una porción del territorio del municipio de Pánuco de Coronado, Durango y el hecho de que el registro de la SSA (DGIS et al., 2020) lo declara como Víctima de rayo en calles y carreteras; por lo que se infiere que las localidades de Pánuco de Coronado, José Librado Rivera, San José de Guadalupe (San Martín de Gamón) y San José de Avino cumplen con estas condiciones. En consecuencia, se considera a los 760 habitantes de la localidad de San José de Avino como población expuesta por su ubicación próxima a la geolocalización de los rayos nube-tierra (CG) registrados (ver Figura 11).

Respecto al indicador de vulnerabilidad social, se hizo una reclasificación en 5 categorías que explican dicha vulnerabilidad, desde muy baja a muy alta y fue construido a partir de datos oficiales de CENAPRED (2011), CONABIO (2014) CONABIO (2010). Este indicador social con enfoque en caída de rayos permite evaluar la distribución de los municipios con menor o mayor preparación ante el peligro de caída de rayo en el área bajo estudio.

En cuanto al aspecto fisiográfico, se analizó en función de la combinación de los rasgos físicos del MDT, la pendiente de éste y la dirección de ladera. Esta variable del peligro de caída de rayo es importante porque las particularidades de una configuración topográfica pueden permitir, o no, el avance de los distintos aportes de humedad, que favorece la formación de tormentas y la generación de rayos al encontrarse con la superficie continental.

En relación con la definición de las variables más relevantes en los decesos por caída de rayo, se realizó un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés para Principal Component Analysis) para definir las variables más destacadas y

su jerarquía entre la condición de vulnerabilidad social, la época del año o estacionalidad, el género, la edad agrupada, la ocupación y el tipo de población.

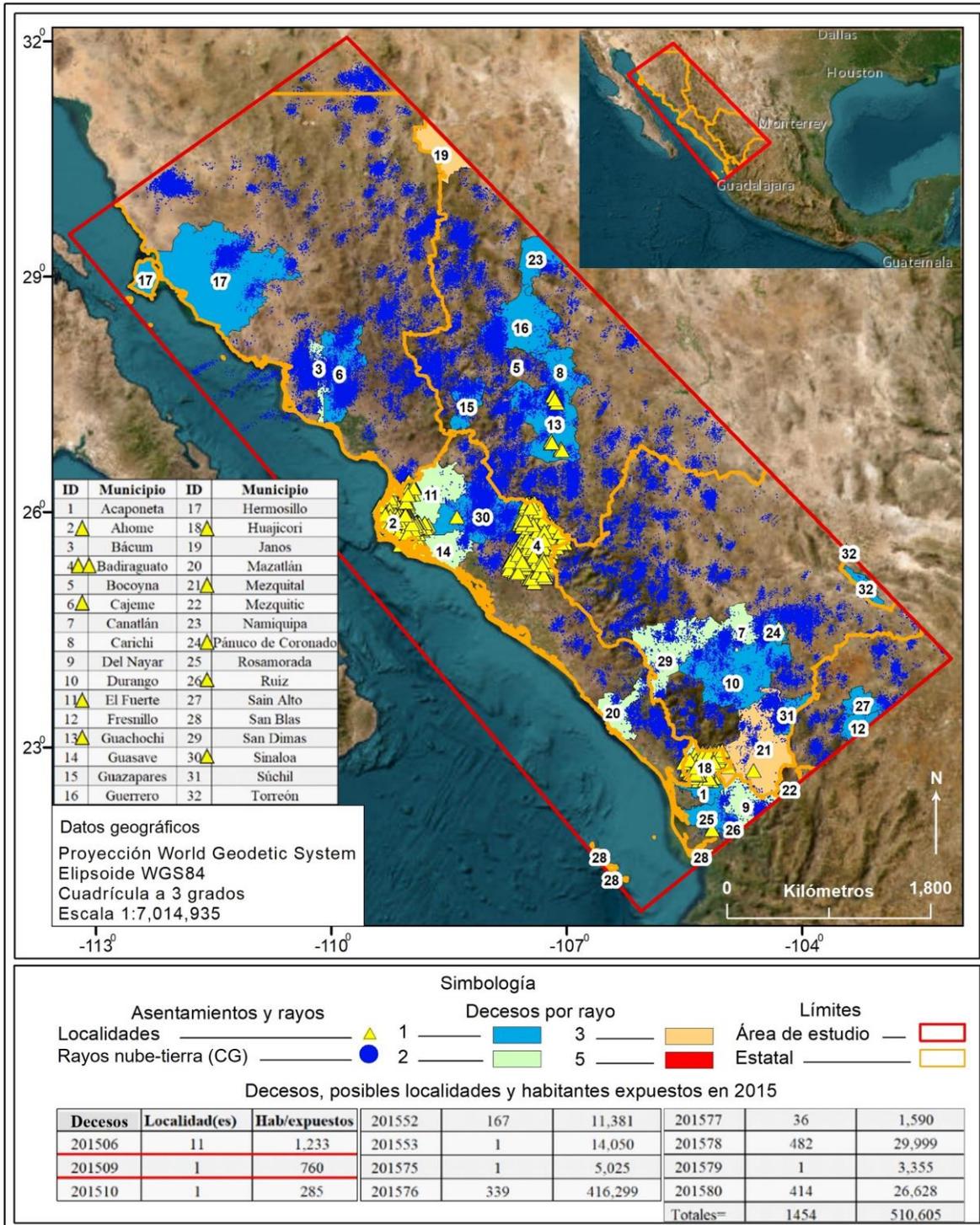


Figura 11. Decesos, posibles localidades y habitantes expuestos en 2015.

Nivel 3. Visualización de densidades.

En esta sección se obtuvo la densidad de muertes por rayo por cantidad de habitantes en localidad de ocurrencia y la densidad de rayos nube-tierra (CG).

La primera, la densidad de muertes atribuidos a la caída de rayos es compleja de visualizar, debido a la dificultad de representar los 50 casos oficiales de decesos por esta causa en un área de estudio extensa (533,743.72 km² aproximadamente).

En atención al inconveniente planteado, se propuso una relación en función de los decesos y la densidad poblacional de las posibles localidades en peligro; esto en cierta forma puede explicar la exposición de las personas a través de la ubicación local de los decesos y dividirlos entre la población total de cada asentamiento humano que pudiese ser afectado. También, para visualizar la concentración de dichos decesos en una superficie tan amplia se utilizó el método de interpolación de Kernel para identificar aquellas regiones con mayor cantidad de fallecimientos por su proximidad geoespacial.

La segunda, en el caso de los rayos nube-tierra (CG), en este estudio se considera que un rayo nube-tierra (CG) es peligroso hasta 2 km de distancia a partir del sitio de impacto, de acuerdo con la posibilidad de distintos puntos de contacto con el suelo en distancias horizontales entre el primero y los subsecuentes (Stall et al., 2009), el desvío ocasional del canal preexistente y el radio de búsqueda dentro del mecanismo de rayos descrito por Holle y Cooper (2016).

En relación con lo planteado, se obtuvo la densidad de los rayos nube-tierra (CG) a partir del procedimiento planteado por Said y Murphy (2016), en este caso con un $I_{min} \pm 30$ kA y una resolución espacial de 5 km para cotejar los resultados obtenidos con lo publicado por Vaisala en su Reporte anual de rayos 2021 (Vaisala Inc., 2021) y otros autores (Holle y Murphy, 2015; Holle, 2016; Said y Murphy, 2016; Said, 2017).

Nivel 4. Correlación de factores.

En este apartado se generó el Índice de Peligro y el '*Factor de Riesgo*'. El Índice de Peligro está compuesto por el Factor de Peligro y el aspecto fisiográfico; en otras palabras, se trata de la distribución derivada del análisis geoestadístico por medio de CoKriging Indicador entre las variables de los rayos nube-tierra (CG) y los decesos por

esta causa con una resolución espacial de 5,000 m sobre el aspecto fisiográfico. Los umbrales establecidos para este análisis fueron 4 para los rayos nube-tierra (CG) y 0 para los decesos.

A la correlación entre el Índice de Peligro y el Indicador de Vulnerabilidad Social se le denominó '*Factor de Riesgo*'; cabe aclarar que, de acuerdo a la definición propia de Riesgo (Guía de Contenido Mínimo Para La Elaboración Del Atlas Nacional de Riesgos, 2016), aquí no se calcularán las afectaciones y el costo del daño, sólo es para fines de identidad dentro del procesamiento de esta tesis. Los umbrales en el '*Factor de Riesgo*' fueron 4, 1 y 0, para los rayos nube-tierra (CG), el indicador de vulnerabilidad social y los decesos, respectivamente.

Nivel 5. Resultados.

En esta última sección se obtuvo el grado de susceptibilidad a la caída de rayo en el noroeste de México, donde se indican las regiones que pueden ser afectadas por este fenómeno hidrometeorológico a través de la correlación de variables físicas y sociales presentes en el área de estudio.

Las variables físico-sociales analizadas son la densidad de rayos nube-tierra (CG), la distribución del indicador de vulnerabilidad social, la pendiente, el aspecto y la elevación del terreno. Las primeras dos se explican en los apartados XII.3.1 y XII.1.4, respectivamente; las últimas tres se exponen en la sección XII.1.8, obtenidas a partir del Modelo Digital de Elevación (MED) (NASA Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos y METI Ministerio de Economía, 2011).

A partir de una matriz de correlación entre dichas variables y los 50 decesos oficiales por caída de rayo se obtuvo el porcentaje de influencia de cada una de estas variables.

Por último, con las técnicas propuestas, aplicadas e implementadas en el desarrollo de esta tesis se construyó una metodología para la evaluación del peligro de caída de rayo en el noroeste de México e integrada en un sistema de información geográfica (SIG) para su posterior presentación interactiva ante organismos y dependencias gubernamentales.

IV. RESULTADOS

IV.1. Nivel 1. Preprocesamiento

IV.1.1. Muertes por caída de rayos a escala nacional y regional

En referencia a lo explicado en el capítulo III. Metodología de este documento, se descubrieron 359 casos donde la causa de muerte es atribuible a la caída de rayo (DGIS et al., 2020); a continuación, se muestra la Tabla 6 con los decesos ocurridos por año, durante el periodo en estudio a nivel nacional.

Tabla 6. Decesos por año en el periodo 2015-2019.

Año	Decesos
2015	99
2016	96
2017	46
2018	69
2019	49
Total	359

Después del análisis previo y decodificación de los decesos nacionales, se amplió la escala de trabajo a nivel municipal. Se identificaron 50 casos de muertes atribuibles a la caída de rayo en diversas circunstancias en 32 municipios; ya sea que su superficie se encuentre total o parcialmente dentro del límite analizado (Figura 12).

Los 50 decesos ocurridos por año dentro del área estudiada se muestran en la Tabla 7 y se explican en el Anexo A, donde se indica la clave del caso, entidad, municipio, localidad, causa-defunción y sexo de las víctimas por caída de rayo (DGIS et al., 2020).

Derivado de los decesos ocurridos en el área de estudio, los meses con más muertes atribuidas a caída de rayo fueron julio de 2015 (4 casos), junio, agosto y septiembre de 2016 (5 casos por mes), agosto 2017 (3 casos), agosto de 2018 (5 casos) y septiembre de 2019 (3 casos) (DGIS et al., 2020). Los municipios con mayor incidencia de fallecimientos fueron Ahome, Sin. con 5 casos, Janos, Chih. y Mezquital, Dgo. con 3 registros cada uno (ver Figura 13); en la Tabla 8 se especifican las fechas de estos eventos.

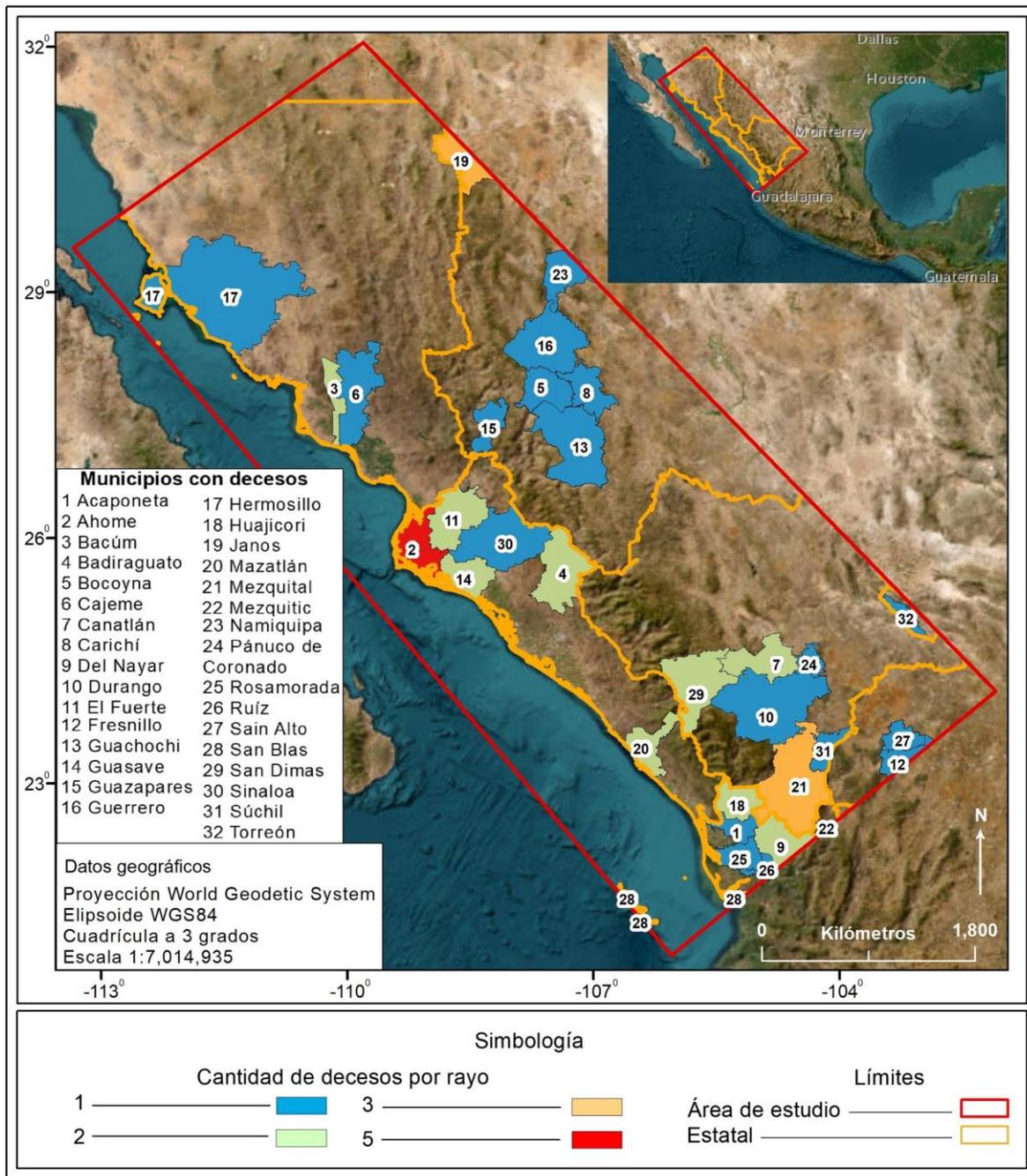


Figura 12. Municipios con muertes por caída de rayo, 2015-2019. Fuente: DGIS et al., 2020.

Tabla 7. Decesos por año en el área de estudio 2015-2019. Fuente: DGIS et al., 2020.

Mes / Año	2015	2016	2017	2018	2019
Enero					
Febrero					
Marzo			1		
Abril					
Mayo	1				
Junio		5		2	
Julio	4	3		1	
Agosto		5	3	5	3
Septiembre	3	5	1	1	3
Octubre	1		1		
Noviembre	1				
Diciembre	1				
Decesos totales	11	18	6	9	6

Tabla 8. Sitios con mayor incidencia de muertes. Fuente: DGIS et al., 2020.

Municipio	Fecha	Municipio	Fecha
Ahome, Sin.	15/09/2015	Mezquital, Dgo.	03/10/2015
	26/06/2016		29/10/2016
	12/09/2016		02/08/2017
	18/09/2016		
	17/07/2018		
Janos, Chih.	27/08/2016		
	27/08/2016		
	05/09/2018		

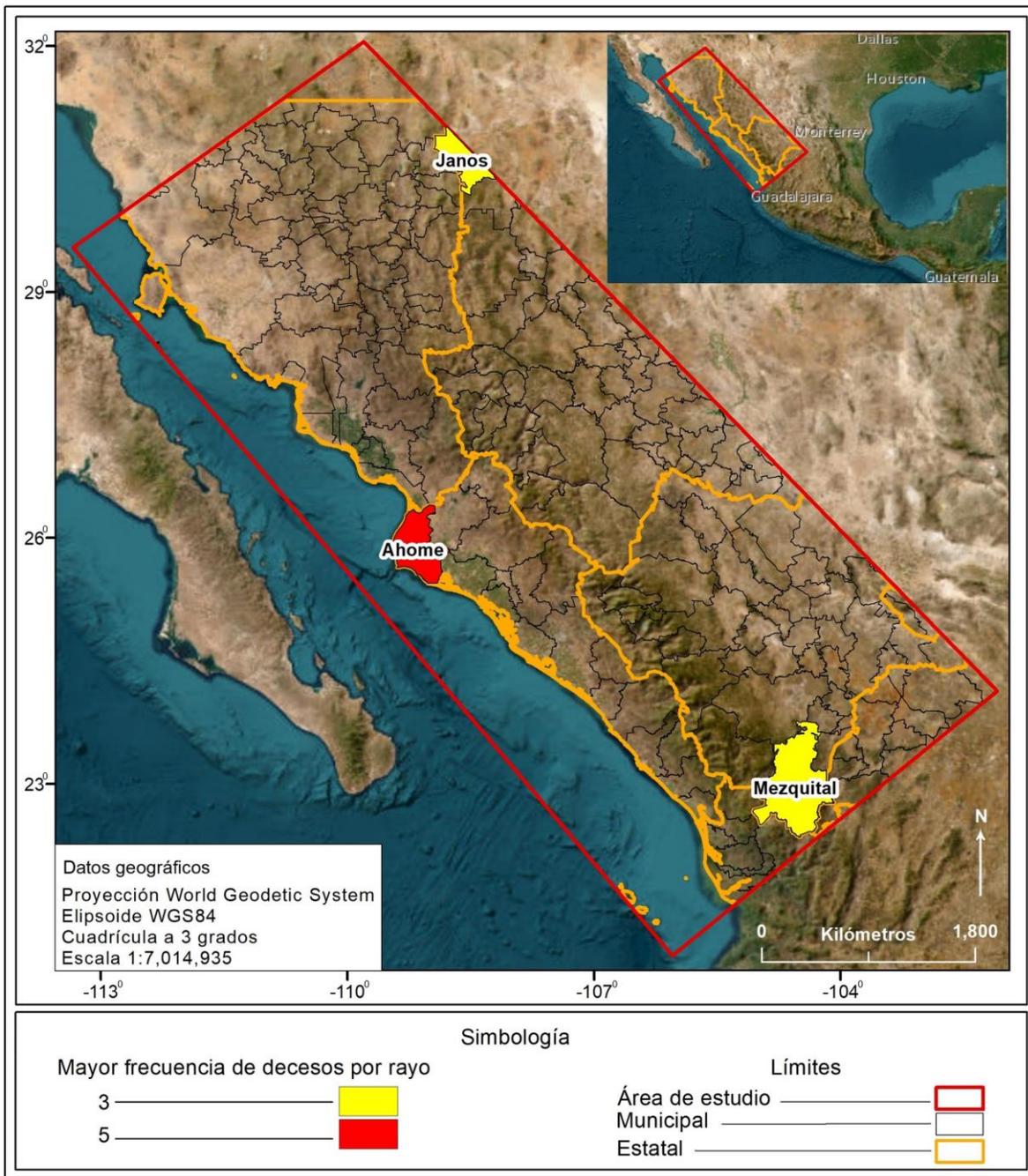


Figura 13. Municipios con mayor incidencia de muertes por caída de rayo, 2015-2019. Fuente: DGIS et al., 2020.

Respecto a la causa de defunción, la gran mayoría de decesos atribuibles a la caída de rayo ocurrieron en espacios despejados y abiertos (43), durante actividades laborales y deportivas, sólo 3 sucedieron en viviendas y 4 en lugar no especificado (ver Figura 14).

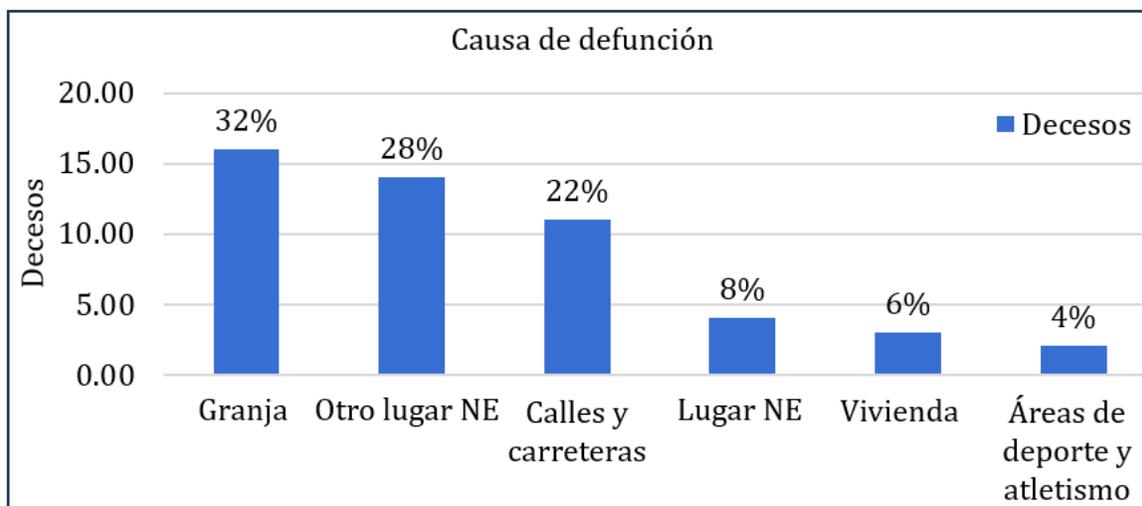


Figura 14. Causa de defunción en víctimas por caída de rayo.

En cuanto al género, 45 corresponden a hombres y 5 a mujeres, 90% y 10 %, respectivamente; 3 de ellas fueron víctima de rayo en vivienda, 1 en granja y 1 en lugar no especificado.

En 24 casos de los fallecidos, se desempeñaban como trabajadores en actividades agrícolas, ganaderas, forestales, caza y pesca, así como en actividades elementales y de apoyo. El resto de las ocupaciones no fueron especificadas (5), insuficientemente especificadas (6), también se incluyen artesanos (1), comerciantes (2), profesionistas y técnicos (1), trabajadores en servicios personales y vigilancia (1), operadores de maquinaria industrial (1) y aquellos que no trabajan (9). Geográficamente, 24 ocurrieron en área urbana, 24 en zona rural y en 2 decesos no se especifica.

Se ha verificado que los grupos de edad más afectados en este tipo de muertes son adultos jóvenes y productivos, de 20 a 39 años se registraron 30 decesos, de 40 a 59 años disminuye a 10 casos y de 60 a 79 años decae considerablemente a 5 fallecidos. En el intervalo de 10 a 19 años se registraron 5 casos (Figura 15).

Los horarios en los que tuvieron lugar los decesos por caída de rayo fueron desde las 12 y hasta las 24 horas; a excepción de un caso ocurrido a las 7 horas. La mayor ocurrencia de muertes por esta causa fue entre las 15 y 18 horas, lo que coincide con el régimen de precipitaciones en el noroeste de México (Figura 16). También, se destacan 7 eventos registrados con hora de deceso oficial a las 24 horas; esta cifra

podría estar parcialmente relacionada con el desconocimiento de la hora exacta por parte del personal técnico que reportó la tragedia (error humano).

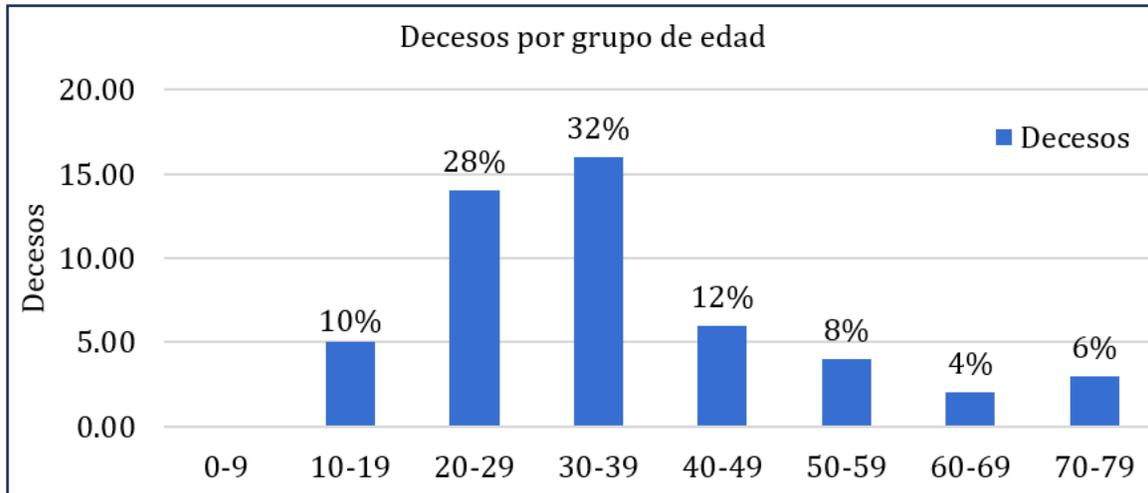


Figura 15. Decesos por grupo de edad en víctimas por caída de rayo.

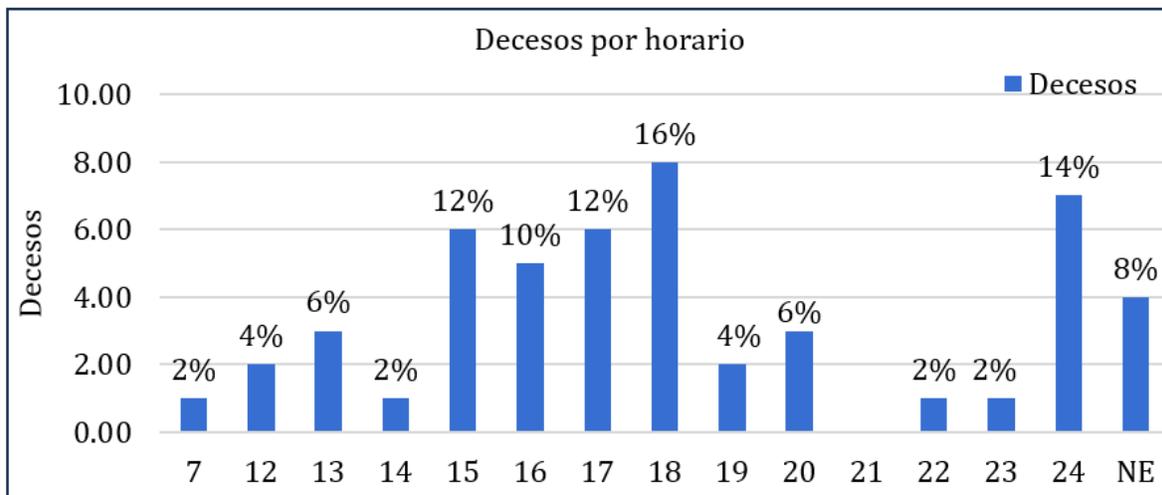


Figura 16. Decesos por horario en víctimas por caída de rayo.

IV.1.2. Descargas eléctricas en el noroeste de México

En relación con las descargas eléctricas de GLD360 fueron acotadas al área de estudio y exportadas por año, mes, día y 30 minutos antes y después de los decesos en formato *.xlsx y *.shp para su posterior edición y análisis en ArcMap 10.8.1. Del registro total de GLD360 (247,566,826), 80,775,585 descargas eléctricas corresponden a esta evaluación y son parte fundamental de esta tesis.

En la Figura 17 se muestran las descargas eléctricas percibidas por los sensores de la red GLD360. Los meses de mayor actividad fueron julio, agosto y septiembre de cada año; se destaca el mes de agosto del año 2015 con un registro de 9,495,044 descargas eléctricas, lo que significa que fue el mes más activo de todo el periodo estudiado.

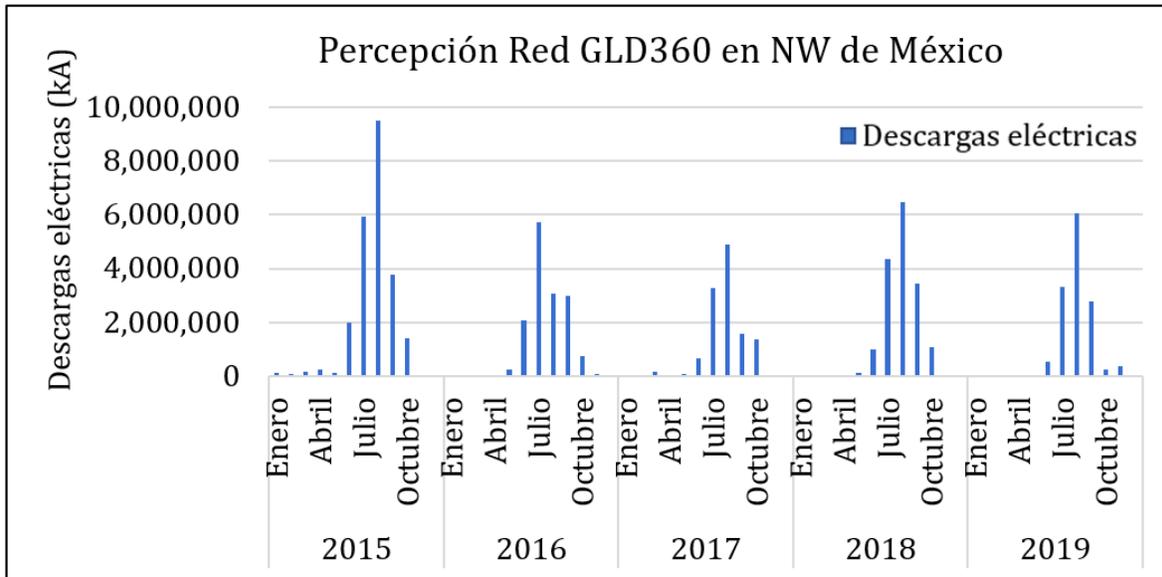


Figura 17. Percepción de descargas eléctricas de GLD360 en el área de estudio.

En cuanto a la relación entre las descargas eléctricas con los decesos reportados, la cantidad de rayos no refleja una correspondencia directa con la cantidad de fallecimientos por esta causa. Por esta razón, se realizó un análisis de su comportamiento mensual, diario y 30 minutos antes y 30 minutos después de la hora oficial de muerte en todos los decesos del periodo. Es importante señalar que, para efectos de esta tesis, la hora oficial del deceso fue considerada para la lectura de la descarga eléctrica generada en la atmósfera.

Derivado de este análisis, en los gráficos resultantes se ubicaron puntos en color naranja que indican el valor de la corriente pico y la hora en que sucedió la tragedia. En casos donde esto no fue posible se obtuvo el valor promedio en el día del deceso y en situaciones con faltantes de actividad eléctrica por horas, días o meses y que sea complicado obtener algún valor de referencia, se consideró la corriente pico como No Especificado (NE).

En el mes de julio del año 2015 se registró la mayor cantidad de decesos por caída de rayo y a modo de ejemplificar el análisis hecho en los datos GLD360, se ilustran las series temporales de estos eventos. Los decesos están identificados con las claves de rayos 201506, 201552, 201575 y 201577; los dos primeros sucedieron el 06 de julio, a las 13 y 17:30 h. El evento 201575 aconteció el día 18 a las 17:15 h y el 201577 el 23 a las 16 h, horas locales.

En la Figura 18 se muestra el comportamiento de las descargas eléctricas durante el mes de julio del año 2015. En los días 06 y 18 las descargas eléctricas negativas se incrementaron considerablemente; en cambio, el día 23 muestra un leve repunte.

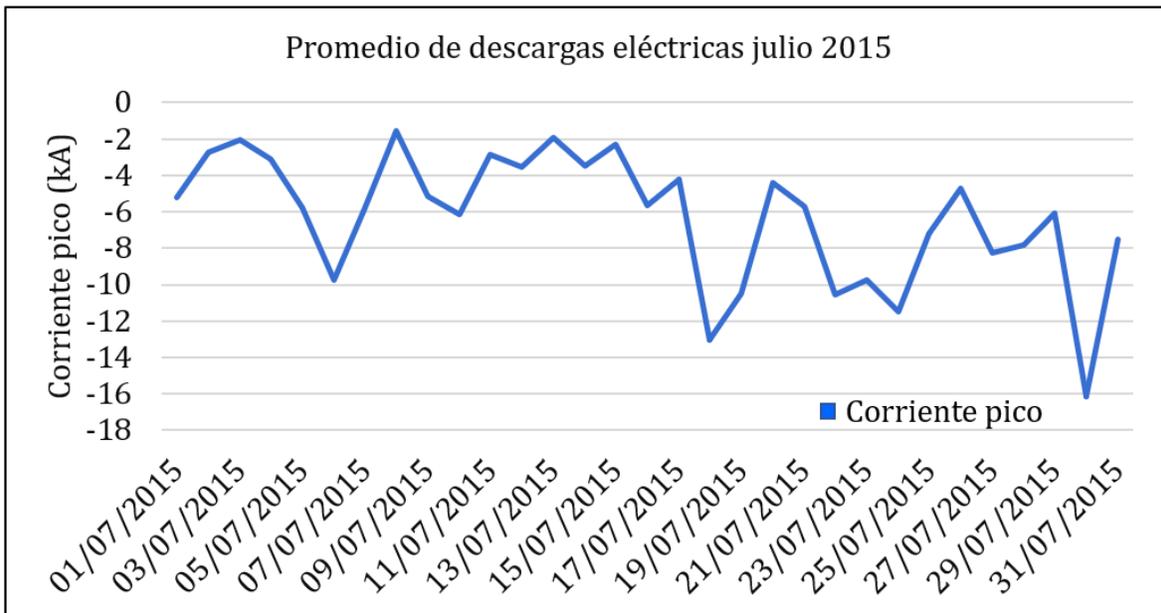


Figura 18. Promedios de descargas eléctricas en el mes de julio de 2015.

En la Figura 19 se expone el comportamiento general de las descargas eléctricas durante todo el día 06 de julio.

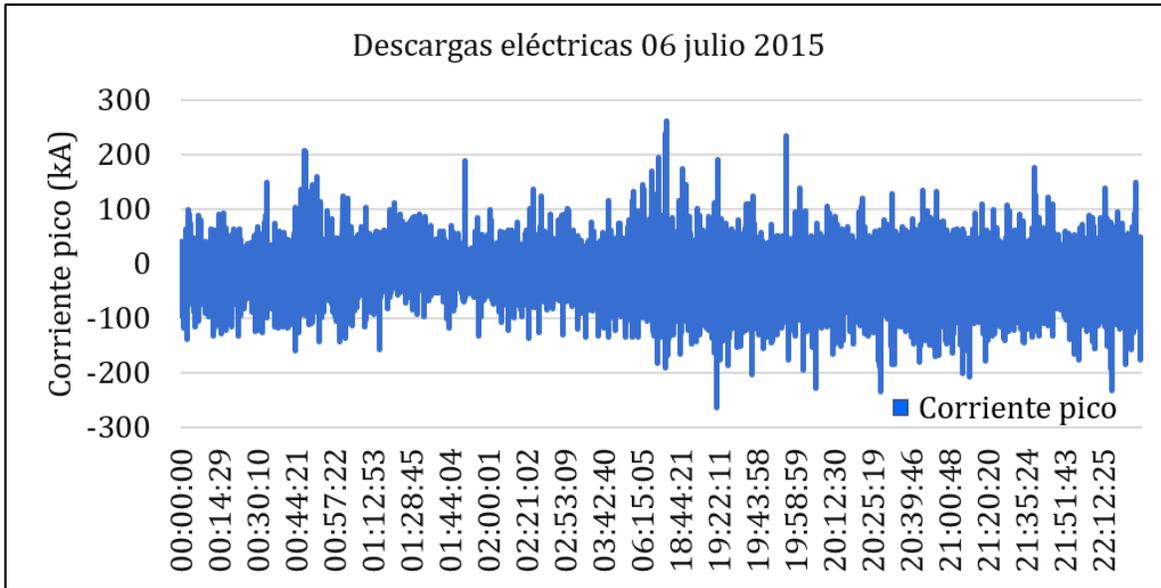


Figura 19. Descargas eléctricas del día 06 de julio del 2015.

En el caso 201506, la corriente pico registrada fue de -13 kA, a las 20:00 hr Greenwich. En el deceso 201552, la tragedia ocurrió a las 17:30 horas, 00:30 de Greenwich, a esa hora las descargas eléctricas se encontraban entre 10.4 kA y -70.5 kA, la hora oficial del deceso coincidió con el registro de 9.7 kA, lo que significa que ocurrió 9 minutos antes del pico más intenso (00:39 Greenwich con 388.7 kA), y exactamente a la hora del deceso los valores estaban entre -67.3 y 35.1 kA (Figura 20).

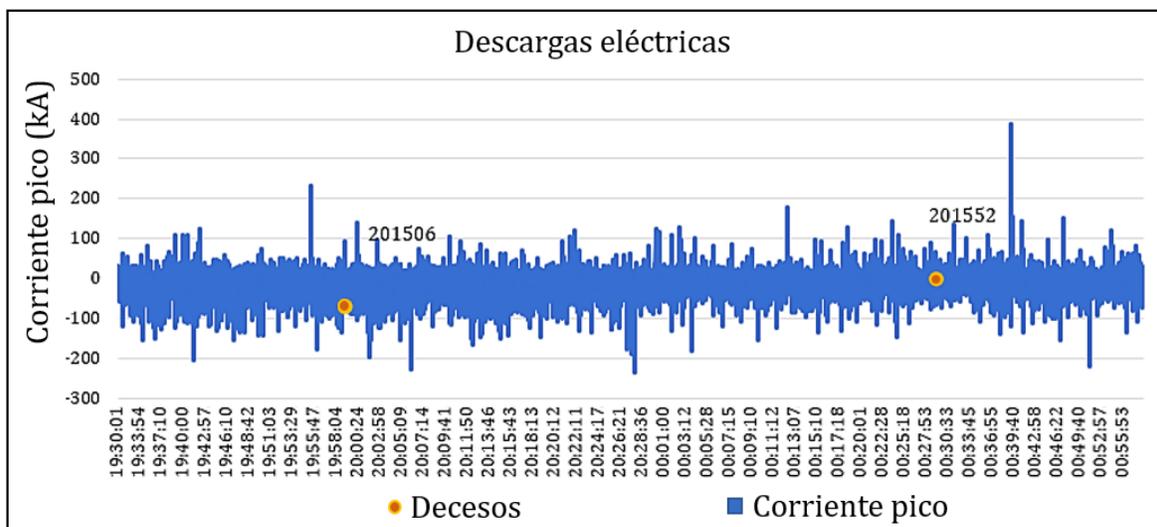


Figura 20. Descargas eléctricas en horas próximas a los decesos.

El evento identificado con la clave 201575 tuvo lugar el 18 de julio de 2015 con hora oficial de muerte a las 17:15 h (local) y la red GLD360 registró a las 00:15 h (Greenwich) una descarga de 7.9 kA. Es relevante señalar que, si la muerte hubiese sucedido exactamente a la hora reportada, situación que se debe considerar, estas lecturas indicarían que 1 segundo previo al deceso ocurrió un cambio de intensidad y polaridad en la descarga eléctrica hasta -181.8 kA.

A continuación, se presentan las descargas eléctricas en horas y minutos cercanos al deceso (Figuras 21 y 22).

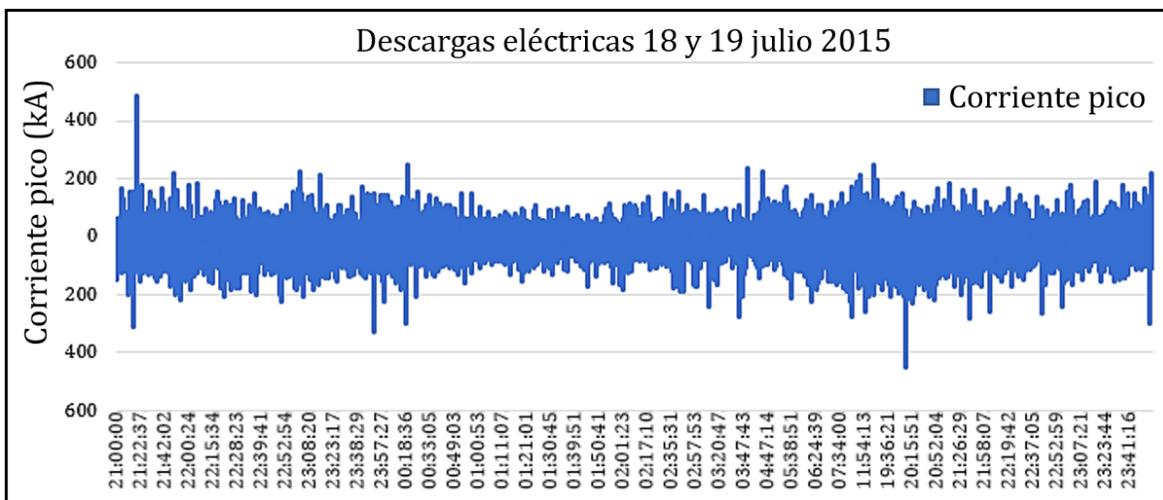


Figura 21. Descargas eléctricas del 18 y 19 de julio del 2015.

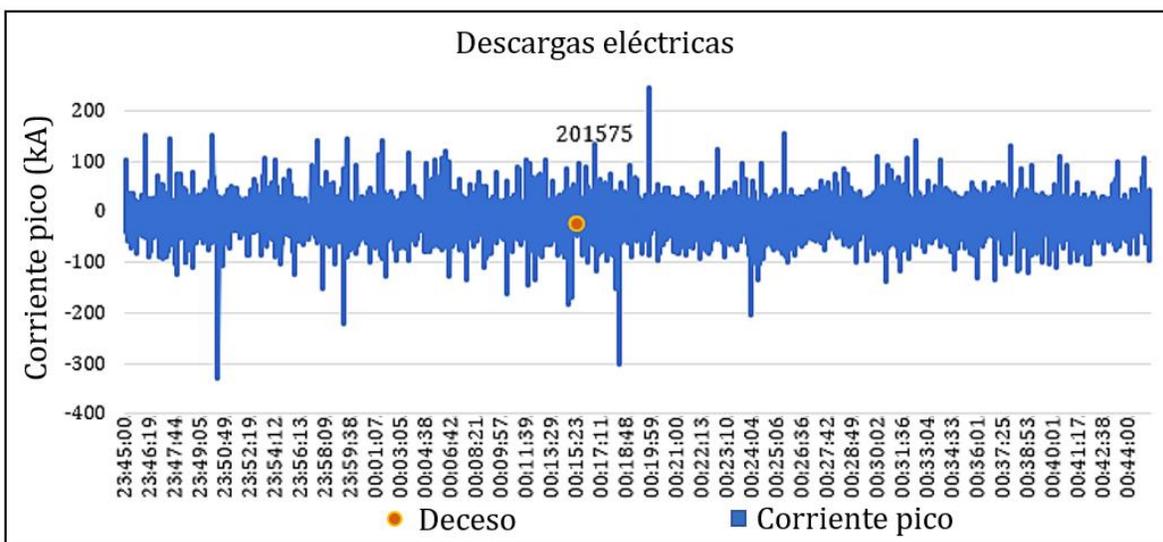


Figura 22. Descargas eléctricas en horas próximas al deceso 201575.

En la ilustración siguiente se observan las descargas eléctricas del 23 de julio para el caso 201577 (Figura 23).

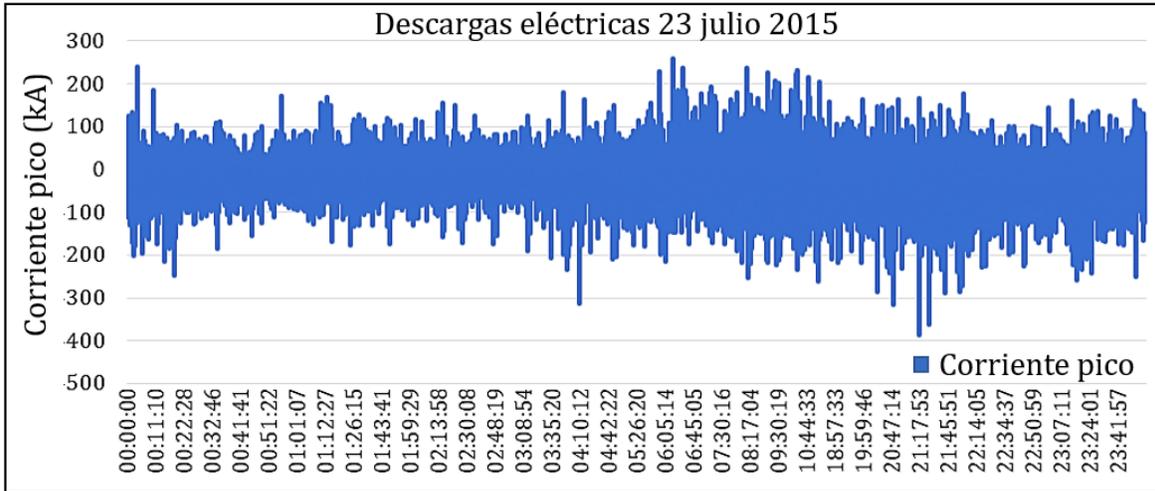


Figura 23. Descargas eléctricas del día 23 de julio del 2015.

El deceso 201577 ocurrió el 23 de julio a las 16:00 hora local, y la GLD360 recibió una señal de -107 kA a las 23:00 h Greenwich. En minutos cercanos al evento, en la Figura 24 se observa un registro con una marcada tendencia hacia los negativos; justo instantes previos de la hora oficial del deceso, el pico más intenso fue de -190.2 kA (Figura 23).

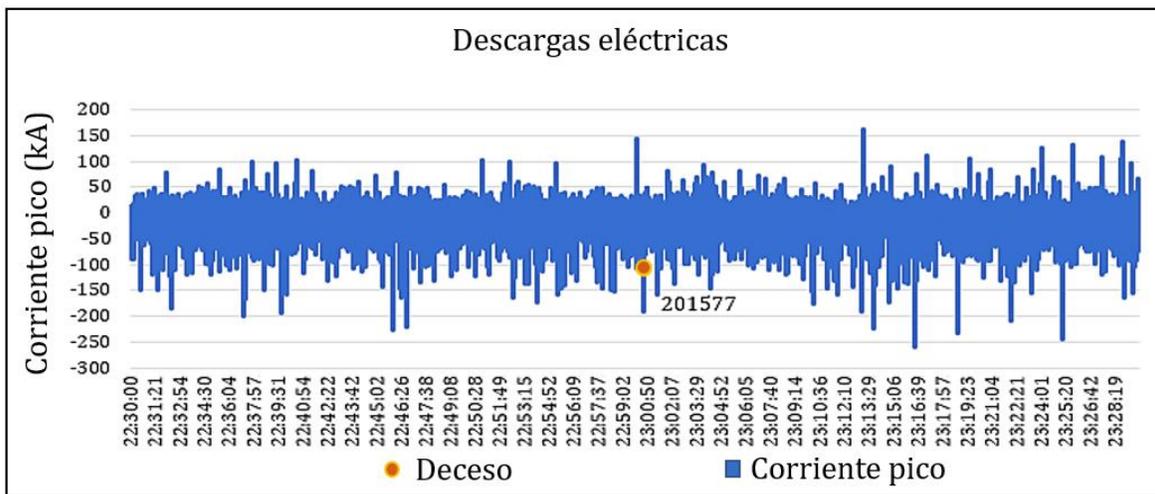


Figura 24. Descargas eléctricas en horas próximas al deceso 201577.

En cuanto al 201578, ocurrió un cambio importante, desde -116.8 a las 00:00:07 Greenwich hasta 62 a las 00:03:21 Greenwich, la hora del deceso fue a las 17 h local = 00:00 Greenwich con -3.3 kA.

Respecto al deceso 201576, sucedió en medio de una predominancia de cargas negativas, la muerte ocurrió a las 17 h local = 00:00 Greenwich y el comportamiento de las descargas eléctricas entre las 16 y 17 h fue relativamente constante, excepto 13 minutos antes (23:47 Greenwich = -298.3 kA), cuando se detectó un aumento en corrientes negativas.

En el caso 201579, el deceso fue clasificado con tiempo de 18 h = 01:00 Greenwich, con un registro de -17.1 kA. En el registro diario se distinguen varios ciclos de altos valores (+ y -) y al momento indicado del fallecimiento, las descargas presentaron un ciclo de menor intensidad que el ciclo previo inmediato.

Por último, a la hora oficial del deceso 201510 (16 h local = 22:00 Greenwich) las descargas eléctricas se ubicaron en 2.5 kA y 17 minutos después las lecturas presentaron un comportamiento atípico, alcanzando el pico más alto en -166.5 kA.

En el Anexo B se encuentran las series temporales de descargas eléctricas para los 11 decesos clasificados en el año 2015, por ser el año que registró mayor actividad atmosférica, y una tabla donde se resumen los resultados para todos los casos estudiados (2015-2019).

Comportamiento de las descargas eléctricas en relación con los decesos

En relación con el análisis de la ocurrencia de las descargas eléctricas y los decesos del 2015 al 2019, se descubrió que la mayoría de los fallecimientos ocurrieron por las tardes, con ocasionales muertes durante las primeras horas de la noche y temprano por la mañana.

En función de la hora local, el registro de rayos mostró un aumento a partir de las 11 AM, alcanzando su máximo entre las 5 y 6 PM, y después decrece hasta entrada la noche, lo que incrementaría el peligro de caída de rayo y el número de fallecimientos por esta causa.

Derivado del análisis de los rayos, no se distingue una relación clara con la hora oficial de los decesos; por ejemplo, en al menos 6 de los 11 casos del año 2015, los decesos ocurrieron en periodos del día donde los registros de la GLD360 manifestaron una serie de corrientes pico intensas y la hora oficial de muerte está dentro de este ciclo de elevada actividad eléctrica o justo saliendo de él. En otras palabras, los decesos ocurridos del periodo 2015-2019 coinciden tanto con registros de GLD360 de alta, moderada y baja intensidad. Es relevante aclarar que la hora oficial de los decesos es la que se consideró para este análisis; si bien es cierto que, es complicado obtener el dato del tiempo real de contacto entre el canal descendente del rayo nube-tierra (CG) y la persona, también es posible que el fallecimiento sucediera después de esta descarga; por ello, en esta investigación se toma la hora establecida por SSA (DGIS et al., 2020) como el momento en que ocurrió el evento para la interpretación del comportamiento de los rayos.

IV.1.3. Distribución de la población a escala municipal

En referencia a la distribución poblacional, se elaboró una combinación de la distribución de la población municipal (CONABIO, 2012) y los 50 casos de defunciones atribuibles a la caída de rayo (DGIS et al., 2020). El resultado derivado de este proceso se muestra en la Tabla C1 del Anexo C, donde se exhibe la población total, la cantidad de decesos, el área comprendida y la densidad poblacional por municipio; también se incluye, la fecha del evento, la causa de muerte y el sexo del fallecido.

En este tema, se destacan las densidades poblacionales de Mazatlán, Ahome y Guasave, en Sinaloa, y Cajeme, Sonora, con 145.81, 84.42, 79.32 y 65.78 habitantes por kilómetro cuadrado, respectivamente.

En el caso particular de los municipios con más frecuencia de muertes por caída de rayo, Ahome, Sinaloa se ubicó en primer lugar con una frecuencia de 5 fallecidos; esto indica que, es posible que ocurra 1 muerte por esta causa por cada 83,260 habitantes en un periodo de 5 años en base a su población total. Le siguen los municipios de Janos, Chihuahua, con 1 caso por cada 3,651 habitantes, y Mezquital, Durango, con 1 fallecido por cada 11,132 habitantes (ver Figura 25).

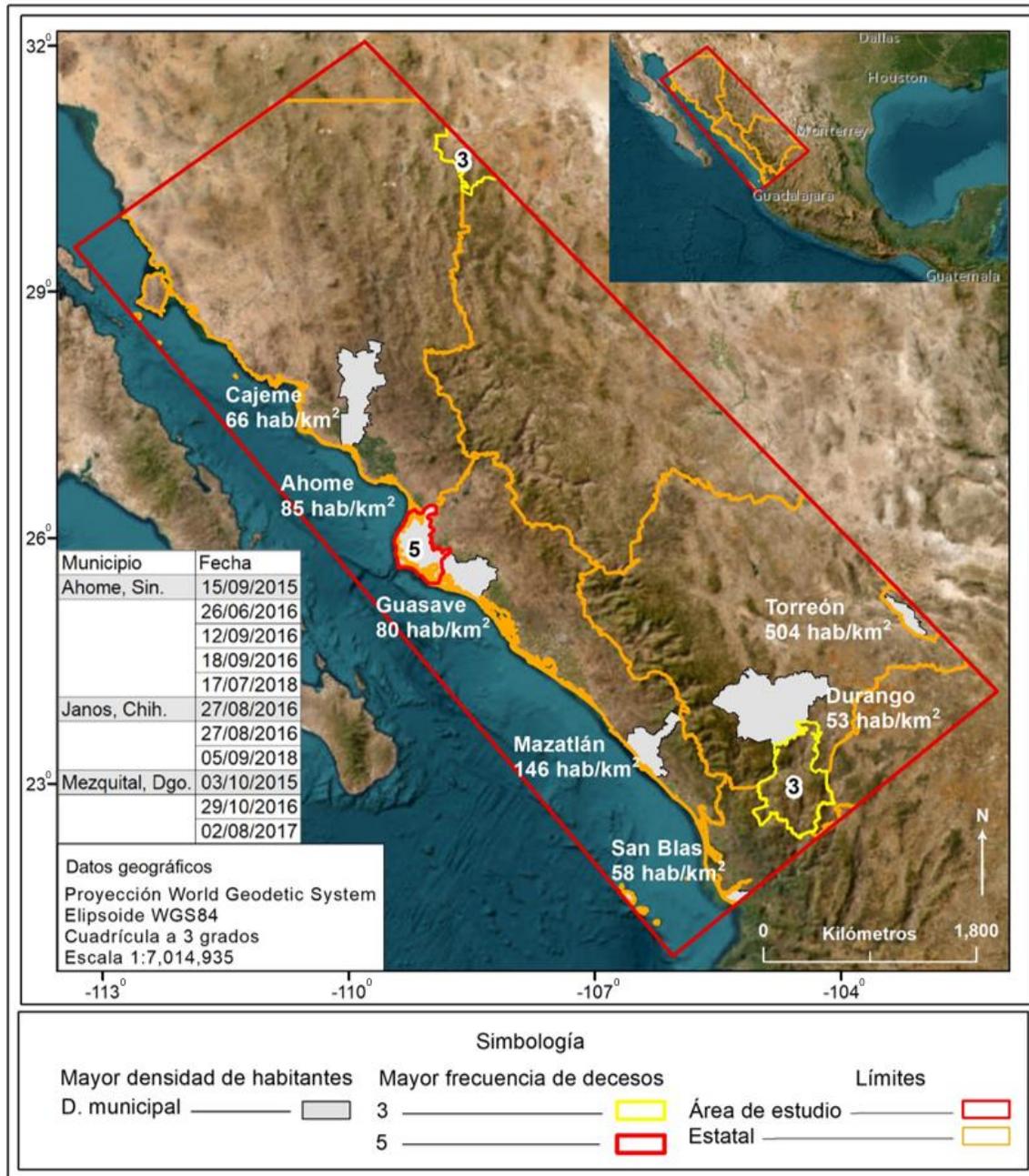


Figura 25. Municipios con mayor densidad poblacional y mayor frecuencia de decesos por caída de rayo. Fuente: Modificado de CONABIO,2012 y DGIS et al., 2020.

IV.1.4. Indicador de vulnerabilidad social (IVS)

En respuesta a los descrito por Holle y Cooper (2016), el indicador de vulnerabilidad social se construyó a partir de los archivos en formato vectorial del Grado de Vulnerabilidad Social por Municipio (CENAPRED, 2011), el Grado de Rezago

Social por Municipio (CONABIO, 2014) y el Grado de Marginación Social Municipal (CONABIO, 2010). Estos archivos representan porciones del área estudiada como polígonos georreferenciados con una clasificación de 5 categorías (Muy Alto, Alto, Medio, Bajo y Muy Bajo), por lo que se les otorgó un valor específico de 5 a 1, respectivamente (Tablas 9,10 y 11).

Los tres archivos mencionados fueron fusionados en ArcMap 10.8.1 y a los polígonos resultantes se les asignó una nueva categoría, que implique la jerarquía entre los datos ingresados de base. Esta categorización recibe el nombre de Indicador de Vulnerabilidad Social y en ella se interrelacionan las variables educativas, económicas, laborales, de acceso a los servicios de salud, infraestructura de casa-habitación y culturales, recomendados por Holle y Cooper (2016).

Tabla 9. Vulnerabilidad Social por Municipio, 2010. Fuente: CENAPRED, 2011.

Vulnerabilidad Social por Municipio, 2010	
Categoría	Valor
Muy alto	5
Alto	4
Medio	3
Bajo	2
Muy bajo	1

Tabla 10. Rezago Social por Municipio, 2010. Fuente: CONABIO, 2014.

Rezago Social por Municipio, 2010	
Categoría	Valor
Muy alto	5
Alto	4
Medio	3
Bajo	2
Muy bajo	1

Tabla 11. Marginación Municipal, 2010. Fuente: CONABIO, 2010.

Marginación Social por Municipio, 2010	
Categoría	Valor
Muy alto	5
Alto	4
Medio	3
Bajo	2
Muy bajo	1

En las Tablas 12 y 13 se muestran las categorías y valores que componen el Indicador de Vulnerabilidad Social, así como un ejemplo de los datos contenidos en el archivo resultante.

Tabla 12. Categorías del Indicador de Vulnerabilidad Social.

Indicador de Vulnerabilidad Social	
Categoría	Valor
Muy alto	13 - 15
Alto	11 - 12
Medio	8 - 10
Bajo	6 - 7
Muy bajo	3 - 5

Tabla 13. Ejemplo del Indicador de Vulnerabilidad Social por municipio.

Estado	Municipio	Población	Vul1.	GM	GRS	Categoría del IVS
Chihuahua	Janos	10,953	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Chihuahua	Buenaventura	22,378	Medio	Bajo	Muy bajo	Bajo
Chihuahua	Casas Grandes	10,587	Medio	Bajo	Muy bajo	Bajo

Coahuila de Zaragoza	Matamoros	107,160	Bajo	Bajo	Muy bajo	Muy bajo
Coahuila de Zaragoza	Torreón	639,629	Bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Coahuila de Zaragoza	Viesca	21,319	Bajo	Medio	Muy bajo	Bajo
Durango	Mezquital	33,396	Muy Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
Durango	Súchil	6,761	Medio	Medio	Bajo	Medio
Durango	San Dimas	19,691	Medio	Medio	Medio	Medio
Jalisco	Huejuquilla el Alto	8,781	Bajo	Medio	Bajo	Bajo
Jalisco	Mezquitic	18,084	Muy Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
Nayarit	Huajicori	11,400	Medio	Muy alto	Alto	Alto
Nayarit	Acaponeta	36,572	Bajo	Medio	Muy bajo	Bajo
Nayarit	Del Nayar	34,300	Muy Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
Sinaloa	Choix	32,998	Medio	Alto	Medio	Alto
Sinaloa	El Fuerte	97,536	Medio	Medio	Bajo	Medio
Sinaloa	Ahome	416,299	Bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Sonora	Caborca	81,309	Bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Sonora	Altar	9,049	Medio	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Zacatecas	Juan Aldama	20,543	Bajo	Bajo	Muy bajo	Muy bajo
*Vul1, Vulnerabilidad; GM, Grado Marginación; GRS, Grado Rezago Social.						

IV.2. Nivel 2. Visualización de distribuciones

IV.2.1. Distribución de muertes por rayo

En la evaluación del peligro de caída de rayo es fundamental identificar la geolocalización del sitio de impacto del rayo nube-tierra (CG) con la persona afectada y

el lugar del fallecimiento, así como ambos tiempos locales para una cartografía más precisa; desafortunadamente, el único dato disponible para su ubicación es el municipio de ocurrencia y dificulta la visualización de la distribución de muertes por caída de rayo a una escala mayor.

Dentro de esta problemática, fueron analizadas las inconsistencias de la base de datos oficial de decesos (DGIS et al., 2020) y de los 50 decesos clasificados como causa de muerte atribuible a la caída de rayo, 8 casos presentaron fechas de ocurrencia y registro consistentes (DGIS et al., 2020); es decir, el registro se realizó el mismo día que sucedió el incidente (201671, 201687, 201688, 201689, 201690, 201860, 201861, 201940).

Contrario a lo anterior, en 42 eventos las fechas de ocurrencia y registro no coinciden; asimismo, 15 casos fueron catalogados con el Código 99, lo que presume un desconocimiento de las fechas de registro por parte del personal técnico especializado en la captura y organización de la información (201509, 201575, 201576, 201580, 201686, 201691, 201695, 201739, 201804, 201805, 201808, 201862, 201903, 201904, 201908) (Figura 26).

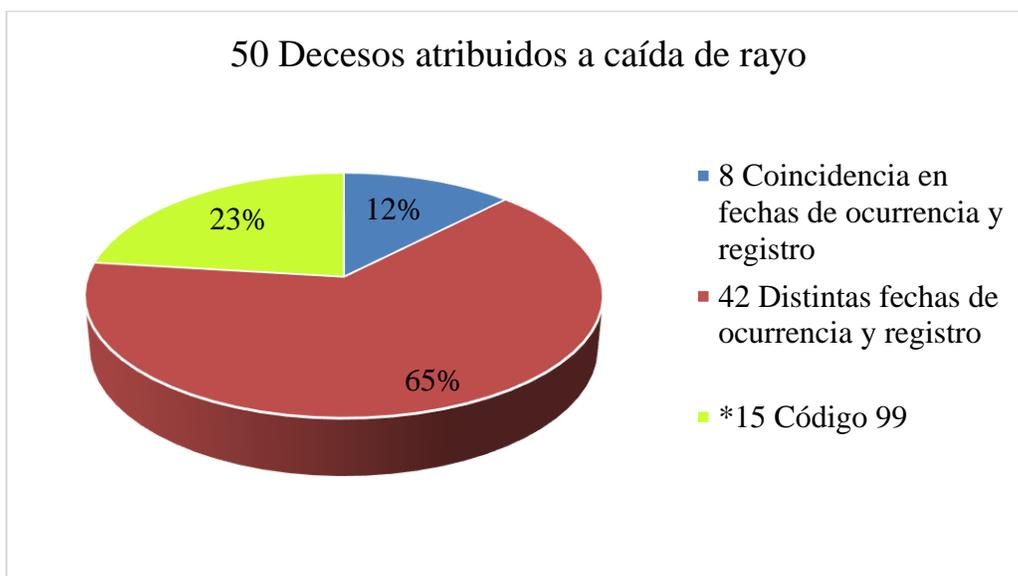


Figura 26. Inconsistencias en decesos atribuidos a caída de rayo.

Desde una perspectiva general, oficialmente se clasificaron 26 casos con el nombre de las localidades donde ocurrió el evento (DGIS et al., 2020), 20 de ellos están

definidos como información resguardada por la Ley SNIEG (DOF, 2018) y en 4 casos se menciona Janos, Chihuahua y Torreón, Coahuila de Zaragoza como municipio y localidad; lo cual es un error. En otras palabras, la base de datos de decesos (DGIS et al., 2020) presenta un 52% de eventos con las localidades oficiales donde tuvieron lugar estos hechos, en 40% se desconoce el dato por resguardo legal y en 8% se aprecia error y/o desconocimiento de la localidad por parte de la persona que registró el suceso (Figura 27).

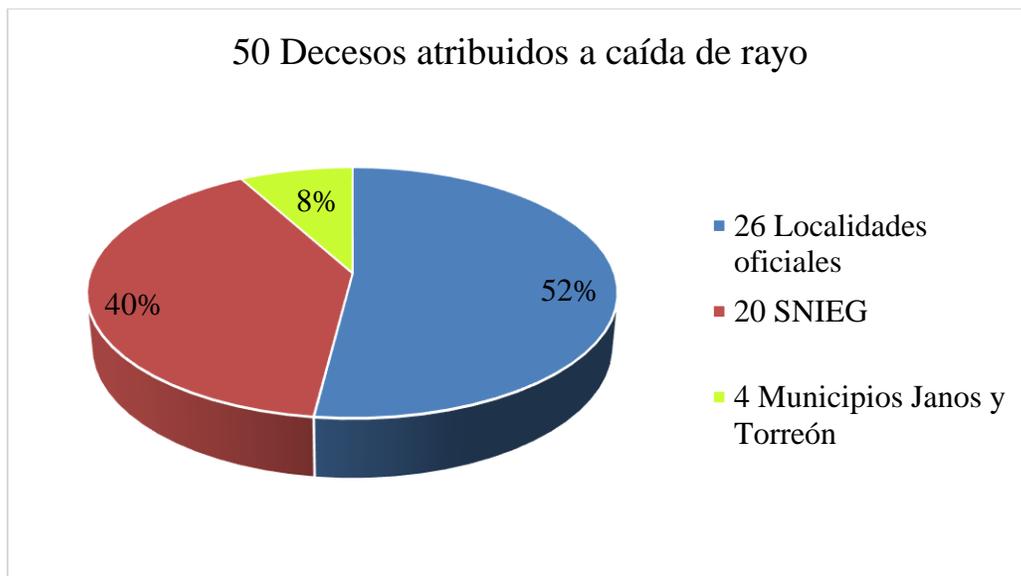


Figura 27. Condición legal de localidades en los decesos atribuidos a caída de rayo.

En resumen, en 52% de los casos se tiene la localidad oficial por la SSA (26) (DGIS et al., 2020), en 24% se obtuvieron las posibles localidades y población expuesta (12) y en 24% no fue posible hacer una identificación a nivel local, por lo que se mantuvo el nombre del municipio (12). En la Figura 28 se muestra la distribución de las localidades oficiales y posibles con registro de decesos atribuidos a la caída de rayo durante el periodo 2015-2019.

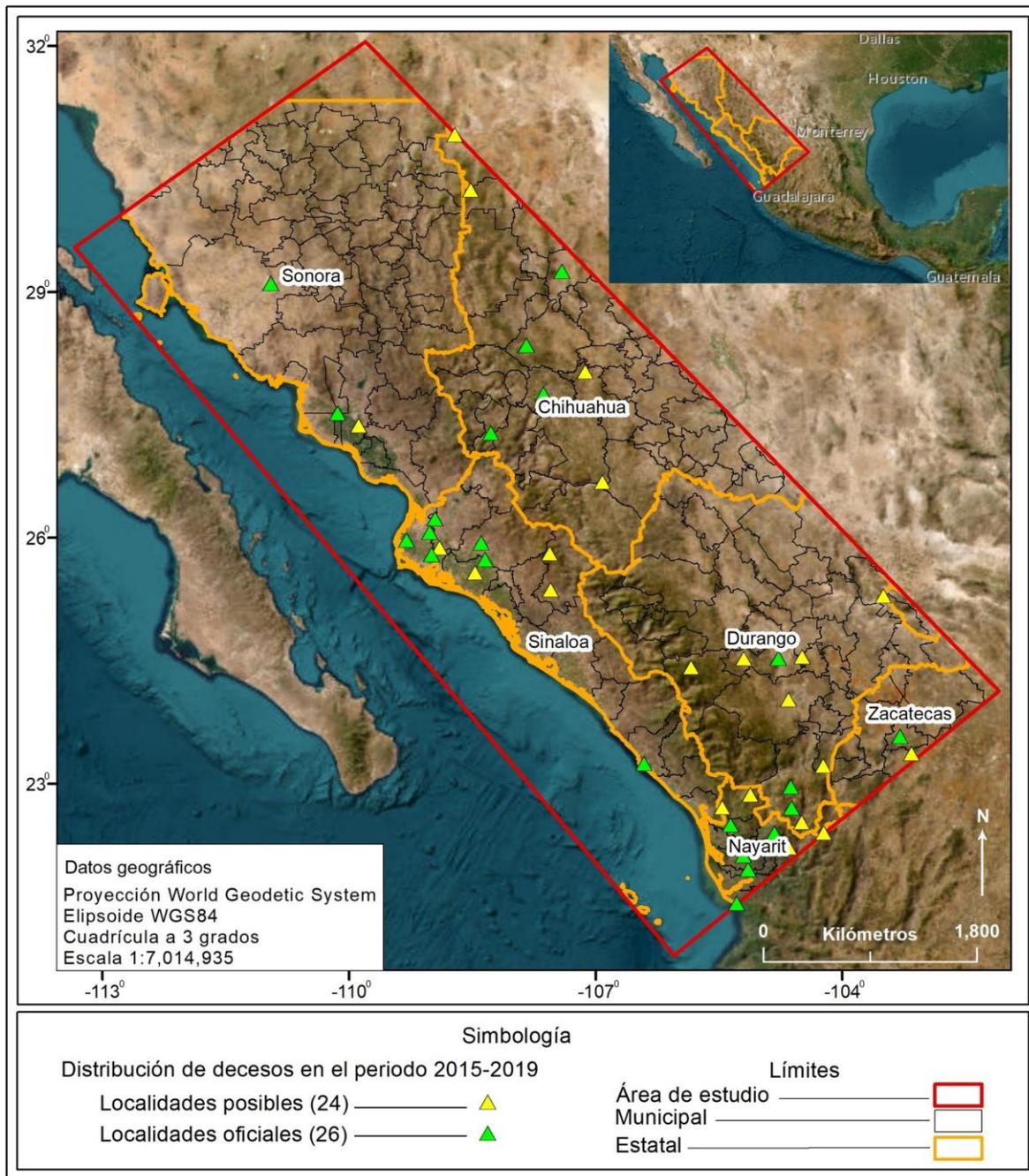


Figura 28. Distribución de localidades con decesos por rayo en 2015-2019.

IV.2.2. Distribución de descargas eléctricas, localidades y habitantes expuestos

En referencia a lo explicado en III. Metodología, la extracción de los rayos nube-tierra (CG) fue por mes, día y 30 minutos antes y después de la hora oficial de los 50

decesos en formatos *.csv, *.xlsx y *.shp para facilitar la edición y visualización de su distribución en el área de estudio.

En relación con la problemática de geolocalización de los decesos, se desarrolló procedimiento que permite aumentar la escala de análisis a un nivel local y a través de la distribución de los rayos nube-tierra (CG) se identificaron las posibles localidades/habitantes expuestos según la hora oficial de los fallecimientos. En el Anexo D se ubican los mapas de la distribución de rayos nube-tierra (CG) de los años que comprende esta evaluación, así como las posibles localidades y población expuestas.

Con el procedimiento metodológico en 10 de los casos con información protegida por la Ley SNIEG (DOF, 2018) se encontraron las posibles localidades y el total de la población expuesta; mientras que, en los 10 restantes no fue posible este análisis por falta de información, quedando sólo a nivel municipal (Figura 29).

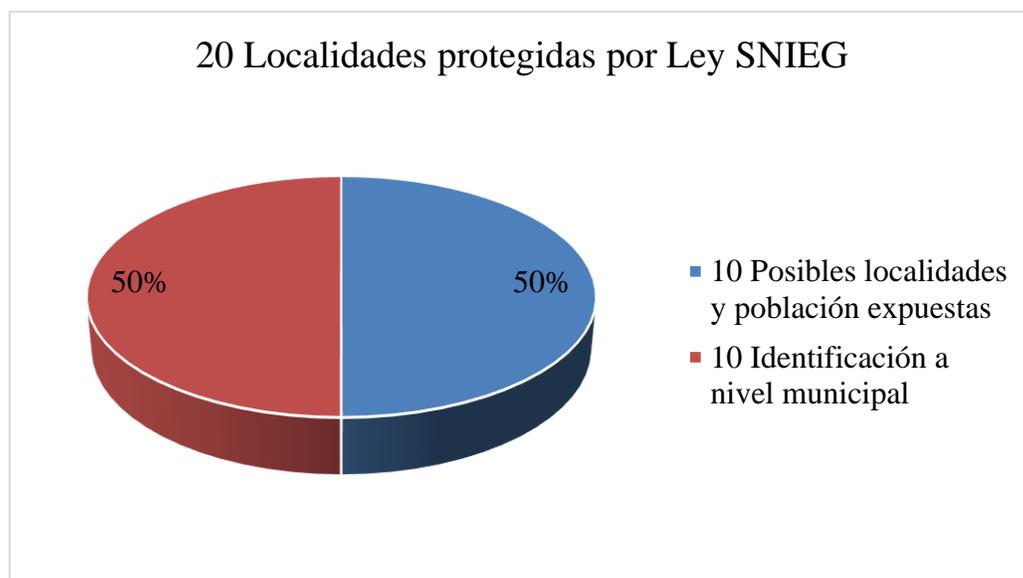


Figura 29. Situación de localidades protegidas por Ley SNIEG (DOF, 2018).

Respecto a los 24 decesos donde no se indica la localidad de ocurrencia, en 12 casos se obtuvieron 184 posibles localidades y 22,429 habitantes que estuvieron posiblemente expuestos (Tabla 14); en cuanto a los 12 casos restantes, solamente se logró una identificación a nivel municipal (Tabla 15).

Tabla 14. Decesos donde se logró el análisis geoespacial.

Deceso	Estado	Municipio	No. localidades	No. habitantes
201506	Chihuahua	Guachochi	11	1,233
201509	Durango	Pánuco de Coronado	1	760
201577	Sinaloa	Badiraguato	36	1,590
201609	Chihuahua	Janos	3	267
201610	Chihuahua	Janos	2	265
201613	Durango	San Dimas	12	340
201614	Durango	San Dimas	12	340
201634	Jalisco	Mezquitic	1	12
201695	Zacatecas	Fresnillo	28	4,898
201705	Durango	Durango	57	10,540
201903	Chihuahua	Carichí	8	371
201908	Durango	Canatlán	13	1,813
		Totales	184	22,429

Tabla 15. Decesos donde no se logró el análisis geoespacial.

Deceso	Estado	Municipio	No. localidades	No. habitantes
201552	Nayarit	Huajicori	167	11,381
201576	Sinaloa	Ahome	339	416,299
201578	Sinaloa	Badiraguato	482	29,999
201580	Sonora	Cajeme	414	26,628
201612	Coahuila de Zaragoza	Torreón	16	4,365
201687	Sinaloa	Ahome	339	416,299
201706	Durango	Mezquital	800	33,396
201730	Nayarit	Del Nayar	324	21,834
201740	Sinaloa	Guasave	543	285,912
201804	Chihuahua	Janos	27	2,416
201907	Durango	Súchil	29	6,761
201940	Nayarit	Huajicori	167	11,381
		Totales	3647	1,266,671

En conclusión, en los decesos atribuidos a la caída de rayo en el noroeste de México durante el periodo 2015-2019, las localidades afectadas y población expuesta a estos eventos se incrementa de un 52% (señalado por la DGIS et al., 2020) a un 76%;

esto debido a que en 24% de los decesos fue posible aproximarse a un nivel local de ocurrencia de la muerte y en 24% se mantuvo a escala municipal (Figura 30).

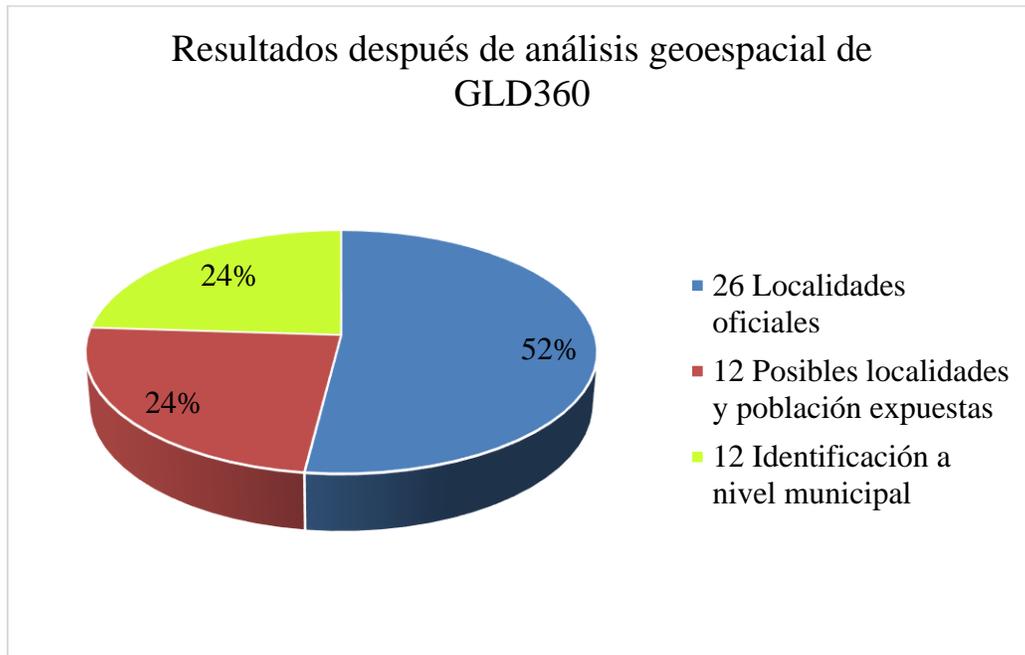


Figura 30. Resultados después del análisis geoespacial de GLD360.

En contexto y para ejemplificar lo realizado, de acuerdo con los registros de la DGIS (2020), los municipios con ocurrencia de decesos por caída de rayo en 2018 fueron Ahome, Bécum, Bocoyna, Canatlán, Guazapares, Janos, Mazatlán y Mezquital. En todos ellos se declara oficialmente la localidad del fallecimiento; excepto en el caso 201804, donde se menciona el nombre del municipio y la distribución geoespacial de las lecturas GLD360 no ubica corrientes pico sobre el territorio de Janos, Chihuahua, al menos 30 minutos antes y después de la hora oficial de la muerte (19 horas).

En perspectiva, esto no significa que el fallecimiento no sucediese por caída de rayo; sino que, probablemente se deba al desconocimiento de la hora del impacto del rayo nube-tierra (CG) con la víctima y/o el traslado del paciente a otro sitio para su atención médica.

Si bien es cierto que el evento tuvo lugar en calles y carreteras (DGIS et al., 2020) y que todos los asentamientos están conectados por vías terrestres, es bastante aventurado mencionar una o unas pocas localidades donde probablemente ocurrió el

deceso. Por esta razón, se considera a las 27 localidades del municipio de Janos como sitios donde posiblemente sucedió el evento y a sus 2,416 habitantes como expuestos.

Esta misma lógica fue implementada en todos los casos del periodo en estudio para tratar de identificar las posibles localidades afectadas y el número de población expuesta al fenómeno de caída de rayo (Tabla 16); en negritas se distinguen los casos con localidades oficiales.

Tabla 16. Posibles localidades afectadas y población expuesta en 2015-2019.

Deceso	Loc.	Habs./exp.	Deceso	Loc.	Habs./exp.
201506	11	1,233	201705	57	10,540
201509	1	760	201706	800	33,396
201510	1	285	201730	324	21,834
201552	167	11,381	201739	1	5,025
201553	1	14,050	201740	543	285,912
201575	1	5,025	201746	1	1,832
201576	339	416,299	Totales	1,726	358,539
201577	36	1,590			
201578	482	29,999			
201579	1	3,355	Deceso	Loc.	Habs./exp.
201580	414	26,628	201804	27	2,416
Totales	1454	510,605	201805	1	5,026
			201806	1	2,053
Deceso	Loc.	Habs./exp.	201808	1	11,495
201609	3	267	201809	1	449
201610	2	265	201859	1	381,583
201611	1	2,818	201860	1	3,456
201612	16	4,365	201861	1	4,318
201613	12	340	201862	1	4,318
201614	12	340	Totales	35	415,114
201634	1	12			
201668	1	19,140			
201669	1	10,187	Deceso	Loc.	Habs./exp.
201670	1	3,620	201903	8	371
201671	1	10,187	201904	1	1,752
201686	1	9,555	201907	29	6,761
201687	339	416,299	201908	13	1,813
201688	1	256,613	201938	1	769

201689	1	3,124		201940	167	11,381
201690	1	381,583		Totales	219	22,847
201691	1	715,061				
201695	28	4,898				
Totales	423	1,838,674				
Deceso: fallecimiento por causa de rayo; Loc.: número de localidad o localidades; Habs./exp.: habitantes expuestos.						

En este sentido y a modo de ejemplo, se muestra como año tipo al 2018, por ser el año donde se tiene la mayor cantidad de localidades oficiales clasificadas por la SSA (DGIS et al., 2020); en este caso, se considera un total de 415,114 habitantes expuestos a las tormentas eléctricas que tuvieron como resultado 9 fallecimientos; 8 de ellos con clasificación de localidad y 1 con sólo el municipio de ocurrencia (Figura 31).

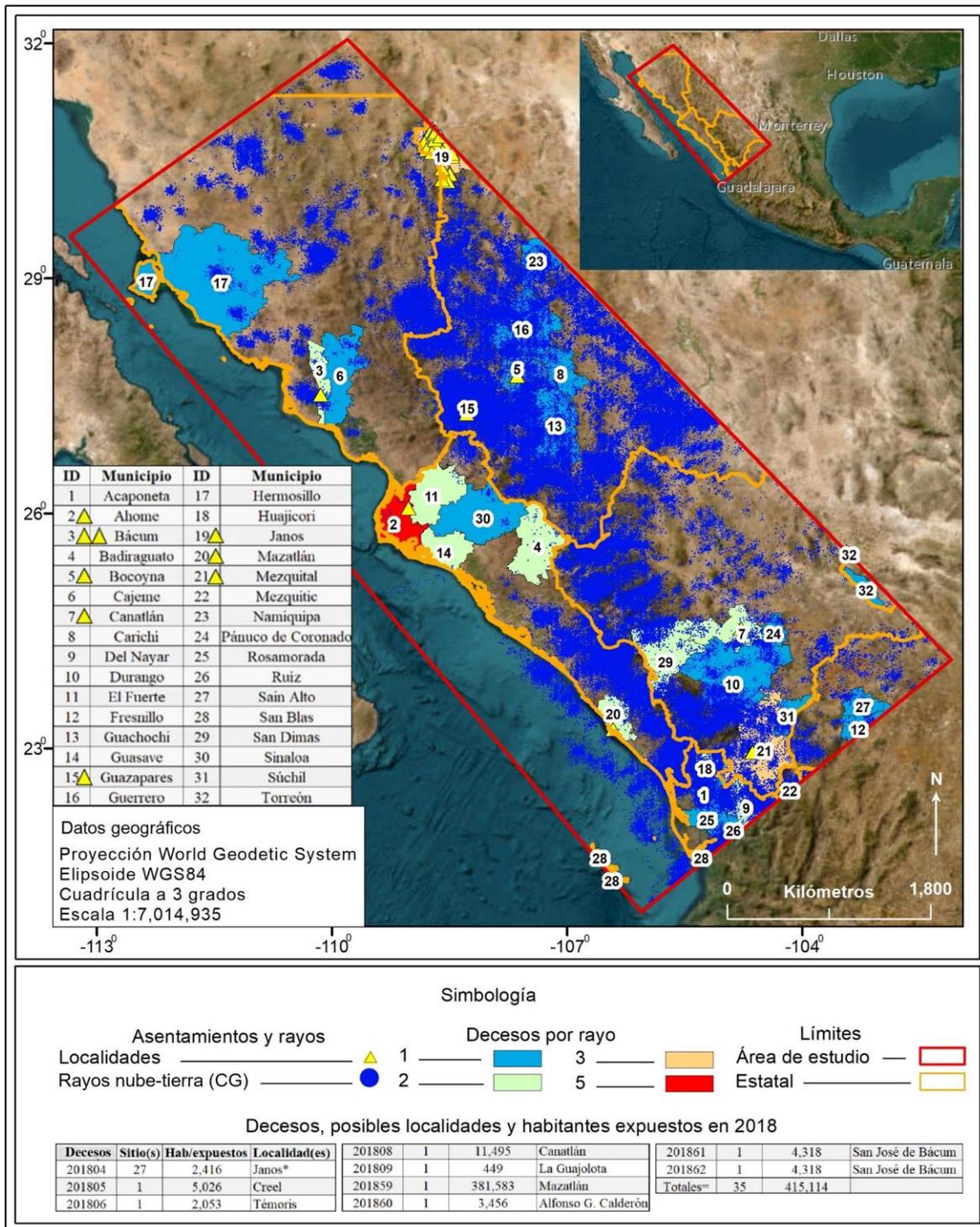


Figura 31. Rayos nube-tierra (CG), localidades y habitantes expuestos en decesos del 2018.

IV.2.3. Distribución de indicador de vulnerabilidad social

Referente al indicador de vulnerabilidad social construido para el noroeste de México, 15 municipios están clasificados con una categoría muy alta y están concentrados principalmente en el suroeste del estado de Chihuahua, noroeste y sur de Durango y noreste de Nayarit. Estos municipios son Balleza, Batopilas, Carichí, Chínipas, Guachochi, Guadalupe y Calvo, Guazapares, Morelos, Urique y Uruchi del estado de Chihuahua, Mezquital, Otáez y Tamazula de Durango; así como, Mezquitic, Jalisco y Del Nayar, Nayarit.

Respecto a los municipios con una clasificación alta, se localizan geográficamente contiguos a los anteriores; mientras que, aquellos identificados con un indicador de vulnerabilidad media, baja y muy baja se encuentran dispersos en el norte, este, sur y oeste del área de estudio. La distribución geoespacial del indicador de vulnerabilidad social se muestra en la Figura 32.

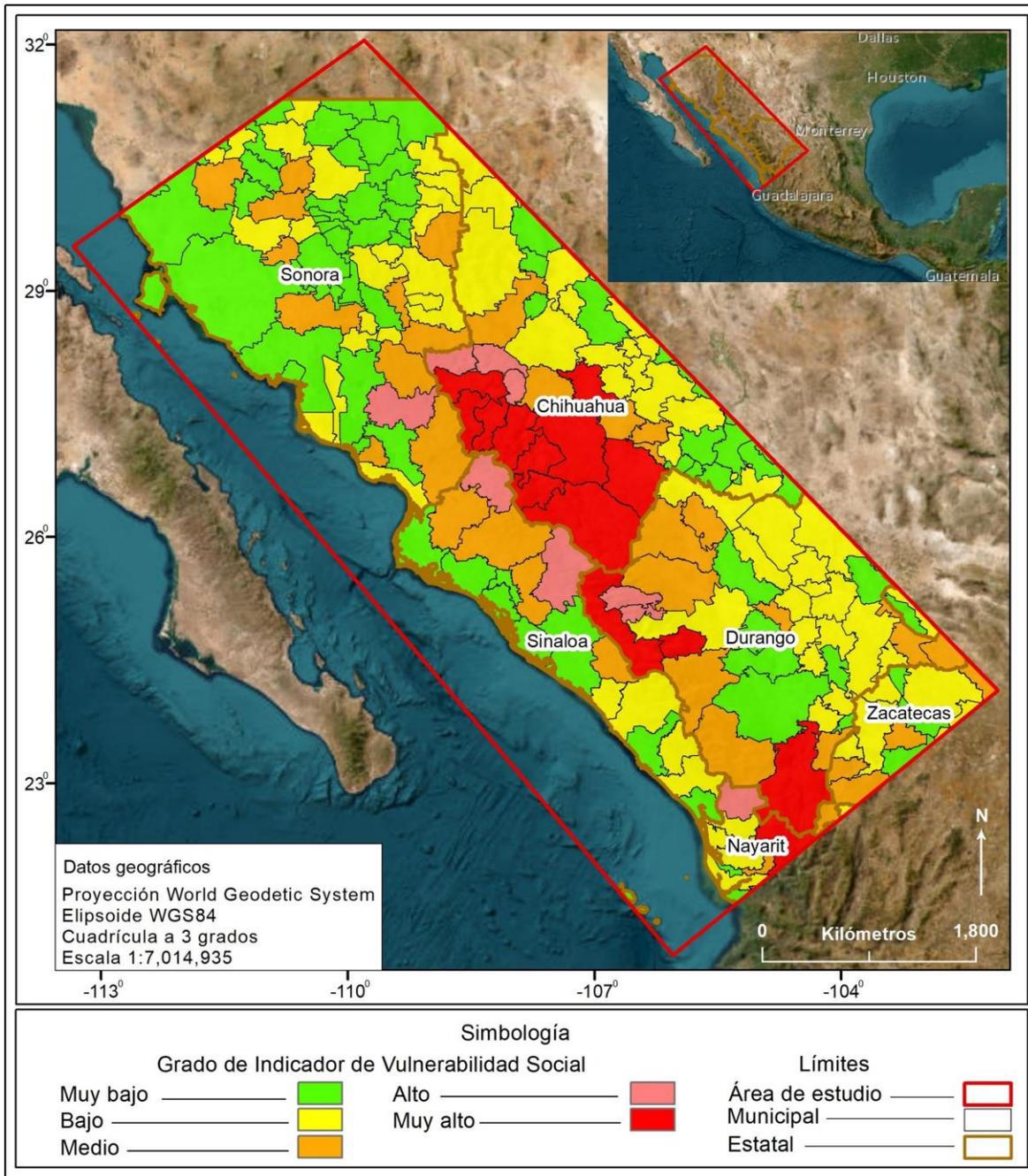


Figura 32. Distribución del indicador de vulnerabilidad social.

IV.2.4. Análisis de componentes principales (ACP) en decesos por caída de rayo

El objetivo de realizar un Análisis de Componentes Principales (ACP) dentro del marco de la presente tesis doctoral es tratar de identificar las variables que resulten más relevantes en materia de muertes por caída de rayo.

Se llevó a cabo un ACP con todos los casos de decesos ocurridos durante el periodo en estudio (2015-2019) que, como se explicó con anterioridad, la Secretaría de Salud (DGIS et al., 2020) clasifica con 10 distintas categorías en muertes atribuibles a caída de rayo, y dentro del ACP se nombran individuos.

Para este análisis se consideraron 6 campos que reúnen información respecto a las condiciones de cada deceso en cuestión, como el tipo de población, la estacionalidad, la vulnerabilidad, la hora del deceso, la edad agrupada y la ocupación; mismas que dentro del ACP se nombran variables. Cada uno de estos campos contiene una subclasificación a la que le fue otorgada una representación numérica.

En la tabla siguiente se muestran los casos del año 2015 y su categorización numérica a manera de ejemplo (Tabla 17). Las subclasificaciones del tipo de población según SSA (DGIS et al., 2020) son urbana, rural y no se especifica; en estacionalidad se tiene premonzón (ene-may), monzón (jun-sep) y postmonzón (oct-dic); en vulnerabilidad son muy baja, baja, media, alta y muy alta; en hora de defunción se consideran las horas completas y los minutos en proporción; en edad agrupada son 14 subcategorías que abarcan desde 10 hasta 79 años y 10 distintos tipos de ocupación.

Tabla 17. Clasificación numérica decesos en 2015 y variables consideradas.

Deceso	Tipo-pob.	Estacionalidad	Vulnerabilidad	Hora-D.	Edad-agrupada	Ocupación
201506	2	2	5	13	6	8
201509	2	1	2	13,25	1	2
201510	2	3	5	16	14	3
201552	2	2	4	17,50	5	9
201553	1	3	3	12	7	7
201575	1	2	3	17,25	3	9
201576	2	2	1	17	14	8
201577	2	2	4	16	1	3
201578	2	2	4	17	4	9

201579	1	2	3	18	9	9
201580	1	3	1	1	3	9
Tipo_pob.: tipo de población; Hora_D.: hora de deceso.						

La base de datos es organizada en un archivo de Excel en formato texto y decimales por comas, importada a R Commander 2.7-1 (Fox y Bouchet-Valat, 2016). Por medio del módulo FactoMineR (Husson et al., 2017), se ejecutó Principal Component Analysis (PCA), considerando como variables activas el tipo de población, la estacionalidad, la vulnerabilidad, la edad agrupada y la ocupación.

En las opciones del archivo de salida se muestran los valores propios, tanto para las variables como para los individuos y la descripción de las dimensiones. En cuanto al agrupamiento jerárquico en componentes principales, éste es ejecutado sobre las primeras 5 dimensiones de ACP, se realiza la consolidación de los conjuntos e imprimen gráficas y resultados para los conjuntos.

Un término importante en ACP es la variación en los datos en el análisis de correspondencia, ésta es la suma de las varianzas de las variables en una matriz de correlación, donde la suma de los valores diagonales de la matriz de correlación corresponde al número de variables. En otras palabras, el porcentaje de varianza es la inercia de los datos.

Además, los valores propios son medidas de la importancia o varianza de los ejes en ACP, son llamados también valores latentes o raíz y son mostrados como las variaciones estimadas de los respectivos componentes. El análisis de los componentes principales se ocupa principalmente de los valores propios de la covarianza de la muestra o de la matriz de correlación (Kottegoda Rosso, 2008).

En el caso que nos ocupa, el primer eje o dimensión representa un 28.673% del total de la inercia o variación de los datos y en el segundo eje se observa con un 26.617%; es decir, en el plano principal se tiene el 55.29% del total de la variación de la información que está dentro de la base de datos original (Figura 33).

También se obtuvieron los porcentajes de varianza asociados a los ejes 3, 4 y 5, siendo 20.303%, 13.735% y 10.672%, respectivamente. De tal manera que, para la Dimensión 5 se logró un porcentaje de varianza acumulada del 100% (Tabla 18).

En el plano principal se pueden observar a los individuos con etiquetas de colores que corresponden a los 4 subconjuntos de individuos o clusters que R Commander encontró de acuerdo a la base de datos original ingresada (Husson et al., 2013). El programa controló automáticamente el color de los individuos usando los cosenos cuadrados, cuyos valores indican la calidad de los individuos en el gráfico (Kassambara, 2017).

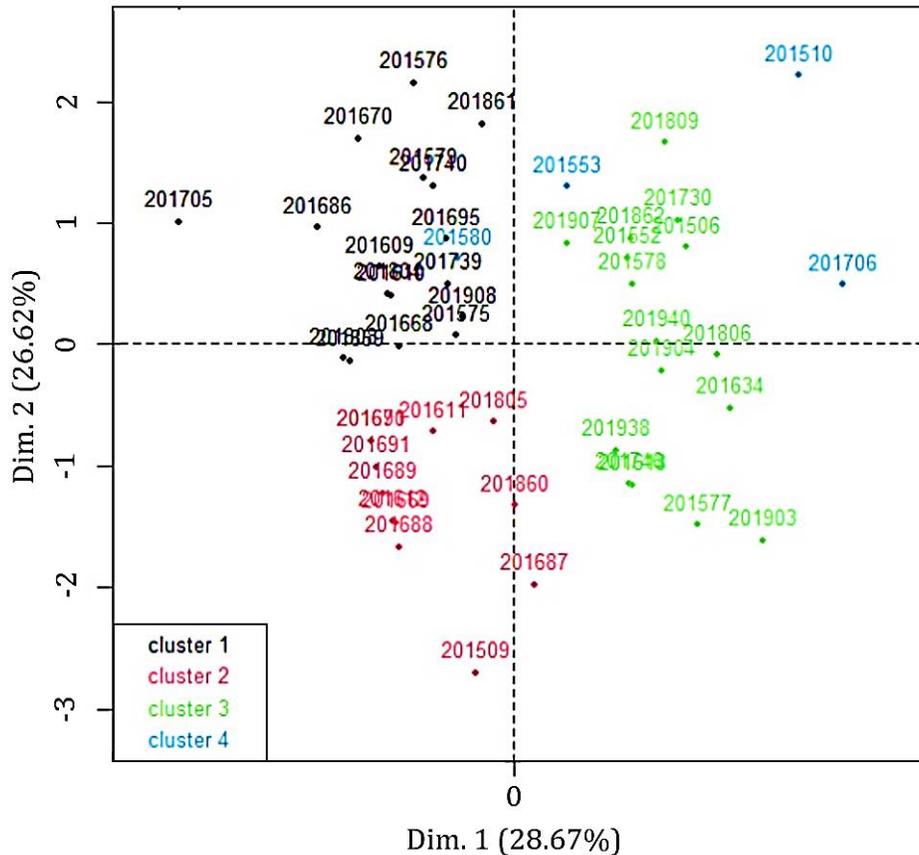


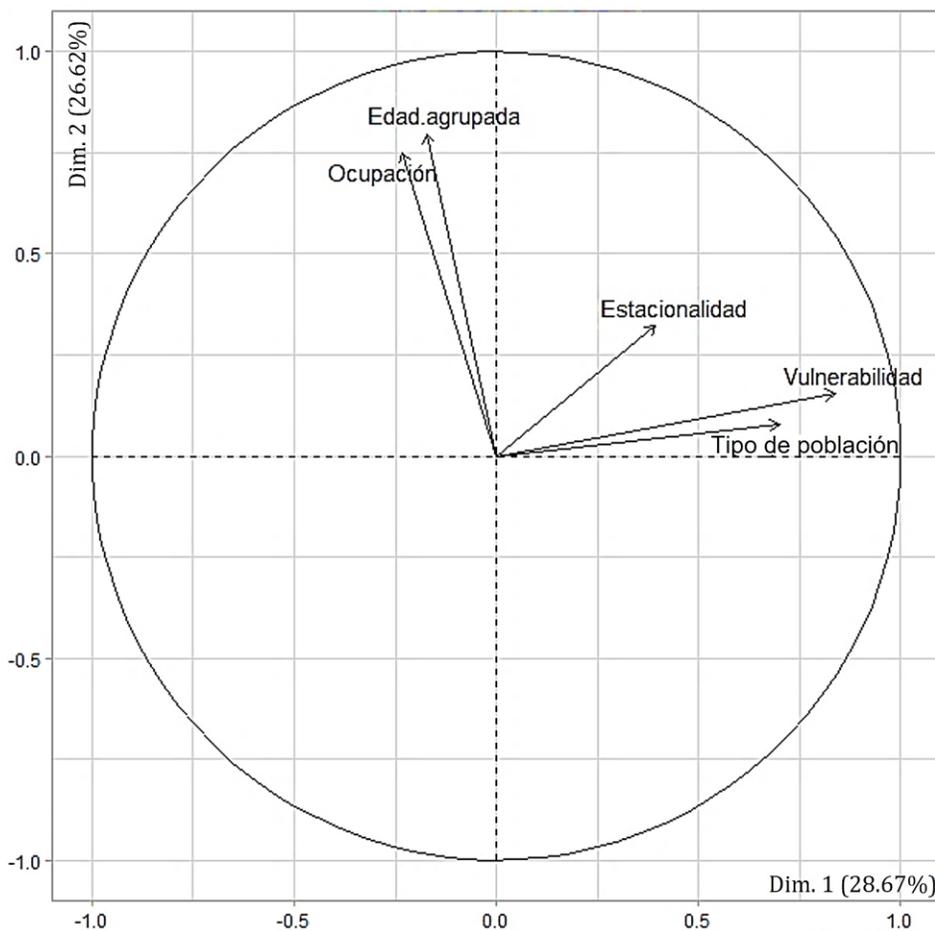
Figura 33. Plano principal de los individuos en el análisis de PCA.

Tabla 18. Varianzas en las 5 dimensiones analizadas.

Valores propios	Dim. 1	Dim. 2	Dim. 3	Dim. 4	Dim. 5
Varianza	1.434	1.331	1.015	0.687	0.534
% de varianza	28.673	26.617	20.303	13.735	10.672
% de varianza acumulada	28.673	55.29	75.593	89.328	100.00

Dim.: dimensión.

Un aspecto muy importante en los PCA es conocer la representación de los individuos dentro del plano principal y para ello se visualizó el círculo de correlación. En la Figura 34, la longitud de las líneas de las variables dentro del círculo de correlación está dada por los cosenos cuadrados de dichas variables y a su vez, ambos indican la calidad de los datos de salida del procesamiento (Husson et al., 2013; Kassambara, 2017).

**Figura 34.** Círculo de correlación entre las variables.

A primera vista, la vulnerabilidad y el tipo de población están altamente relacionadas, debido a que manifiestan un ángulo pequeño entre ambas líneas; como se mencionó con anterioridad, la vulnerabilidad está vinculada al nivel de preparación de la población para hacerle frente a un fenómeno perturbador (Martínez Haros, 2016) y en efecto, la vulnerabilidad es mayor cuando se trata de una población con poca información e infraestructura inadecuada ante la caída de rayo; por lo tanto, es comprensible que estas dos variables resulten correlacionadas.

Una situación similar sucedió entre la edad agrupada y la ocupación, una mayor cantidad de personas en edad biológica productiva realizan actividades laborales y recreativas al aire libre (DGIS et al., 2020), lo que expone a los habitantes al peligro que representa un rayo.

Por otro lado, la estacionalidad de las precipitaciones no muestra una línea tan extensa como sus homólogas en el círculo de correlaciones. En la tabla de cosenos cuadrados la estacionalidad es la variable menos representada en el plano principal con un 25.83%. La vulnerabilidad es la variable que está mejor representada de las 5 con un 72.71%, seguida por la edad agrupada con 66.47%, ocupación con un 61.65% y el tipo de población con 49.77% (Tabla 19).

Es importante destacar que, por estar definidos sobre el eje de la Dimensión 1 (28.67%), se infiere que la vulnerabilidad y el tipo de población son las variables que tienen mayor peso en cuanto a su relación entre ambas, que la existente entre la edad agrupada y la ocupación, cuyo peso está cimentado por la Dimensión 2 y su 26.62% de la información.

En cuanto a la época estacional, 44 decesos ocurrieron de junio a septiembre (monzón), 2 en marzo y mayo (premonzón) y 2 en 2 octubre, 1 en noviembre y 1 diciembre (postmonzón). La variable estacionalidad se posicionó dentro del plano principal con una tendencia mayor en la Dimensión 1 (28.67%); lo que significa un mayor peso que la relación existente entre la edad agrupada y la ocupación, pero menor que la vulnerabilidad y el tipo de población.

La sumatoria de las Dimensiones 1 y 2 en la variable de estacionalidad representó el menor valor de todas las variables. Esto puede deberse a que la gran mayoría de decesos (44) y precipitaciones con rayos sucedieron durante los meses que ocupan el monzón (junio-septiembre) y R Commander interpreta los datos originales cargados hacia una sola opción, por lo que no identifica a la estacionalidad como un factor determinante, cuando evidentemente lo es.

Tabla 19. Cosenos cuadrados en las 5 dimensiones analizadas.

	Dim. 1	Dim. 2	Suma	Dim. 3	Dim. 4	Dim. 5
Tipo población	0.491406	0.006317	0.497723	0.318230	0.014148	0.169899
Estacionalidad	0.155036	0.103341	0.258377	0.607347	0.085441	0.048835
Vulnerabilidad	0.702986	0.024184	0.727170	0.000704	0.045958	0.226168
Edad agrupada	0.030086	0.634621	0.664707	0.000283	0.301376	0.033634
Ocupación	0.054146	0.562382	0.616528	0.088604	0.239825	0.055044
Dim.: Dimensión.						

Superposición de planos

La sobreposición de planos puede facilitar la identificación de los individuos que resultan más dependientes de las variables analizadas; en la Figura 35 se muestran 3 elipses que encierran a los casos con sus correspondientes variables dominantes. Aquellos decesos ubicados fuera de las elipses pueden reconsiderarse como parte del subgrupo más cercano y aquellos casos más lejanos, principalmente los identificados con tono rojo en su etiqueta, pueden formar otro subgrupo donde su ocurrencia está inversamente relacionado con la estacionalidad y la edad agrupada.

Correlación de variables

En la relación de las variables en las primeras 3 dimensiones o componentes, sólo las correspondencias significativamente distintas de 0 fueron mostradas y están ordenadas de la más positiva y significativa a la más negativa y significativamente correlacionada (Husson et al., 2013). En la Dimensión 1, la vulnerabilidad se presentó con un 0.8384 del índice de correlación, seguida por el tipo de población con 0.7010 y

la estacionalidad con un 0.3937; de igual manera, para las Dimensiones 2 y 3 se exhiben las variables que obtuvieron índices de correlación elevados (Tabla 20).

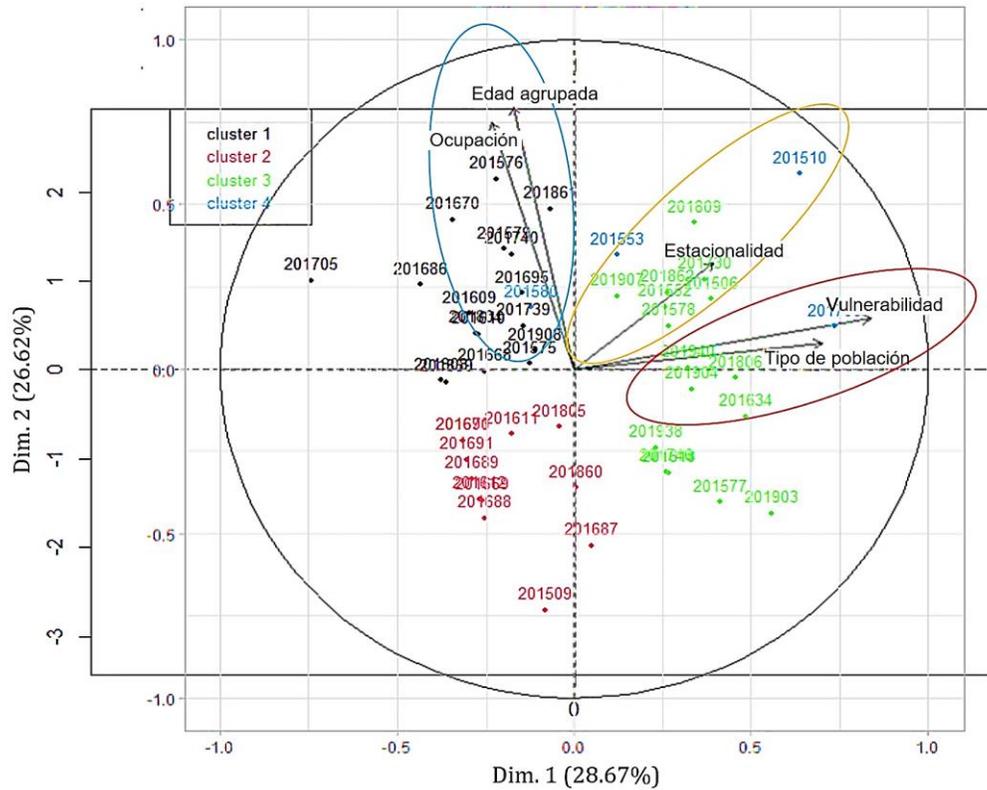


Figura 35. Superposición de planos.

Tabla 20. Correlación de variables.

Dimensión 1	Correlación	Valor propio
Vulnerabilidad	0.8384425	3.01E-14
Tipo población	0.7010036	1.44E-08
Estacionalidad	0.3937459	4.67E-03
Dimensión 2	Correlación	Valor propio
Edad agrupada	0.7966307	4.56E-12
Ocupación	0.7499213	3.66E-10
Estacionalidad	0.3214670	2.28E-02
Dimensión 3	Correlación	Valor propio
Tipo población	0.5641188	1.99E-05
Ocupación	0.2976642	3.58E-02
Estacionalidad	-0.7793249	2.62E-11

También, se construyó una matriz de correlación para demostrar cuanta relación existe entre 2 o más variables; por lo tanto, el coeficiente de Pearson puede usarse como un índice para medir el grado de relación de 2 variables cuantitativas y continuas (Husson et al., 2013). Esta matriz de correlación confirma lo representado en el círculo de correlaciones a través del valor del coeficiente de Pearson, donde la edad agrupada manifestó cierto nivel de relación con la ocupación, con un valor de 0.3208, así como el tipo de población con vulnerabilidad en un 0.3636 (Tabla 21).

Tabla 21. Matriz de correlación entre las variables analizadas.

	Edad agrupada	Estaciona- lidad	Ocupación	Tipo de población	Vulnera- bilidad
Edad agrupada	1	0.0809695	0.3208905	-0.0574748	0.0093715
Estaciona- lidad	0.0809695	1	0.0087763	-0.0122084	0.2330470
Ocupación	0.3208905	0.0087763	1	0.0259486	-0.0797851
Tipo de población	-0.0574748	-0.0122084	0.0259485	1	0.3636180
Vulnerabi- lidad	0.00937153	0.233047031	-0.079785163	0.36361801	1

IV.3. Nivel 3. Visualización de densidades

IV.3.1. Densidad de muertes por rayo

En relación con lo explicado en la sección III.1.3. Procesamiento, la opción viable para representar la densidad de decesos por caída de rayo fue a través de la relación entre la muerte y la cantidad de habitantes de la localidad afectada a modo de cuantificar el nivel de exposición de la población. Dicha relación se representa por una simbología triangular y colorimetría de tonos verde a rojo; este último indica un cociente mayor o una estadística poblacional de mayor exposición y que podría terminar en deceso. Los valores más elevados de este índice de exposición se localizan en el sur-suroeste de Durango y sobre la cuesta este de la Sierra Madre Occidental, en los estados de Zacatecas, Durango y Chihuahua (Figura 36).

En este sentido, visualizar la concentración de decesos dentro del territorio estudiado permite identificar las áreas con una mayor ocurrencia de decesos por caída

de rayo y puede. En la Figura 37 se observan dos regiones con alta concentración de decesos, la primera al sur, en el norte de Nayarit, sur de Sinaloa y suroeste de Durango y la segunda mayor concentración se ubica en la porción central-oeste, en el municipio de Ahome, Sinaloa y alrededores.

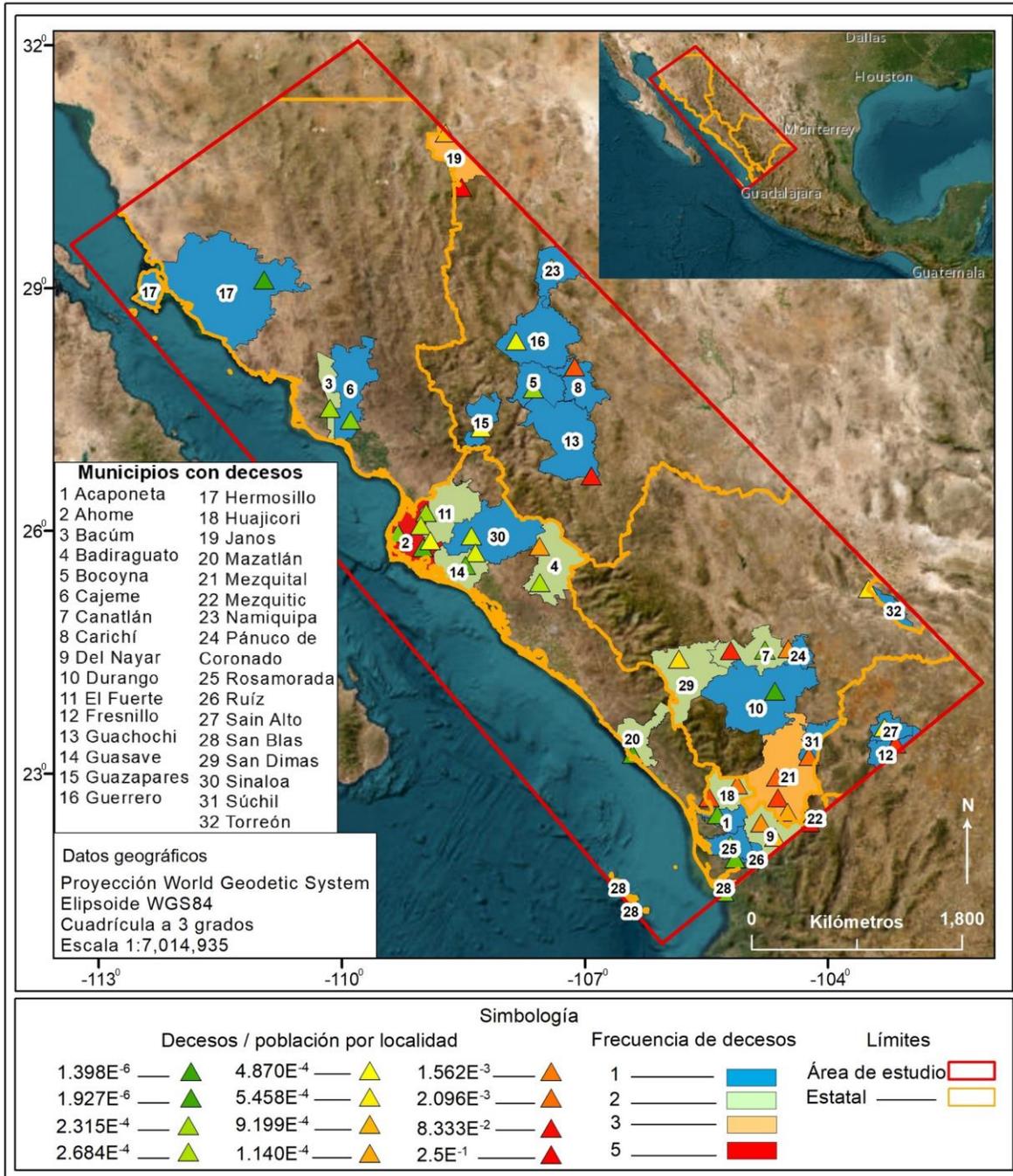


Figura 36. Decesos entre población por localidad afectada.

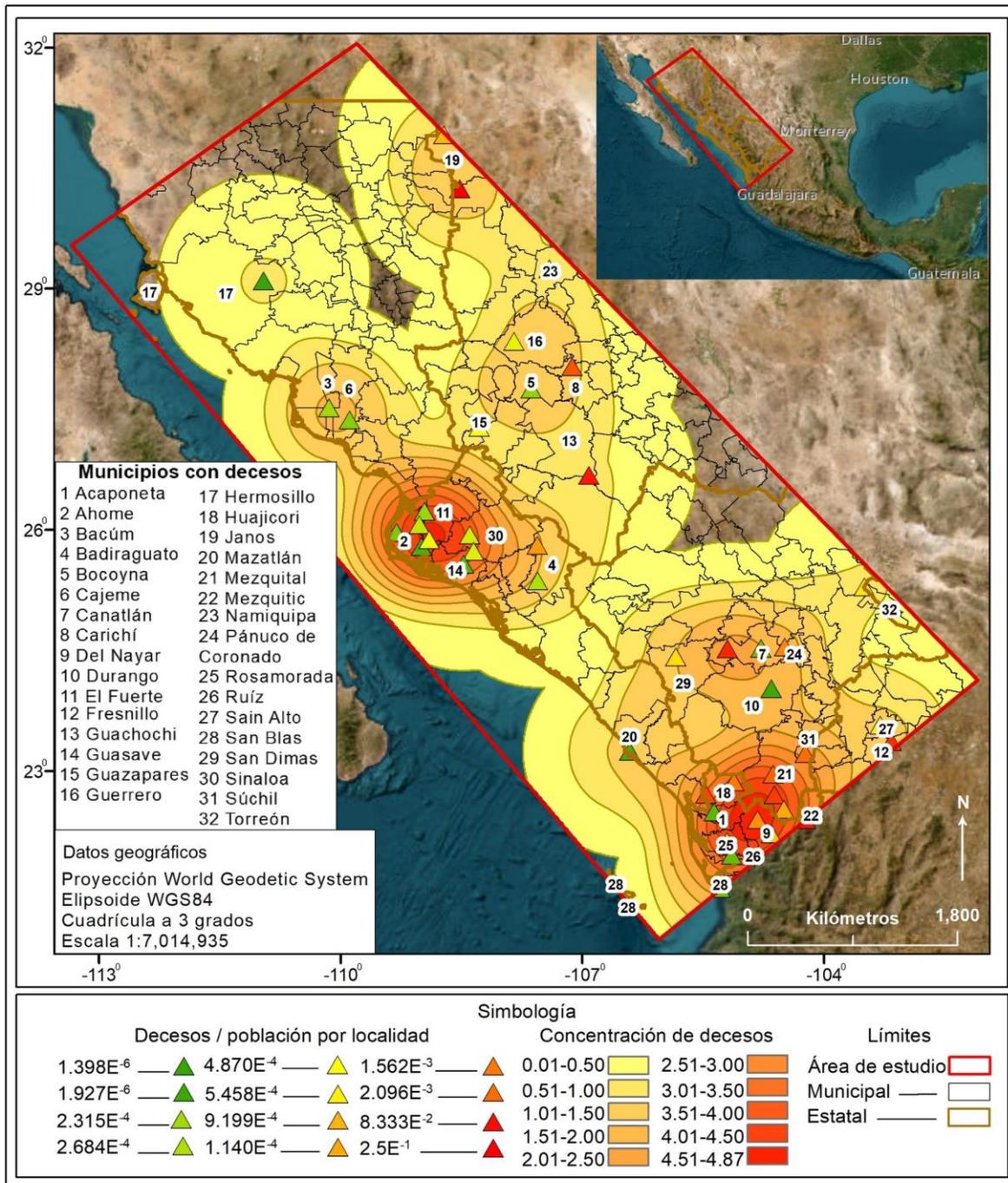


Figura 37. Concentración de decesos.

IV.3.2. Densidad de rayos nube-tierra (CG)

En el marco de esta investigación, se considera que un rayo nube-tierra (CG) es peligroso hasta 2 km de distancia a partir del sitio de impacto, de acuerdo con lo descrito por Holle y Cooper (2016) y Stall et al. (2009).

En el noroeste de México sólo el 32.53% de los rayos totales (IC + CG) corresponde a los rayos nube-tierra (CG), aproximadamente 26.27 millones de rayos. La densidad promedio de los rayos nube-tierra (CG) se distribuye con una tendencia NW-SE con una ligera reorientación hacia el norte. Se destacan dos regiones, una en el centro-norte de Nayarit y sur de Sinaloa con valores de 20 a 32 rayos nube-tierra (CG) $\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$ y otra en el suroeste de Chihuahua, con una densidad de 16-24 rayos nube-tierra (CG) $\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$ (Figura 38).

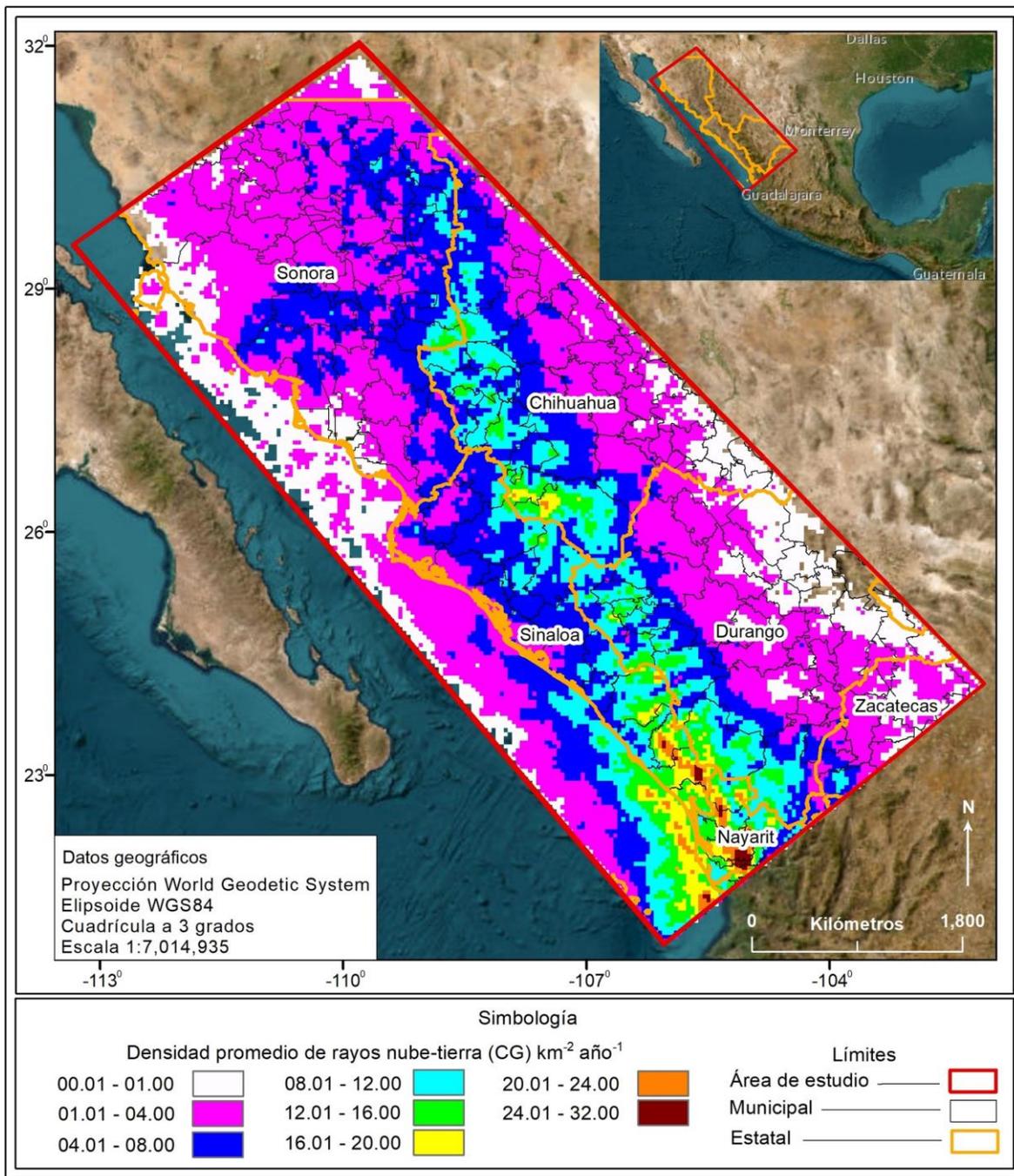


Figura 38. Densidad promedio de rayos nube-tierra (CG) por kilómetro cuadrado por año.

IV.4. Nivel 4. Correlación de factores

En función de lo planteado, en esta sección se realizó la correlación de los elementos analizados en dos puntos. En primer lugar, se aborda la concordancia entre el aspecto fisiográfico, la densidad de rayos nube-tierra (CG) y los decesos ocurridos, denominado como Índice de Peligro. En segundo sitio, se obtiene el Factor de Riesgo, donde se atiende la correspondencia del indicador de vulnerabilidad social con los anteriores.

IV.4.1. Relación entre fisiografía, densidad de rayos nube-tierra (CG) y decesos

Contrario a lo que se piensa, los rayos no ocurren a grandes altitudes, en esta investigación se comprueba que la mayor cantidad de rayos por kilómetro cuadrado sucede al pie de la SMO, específicamente sobre los lomeríos y la cuesta de la SMO. También, de la misma manera en que la SMO crea un tren ligeramente curvo hacia el norte, las densidades se comportan exactamente igual, pero sobre la cuesta, no en las cimas.

A una pequeña escala, se puede mencionar que la alta concentración de rayos en esta región del noroeste de México está limitada por el imponente arreglo topográfico de la SMO, que funciona como barrera para las precipitaciones generadoras de rayos. Un mayor número de rayos nube-tierra (CG) suceden al pie de la SMO, específicamente sobre el piedemonte, lomeríos y la cuesta oeste de la SMO, no en las cimas. También es de notarse una ligera tendencia en dirección hacia el norte por parte de la densidad de rayos nube-tierra (CG), similar a la curvatura desarrollada por la SMO en el área estudiada.

Geográficamente, en Nayarit y el extremo sur de Sinaloa, sobre el piedemonte, lomeríos y laderas montañosas de pendiente media-alta se presentan densidades de 16 a 32 rayos nube-tierra (CG) $\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$. En regiones de mayor altitud, se calcularon valores de 8 a 16 rayos nube-tierra (CG) $\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$, específicamente en la frontera Sinaloa-Durango-Chihuahua, con algunas zonas dispersas de hasta 24 rayos nube-tierra (CG) $\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$. Entre los estados de Chihuahua y Sonora, los rayos nube-tierra (CG) presentaron una tendencia norte-sur con 8-16 rayos nube-tierra (CG) $\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$;

mientras que, en el centro de Sonora los valores registrados fueron entre 4-12 rayos nube-tierra (CG) $\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$.

En cuanto a los 26 decesos oficiales por caída de rayo, sólo 8 en el sur coinciden con altas densidades de rayos nube-tierra (CG), donde se calcularon de 16 a 32 rayos nube-tierra (CG) $\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$. También, 15 decesos fueron reportados en Sinaloa, Chihuahua y Sonora, estados con una estimación de 4 a 16 rayos nube-tierra (CG) $\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$. Los últimos 3 decesos oficiales, reportados en las regiones centrales de Durango y Chihuahua y norte de Zacatecas, se localizan en sitios con densidades menores de rayos, desde 1 hasta 4 rayos nube-tierra (CG) km^{-2} .

En definitiva, se confirma que ocasionalmente existe una coincidencia entre las altas densidades de rayos nube-tierra (CG) y la ocurrencia de decesos por caída de rayo, al norte de Nayarit y sur de Durango (Figura 39).

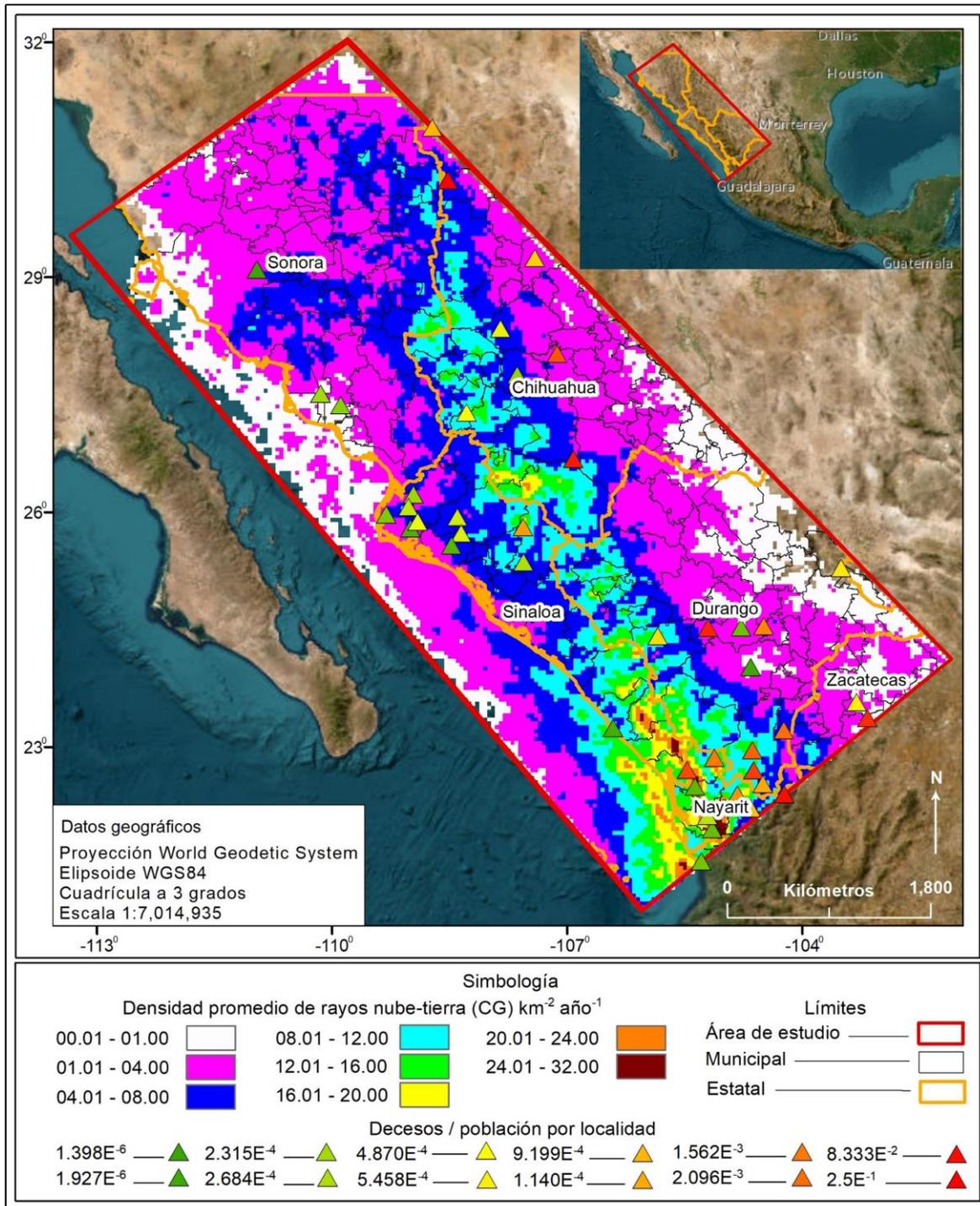


Figura 39. Superposición de decesos entre población por localidad afectada y densidad promedio de rayos nube-tierra (CG).

IV.4.2. Índice de Peligro

Dentro del marco de esta investigación, a la correlación entre la densidad de rayos nube-tierra (CG), la ocurrencia de decesos por esta causa y el aspecto fisiográfico se denomina Índice de Peligro. Los primeros 2 factores son archivos de tipo ráster y el tercero se compone de unidades de terreno que definen la configuración del relieve por alturas relativas, pendiente y orientación o dirección de la cuesta.

Una alternativa para solucionar la problemática sobre el cruce de distintos tipos de formatos fue utilizar la técnica de CoKriging para obtener el Factor de Peligro, donde se correlacionaron los rayos nube-tierra (CG) y los decesos, con umbrales de 4 y 0, respectivamente, con y sin anisotropía; es decir, cuando el comportamiento de los datos es dependiente o no de la dirección espacial de los mismos. El resultado previo se correlacionó posteriormente con el aspecto fisiográfico para conseguir el Índice de Peligro.

En la Figura 40 se muestran los semivariogramas sin dependencia direccional en los datos (a) y con anisotropía (b); las líneas azules representan el modelo o modelos a los cuales han sido ajustado los datos, los puntos rojos corresponden a los pares de observaciones estimadas. Los pares localizados en la porción inferior de cada semivariograma presentan valores más similares; a medida que los pares de ubicaciones se separan (hacia la derecha en el eje X), los pares de ubicaciones tienden a volverse más diferentes por encontrarse alejados y tienen una diferencia cuadrática mayor (indicada por el aumento en el eje Y y la parte superior de la nube de pares).

Es clara la correspondencia entre ambas versiones de semivariogramas; sin embargo, la distinción radica en el ajuste de varios modelos en b), con un rango máximo de 3.5213 y una dirección de 146.7773.

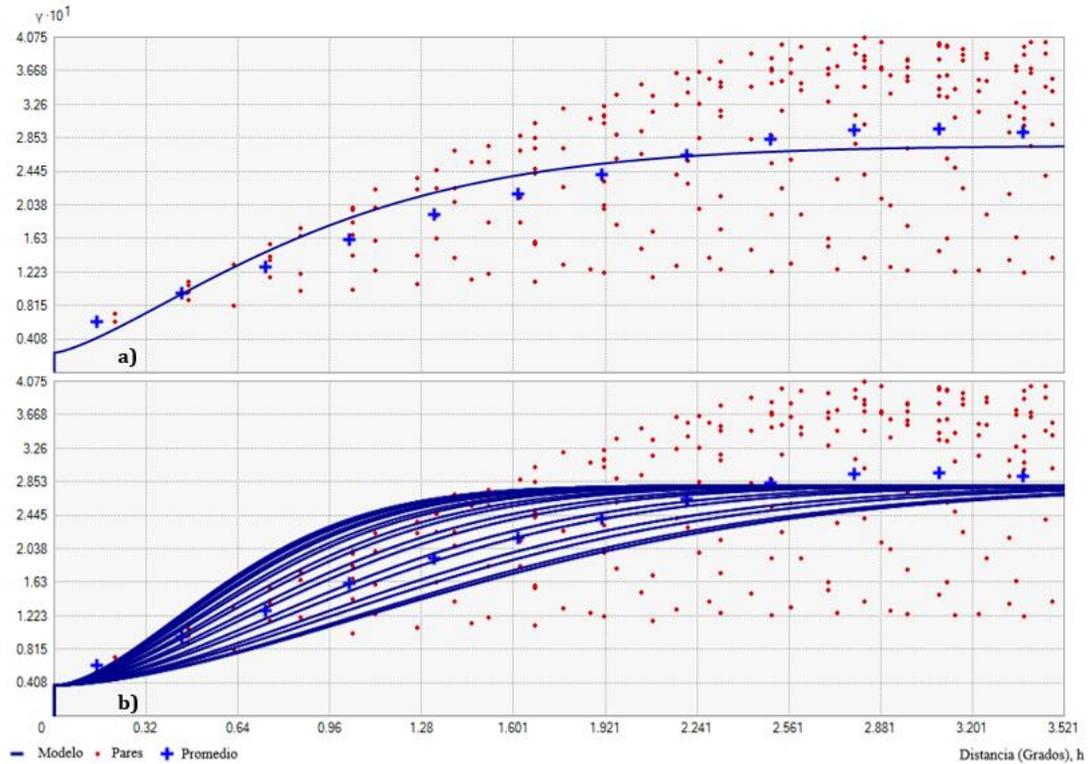


Figura 40. Semivariogramas de Factor de Peligro (rayos nube-tierra (CG) y decesos); a) no anisotropía; b) sí anisotropía.

En el gráfico de predicción de indicadores (Figura 41), todos los pares de observaciones ubicados a la izquierda de la línea azul (umbral principal de 4), tienen un valor de transformación indicador de 0 y los ubicados a la derecha del mismo umbral se representan con un valor de transformación indicador de 1.

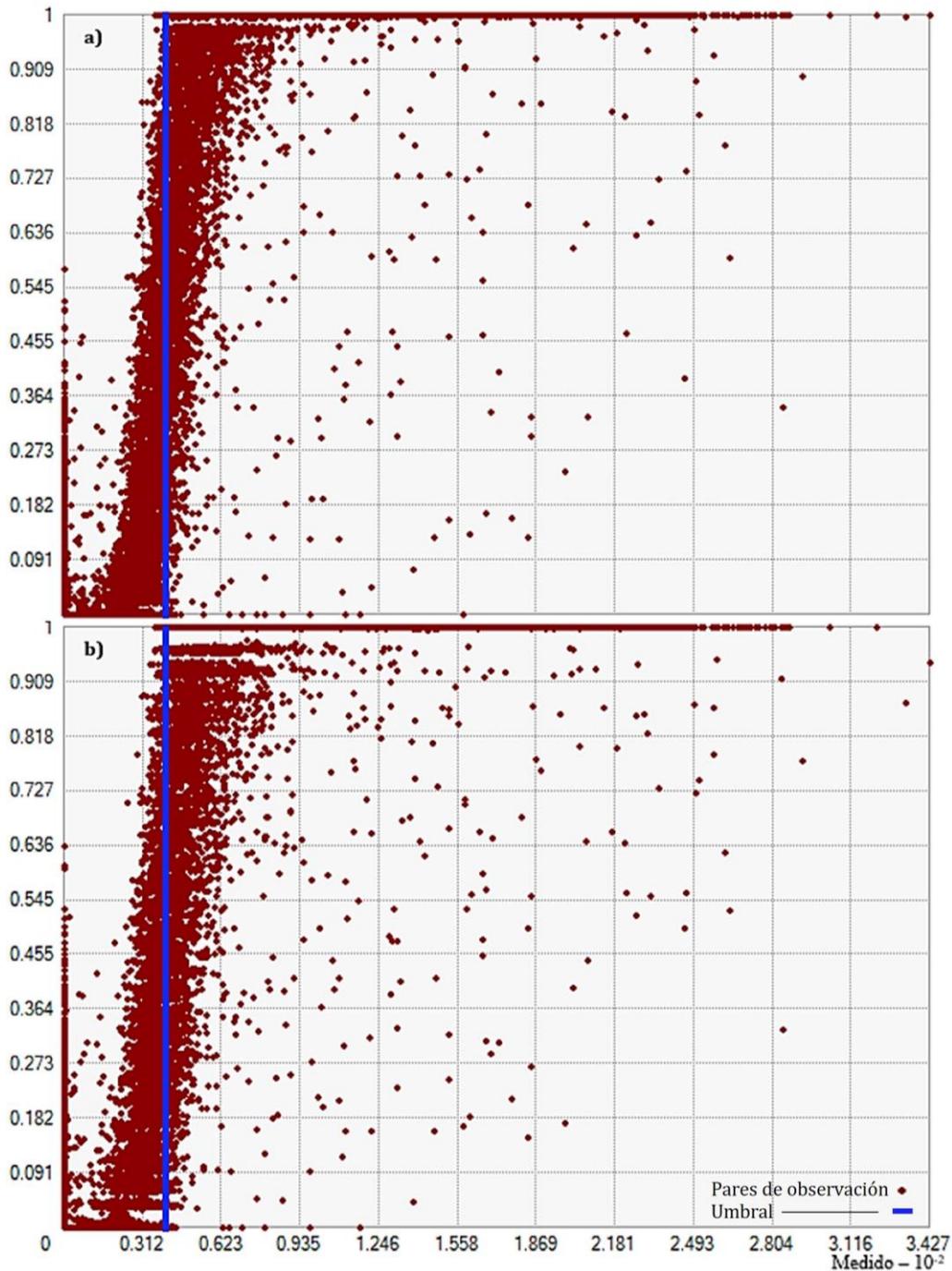


Figura 41. Predicción de indicadores de Factor de Peligro; a) no anisotropía; b) sí anisotropía.

En la Figura 41b), donde se considera la naturaleza direccional de los datos, se distingue más dispersión de los pares de observaciones y una menor concentración de ellos en valores cercanos al umbral principal. Estadísticamente, en esta versión se presenta el mayor error estándar promedio de 0.2002006224, indicado para el cálculo

del Factor de Peligro, dado por la densidad de rayos nube-tierra (CG) por kilómetro cuadrado por año y los decesos ocurridos en el periodo 2015-2019. En la Tabla 22 se muestran los valores de los errores de predicción.

Tabla 22. Errores de predicción del Factor de Peligro.

Errores de predicción	No anisotropía	Anisotropía
Muestra	26,543 de 26,543	26,543 de 26,543
Media	0.0003647573	0.0012263757
Raíz cuadrada	0.1817754981	0.1929873881
Media estandarizada	0.0026561158	0.0061442736
Raíz cuadrada de media estandarizada	1.0652268052	0.9630640181
Error estándar promedio	0.1693712611	0.2002006224

En términos prácticos, cuando no se toma a cuenta la dirección de los datos al aplicar la técnica CoKriging Indicador (42a), las probabilidades estimadas aparecen distribuidas sobre una mayor superficie dentro del área estudiada. En cambio, al considerar la anisotropía (42b), dada la orientación de las observaciones en este caso NW-SE con una ligera tendencia hacia el norte, la correlación se calculó en contornos mejor ajustados y con menor dispersión de los valores inferiores. Esto se aprecia fácilmente en la Figura 42, donde se comparan ambos geoprocесamientos y se muestra la correlación de ocurrencia de rayos nube-tierra (CG) y decesos.

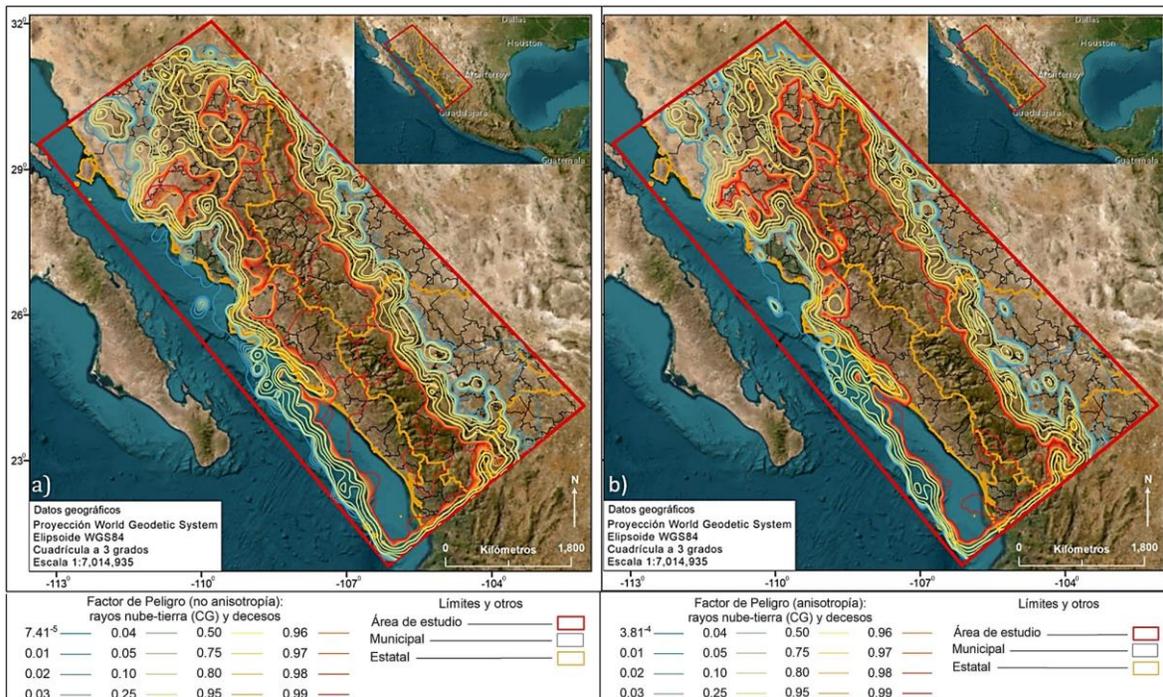


Figura 42. Distribución de probabilidades de ocurrencia de rayos nube-tierra (CG) y decesos; a) no anisotropía; b) sí anisotropía.

En referencia a lo explicado párrafos arriba, en la Figura 43 se muestra la distribución de los contornos del Factor de Peligro, donde se correlacionaron los rayos nube-tierra (CG) y los decesos por esta causa. En primer lugar, la correlación entre ambas variables fue inferior al 2% en los extremos noroeste, norte y este del área analizada; en segundo, y contiguo a los anteriores, valores entre 2 y 95% bordean la Sierra Madre Occidental y los macizos rocosos de alturas relativas mayores; en tercero, sobre gran parte del estado de Sinaloa y en las regiones norte de Nayarit, oeste de Durango y Chihuahua, así como en el centro, noreste y este de Sonora, esta correlación fue bastante marcada y supera el 95% de probabilidad.

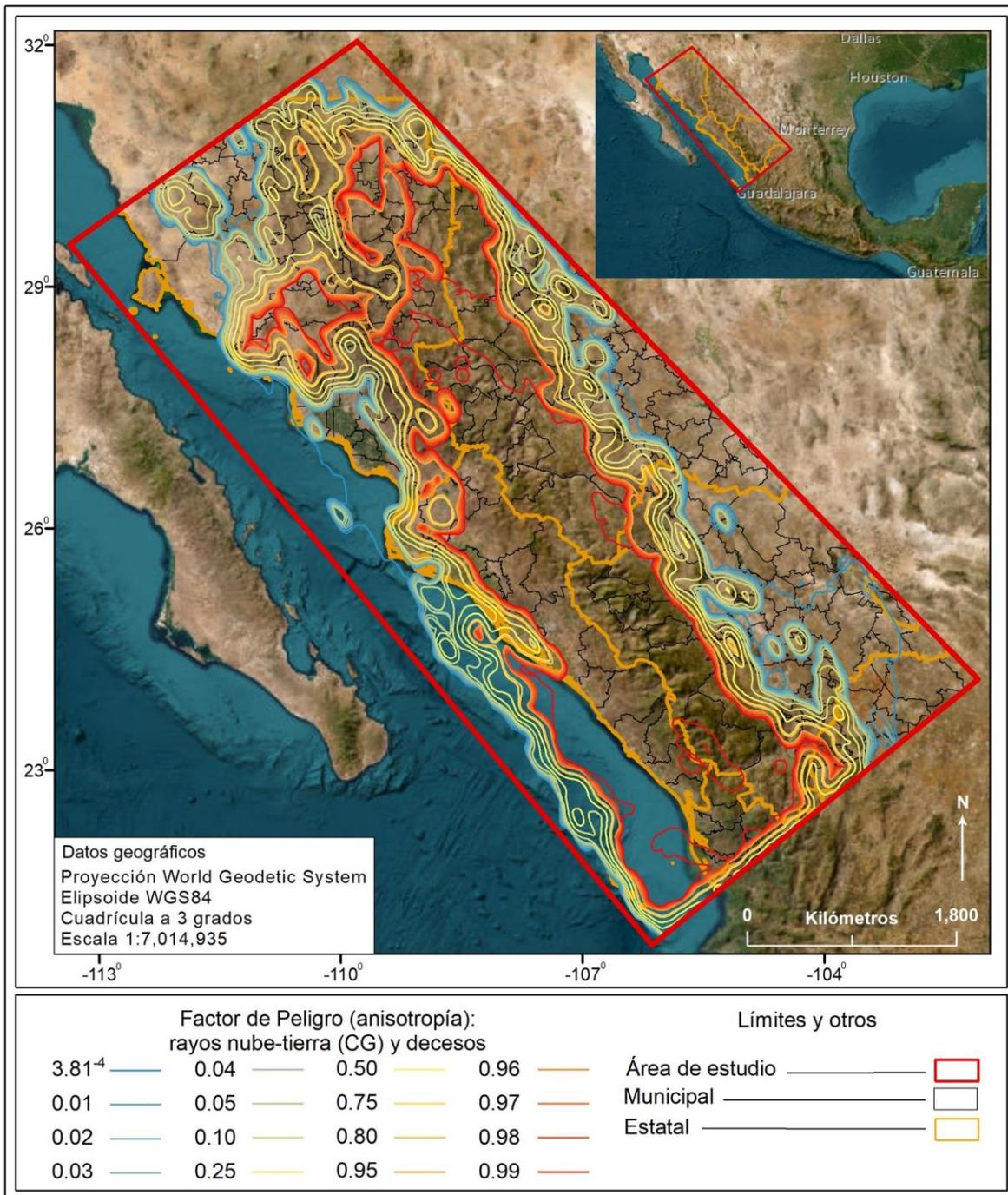


Figura 43. Distribución de probabilidades del Factor de Peligro con anisotropía.

Al sobreponer la distribución de las probabilidades del Factor de Peligro sobre la fisiografía, los valores más altos se visualizaron con una tendencia preferencial NW-SE, con un ligero cambio hacia el norte desde la parte central.

En un recorrido desde el sur del área de estudio, sobre los litorales y planicies costeras del norte de Nayarit y centro-sur de Sinaloa, las probabilidades estimadas fueron superiores al 95%. En esta misma dirección, sobre los piedemonte y lomeríos de Sinaloa, cubren toda la franja poniente de los estados de Durango, Chihuahua y en el punto interestatal triple Sinaloa-Sonora-Chihuahua rotan en dirección norte, específicamente sobre la frontera Sonora-Chihuahua; esta porción del terreno se constituye por lomeríos altos y laderas montañosas altas escarpadas y fuertemente fracturadas (Figura 44).

En otras palabras, las probabilidades calculadas por encima del 95% del Índice de Peligro se distribuyen geoespacialmente desde áreas abiertas y estables como las planicies costeras del sur del polígono en estudio, continúan por terrenos más inclinados, ondulados y escarpados de pendiente baja y moderada (de 2-20 grados de inclinación general) en el piedemonte y cuesta oeste de la Sierra Madre Occidental, y culminan en dirección al norte.

En la región límite entre Sonora y Chihuahua, el relieve presenta una gran cantidad de fallas y fracturas, evidentemente presentes por la disposición de los bloques de terreno; en esta región donde la pendiente de la superficie se clasifica en moderada, alta y ocasionalmente abrupta, desde los 10 hasta superar los 30 grados, cuando el relieve es más escarpado. Las probabilidades superiores al 95% en la ladera montañosa no superan los 2,200 msnm.

En el intervalo del 2 al 95% de probabilidades, rodean lomeríos bajos y altos, laderas montañosas bajas y altas de pendiente general baja a moderada, en el sur y norte de Sonora, también en el centro de Chihuahua y Durango.

Por otro lado, los valores inferiores al 2% de este Índice de Peligro se distribuyen por las amplias bajadas, planicies aluviales, fluviales, divergentes, de inundación, urbanizadas, cultivadas y deltaicas en el extremo noroeste del área estudiada y sobre la cuesta distal este de la SMO.

En síntesis, por encima de los 1,800 y hasta los 2,200 msnm, se observó un comportamiento semirecto de las probabilidades de ocurrencia del Índice de Peligro. Es evidente que la distribución de los contornos del Índice de Peligro está influenciada

por la morfología de la cuesta oeste de la Sierra Madre Occidental, misma que funciona como barrera al impedir que las tormentas generadoras de rayos se desplacen hacia el extremo este del polígono estudiado.

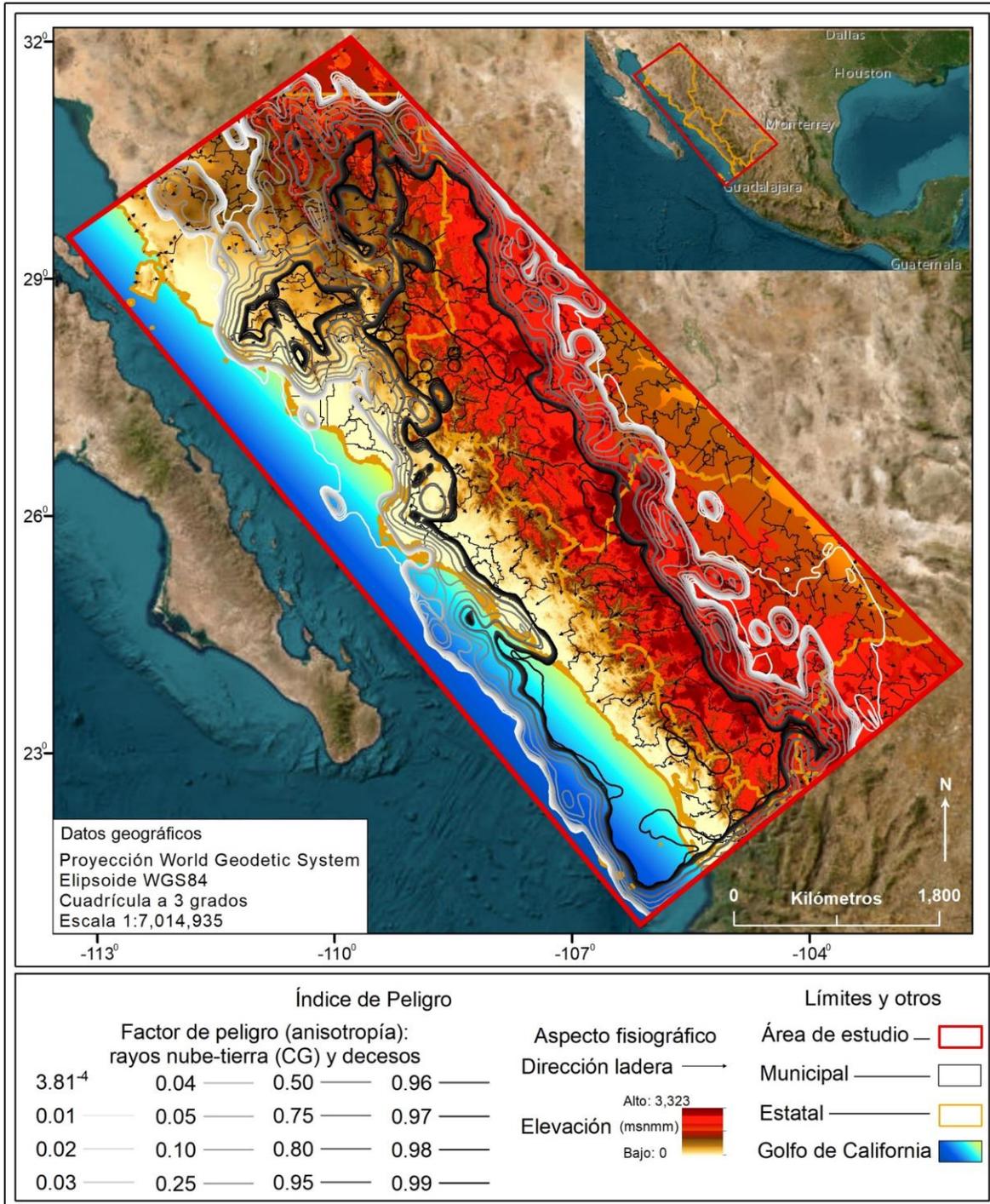


Figura 44. Distribución del Índice de Peligro con anisotropía sobre el aspecto fisiográfico.

IV.4.3. Factor de Riesgo

En esta investigación, el Factor de Riesgo está definido por la correlación entre la ocurrencia de rayos nube-tierra (CG), el indicador de vulnerabilidad social y los decesos por esta causa. Similar al Índice de Peligro, la diferencia entre ambas versiones de semivariogramas del Factor de Riesgo radica en el ajuste de varios modelos en la sección b), con un rango mayor de 2.1945 y una dirección de 58.3593 (Figura 45).

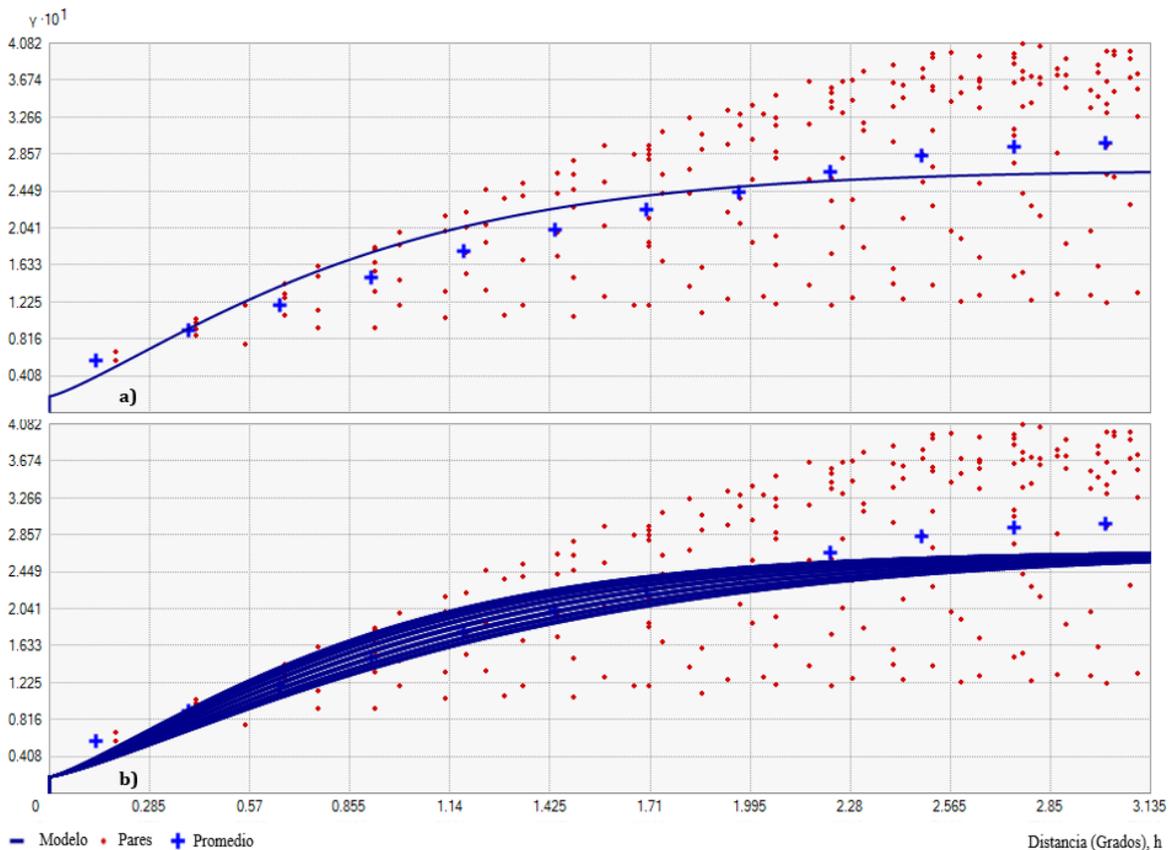


Figura 45. Semivariogramas de Factor de Riesgo (rayos nube-tierra (CG), vulnerabilidad social y decesos); a) no anisotropía; b) sí anisotropía.

Asimismo, los pares de observaciones ubicados a la izquierda del umbral principal (4) tienen un valor de transformación indicador de 0 y a la derecha de 1 (Figura 46). En la Figura 46b) los pares de observaciones tienen más dispersión en el área de indicador 1 y una concentración de pares en zonas próximas a dicho umbral; mientras que en 46a) se muestran más cercanos al origen y mayor presencia en el indicador 0.

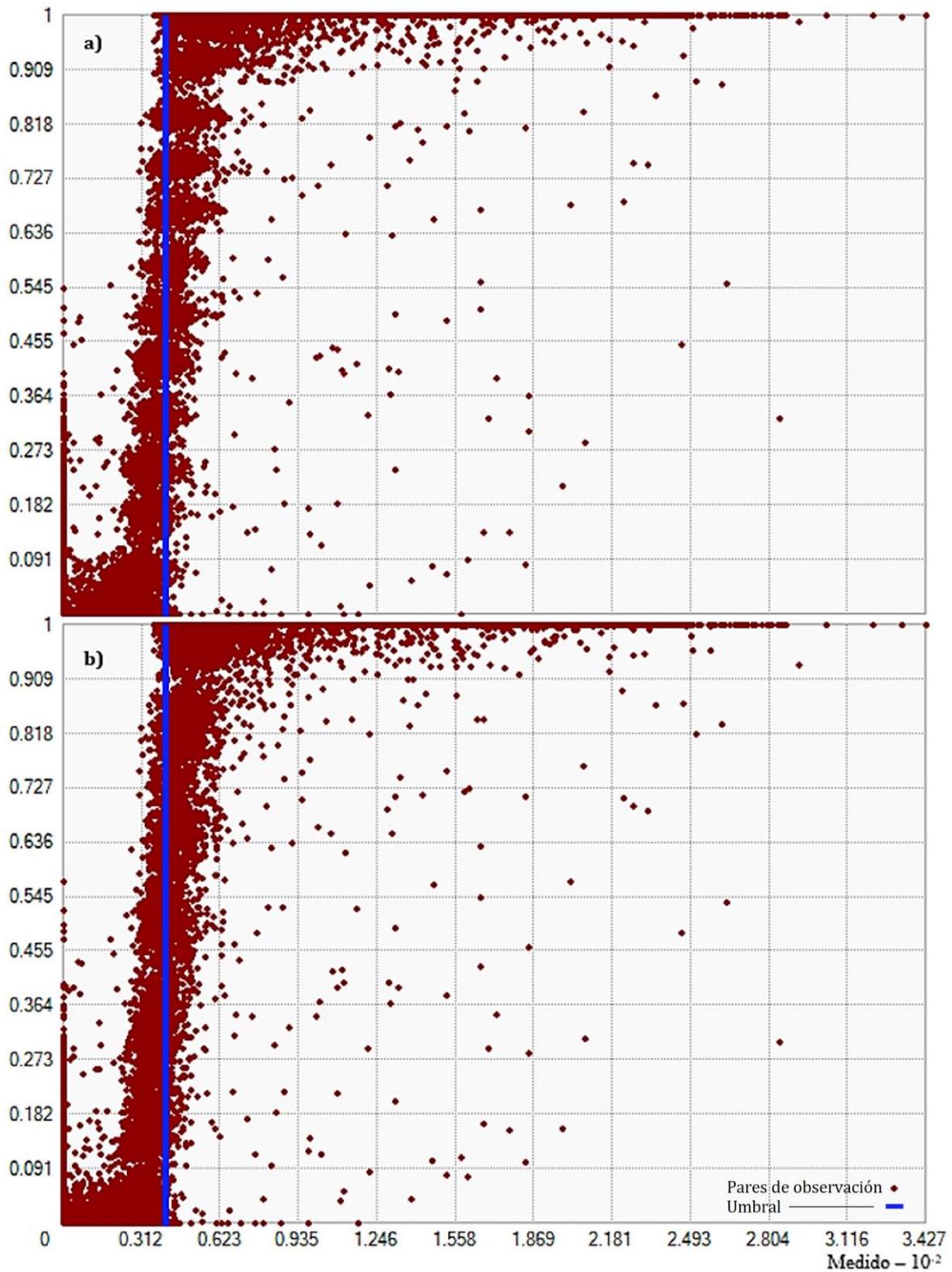


Figura 46. Predicción de indicadores del Factor de Riesgo; a) no anisotropía; b) sí anisotropía.

Respecto a la estimación de errores de predicción, al considerar la naturaleza direccional de los datos se consiguió una mejoría de aproximadamente 1.6%, de 0.1538668450 a 0.1513997364 en el error estándar promedio (Tabla 23).

Tabla 23. Errores de predicción del Factor de Riesgo.

Errores de predicción	No Anisotropía	Anisotropía
Muestra	26,543 de 26,543	26,543 de 26,543
Media	0.0005368669	0.0004140332
Raíz cuadrada	0.1770422966	0.1784578485
Media estandarizada	0.0040619549	0.0032440939
Raíz cuadrada de media estandarizada	1.1367135923	1.1665250949
Error estándar promedio	0.1538668450	0.1513997364

Al comparar la representación del Factor de Riesgo en ausencia y presencia de anisotropía, la distribución geoespacial resultó ligeramente más ajustada y una menor dispersión de los valores inferiores al 2% de probabilidad (Figura 47 b).

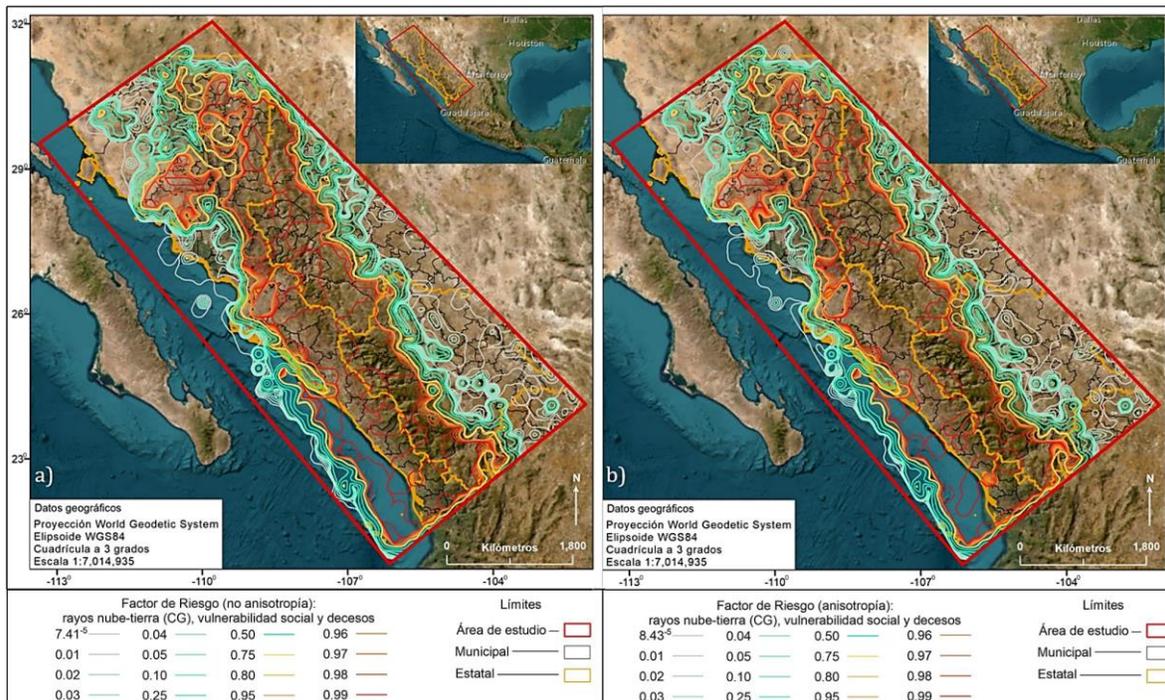


Figura 47. Distribución de probabilidades del Factor de Riesgo; a) no anisotropía; b) sí anisotropía.

En los márgenes oeste, noroeste, norte y este del área estudiada se calculó una distribución menor al 2% de probabilidad del Factor de Riesgo (contornos de tono gris, Figura 48); mientras que los valores estimados por encima del 95% se localizaron en la porción central, norte y noroeste del territorio, con una tendencia NW-SE y un evidente cambio hacia el norte en el punto interestatal triple Sinaloa-Sonora-Chihuahua. Esto es evidente sobre gran parte del estado de Sinaloa, norte de Nayarit, oeste de Durango y Chihuahua, este y centro de Sonora. Las probabilidades mayores estimadas para el Factor de Riesgo coinciden principalmente en los municipios con un grado muy alto, alto y medio del IVS, en la sección central (Figura 49).

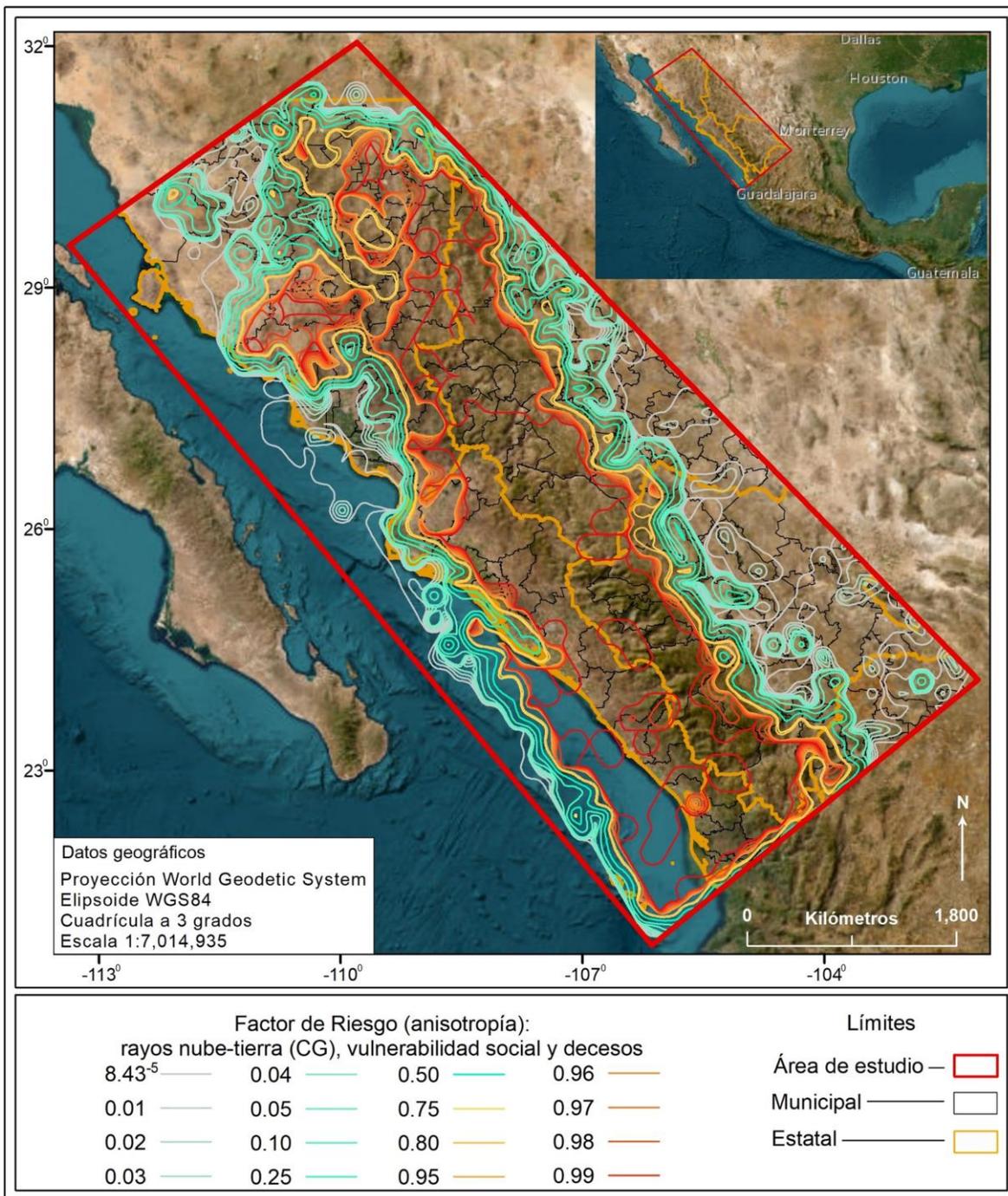


Figura 48. Distribución de probabilidades del Factor de Riesgo con anisotropía.

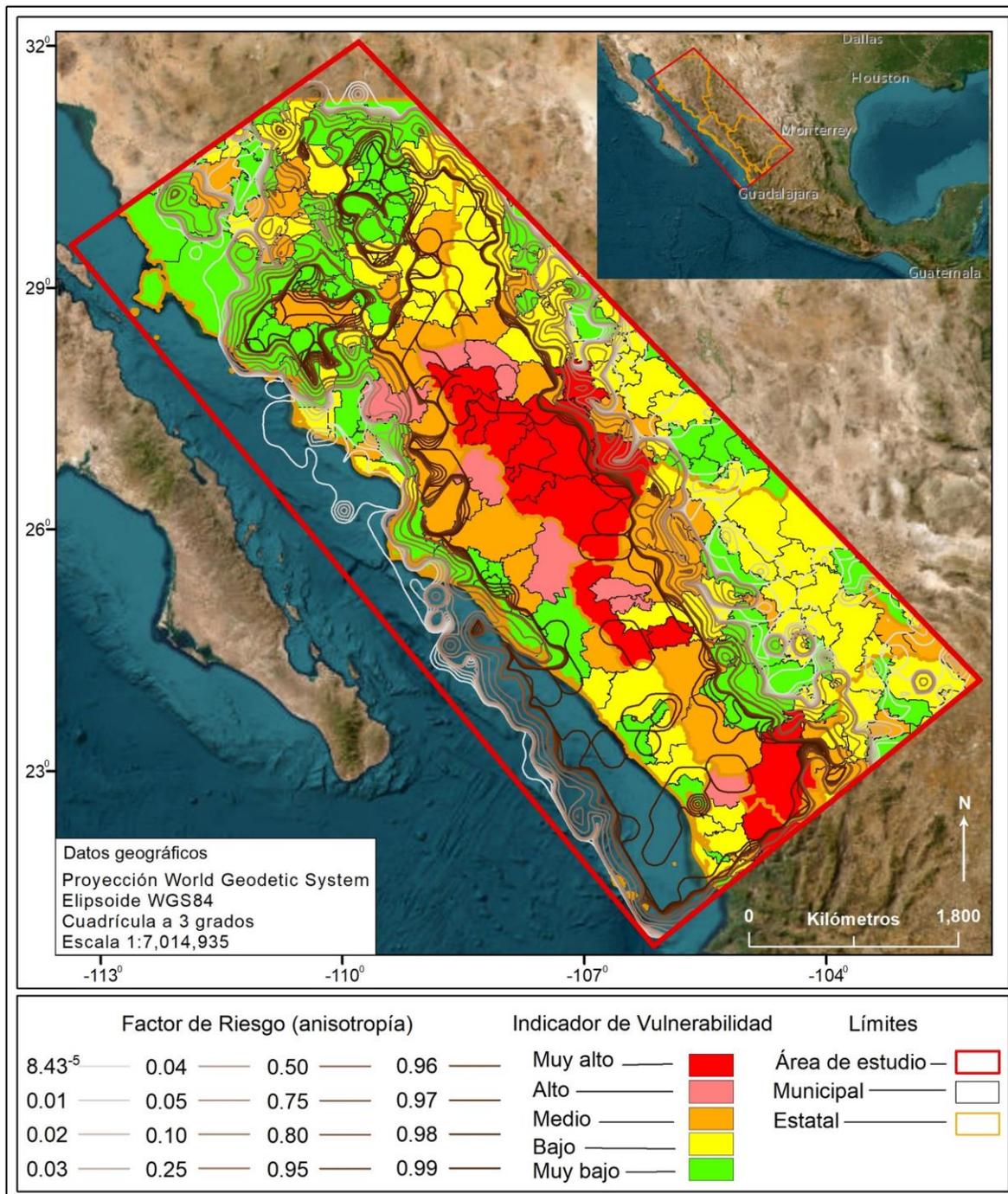


Figura 49. Distribución de Factor de Riesgo con anisotropía e Indicador de Vulnerabilidad Social.

IV.5. Susceptibilidad al peligro de caída de rayo

IV.5.1. Variables físico-sociales correlacionadas en la susceptibilidad al peligro de caída de rayo

Conocer la ubicación geográfica de las zonas en peligro en base a la información estadística confiable es lo ideal; sin embargo, en países donde esto no es factible, la opción más viable es echar mano del análisis geoespacial a través de la correlación de variables físicas y sociales que intervienen en la susceptibilidad al peligro de caída de rayo.

En relación con lo anterior y debido a la incertidumbre que representa no contar con la geolocalización oficial de los sitios de impacto, atención médica y deceso, las variables físico-sociales analizadas en la susceptibilidad a caída de rayo para el área estudiada fueron la densidad de rayos nube-tierra (CG), el indicador de vulnerabilidad social, el aspecto, la pendiente y la elevación del terreno. Las especificaciones de dichas variables se describen en los apartados IV.3.2., IV.2.3. y las últimas tres en III.1.2.

IV.5.2. Grado de susceptibilidad a la caída de rayo

Parte fundamental de toda evaluación de peligro es la identificación de las regiones más expuestas y vulnerables, particularmente en este caso ante la caída de rayos nube-tierra (CG) y la ocurrencia de decesos atribuidos a esta causa.

El noroeste de México es el escenario perfecto para la evaluación del peligro de caída de rayo, de acuerdo con lo descrito en el desarrollo de esta tesis. Afortunadamente, las limitantes estadísticas con que cuenta este tema incentivan la búsqueda de alternativas como el uso del análisis geoespacial del registro de los rayos nube-tierra (CG) y las variables físicas disponibles (Vaisala Inc., 2020; NASA Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos y METI Ministerio de Economía, 2011).

En consecuencia, para obtener el grado de susceptibilidad a la caída de rayo a partir de las variables físico-sociales (densidad de rayos nube-tierra (CG), indicador de vulnerabilidad social, pendiente, aspecto y elevación del terreno), se elaboró una matriz

de correlación para obtener el peso o influencia de cada variable respecto a los decesos oficiales ocurridos por esta causa (ver Tablas 24 y 25). Cabe mencionar que, la distribución espacial de la susceptibilidad a la caída de rayo está definida por la ubicación geográfica de las variables físico-sociales en función de su porcentaje ponderado.

Tabla 24. Matriz de correlación de variables físico-sociales respecto a decesos por caída de rayo.

	1	2	3	4	5	6
1	1.00000	0.31047	0.05937	0.22634	-0.00511	0.37198
2	0.31047	1.00000	0.00788	0.26216	0.20222	0.18977
3	0.05937	0.00788	1.00000	0.34857	0.28980	0.06488
4	0.22634	0.26216	0.34857	1.00000	0.50585	0.11225
5	-0.00511	0.20222	0.28980	0.50585	1.00000	-0.02746
6	0.37198	0.18977	0.06488	0.11225	-0.02746	1.00000

Variables físicas: 1 Densidad rayos nube-tierra (CG), 2 Indicador de vulnerabilidad social, 3 Aspecto, 4 Pendiente, 5 Elevación, 6 Decesos por caída de rayo.

Tabla 25. Porcentajes ponderados por variable físico-social.

Variable físico-social	Porcentaje ponderado
Densidad de rayos nube-tierra	49
Indicador de vulnerabilidad social	24
Aspecto	8
Pendiente	15
Elevación	4

Posteriormente, se realizó una sobreposición ponderada para definir las regiones que pueden resultar afectadas por el fenómeno hidrometeorológico y su grado de susceptibilidad ante la ocurrencia de caída de rayos nube-tierra (CG), en base al análisis del relieve con una resolución espacial de 5,000 m. Este grado de susceptibilidad está definido en una clasificación de cinco categorías denominadas muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.

El resultado de esta sobreposición ponderada de variables físico-sociales está dado por la distribución geoespacial de celdas identificadas con una colorimetría, que

indica el grado de susceptibilidad a la ocurrencia de caída de rayos de verde a rojo (Figura 50).

La distribución geoespacial de la susceptibilidad media principalmente está localizada sobre el oeste y sur de Chihuahua, oeste y suroeste de Durango, norte de Nayarit y la región limítrofe de Sinaloa con estos estados; también, las zonas dispersas en el noreste de Durango, en la frontera Sonora-Chihuahua y en la línea de costa en Sonora, Sinaloa y Nayarit están clasificadas en esta misma categoría, lo que representa un total de 75,200 km² y un 14.08 % del territorio analizado.

Por otro lado, la susceptibilidad de grado alto se determinó en 3,750 km² y tiene una mayor presencia en el suroeste de Chihuahua, oeste y sur de Durango, sur de Sinaloa y norte-centro de Nayarit, lo que significa un 0.70 % de toda la superficie investigada.

En cuanto a la clasificación de grado muy alto, sólo se encontró una zona de 25 km² en el noreste de Nayarit, lo que equivale a un 0.004 % del área de estudio.

Cabe aclarar que, una región clasificada con grado bajo o muy bajo de susceptibilidad a la caída de rayo, no la excluye del peligro ni de la ocurrencia de decesos por esta causa. Las probabilidades de morir por caída de rayo nube-tierra (CG) disminuyen relativamente de acuerdo con la combinación de las variables físico-sociales ponderadas. A decir verdad, la distribución del grado de susceptibilidad está fuertemente influenciada por las dos primeras variables (densidad de rayos nube-tierra (CG) e indicador de vulnerabilidad social), y en segundo orden por la pendiente, el aspecto y la elevación.

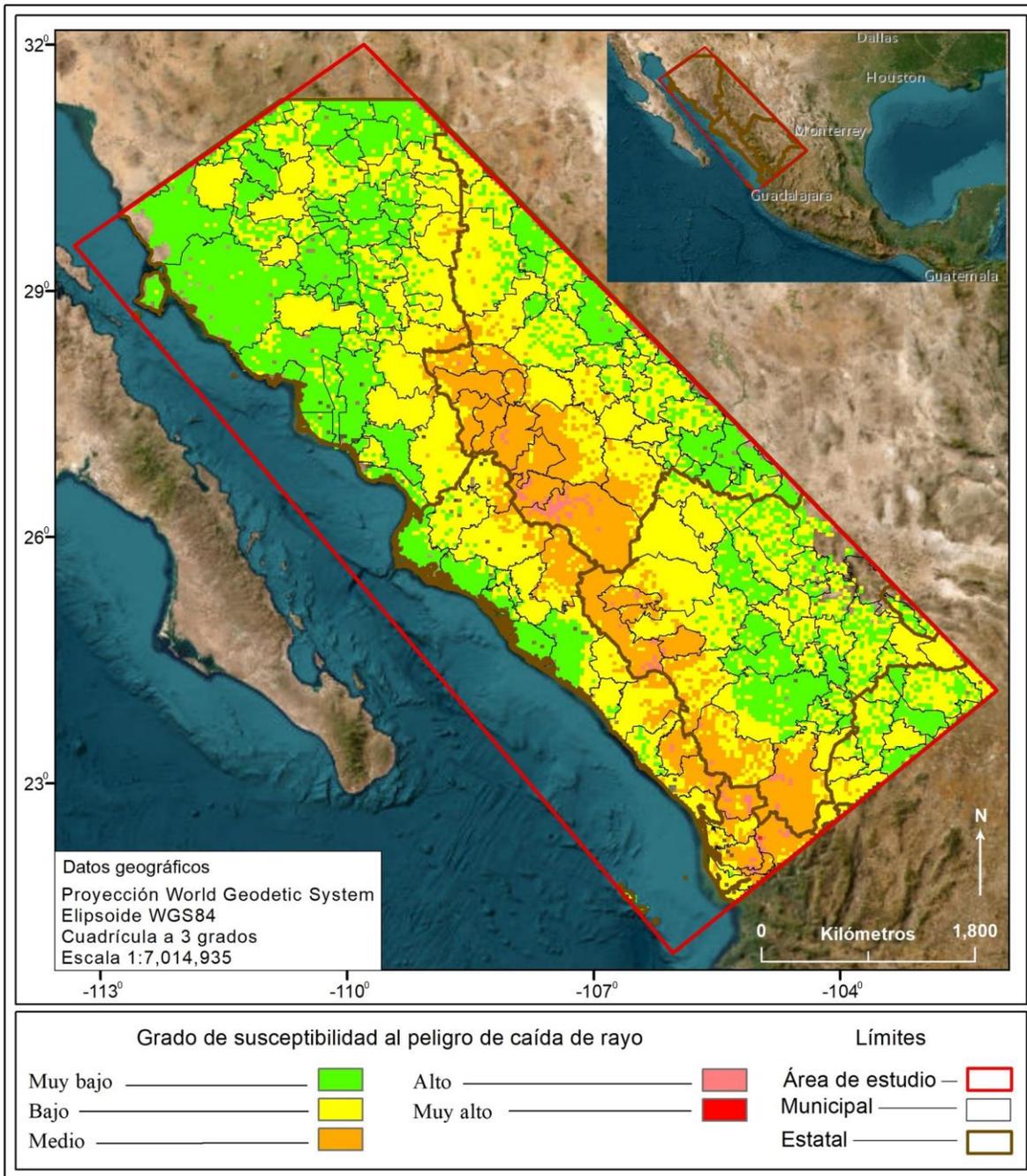


Figura 50. Grado de susceptibilidad al peligro de caída de rayo.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio se realizó una evaluación del peligro de caída de rayo del 1º de enero del 2015 al 31 de diciembre del 2019 y por medio de un análisis de componentes principales, las variables asociadas a los decesos atribuidos a esta causa en el noroeste de México fueron estudiadas.

Hasta el momento, la mayoría de las investigaciones publicadas sobre el tema están dedicadas a realizar estudios estadísticos sobre la incidencia de muertes por caída de rayo, sin estudiar de una forma sistemática en la correlación de las diferentes variables involucradas en el fenómeno.

En este trabajo, se logró realizar un estudio que utiliza los conceptos de peligro, riesgo, vulnerabilidad y susceptibilidad de acuerdo con los términos consensados en la comunidad científica dedicada al estudio de peligros y riesgos naturales; a diferencia de los publicados con anterioridad donde se emplea una terminología confusa de estos conceptos.

La presente investigación muestra los primeros mapas (hasta el momento) de índice de peligro, factor de riesgo, vulnerabilidad y susceptibilidad a la caída de rayo en el mundo. Este estudio marca la pauta para futuros trabajos en este tema, ya sea para otras regiones de México o en otros países.

En el periodo mencionado, a nivel nacional se registró un total de 359 decesos atribuidos a la caída de rayo y dentro de la región analizada, 50 muertes por esta misma causa. Una primera conclusión es que, el 86% de los decesos por rayo ocurrió al realizar actividades laborales y deportivas, en su mayoría por adultos jóvenes en edad productiva, en espacios despejados y abiertos; sin embargo, la estadística también reveló casos de afectados dentro de viviendas y otros más en sitios no especificados (14%).

Mostrando evidencia de que las variables sociodemográficas pueden llegar a tener un peso significativo, en la incidencia de decesos por caída de rayo, fue que la densidad de rayos nube-tierra (CG) no necesariamente reflejó una relación directa con

la cantidad de fallecimientos ocurridos; esto desmiente la idea de que ambas variables son directamente proporcionales.

En resumen, el indicador de vulnerabilidad social (IVS) prevaleció como la variable de mayor presencia o peso, seguida por la edad agrupada, la ocupación y el tipo de población; no se discute la influencia significativa de la estacionalidad, debido a que la mayor cantidad de decesos ocurrieron de junio a septiembre (44 muertes). Se clasificó con un nivel de preparación bajo o grado de vulnerabilidad social alto ante el fenómeno hidrometeorológico a los municipios de Balleza, Batopilas, Carichí, Chínipas, Guachochi, Guadalupe y Calvo, Guazapares, Morelos, Urique y Uruchi en Chihuahua; Mezquital, Otáez y Tamazula en Durango; así como Mezquitic, Jalisco y Del Nayar, Nayarit.

Por otro lado, se puede deducir un posible aumento de la probabilidad de caída de rayo a partir de las 11 horas, con un máximo de 17 a 18 horas y seguido de un decremento hasta entrada la noche, propio de las precipitaciones monzónicas; específicamente a elevaciones entre 1,800 y 2,200 msnm sobre la cuesta ondulada y escarpada de la Sierra Madre Occidental.

Además, la distribución de las probabilidades del Índice de Peligro está ligada a la morfología de la cuesta oeste de la SMO y la configuración del macizo lítico funciona como una barrera que impide el desplazamiento de las tormentas generadoras de rayos hacia el centro y este de México. Similar al Índice de Peligro, el Factor de Riesgo mostró una dirección preferencial NW-SE y un cambio de tendencia hacia el norte en el punto triple interestatal Sinaloa-Chihuahua-Sonora.

El grado alto de susceptibilidad se identificó en 3,750 km² en el suroeste de Chihuahua, oeste y sur de Durango, sur de Sinaloa y norte-centro de Nayarit, lo que representa un 0.70% de la superficie analizada; mientras que la susceptibilidad de grado muy alto se ubicó en 25 km² en el noreste de Nayarit, lo que equivale a un 0.004%.

En conclusión, la susceptibilidad al peligro de deceso por caída de rayo está directamente relacionada con la combinación de condiciones meteorológicas y sociales. En otras palabras, a la ocurrencia de rayos nube-tierra (CG), al desarrollo de actividades

laborales y de esparcimiento al aire libre, a la carencia de una infraestructura física adecuada y principalmente al desconocimiento de los distintos mecanismos de lesiones.

Dados los resultados obtenidos en esta investigación, se considera que la metodología desarrollada en esta tesis puede funcionar como una herramienta para otros estudios e incluso aplicable en países en condiciones similares, donde la disponibilidad de los datos es escasa.

En este sentido, se recomienda un aumento de disponibilidad de información a la población del fenómeno hidrometeorológico y de los distintos mecanismos de lesiones para generar la cultura del rayo en México.

Se sugiere a los organismos y dependencias gubernamentales disminuir las inconsistencias en la fuente oficial de muertes por caída de rayo, en medida de lo posible, ubicando la localización del impacto del rayo nube-tierra (CG) sobre la persona y el sitio del deceso; quizá con la ayuda de las nuevas tecnologías como las de los celulares se pueda tener una mejor información al respecto. Al mismo tiempo, crear mayor capacitación técnica en la clasificación de los eventos de este tipo e integrar a la base de datos de decesos oficial aquellos donde suceden múltiples afectados y/o daños.

Finalmente, se solicita diseñar infraestructuras de resguardo para tormentas eléctricas, un aumento de infraestructura hospitalaria para evitar el traslado de pacientes y por supuesto, como consecuencia, buscar una actualización de Términos de Referencia (TR) para creación de atlas de peligros naturales y modificación de políticas públicas.

VI. CONTRIBUCIÓN Y FUTURA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

El principal aporte de esta investigación es la metodología implementada para evaluar el peligro de caída de rayo en el noroeste de México que, a pesar de ser una región de alta exposición, aún se desconoce el peligro derivado del fenómeno hidrometeorológico.

En contexto, esta tesis aporta al conocimiento de la actividad de rayos en la región estudiada, define las variables sociodemográficas de los decesos por esta causa y determina la contribución de dichas variables.

Los resultados presentados pueden ayudar en la mitigación de las pérdidas humanas y se incluyen importantes elementos adicionales sobre la actividad de rayos, como las variaciones estacionales y diarias; también, la configuración del terreno y su posible influencia en los rayos fue analizada. La información generada está disponible para la Unidad Estatal de Protección Civil Sonora y CENAPRED en un sistema de información geográfica (SIG),

El análisis geoespacial de los rayos y el peligro que representa tiene una amplia variedad de aplicaciones en tiempo real, desde la predicción de tormentas eléctricas y chubascos, la creación de plataformas de alerta temprana, la localización de los daños producidos tanto a la población como a la infraestructura, la evaluación de riesgos, la investigación geofísica y forestal, entre otros.

A futuro, se espera incentivar el interés de investigadores sociales y dependencias gubernamentales para generar una cartografía de vulnerabilidad social con enfoque de caída de rayo a una escala mayor y fiel.

Por último, se pretende avanzar en la generación de la cultura del rayo en México como una futura línea de investigación, contribuir al impulso de la modificación de políticas públicas y participar en proyectos enfocados en materia de protección civil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdekareem, M., Al-Arifi, N., Abdalla, F., Mansour, A., y El-Baz, F. (2022). Fusion of Remote Sensing Data Using GIS-Based AHP-Weighted Overlay Techniques for Groundwater Sustainability in Arid Regions. *Sustainability (Switzerland)*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/su14137871>
- Agnew, M. D., y Palutikof, J. P. (2000). GIS-based construction of baseline climatologies for the Mediterranean using terrain variables. *Climate Research*, 14(2), 115–127. <https://doi.org/10.3354/cr014115>
- Albrecht, R. I., Morales, C. A., y Silva Dias, M. A. F. (2011). Electrification of precipitating systems over the Amazon: Physical processes of thunderstorm development. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(8), 1–27. <https://doi.org/10.1029/2010JD014756>
- Alcántara Ayala, I. (2004). Flowing Mountains in Mexico: Incorporating Local Knowledge and Initiatives to Confront Disaster and Promote Prevention. *Mountain Research and Development*, 10-13. doi:10.2307/3674458
- Aranguren, D., Lopez, J., Inampues, J., Torres, H., Betz, H., 2017. Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. *Journal of Atmospheric and Sola-Terrestrial Physics*. 154, 182-189.
- Arreygue Rocha, E., Garduño Monroy, V., Canuti, P., Casaglie, N., Lotti, A., y Chiesa, S. (2002). Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(2), 91-106.
- Atak, A., Çabuk, S., Bakış, R., y Çabuk, A. (2019). Determination of Suitable Sites for Solar Power Plants by Using Weighted Overlay Analysis: Sivrihisar Case. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(3), 1–12.
- Atorre, F., Alfo, M., De Sanctis, M., Francesconi, F., y Bruno, F. (2007). Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale. *International Journal of Climatology*, 27(March 2007), 1825–1843. <https://doi.org/10.1002/joc.1495>
- Awanda, D., Anugrah Nurul, H., Musfiroh, Z., y Dinda Dwi, N. P. (2017). Spatial Analysis for Potential Water Catchment Areas using GIS: Weighted Overlay Technique. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 98(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/98/1/012054>
- Basharat, M., Shah, H. R., y Hameed, N. (2016). Landslide susceptibility mapping using GIS and weighted overlay method: a case study from NW Himalayas, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4). <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2308-y>
- Bhavika, B., 2007. The influence of terrain elevation on lightning density in South Africa. Master's thesis. University of Johannesburg.
- Biswas, R. N., Islam, M. N., Mia, M. J., y Islam, M. N. (2020a). Modeling on the spatial vulnerability of lightning disaster in Bangladesh using GIS and IDW techniques. *Spatial Information Research*, 28(5), 507–521. <https://doi.org/10.1007/s41324-019-00311-y>
- Blumenthal, R., y West, N. J. (2015). Investigating the risk of lightning's pressure blast

- wave. *South African Journal of Science*, 111(3-4).
<https://doi.org/10.17159/sajs.2015/20140187>
- Bourscheidt, V., Junior, O.P., Naccarato, K., Pinto, I., 2009. The influence of topography on the cloud-to-ground lightning density in South Brazil. *Journal of Atmospheric Research*, 91, 508-513.
- Burrough, P. A., y McDonnell, R. A. (1998). Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics. *Economic Geography*, 75(4), 16-34. <https://doi.org/10.2307/144481>
- Burrows, W. R., King, P., Lewis, P. J., Kochtubajda, B., Snyder, B., y Turcotte, V. (2002). Lightning occurrence patterns over Canada and adjacent United States from lightning detection network observations. *Atmosphere - Ocean*, 40(1), 59-80. <https://doi.org/10.3137/ao.400104>
- Candiani, G., Carnevale, C., Finzi, G., Pisoni, E., y Volta, M. (2013). A comparison of reanalysis techniques: Applying optimal interpolation and ensemble kalman filtering to improve air quality monitoring at mesoscale. *Science of the Total Environment*, 458-460, 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.089>
- Cañada, R. M. (2004). Aplicación de la geoestadística al estudio de la variabilidad espacial del ozono en la Comunidad de Madrid. *El clima entre el mar y la montaña*. Ed. Asociación Española de Climatología. 451-462.
- Carver, S. J. (1991). Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographic Information Systems*, 321-339.
- CENAPRED, C. N. de P. de D. (2011). *Grado de vulnerabilidad social por municipio, 2010, escala 1:250,000*.
- CENAPRED, y SEGOB. (2014a). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. *Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana* (Primera Ed, Vol. 1). <http://www.cenapred.gob.mx>
- CENAPRED, y SEGOB. (2014b). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Conceptos Básicos para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. In *Segob* (1ª edición).
- CENAPRED, y SEGOB. (2014c). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social*. (1ª edición, Vol. 1).
- CENAPRED, y SEGOB. (2014d). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Fenómenos hidrometeorológicos*. (1ª edición). SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN; CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES.
- CENAPRED, y SEGOB. (2016). *Guía de contenido mínimo para la Elaboración del Atlas Nacional De Riesgos* (1ª edición, Issue 15).
- Chaudhari, V., Dhanesh, B., Dutta, S., Umrikar, B., y Halder S. (n.d.). 1 ; Second B Dhanesh Lal 2 , Indian Institute of Remote Sensing-ISRO 2 ; Third C Sayantan Dutta 3 , Kumaun University-SSJ Campus 3 ; Fourth D Dr. Bhavna Umrikar 4 , University of Pune 4. *International Journal of Remote Sensing & Geoscience (IJRSG)*, 5. <https://www.researchgate.net/publication/347357905>
- Chingombe, W., Pedzisai, E., Manatsa, D., Mukwada, G., & Taru, P. (2015). A participatory approach in GIS data collection for flood risk management, Muzarabani district,

- Zimbabwe. *Arabian journal of geosciences*, 8(2), 1029-1040. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1265-6>
- Chuvienco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M. P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J. R., Herrera, M. A., y Zamora, R. (2010). Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 221(1), 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>
- Collins, M. G., Steiner, F. R., & Rushman, M. J. (2001). Land-Use Suitability Analysis in the United States: Historical Development and Promising Technological Achievements. *Environmental Management*, 611-621.
- CONABIO, C. N. para el C. y U. de la B. (2010). *Grados de marginación municipal, 2010, escala: 1:250000*.
- CONABIO, C. N. para el C. y U. de la B. (2012). *Distribución de la población en México por municipio, 2010, escala 1:250,000*.
- CONABIO, C. N. para el C. y U. de la B. (2014). *Grado de rezago social por municipio, 2010, escala 1:250, 000*.
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2014). *Metadato completo: población por localidad*.
- CONAPO, Consejo Nacional de Población. (2010). *Índice de Desarrollo Humano por Municipio, escala 1:250,000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo México (PNUD). México, D. F.*
- CONAPO, Consejo Nacional de Población. (2010). *Índice de Marginación por Entidad Federativa, escala 1:250,000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo México (PNUD). México, D. F.*
- CONAPO, Consejo Nacional de Población. (2010). *Índice de Marginación por Municipio, escala 1:250,000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo México (PNUD). México, D. F.*
- Cummins, K. L., y Murphy, M. J. (2009). An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51(3 PART 1), 499–518. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2009.2023450>
- de la Fuente, F. (2011). *Análisis Componentes Principales Santiago de la Fuente Fernández*. 32.
- Dissing, D., Verbyla, D.L. (2003). Spatial patterns of lightning strikes in interior Alaska and their relations to elevation and vegetation. *Canadian Journal of Research*. 33, 770-782.
- DGIS Dirección General de Información en Salud, SSA Secretaría de Salud, INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2020). Base de Datos Nacional de Decesos por Caída de Rayo 1998-2019. <http://www.plataformadetransparencia.org.mx/>.
- DOF. (2018). Ley Del Sistema Nacional De Información Estadística Y Geográfica. *Ley Del Sistema Nacional De Información Estadística Y Geográfica*. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LSNIEG_250618.pdf

- Dos Santos, A. P. P.; Coelho, C. A. S.; Pinto, O.; Quadros dos Santos, S. R.; Lopez de Lima, F. J.; Barreiros de Souza, E. (2017). Climatic diagnostics associated with anomalous lightning incidence during the summer 2012/2013 in southeast Brazil. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.5227
- Eldrandaly, K. A., y Abu-Zaid, M. S. (2011). Comparison of six GIS-based spatial interpolation methods for estimating air temperature in western Saudi Arabia. *Journal of Environmental Informatics*, 18(1), 38–45. <https://doi.org/10.3808/jei.201100197>
- Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN y Comunidad de Usuarios GIS (2017). World Imagery Compuesto de imágenes TerraColor de 15 m, SPOT de 2.5 m; resolución espacial base de $x=0.1493\text{m}$, $y=0.1493\text{m}$; recorte descargado en píxel 100 X 100.
- Fox y Bouchet-Valat (2016). *Getting Started with R commander*. V 2.3-0.
- García-Cabrejo, O., y Moreno-Sánchez, G. (2006). Sobre la Utilización del Análisis de Fourier, Análisis Espectral Singular y Redes Neuronales Artificiales en Estratigrafía. Parte 1: Teoría y Caso Sintético. *Geología Colombiana*, 31, 105–120.
- Gochis, D. J., Jimenez, A., Watts, C. J., Garatuza-Payan, J., y Shuttleworth, W. J. (2004). Analysis of 2002 and 2003 warm-season precipitation from the North American monsoon experiment event rain gauge network. *Monthly Weather Review*, 132(12), 2938–2953. <https://doi.org/10.1175/MWR2838.1>
- Gomariz-Castillo, Francisco J. (2013). Distribución espacial: interpolación espacial
- Gomes, C., y Kadir, M. Z. A. A. (2011). A theoretical approach to estimate the annual lightning hazards on human beings. *Atmospheric Research*, 101(3), 719–725. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.020>
- Gonçalves, W. A., Machado, L. A. T., y Kirstetter, P. E. (2015). Influence of biomass aerosol on precipitation over the Central Amazon: An observational study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(12), 6789–6800. <https://doi.org/10.5194/acp-15-6789-2015>
- González García, N., y Taborda Londoño, A. (2015). “ANÁLISIS DE COMPONENTES ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES SPARSE Formulación, algoritmos e implicaciones en el análisis de datos. <http://bit.ly/1jsRCXa>
- Guía de contenido mínimo para la elaboración del Atlas Nacional de Riesgos, 39 (2016).
- Gutiérrez-Anguamea, G. A., Martínez-Haros, A. L., Minjárez-Sosa, J. I. (2016). La utilidad del análisis del relieve en beneficio de la sociedad. *EPISTEMUS*, año 10, No. 21, julio-diciembre 2016. Universidad de Sonora. No. 04-2012-101210334800-102; ISSN: 2007-8196 (electrónico), ISSN: 2007-4530 (impreso). pp 68-74 <http://www.epistemus.uson.mx/revistas/articulos/21-R21-9-UTILIDAD.pdf>
- Gutiérrez-Anguamea, G. A., de la Rosa-Varela, F. S., Martínez-Haros, A. L., Minjárez-Sosa, J. I. *Análisis del paisaje en materia de sustentabilidad ambiental: Descripción geomórfica del área Guaymas-Empalme, Sonora*. Educación y Universidad ante el Horizonte 2020: Inclusión y Cultura Colaborativa entre Empresa y Sociedad; 1era. edición, Editorial Qartuppi, S. de R.L. de C.V., marzo 2017. Libro electrónico ISBN 978-607-518-225-4 (obra completa); ISBN 978-607-518-226-1 (volumen 2); D.R. © 2017. Universidad de Sonora; pp 81-88. http://www.qartuppi.com/2017/HORIZONTE_2.pdf
- Gutzler, D. S., Kim, H. K., Higgins, R. W., Juang, H. M. H., Kanamitsu, M., Mitchell, K., Mo,

- K., Pegion, P., Ritchie, E., Schemm, J. K., Schubert, S., Song, Y., y Yang, R. (2005). The North American Monsoon Model Assessment Project: Integrating numerical modeling into a field-based process study. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(10), 1423–1429. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-10-1423>
- Hammond, H. E. (1954). Small-scale continental landform maps. *Annals of the Association of American Geographers* 44 No 1: 33-42.
- Hiemstra, P. H., Pebesma, E. J., Heuvelink, G. B. M., y Twenhöfel, C. J. W. (2010). Using rainfall radar data to improve interpolated maps of dose rate in the Netherlands. *Science of the Total Environment*, 409(1), 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.051>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hodanish, S. J. (2012). Meteorological case studies of lightning strike victims in Colorado. In International lightning meteorology conference. Broomfield, CO: Vaisala.
- Holle, R. L. (2008). Annual Rates of Lightning Fatalities by Country. *20th International Lightning Detection Conference*, 1–14. http://es.vaisala.com/Vaisala Documents/Scientific papers/Annual_rates_of_lightning_fatalities_by_country.pdf
- Holle, R. L. (2016). A summary of recent national-scale lightning fatality studies. *Weather, Climate, and Society*, Vol. 8, 35-48. DOI: 10.1175/WCAS-D-15-0032.1
- Holle, R. L., y Cooper, M. A. (2016). Lightning Occurrence and Social Vulnerability; chapter 1. In *Intech: Vol. i* (Issue Atmospheric Hazards-Case Studies in Modeling, Communication, and Societal Impacts, p. 13). <https://doi.org/10.5772/63001>
- Holle, R. L., y Murphy, M. J. (2015). Lightning in the North American monsoon: An exploratory climatology. *Monthly Weather Review*, 143(5), 1970–1977. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00363.1>
- Husson et al., (2013). Análisis de datos con R. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Pp. 212. ISBN 978-958-8726-05-2; EAN 9789588726052
- Husson, F., Le, S. and Pages, J. (2017). Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R, Principal Component Analysis (PCA). Segunda edición. Chapman and Hall/CRC. 60 páginas; eBook ISBN 9780429225437
- INEEL, I. N. de E. y E. L., y Montoya Tena, J. G. (2020). *Solicitud de información No. 1847000004720*.
- INEGI (2016). Estadística de defunciones generales Marco metodológico. ISBN 978-607-739-967-4; formato electrónico. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825086114>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, I. (2010). *Metadatos completo: Áreas Geoestadísticas Municipales, escala 1:250,000. Marco Geoestadístico 2013 versión 6.0c (Inventario Nacional de viviendas 2010)*. Aguascalientes, Ags., México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, I. (2019). *Metadatos completo: Localidades de la República Mexicana*.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, I. (2021a). *Metadatos completo: División política municipal, 1:250,000*.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, I. (2021b). *Metadatos completos: División política estatal, 1:250,000*.

- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, I. (2021c). *Metadatos completos: Población por localidad, 2010, escala: 1:1. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Datos estadísticos del 2010, del Instituto Nacional de estadística y Geografía (INEGI). México, D. F.*
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, I. (2019). *Metadatos completo: Red nacional de caminos.*
- Jiménez, M., Baeza, C., Matías, L., y Eslava, H. (2012). *Mapas de Índices de Riesgo a escala Municipal por Fenómenos Hidrometeorológicos.* 61.
- Johnson, R. H., Ciesielski, P. E., McNoldy, B. D., Rogers, P. J., y Taft, R. K. (2007). Multiscales variability of the flow during the North American Monsoon experiment. *Journal of Climate*, 20(9), 1628–1648. <https://doi.org/10.1175/JCLI4087.1>
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., y Lucas, N. (2001). Using ArcGIS geostatistical analyst. *Analysis*, 300, 300. [http://direitosminerarios.com/pdf/ESRI - Using ArcGIS Geostatistical Analyst.pdf](http://direitosminerarios.com/pdf/ESRI-Using ArcGIS Geostatistical Analyst.pdf)
- Karimzadeh, S., y Matsuoka, M. (2018). A weighted overlay method for liquefaction-related urban damage detection: A case study of the 6 september 2018 Hokkaido eastern iburi earthquake, Japan. *Geosciences (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/geosciences8120487>
- Kassambara (2017). Practical guide to principal component methods in R: PCA, M(CA), FAMD, MFA, HCPC, factoextra. Publicado por STHDA; pp. 169. Libro sobre la interpretación de los gráficos y su significado de las cosas.
- KianiSadr, M., Melhosseini Darani, K., y Golkarian, H. (2019). *Quantitative Zoning of Ecotourism Potential in Oshtorankouh Protected Area Using Delphi Method, Analytic Hierarchy Process, and Weighted Overlay Methods.*
- Kotroni, V., Lagouvardos, K. (2008). Lightning occurrence in relation with elevation, terrain slope, and vegetation cover in the Mediterranean. *Journal of Geophysical Research*. 113, D21118. <http://dx.doi.org/10.1029/2008JD010605>
- Kottegoda, N., y Rosso, R. (2008). *Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers* (B. P. Ltd y I. The McGraw-Hill Companies (eds.); Second).
- Leenaers, H., Burrough, P. A., and Okx, J. P. (1989), Efficient mapping of heavy metal pollution on floodplains by cokriging from elevation data, in *Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems* (J. Raper, ed.) Taylor and Francis, London, pp. 37-50.
- Lloyd, C. D. (2005). Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 308(1–4), 128–150. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.026>
- López, R.; Holle, R. (1986). Diurnal and spatial Variability of Lightning Activity in Northeastern Colorado and Central Florida during the Summer. *Monthly Weather Review*, 114(1), 25. <https://doi.org/10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004>
- Martínez Haros, A. L. (2014). *Evaluación de Peligro de Remoción en Masa: Caso Colonia Piedra Bola, Hermosillo, Sonora.* Universidad de Sonora.
- Matheron, G. (1965). Les variables régionalisées et leur estimation: Une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature. Masson, Paris.
- Matheron G (1971). La théorie des fonctions aléatoires intrinsèques généralisées. Note Géostatistique no 117. Technical report N-252, Centre de Géostatistique,

Fontainebleau, France

- Mayfield, J. (2016). *Automating the Classification of Thematic Rasters for Weighted Overlay Analysis in GeoPlanner for ArcGIS* [Master of Science in Geographic Information Systems]. University of Redlands.
- McBratney, A. B., and R. Webster. (1986). Choosing Functions for Semi-variograms of Soil Properties and Fitting Them to Sampling Estimates. *Journal of Soil Science* 37: 617–639.
- Minjarez Sosa, C. M. (2005). Precipitable water vapor from ground based gps observations over southwestern north america: summer 2002 and 2003. In *Thesis Master of Science with a Mayor in Atmospheric Sciences*. University of Arizona.
- Minjarez-Sosa, C. M., Castro, C. L., Cummins, K. L., Krider, E. P., y Waissmann, J. (2012). Toward development of improved QPE in complex terrain using cloud-to-ground lightning data: A case study for the 2005 Monsoon in Southern Arizona. *Journal of Hydrometeorology*, 13(6), 1855–1873. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-0129.1>
- Minjarez-Sosa, C. M., y Waissman, J. (2017). A Survey and Perspectives on Mathematical Models for Quantitative Precipitation Estimation Using Lightning. *Advances in Meteorology*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1351308>
- Minjárez Sosa, J. I., Ramírez, L., Villa, A., Martínez, A., Gutiérrez, G. A., Tapia, E., . . . Montijo, A. (2007). *Atlas de Peligros Naturales de Nogales, Sonora*. Nogales, Sonora, México: Secretaria de Desarrollo Social, SEDESOL.
- Minjárez Sosa, J. I., Ramírez, L., Villa, A., Gutiérrez, G. A., Martínez, A., Tapia, E., . . . Montijo, A. (2008). *Atlas de Riesgos para el Estado de Sonora*. Unidad Estatal de Protección Civil del Estado de Sonora.
- Montanero Fernández, J. (2019). *Manual abreviado de Análisis Multivariante*.
- Moreno-Sánchez, G. y García-Cabrejo, O. (2003): Metodologías Cuantitativas en el Análisis de Datos Estratigráficos. Notas de Clase (Material No Publicado). 105 pp.
- Murphy, M. J., y Holle, R. L. (2005). Where is the real cloud-to-ground lightning maximum in North America? *Weather and Forecasting*, 20(2), 125–133. <https://doi.org/10.1175/WAF844.1>
- Mushtaq, F., Nee Lala, M. G., y Anand, A. (2018). Spatio-temporal variability of lightning activity over JyK region and its relationship with topography, vegetation cover, and absorbing aerosol index (AAI). In *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (Vol. 179). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.08.011>
- Myers, D. E. (1982), Matrix formulation of cokriging, *Math. Geol.* 14:249-257.
- NASA Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos, y METI Ministerio de Economía, C. e I. de J. (2011). *ASTER Global DEM (ASTER GDEM) - Quick Guide for V2* (Issue December 1999).
- Nesbitt, S. W., Gochis, D. J., y Lang, T. J. (2008). The diurnal cycle of clouds and precipitation along the Sierra Madre Occidental observed during NAME-2004: Implications for warm season precipitation estimation in complex terrain. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4), 728–743. <https://doi.org/10.1175/2008JHM939.1>
- Nowreen, S., Newton, I. H., Zzaman, R. U., Islam, A. K. M. S., Islam, G. M. T., y Alam, M. S. (2021). Development of potential map for groundwater abstraction in the northwest region of Bangladesh using RS-GIS-based weighted overlay analysis and water-table-fluctuation technique. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08790-5>

- Oliver, M. A. y Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems, *International Journal of Geographical Information Systems*, 4:3, 313-332. <http://dx.doi.org/10.1080/02693799008941549>
- Orville, R. E., Huffines, G. R., Burrows, W. R., Holle, R. L., y Cummins, K. L. (2002). The North American lightning detection network (NALDN) - first results: 1998-2000. *Monthly Weather Review*, 130(8), 2098-2109. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<2098:TNALDN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<2098:TNALDN>2.0.CO;2)
- Pani, S., Chakrabarty, A., y Bhadury, S. (2016). GROUNDWATER POTENTIAL ZONE IDENTIFICATION BY ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP) WEIGHTED OVERLAY IN GIS ENVIRONMENT – A CASE STUDY OF JHARGRAM BLOCK, PASCHIM MEDINIPUR. *International Journal of Remote Sensing & Geoscience (IJRSG)*, 5(3). www.ijrsg.com
- Plazas-Nossa, L., Ávila, M. A., y Torres, A. (2017). Spectral Estimation of UV-Vis Absorbance Time Series for Water Quality Monitoring. *Ingeniería*, 22; No. 2, 211-225. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.2.a03>
- Price, D. T., McKenney, D. W., Nalder, I. A., Hutchinson, M. F., y Kesteven, J. L. (2000). A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101(2-3), 81-94. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00169-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00169-0)
- Raga, G. B., De La Parra, M. G., y Kucienska, B. (2014). Deaths by lightning in Mexico (1979-2011): Theat or vulnerability? *Weather, Climate, and Society*, 6(4), 434-444. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-13-00049.1>
- Roeder, W. P., Cummins, B. H., Cummins, K. L., Holle, R. L., y Ashley, W. S. (2015). Lightning fatality risk map of the contiguous United States. *Natural Hazards*, 79(3), 1681-1692. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1920-6>
- Rowe, A. K., Rutledge, S. A., Lang, T. J., Ciesielski, P. E., y Saleeby, S. M. (2008). Elevation-dependent trends in precipitation observed during NAME. *Monthly Weather Review*, 136(12), 4962-4979. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2397.1>
- Said, R. K., Inan, U.; Cummins, K. L. (2010). Long-range lightning geolocation using a VJF radio atmospheric waveform bank. *J. Geophys Res.* 115(D23):D23108.
- Said, R. K., y Murphy, M. J. (2016). GLD360 Upgrade: Performance Analysis and Applications. *24th International Lightning Detection Conference, Ic.*
- Said, R. 2017. Towards a global lightning detection system. *Weather*. 72(2):36-40.
- Schulz, W., Diendorfer, G. (1999). Lightning characteristics as a function of altitude evaluated from lightning location network data. Proceedings of the International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE). Society of Automotive Engineers, Toulouse, France.
- Serra, Y. L., Adams, D. K., Minjarez-Sosa, C., Moker, J. M., Arellano, A. F., Castro, C. L., Quintanar, A. I., Alatorre, L., Granados, A., Vazquez, G. E., Holub, K., y DeMets, C. (2016). The north American monsoon GPS transect experiment 2013. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(11), 2103-2115. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00250.1>
- Shit, P. K., Bhunia, G. S., y Maiti, R. (2016). Potential landslide susceptibility mapping using weighted overlay model (WOM). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0078-x>

- Smorgonskiy, A., Rachidi, F., Rubenstein, M., Diendorfer, G. (2013). On the relation between lightning flash density and terrain elevation. In: International Symposium on Lightning Protection (XIISIPDA), Brasil.
- Stall, C. A., Cummins K. L., Krinder E. P., Cramer J. A. 2009. Detecting Multiple Ground Contacts in Cloud-to-Ground Lightning Flashes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(11):2392–2402. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1278.1>
- Steiner, A. K., Kirchengast, G., Foelsche, U., Kornblueh, L., Manzini, E., y Bengtsson, L. (2001). GNSS occultation sounding for climate monitoring. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(3), 113–124. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00034-5)
- Takahashi, T. (1990). *ABSENCE IN TORRENTIAL RAINFALL particles were frequently observed above the freezing Takahashi: Near absence of lightning Precipitation Particle Image Sensor Radio- Fig. 1b. Schematic display of precipitation particles on stones were also seen (Figure. 17(12), 2381–2384.*
- Vaisala, Inc. (2020), Base de datos GLD360, descargas de rayos nube-tierra en el noroeste, centro y sureste de México. *Registros puntuales del 1º de enero del 2015 al 31 de diciembre del 2019.*
- Vaisala, Inc. (2021), Total Lightning Statistics, 2021 Annual Lightning Report. © Vaisala 2022
- Varnes, D. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Paris, Francia: UNESCO.
- Vauclin, M., Vieira, S.R., Vachaud, G., and Nielsen, D.R. (1983). The use of cokriging with limited field soil observations, *Soil Sei. Soc. Am. J.*, 47, 175-184.
- Vicente-Serrano, S. M., Saz-Sánchez, M. A., y Cuadrat, J. M. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): Application to annual precipitation and temperature. *Climate Research*, 24(2), 161–180. <https://doi.org/10.3354/cr024161>
- Vidal R. Número de días con tormenta eléctrica, carta NA-XIV-5. [Sección del libro] // Nuevo Atlas Nacional de México. - [s.l.] : Instituto de Geografía, UNAM, 2007. - escala 1:16,000,000. - ISBN: 978-970-32-5047-9.
- Vogt, B. J., y Hodanish, S. J. (2016). A geographical analysis of warm season lightning/landscape interactions across Colorado, USA. *Applied Geography*, 75, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.08.006>
- Wang, J., Sheng, Z., Zhou, B., y Zhou, S. (2014). Lightning potential forecast over Nanjing with denoised sounding-derived indices based on SSA and CS-BP neural network. *Atmospheric Research*, 137, 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.014>
- Yan, H., Nix, H. A., Hutchinson, M. F., y Booth, T. H. (2005). Spatial interpolation of monthly mean climate data for China. *International Journal of Climatology*, 25(10), 1369–1379. <https://doi.org/10.1002/joc.1187>
- Yi, G., Yijun, Z., Wenjuan, Z., y Yang, Z. (2014). Characteristics of Lightning Casualties and Vulnerability Evaluation Regionalization in China. *23rd International Lightning Detection Conference*, 4.
- Zajac, B. A. y S. A. Rutledge, 2001: Cloud-to-ground lightning activity in the contiguous United States from 1995 to 1999. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 999–1019.

- Zhang, X., y Srinivasan, R. (2009). Gis-Based Spatial Precipitation Estimation : a Comparison Geostatistical Approaches. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(4), 894–906.
- Zinck, J. (2012). Geopedología. *Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation*, 131.
https://www.actswithscience.com/Descargas/zinck_geopedologia_2012.pdf

ANEXO A

Tabla A1. Decesos ocurridos en el área de estudio, 2015-2019 (DGIS et al., 2020).

Deceso	Entidad	Municipio	Localidad	Causa-defunción	Sexo
201506	Chihuahua	Guachochi	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201509	Durango	Pánuco de Coronado	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201510	Durango	Mezquital	San Pedro de Xícora	Víctima de rayo en lugar no especificado	H
201552	Nayarit	Huajicori	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201553	Nayarit	Ruíz	Ruíz	Víctima de rayo en lugar no especificado	M
201575	Sinaloa	El Fuerte	Adolfo López Mateos (Jahuara Segundo)	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201576	Sinaloa	Ahome	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201577	Sinaloa	Badiraguato	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201578	Sinaloa	Badiraguato	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201579	Sinaloa	Sinaloa	Genaro Estrada	Víctima de rayo en granja	H

201580	Sonora	Cajeme	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201609	Chihuahua	Janos	Janos	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201610	Chihuahua	Janos	Janos	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201611	Chihuahua	Guerrero	Tomochi	Víctima de rayo en vivienda	M
201612	Coahuila de Zaragoza	Torreón	Torreón	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201613	Durango	San Dimas	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201614	Durango	San Dimas	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201634	Jalisco	Mezquitic	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201668	Nayarit	Acaponeta	Acaponeta	Víctima de rayo en áreas de deporte y atletismo	H
201669	Nayarit	San Blas	San Blas	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201670	Nayarit	Rosamorada	Rosamorada	Víctima de rayo en granja	H
201671	Nayarit	San Blas	San Blas	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201686	Sinaloa	Ahome	Higuera de Zaragoza	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201687	Sinaloa	Ahome	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201688	Sinaloa	Ahome	Los Mochis	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201689	Sinaloa	Guasave	León Fonseca (Estación Verdura)	Víctima de rayo en calles y carreteras	H

201690	Sinaloa	Mazatlán	Mazatlán	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201691	Sonora	Hermosillo	Hermosillo	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201695	Zacatecas	Fresnillo	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201705	Durango	Durango	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201706	Durango	Mezquital	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en lugar no especificado	H
201730	Nayarit	Del Nayar	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201739	Sinaloa	El Fuerte	Adolfo López Mateos (Jahuara Segundo)	Víctima de rayo en granja	H
201740	Sinaloa	Guasave	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201746	Zacatecas	Sain Alto	Emiliano Zapata (San José)	Víctima de rayo en áreas de deporte y atletismo	H
201804	Chihuahua	Janos	Janos	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201805	Chihuahua	Bocoyna	Creel	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201806	Chihuahua	Guazapares	Témoris	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201808	Durango	Canatlán	Canatlán	Víctima de rayo en granja	H
201809	Durango	Mezquital	La Guajolota	Víctima de rayo en lugar no especificado	H
201859	Sinaloa	Mazatlán	Mazatlán	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201860	Sinaloa	Ahome	Alfonso G. Calderón (Poblado Siete)	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H

201861	Sonora	Bácum	San José de Bácum	Víctima de rayo en granja	H
201862	Sonora	Bácum	San José de Bácum	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201903	Chihuahua	Carichí	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	M
201904	Chihuahua	Namiquipa	Namiquipa	Víctima de rayo en granja	H
201907	Durango	Súchil	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201908	Durango	Canatlán	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201938	Nayarit	Del Nayar	Linda Vista	Víctima de rayo en vivienda	M
201940	Nayarit	Huajicori	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en vivienda	M

ANEXO B

Series de tiempo de descargas eléctricas

Se realizó un acercamiento a las descargas eléctricas detectadas por la red GLD360, a través del análisis de su comportamiento mensual, diario y en las horas próximas a cada uno de los decesos ocurridos en el año 2015, dentro del área de estudio.

En todos los casos de pérdidas humanas del año 2015, se realizaron gráficos que ilustren las descargas eléctricas detectadas por la red GLD360 en las horas próximas donde se estableció el fallecimiento.

En los gráficos resultantes se ubicaron puntos en color naranja que indican el valor de la corriente pico y la hora en que sucedió la tragedia. En casos donde esto no fue posible, solamente se obtuvo el valor promedio en el día del deceso; en situaciones con faltantes de actividad eléctrica por horas, días o meses y que sea complicado obtener algún valor de referencia, se considerará la corriente pico como No Especificado (NE).

La primera pérdida humana sucedió en el mes de mayo, en la siguiente ilustración se observa un vuelco a polaridad negativa a partir del día 02 y el resto del mes las corrientes pico se mantienen moderadas, excepto por el día 08 donde tuvo lugar otro cambio de polaridad, esta vez hacia la carga positiva (Figura B1).

Durante el día 22 de mayo, solamente se presentaron 8 lecturas con repuntes superiores a los 150 y -150 kA, y la mayor actividad eléctrica fue concentrada entre los 50 y -50 kA (Figura B2).

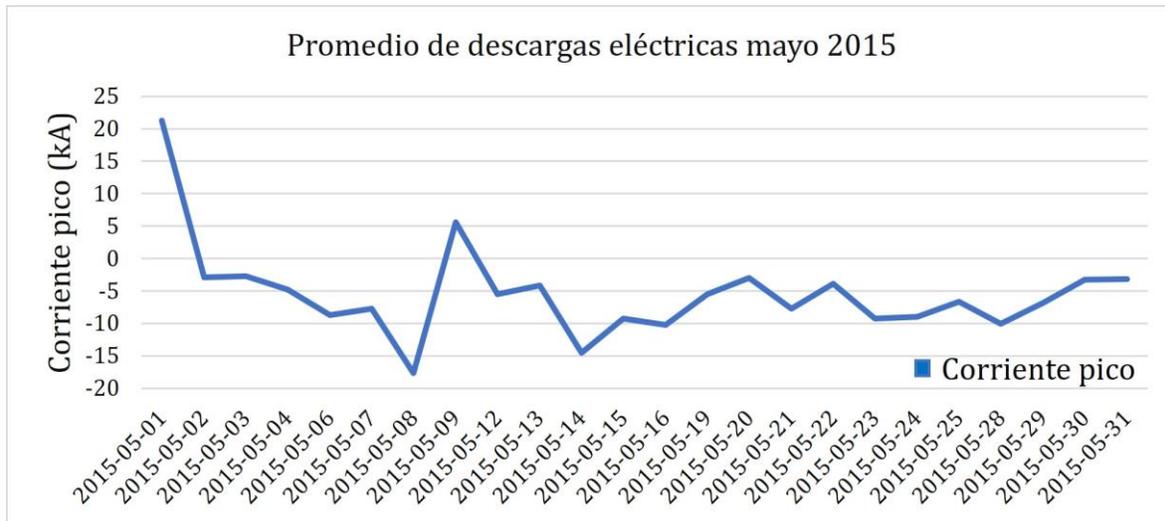


Figura B1. Promedio de descargas eléctricas en el mes de mayo de 2015.

El evento 201509 fue notificado con hora oficial de muerte a las 13:15 h (tiempo local), esto corresponde a 19:15 h Greenwich, del 22 de mayo de 2015. La corriente pico registrada a esa hora fue de 7.4 kA. Nótese que este deceso ocurrió en un periodo donde las descargas eléctricas emitidas fueron principalmente negativas, siendo a las 19:03 h Greenwich el pico mayor con -92.7 kA (Figura B3).

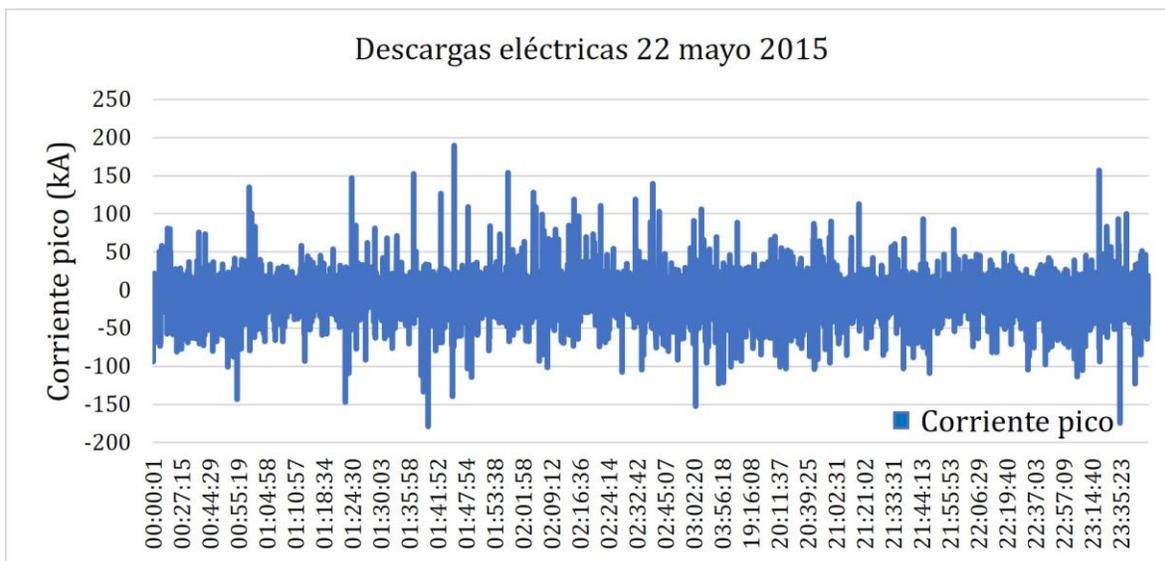


Figura B2. Descargas eléctricas del día 22 de mayo del 2015.

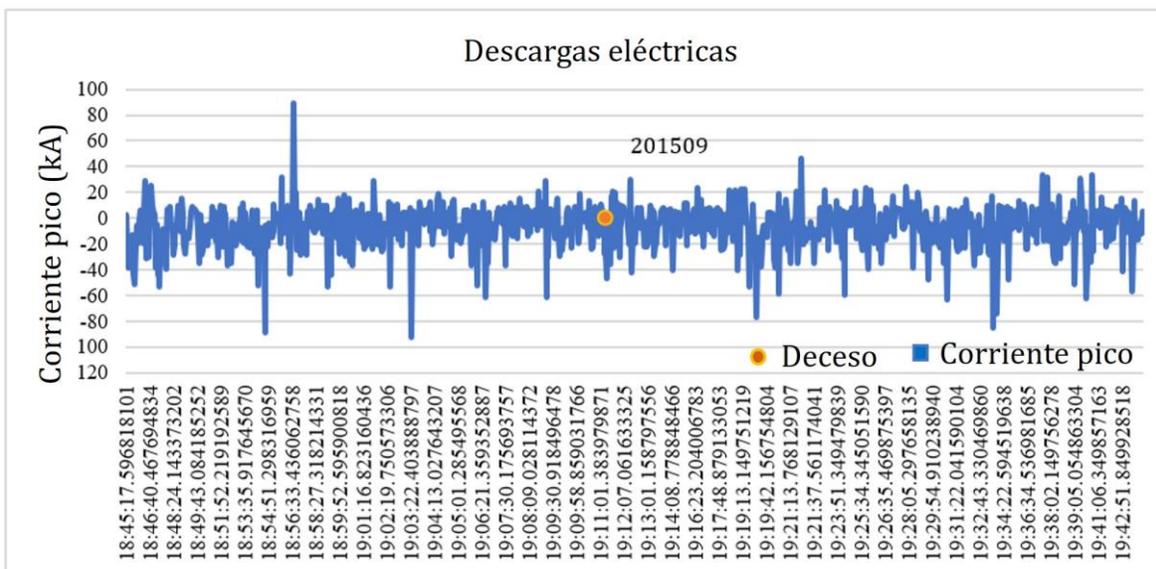


Figura B3. Descargas eléctricas en horas próximas al deceso 201509.

En el mes de julio sucedieron 4 decesos, identificados con las claves de rayos 201506, 201552, 201575 y 201577; los dos primeros sucedieron el 06 de julio, a las 13 y 17:30 h. El evento 201575 aconteció el día 18 a las 17:15 h y el 201577 el 23 a las 16 h.

En la Figura B4 se muestra el comportamiento de las descargas eléctricas durante el mes de julio del año 2015. En el promedio de las lecturas del mes de julio, se puede observar que en los días 06 y 18 las descargas eléctricas negativas se incrementaron considerablemente; en cambio, el día 23 muestra un leve repunte.

En la Figura B5 se expone el comportamiento general de las descargas eléctricas durante todo el día 06 de julio.

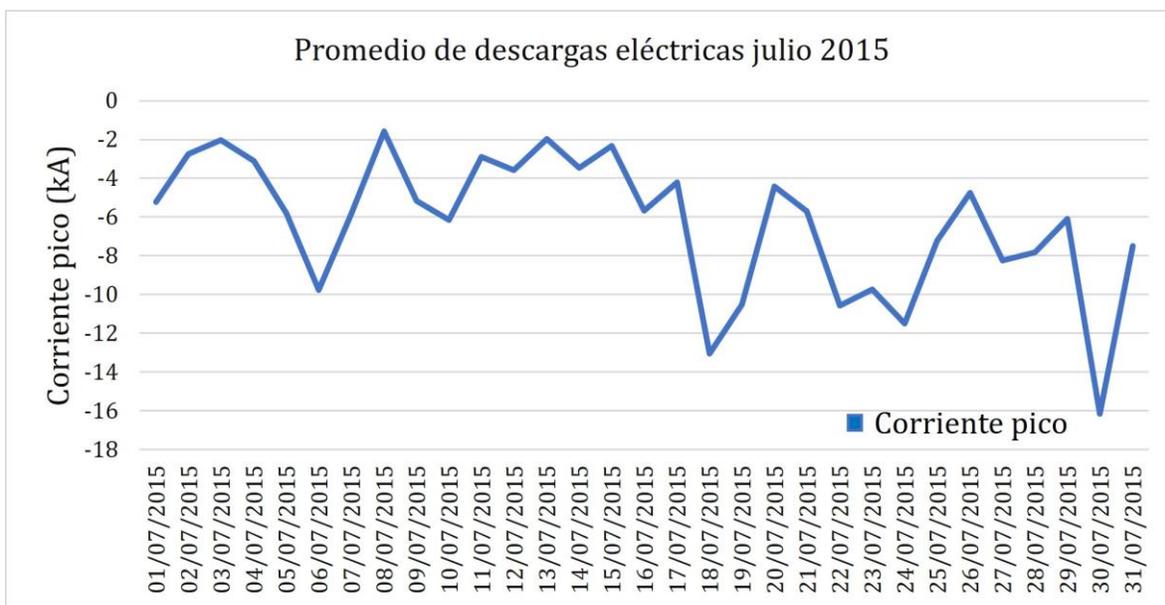


Figura B4. Promedios de descargas eléctricas en el mes de julio de 2015.

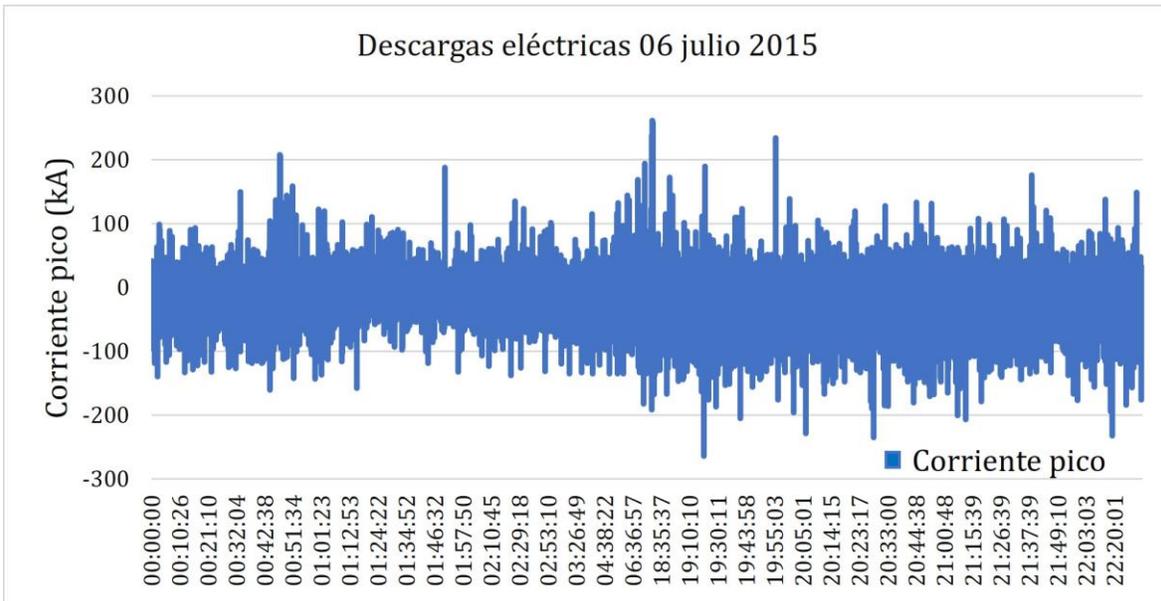


Figura B5. Descargas eléctricas del día 06 de julio del 2015.

Es importante señalar que, para efectos de esta tesis, la hora oficial del deceso será considerada para la lectura de la descarga eléctrica generada en la atmósfera.

En el caso 201506, la corriente pico registrada fue de -13 kA, a las 20:00 hr Greenwich (Figura B6).

En el deceso 201552, la Secretaría de Salud indica que la tragedia ocurrió a las 17:30 horas, 00:30 de Greenwich; en torno a ese tiempo, las descargas eléctricas se encontraban entre 10.4 kA y -70.5 kA, la hora oficial del deceso coincide con 9.7 kA.

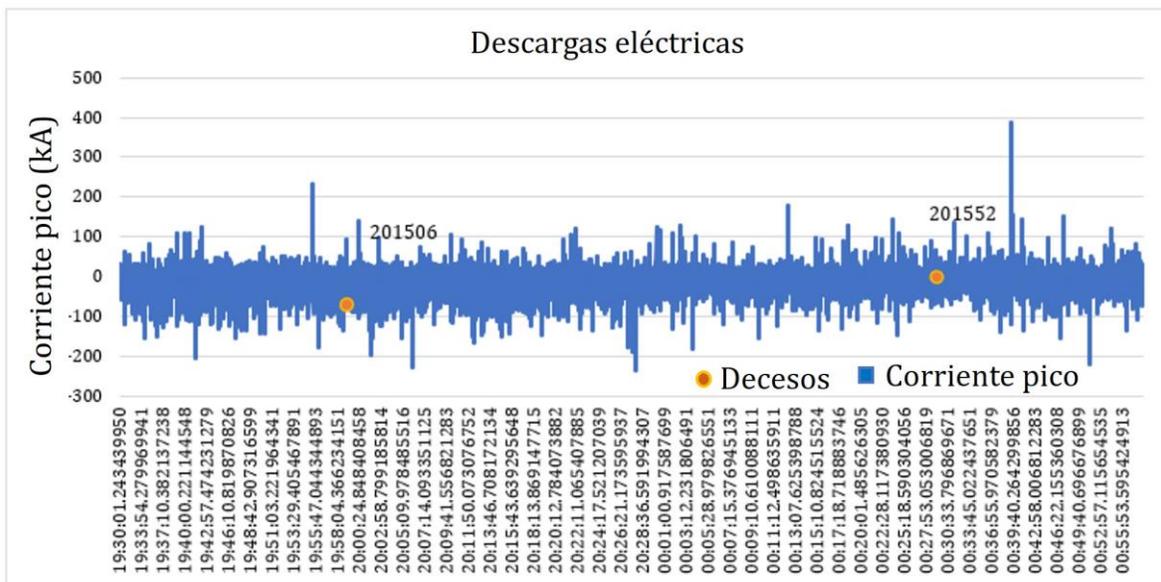


Figura B6. Descargas eléctricas en horas próximas a los decesos.

El evento identificado con la clave 201575 tuvo lugar el 18 de julio de 2015 con hora oficial de muerte a las 17:15 h (local) y la red GLD360 registró a las 00:15 h (Greenwich) una descarga de 7.9 kA.

Es relevante señalar que, si la muerte hubiese sucedido exactamente a la hora reportada, situación que se debe considerar, estas lecturas indicarían que 1 segundo previo al deceso ocurrió un cambio de intensidad y polaridad en la descarga eléctrica de -181.8 kA. A continuación, se presentan las descargas eléctricas en horas y minutos cercanos al deceso (Figuras B7 y B8).

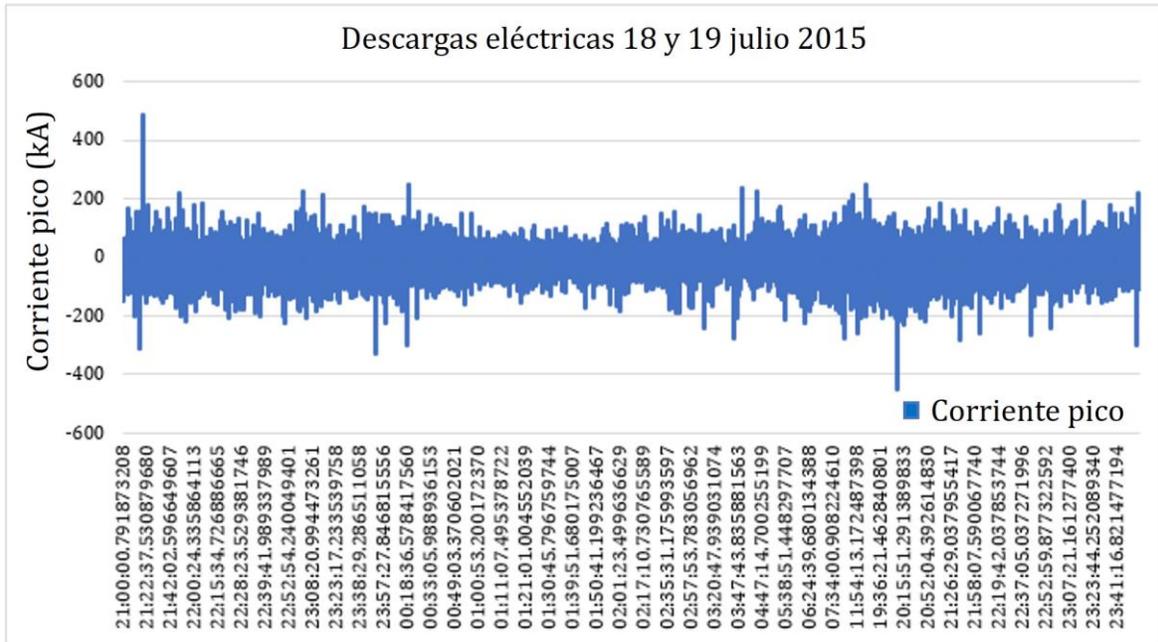


Figura B7. Descargas eléctricas del 18 y 19 de julio del 2015.

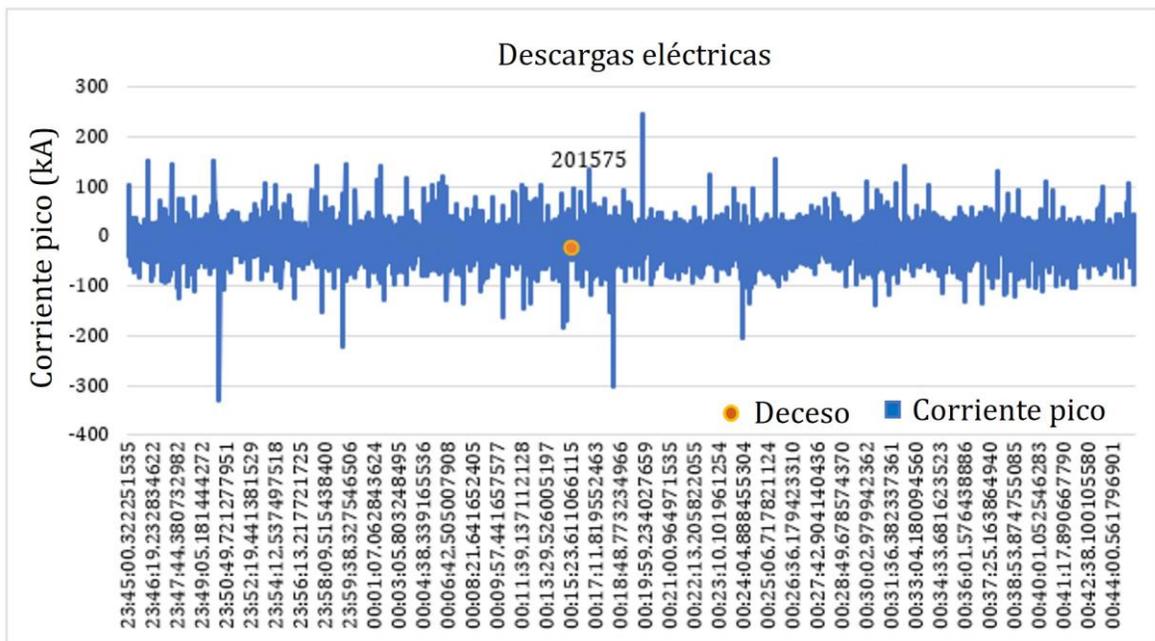


Figura B8. Descargas eléctricas en horas próximas al deceso 201575.

En la Figura B9 se observan las descargas eléctricas del 23 de julio para el caso 201577.

El deceso 201577 ocurrió el 23 de julio a las 16:00 hora local, y la GLD360 recibió una señal de -107 kA a las 23:00 h Greenwich. En la Figura B10 se observa un registro con una marcada tendencia hacia los negativos; justo instantes previos de la hora oficial del deceso, el pico más intenso fue de -190.2 kA.

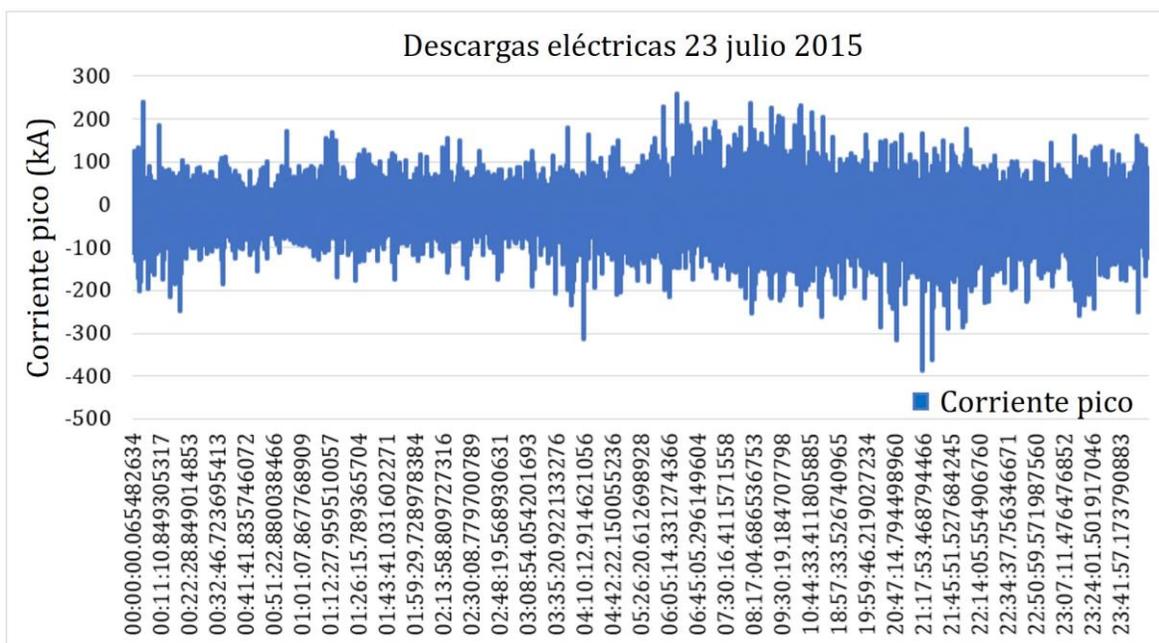


Figura B9. Descargas eléctricas del día 23 de julio del 2015.

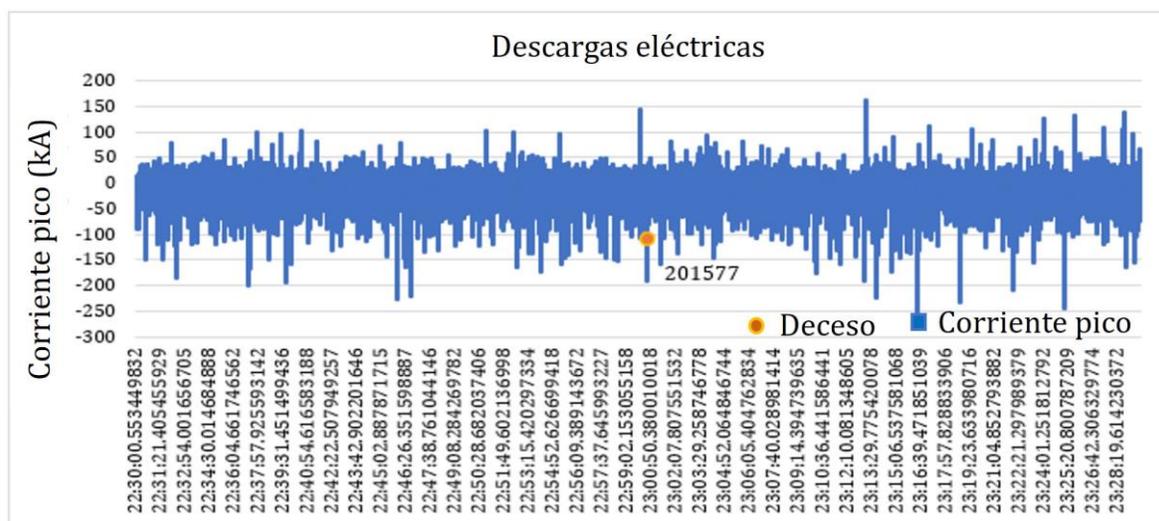


Figura B10. Descargas eléctricas en horas próximas al deceso 201577.

En el mes de septiembre se clasificaron 3 decesos por caída de rayo, el 14, 15 y 18; el promedio de las descargas eléctricas indica una tendencia creciente con altibajos pronunciados (Figura B11).

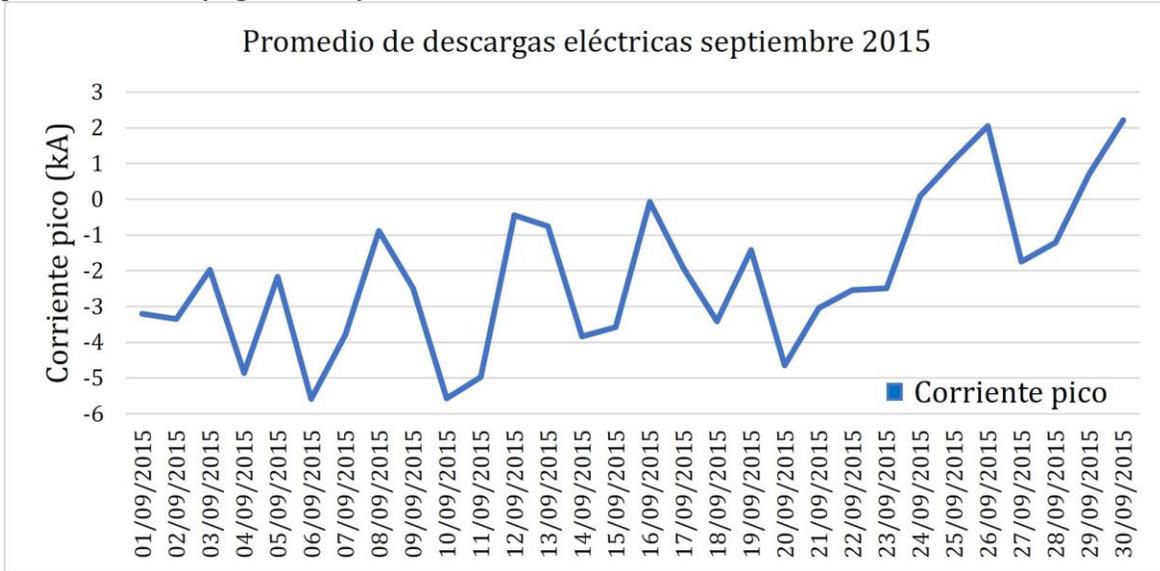


Figura B11. Promedio de descargas eléctricas del mes de septiembre de 2015.

El 14 de septiembre se registró el caso 201578, en la Figura A12 se muestran comportamientos de lecturas eléctricas entre -200 y 200 kA, con algunos picos que rebasan los -280 y 240 kA.

El deceso 201578 sucedió a las 17 horas (local), 00:00 Greenwich, y la lectura registrada a ese horario fue de -3.3 kA, mientras que 15 minutos antes las descargas emitieron un pico de -230.2 kA y 13 minutos después de medianoche -212.9 kA (Figura B13).

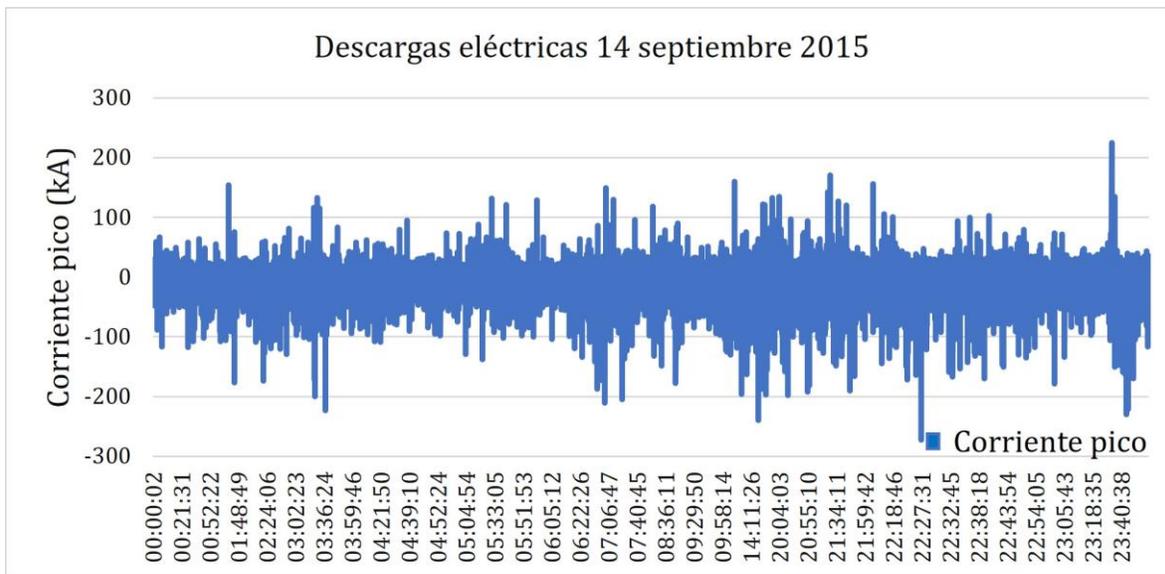


Figura B12. Descargas eléctricas del día 14 de septiembre del 2015.

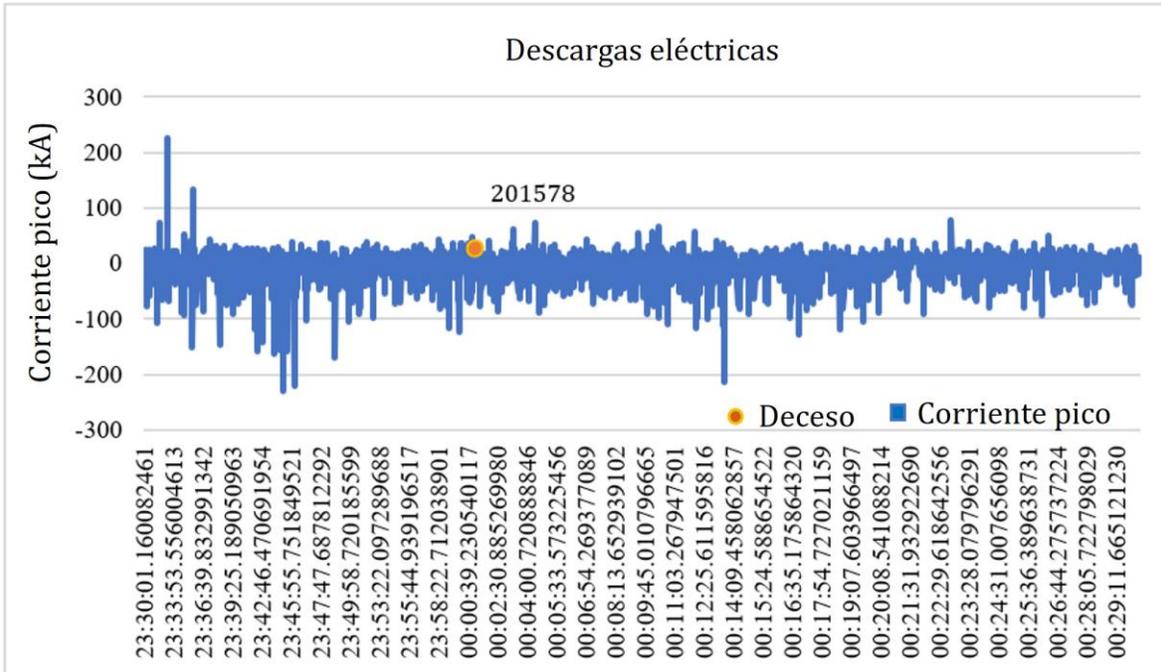


Figura B13. Descargas eléctricas en horas próximas al deceso 201578.

El evento 201576 sucedió el día 15 de septiembre a las 17 horas tiempo local y 00:00 hora Greenwich (Figura B14); según las descargas eléctricas presentes, 13 minutos antes del deceso se presentó un pico fuera del comportamiento habitual de las descargas eléctricas registradas -298.3 kA, mientras que la identificada a la hora oficial de muerte fue de 3 kA (Figura B15).

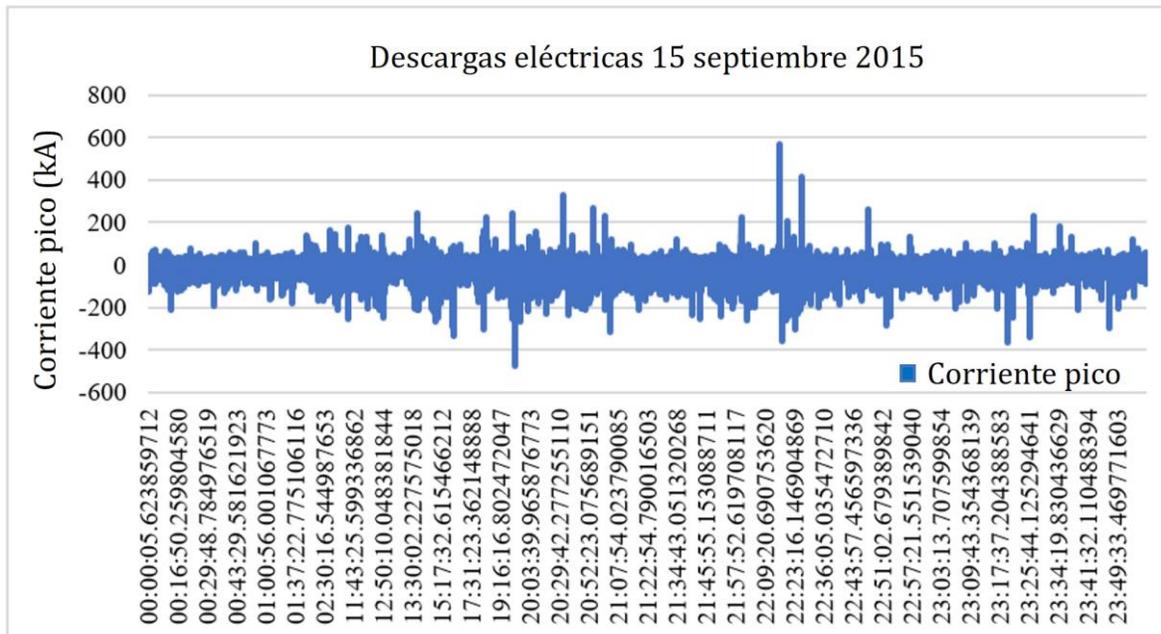


Figura B14. Descargas eléctricas del día 15 de septiembre del 2015.

Si se amplía aún más la línea temporal, el comportamiento de las descargas eléctricas entre las 23:30 h (15 septiembre 2015) y 00:30 h (16 septiembre 2015) es relativamente constante; pero si se enfoca justo 13 minutos antes y 9 minutos después de la hora oficial de muerte, se registraron los picos mayores de -298.3 y -330.8 kA, respectivamente (Figura B15).

En la misma Figura, se denota un incremento de actividad eléctrica con 4 cambios mucho más violentos en valores en minutos cercanos a la hora oficial del deceso (Figura B15).

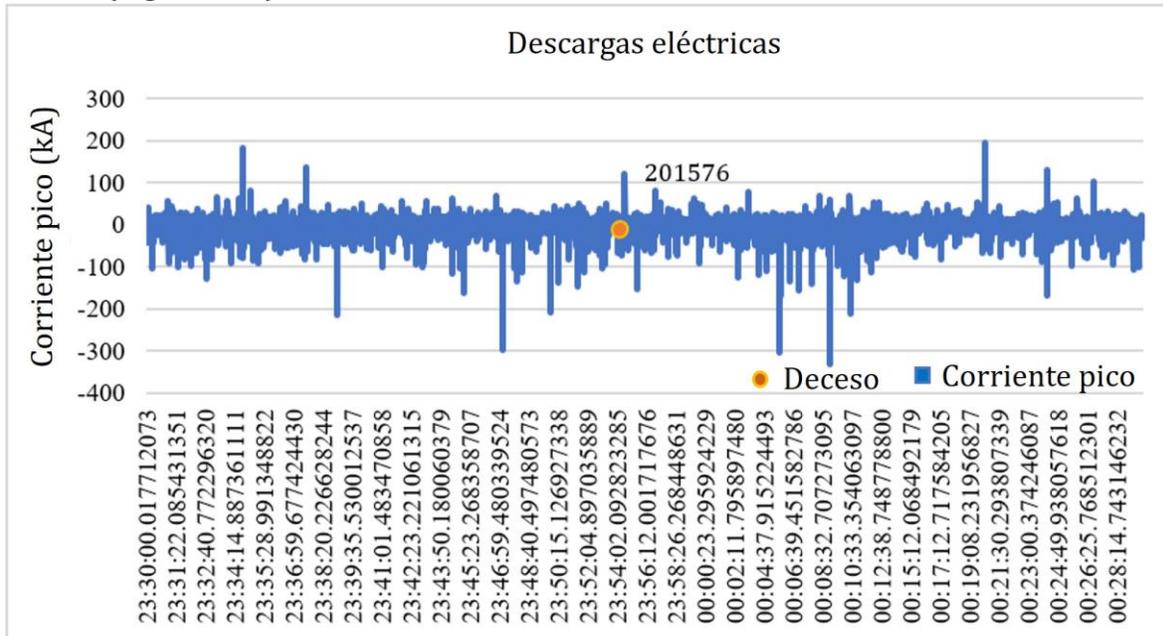


Figura B15. Descargas eléctricas en horas próximas al deceso 201576.

El día 18 de septiembre del 2015 se presentó un moderado aumento de actividad eléctrica entre las 7 y 8:30 horas y 10 y 12 horas, con algunos repuntes (Figura B16).

En el caso 201579, el deceso ocurrió a las 18 h tiempo local (1:00 am hora Greenwich, que sería 19 septiembre local), cuando el registro GLD360 recibió el dato de -17.1 kA (Figura B17).

Nótese que 12 minutos después del evento existen varios saltos en valor de polaridad negativa, lo que indica inició de un ciclo de actividad importante (Figura B17).

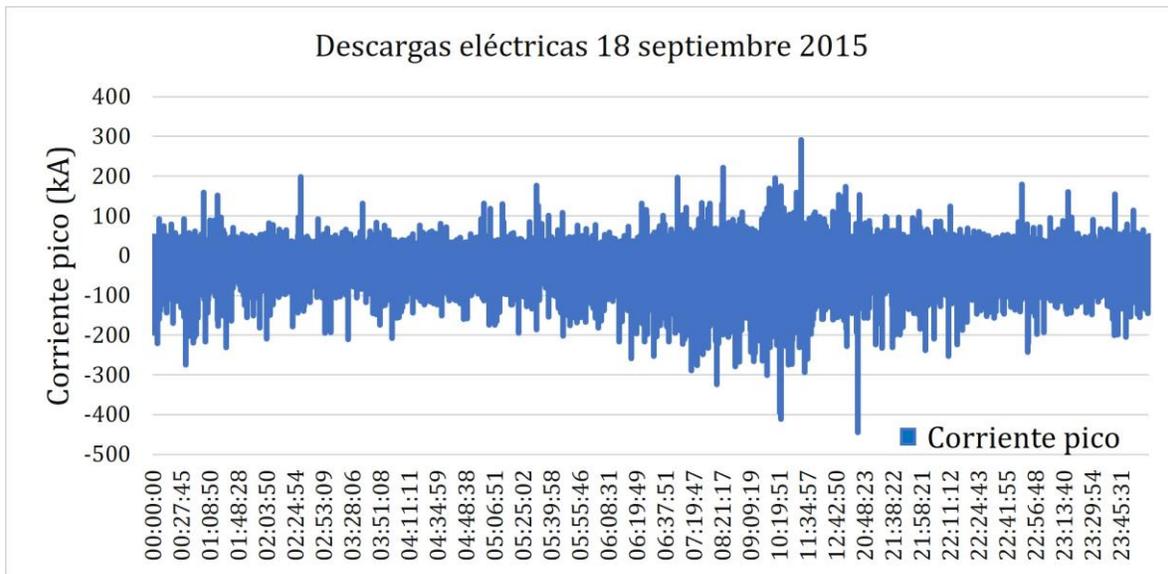


Figura B16. Descargas eléctricas del día 18 de septiembre del 2015.

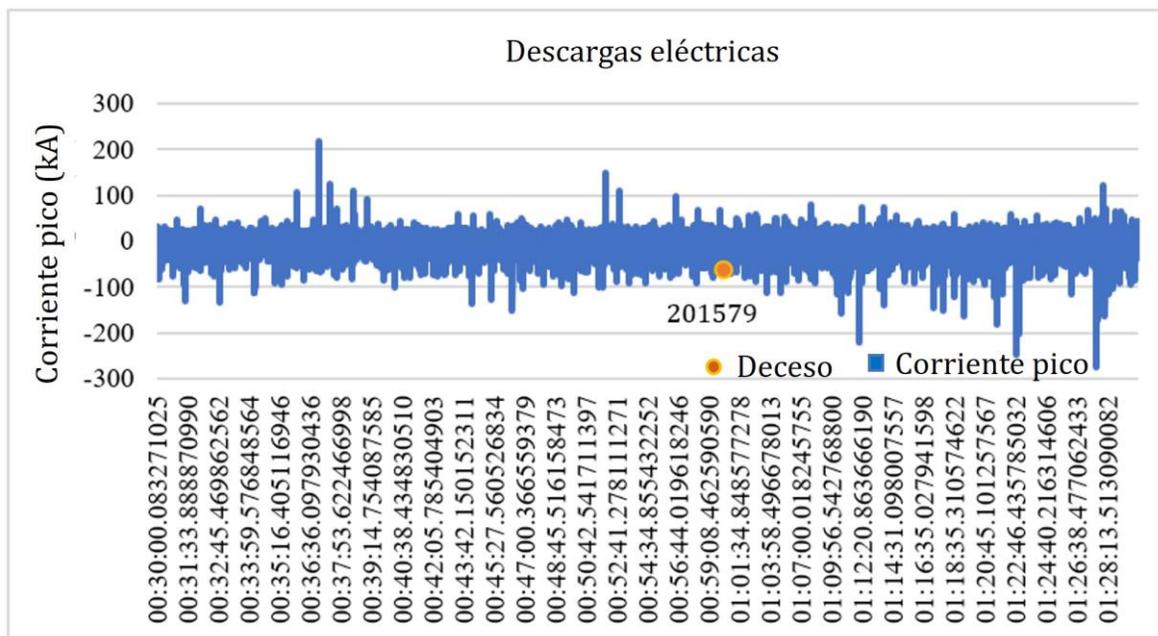


Figura B17. Descargas eléctricas en horas próximas al deceso 201579.

El mes de octubre del 2015 mostró una tendencia de intensificación decreciente en las corrientes pico registradas, con un cambio a polaridad positiva ascendente entre los días 12 y 16 (Figura B18).

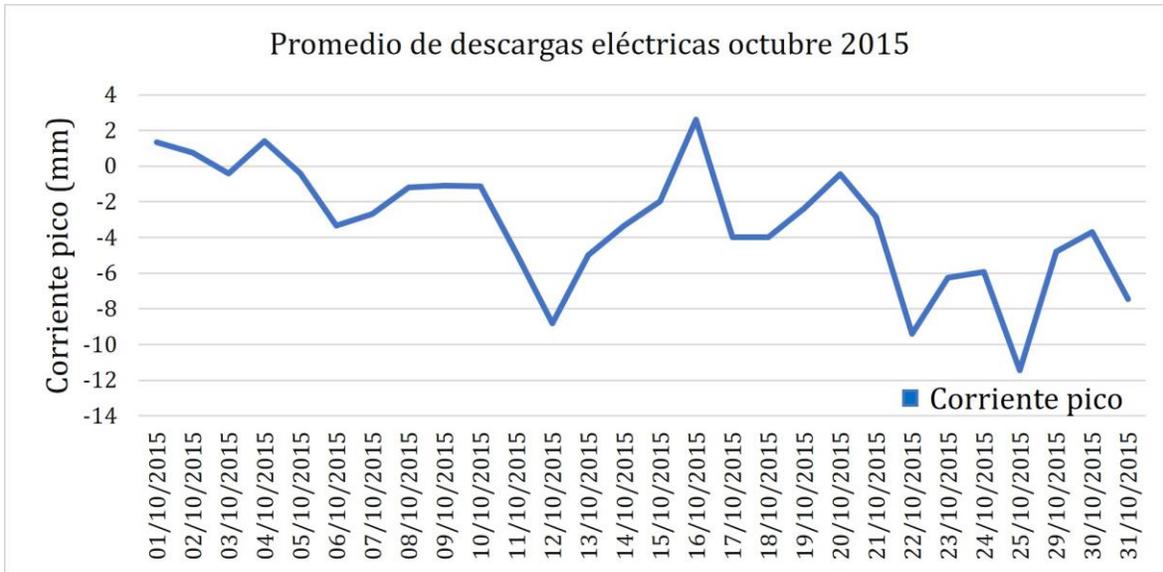


Figura B18. Promedio de descargas eléctricas del mes de octubre de 2015.

En cuanto al deceso 201510, ocurrió el día 03 de octubre, y respecto a su actividad eléctrica se puede mencionar que se presentó una moderada cantidad de repuntes y cambios de polaridad, principalmente entre las 16:20 y cerca de medianoche tiempo de Greenwich (Figura B19).

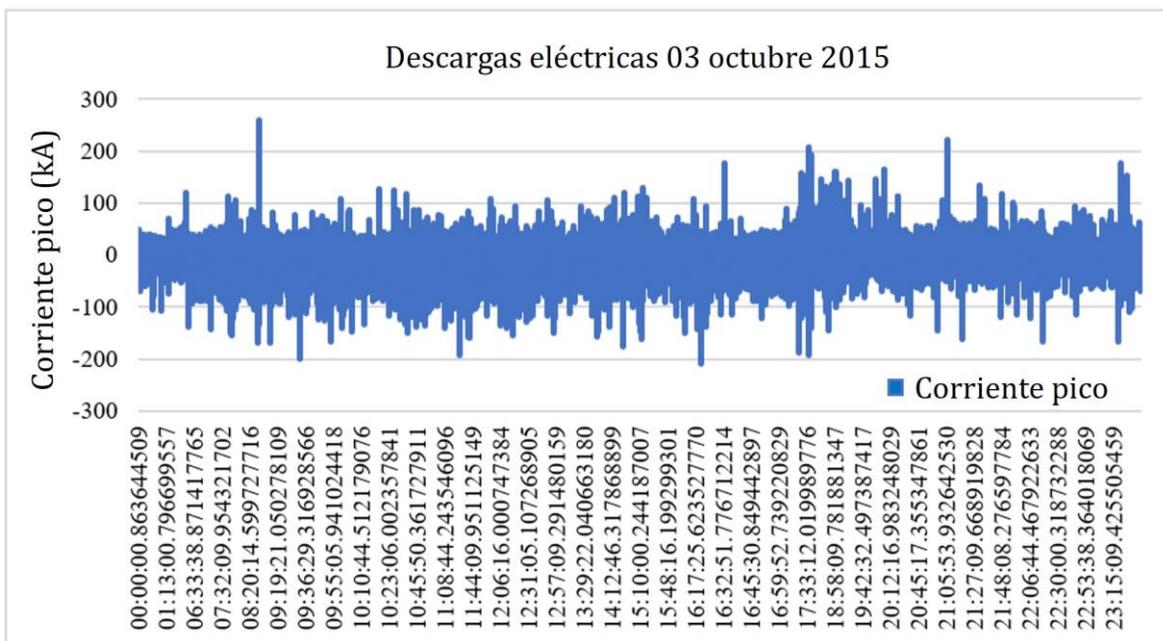


Figura B19. Descargas eléctricas del día 03 de octubre del 2015.

Si se observa con detenimiento en la hora a la que tuvo lugar el deceso 201510 (16 h tiempo local y 22:00 h tiempo Greenwich), las lecturas son constantes dentro de los -50 y 50 kA, con algunas que salen de este comportamiento; el valor máximo fue de -166.5 kA a las 22:17 hora Greenwich, 17 minutos después del evento (Figura B20).

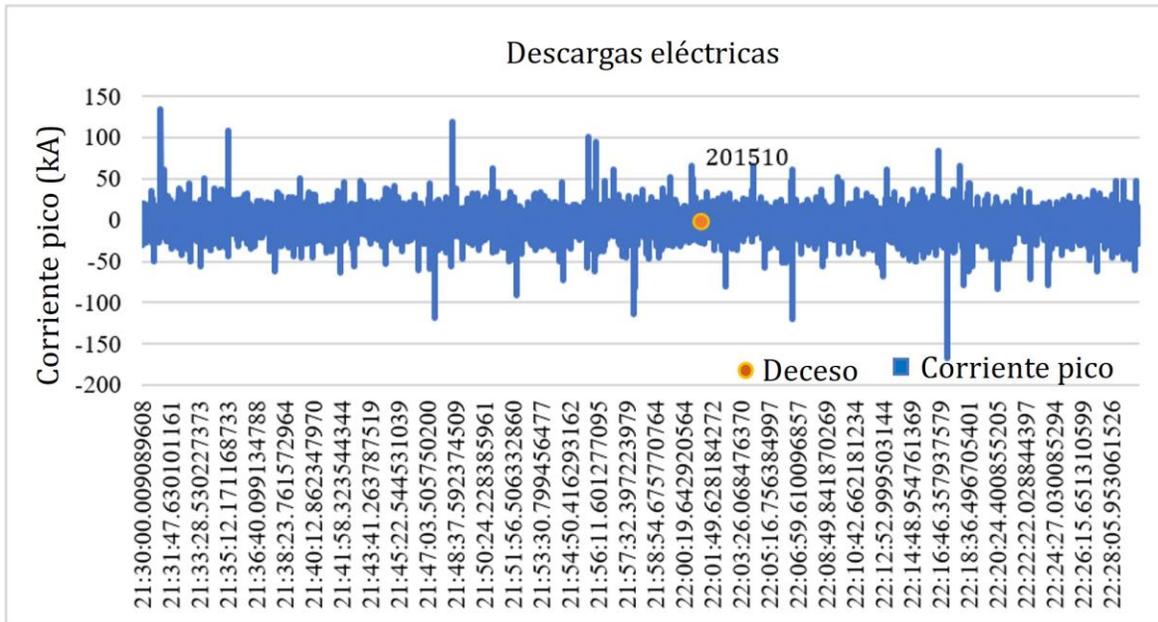


Figura B20. Descargas eléctricas en horas próximas al deceso 201510.

En lo que respecta al mes de noviembre del 2015, las descargas eléctricas emitidas se comportaron constantes con aislados aumentos de actividad en los días 13 y 14 (Figura B21).

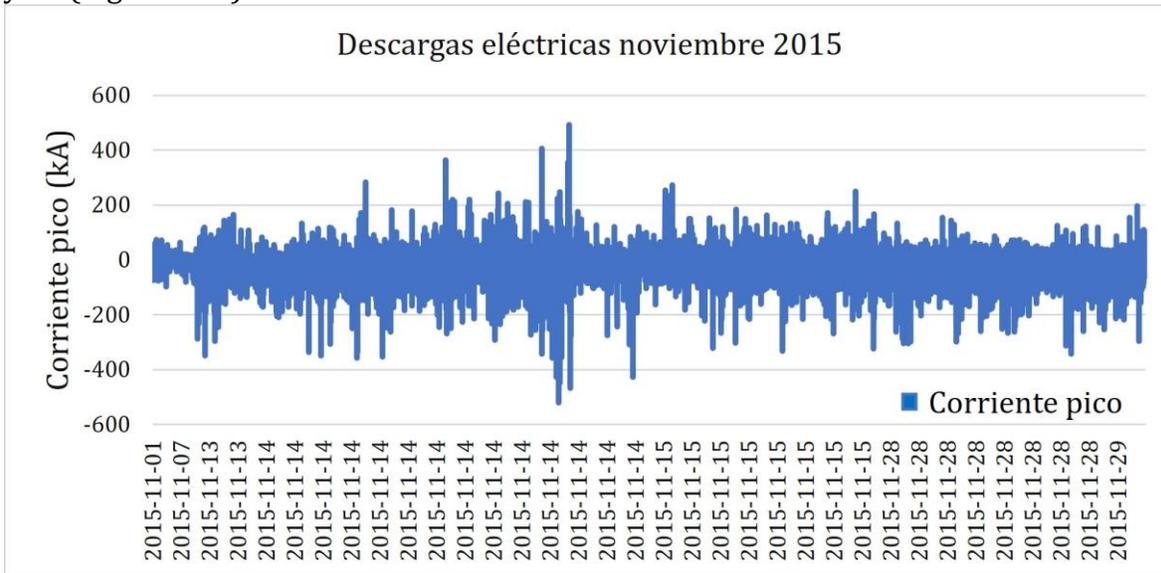


Figura B21. Descargas eléctricas del mes de noviembre de 2015.

Desafortunadamente, en el caso 201580 no se tiene registro de la hora del deceso y por esta razón, se tomó el promedio de las descargas del día 13, que fue de -21.86 kA y no es posible ubicarlo en la Figura B22. Lo que se puede mencionar del día en cuestión, es que entre las 17 y 21 horas se registraron al menos 5 repuntes negativos de actividad eléctrica, superiores a los -200 kA.

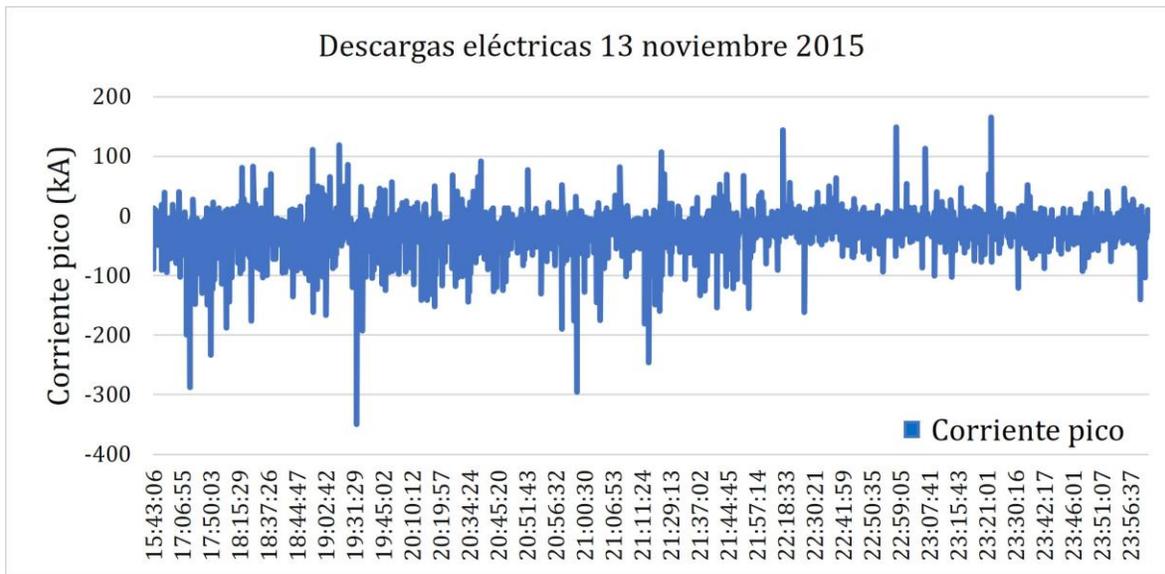


Figura B22. Descargas eléctricas del día 13 de noviembre del 2015.

Por otro lado, durante en el mes de diciembre las descargas eléctricas se mantuvieron en relativa pasividad, a excepción de los días 05, 09 y 12 (Figura B23).

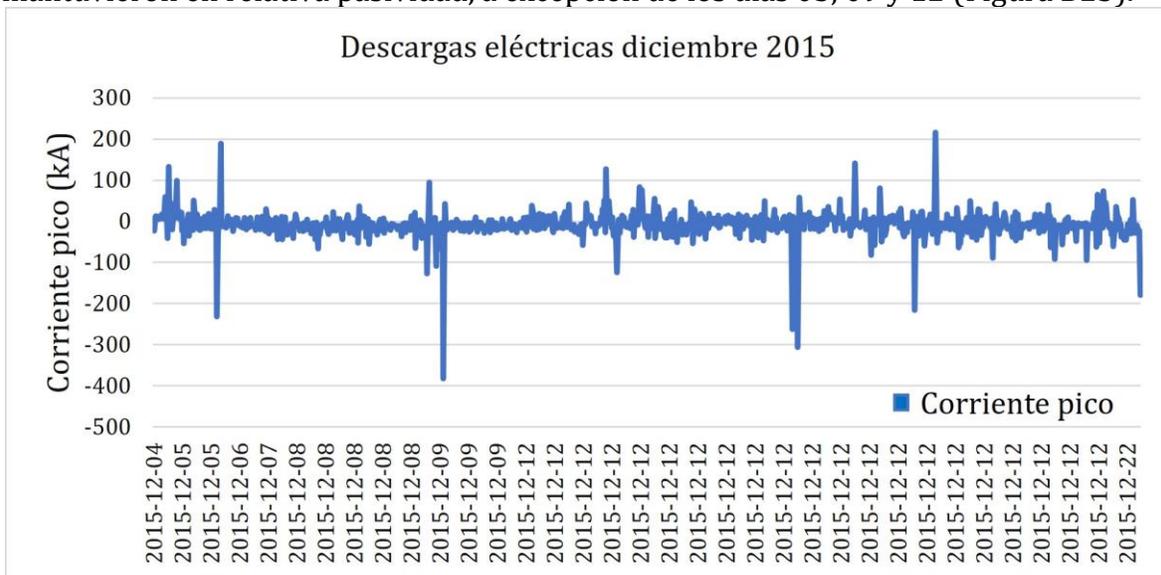


Figura B23. Descargas eléctricas del mes de diciembre de 2015.

Específicamente en el caso 201553, se identifica el deceso a las 12 h; sin embargo, no hay registros de descargas eléctricas en ese horario. El registro anterior fue el 13 de diciembre a las 00:14:56 h con -4.2 kA y el siguiente inmediato fue el 22 de diciembre con -7 kA a las 17:30:21 h, de tal manera que la corriente pico no pudo determinarse por la pérdida de aproximadamente 10 días de datos.

A manera de ejemplo, se muestra el comportamiento de las descargas eléctricas próximas a la ocurrencia del deceso 201553 (Figura B24); seguido, se despliega una Tabla con los valores de la corriente pico para cada uno de los decesos ocurridos en el

año 2015; los 40 casos del resto del periodo en estudio se ubicarán en este apartado en las siguientes etapas del procesado.

Las cantidades de corriente pico en negritas se refieren al promedio calculado en kA de descargas eléctricas registradas durante el día. Además, cuando existe una pérdida considerable de datos se presentan las siglas NE (No Especificado).

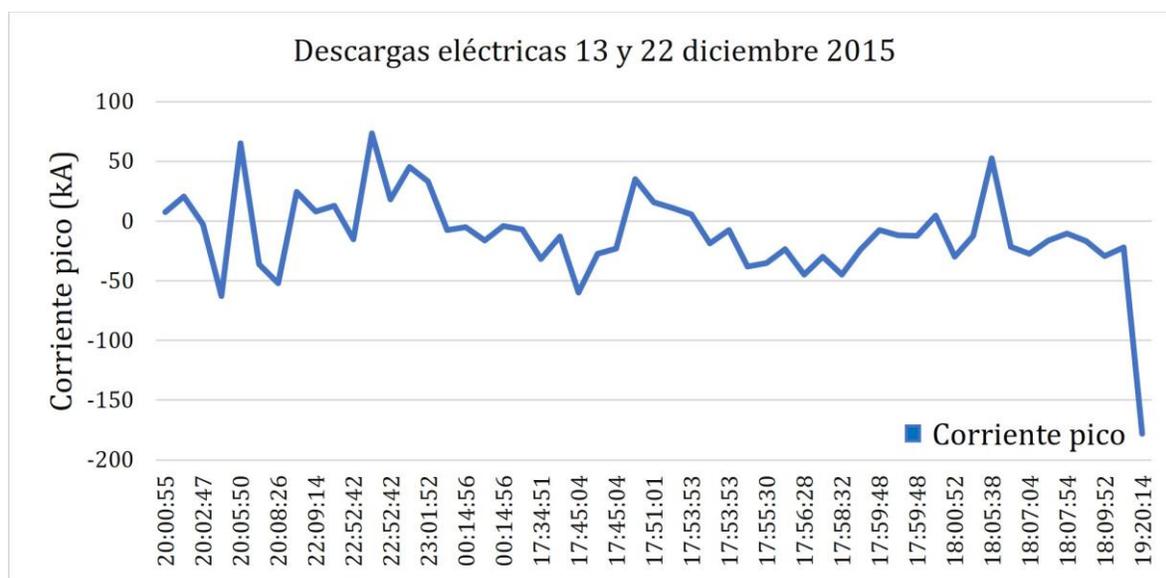


Figura B24. Descargas eléctricas de los días 13 y 22 de diciembre del 2015.

Tabla B1. Descargas eléctricas en los decesos del 2015 - 2019.

Deceso	Entidad	Municipio	Fecha	Causa-defunción	Hora_D	C. Pico (kA)
201506	Chihuahua	Guachochi	06/07/2015	Víctima de rayo en granja	13:00	-13.00
201509	Durango	Pánuco de Coronado	22/05/2015	Víctima de rayo en calles y carreteras	13:15	7.40
201510	Durango	Mezquital	03/10/2015	Víctima de rayo en lugar no especificado	16:00	2.50
201552	Nayarit	Huajicori	06/07/2015	Víctima de rayo en granja	17:30	9.70
201553	Nayarit	Ruíz	22/12/2015	Víctima de rayo en lugar no especificado	12:00	-20.64
201575	Sinaloa	El Fuerte	18/07/2015	Víctima de rayo en otro lugar especificado	17:15	7.90
201576	Sinaloa	Ahome	15/09/2015	Víctima de rayo en otro lugar especificado	17:00	3.00
201577	Sinaloa	Badiraguato	23/07/2015	Víctima de rayo en otro lugar especificado	16:00	-
201578	Sinaloa	Badiraguato	14/09/2015	Víctima de rayo en otro lugar especificado	17:00	-3.30
201579	Sinaloa	Sinaloa	18/09/2015	Víctima de rayo en granja	18:00	-17.10
201580	Sonora	Cajeme	13/11/2015	Víctima de rayo en otro lugar especificado	NE	-21.86

201609	Chihuahua	Janos	27/08/2016	Víctima de rayo en calles y carreteras	16:00	5.40
201610	Chihuahua	Janos	27/08/2016	Víctima de rayo en calles y carreteras	15:30	5.10
201611	Chihuahua	Guerrero	26/06/2016	Víctima de rayo en vivienda	14:00	41.50
201612	Coahuila de Zaragoza	Torreón	21/08/2016	Víctima de rayo en calles y carreteras	15:30	-39.20
201613	Durango	San Dimas	14/06/2016	Víctima de rayo en calles y carreteras	18:00	-21.60
201614	Durango	San Dimas	14/06/2016	Víctima de rayo en calles y carreteras	18:00	-21.60
201634	Jalisco	Mezquitic	13/06/2016	Víctima de rayo en otro lugar especificado	18:00	4.80
201668	Nayarit	Acaponeta	21/07/2016	Víctima de rayo en áreas de deporte y atletismo	23:30	8.10
201669	Nayarit	San Blas	18/09/2016	Víctima de rayo en otro lugar especificado	07:00	-30.60
201670	Nayarit	Rosamorada	17/09/2016	Víctima de rayo en granja	16:30	9.20
201671	Nayarit	San Blas	18/09/2016	Víctima de rayo en otro lugar especificado	00:00	5.60
201686	Sinaloa	Ahome	29/06/2016	Víctima de rayo en otro lugar especificado	12:30	4.00
201687	Sinaloa	Ahome	12/09/2016	Víctima de rayo en granja	00:00	15.90
201688	Sinaloa	Ahome	18/09/2016	Víctima de rayo en otro lugar especificado	00:00	5.60
201689	Sinaloa	Guasave	14/08/2016	Víctima de rayo en calles y carreteras	00:00	13.40
201690	Sinaloa	Mazatlán	22/07/2016	Víctima de rayo en otro lugar especificado	00:00	9.60
201691	Sonora	Hermosillo	18/08/2016	Víctima de rayo en calles y carreteras	20:00	-38.40
201695	Zacatecas	Fresnillo	07/07/2016	Víctima de rayo en granja	NE	-12.34
201705	Durango	Durango	09/03/2017	Víctima de rayo en granja	17:00	-15.80
201706	Durango	Mezquital	29/10/2016	Víctima de rayo en lugar no especificado	15:00	-2.60
201730	Nayarit	Del Nayar	25/08/2017	Víctima de rayo en granja	19:30	11.00
201739	Sinaloa	El Fuerte	25/08/2017	Víctima de rayo en granja	18:35	-8.20
201740	Sinaloa	Guasave	13/08/2017	Víctima de rayo en granja	13:30	-9.60
201746	Zacatecas	Sain Alto	19/09/2017	Víctima de rayo en áreas de deporte y atletismo	18:30	12.30
201804	Chihuahua	Janos	05/09/2018	Víctima de rayo en calles y carreteras	19:00	-12.50
201805	Chihuahua	Bocoyna	18/08/2018	Víctima de rayo en otro lugar especificado	18:00	15.50
201806	Chihuahua	Guazapares	22/08/2018	Víctima de rayo en calles y carreteras	18:20	5.10

201808	Durango	Canatlán	22/06/2018	Víctima de rayo en granja	22:00	-6.80
201809	Durango	Mezquital	02/08/2017	Víctima de rayo en lugar no especificado	17:00	20.20
201859	Sinaloa	Mazatlán	12/06/2018	Víctima de rayo en otro lugar especificado	20:00	8.00
201860	Sinaloa	Ahome	17/07/2018	Víctima de rayo en otro lugar especificado	00:00	-5.50
201861	Sonora	Bácum	25/08/2018	Víctima de rayo en granja	NE	-6.50
201862	Sonora	Bácum	28/08/2018	Víctima de rayo en calles y carreteras	NE	-5.84
201903	Chihuahua	Carichí	19/09/2019	Víctima de rayo en granja	15:00	41.80
201904	Chihuahua	Namiquipa	01/08/2019	Víctima de rayo en granja	15:00	-12.00
201907	Durango	Súchil	18/09/2019	Víctima de rayo en granja	16:00	-13.50
201908	Durango	Canatlán	11/09/2019	Víctima de rayo en granja	15:10	18.20
201938	Nayarit	Del Nayar	10/08/2019	Víctima de rayo en vivienda	20:00	-14.10
201940	Nayarit	Huajicori	21/08/2019	Víctima de rayo en vivienda	00:00	4.50

Deceso, clave rayos; Hora-D, hora de defunción; C. Pico, corriente pico.

ANEXO C

Tabla C1. Distribución municipal, densidad de población y casos de decesos por caída de rayo en el área de estudio. Fuente: Modificado de CONABIO (2012) e IMSS (2020).

Deceso	Entidad	Municipio	Pob-total	Decesos	Área (km2)	Densidad-Pob (hab/km2)	Fecha	Localidad	Causa-defunción	Sexo
201668	Nayarit	Acaponeta	36,572	1	1,412.2500	21.9040	21/07/2016	Acaponeta	Víctima de rayo en áreas de deporte y atletismo	H
201576	Sinaloa	Ahome	416,299	5	3,958.6400	84.4279	15/09/2015	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201686	Sinaloa	Ahome					29/06/2016	Higuera de Zaragoza	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201687	Sinaloa	Ahome					12/09/2016	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201688	Sinaloa	Ahome					18/09/2016	Los Mochis	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201860	Sinaloa	Ahome					17/07/2018	Alfonso G. Calderón (Poblado Siete)	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201861	Sonora	Bácum	22,821	2	1,574.5900	11.3062	25/08/2018	San José de Bácum	Víctima de rayo en granja	H
201862	Sonora	Bácum					28/08/2018	San José de Bácum	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201577	Sinaloa	Badiraguato	29,999	2	4,789.9700	5.0517	23/07/2015	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201578	Sinaloa	Badiraguato					14/09/2015	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H

201805	Chihuahua	Bocoyna	28,766	1	2,691.5300	8.3291	18/08/2018	Creel	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201580	Sonora	Cajeme	409,310	1	4,850.2200	65.7819	13/11/2015	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201808	Durango	Canatlán	31,401	2	3,455.0100	7.4532	22/06/2018	Canatlán Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201908	Durango	Canatlán					11/09/2019		Víctima de rayo en granja	H
201903	Chihuahua	Carichí	8,795	1	2,576.8700	2.6598	19/09/2019	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	M
201730	Nayarit	Del Nayar	34,300	2	5,089.7700	9.7575	25/08/2017	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201938	Nayarit	Del Nayar					10/08/2019	Linda Vista	Víctima de rayo en vivienda	M
201705	Durango	Durango	582,267	1	9,185.1000	52.4148	09/03/2017	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201575	Sinaloa	El Fuerte	97,536	2	4,133.8000	18.8379	18/07/2015	Adolfo López Mateos (Jahuara Segundo)	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201739	Sinaloa	El Fuerte					25/08/2017	Adolfo López Mateos (Jahuara Segundo)	Víctima de rayo en granja	H
201695	Zacatecas	Fresnillo	213,139	1	5,037.3100	127.1072	07/07/2016	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201506	Chihuahua	Guachochi	49,689	1	6,924.1800	5.6503	06/07/2015	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201689	Sinaloa	Guasave	285,912	2	2,909.7600	79.3268	14/08/2016	León Fonseca (Estación Verdura)	Víctima de rayo en calles y carreteras	H

201740	Sinaloa	Guasave					13/08/2017	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201806	Chihuahua	Guazapares	8,998	1	1,811.2800	3.8969	22/08/2018	Témoris	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201611	Chihuahua	Guerrero	39,626	1	5,708.3800	5.3610	26/06/2016	Tomochi	Víctima de rayo en vivienda	M
201691	Sonora	Hermosillo	784,342	1	15,698.3000	35.4251	18/08/2016	Hermosillo	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201552	Nayarit	Huajicori	11,400	2	2,213.5000	4.3351	06/07/2015	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201940	Nayarit	Huajicori					21/08/2019	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en vivienda	M
201609	Chihuahua	Janos	10,953	3	7,455.1200	3.3997	27/08/2016	Janos	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201610	Chihuahua	Janos					27/08/2016	Janos	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201804	Chihuahua	Janos					05/09/2018	Janos	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201690	Sinaloa	Mazatlán	438,434	2	2,503.9200	145.8133	22/07/2016	Mazatlán	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201859	Sinaloa	Mazatlán					12/06/2018	Mazatlán	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201510	Durango	Mezquital	33,396	3	8,283.4200	3.3827	03/10/2015	San Pedro de Xícora	Víctima de rayo en lugar no especificado	H

201706	Durango	Mezquital					29/10/2016	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en lugar no especificado	H
201809	Durango	Mezquital					02/08/2017	La Guajolota	Víctima de rayo en lugar no especificado	H
201634	Jalisco	Mezquitic	18,084	1	3,328.8200	187.6392	13/06/2016	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201904	Chihuahua	Namiquipa	22,880	1	4,856.3800	7.1785	01/08/2019	Namiquipa	Víctima de rayo en granja	H
201509	Durango	Pánuco de Coronado	11,927	1	1,015.3200	9.6357	22/05/2015	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201670	Nayarit	Rosamorada	34,393	1	1,821.7700	16.0517	17/09/2016	Rosamorada	Víctima de rayo en granja	H
201553	Nayarit	Ruíz	23,469	1	515.3160	38.7961	22/12/2015	Ruíz	Víctima de rayo en lugar no especificado	M
201746	Zacatecas	Sain Alto	21,533	1	1,399.6100	12.7996	19/09/2017	Emiliano Zapata (San José)	Víctima de rayo en áreas de deporte y atletismo	H
201669	Nayarit	San Blas	43,120	3	858.7310	58.0852	18/09/2016	San Blas	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201671	Nayarit	San Blas					18/09/2016	San Blas	Víctima de rayo en otro lugar especificado	H
201939	Nayarit	San Blas					12/09/2019	Jalcocotán	Víctima de rayo en lugar no especificado	H
201613	Durango	San Dimas	19,691	2	5,424.5300	3.0025	14/06/2016	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en calles y carreteras	H

201614	Durango	San Dimas					14/06/2016	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en calles y carreteras	H
201579	Sinaloa	Sinaloa	88,282	1	6,268.2700	11.2944	18/09/2015	Genaro Estrada	Víctima de rayo en granja	H
201907	Durango	Súchil	6,761	1	1,452.3600	3.8803	18/09/2019	Cifra confidencial. Establecido en la Ley del SNIEG.	Víctima de rayo en granja	H
201612	Coahuila de Zaragoza	Torreón	639,629	1	1,269.8450	503.7063	21/08/2016	Torreón	Víctima de rayo en calles y carreteras	H

ANEXO D

Distribución espacial de corrientes pico GLD360 en correspondencia con los decesos por año; las descargas eléctricas se muestran solamente 30 minutos antes y 30 minutos después de la hora oficial de las muertes.

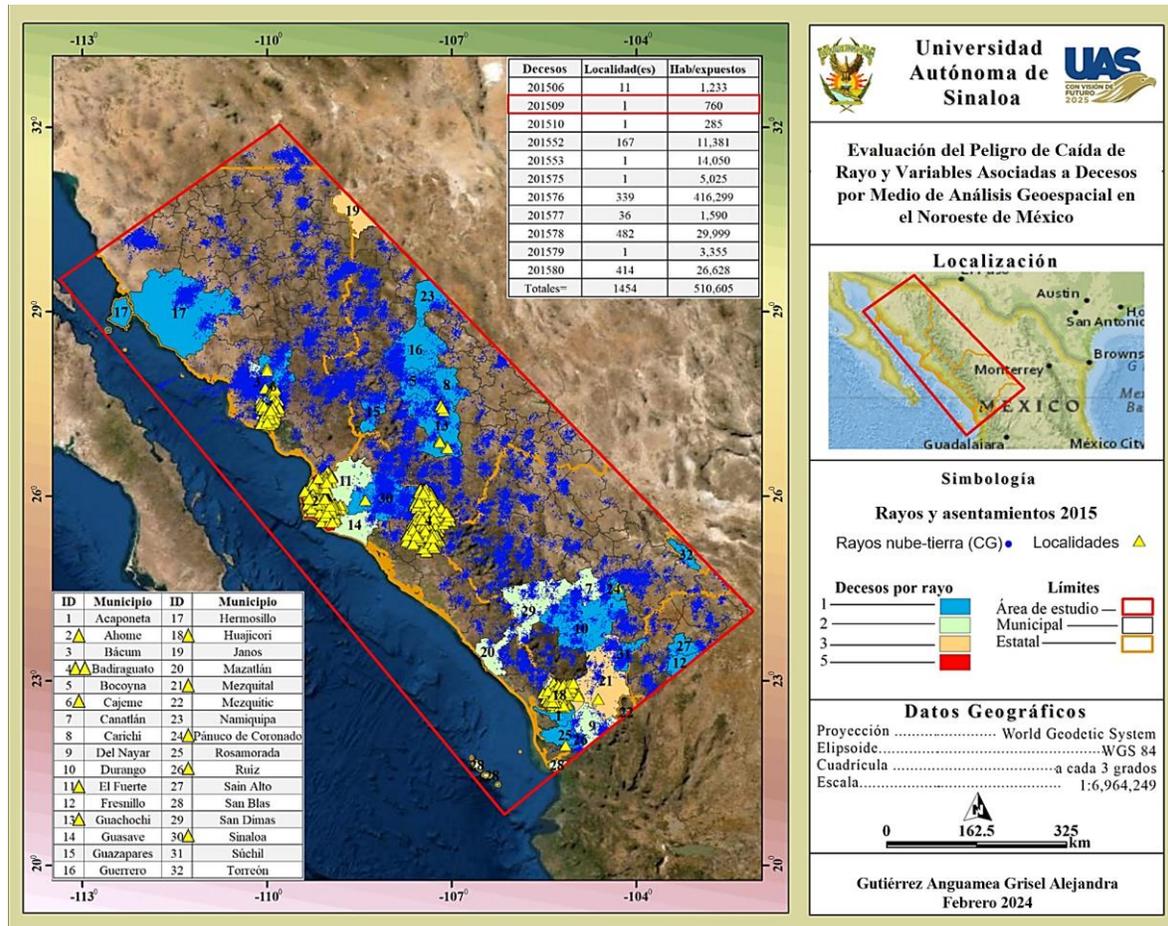


Figura D1. Rayos nube-tierra (CG) y asentamientos del año 2015.

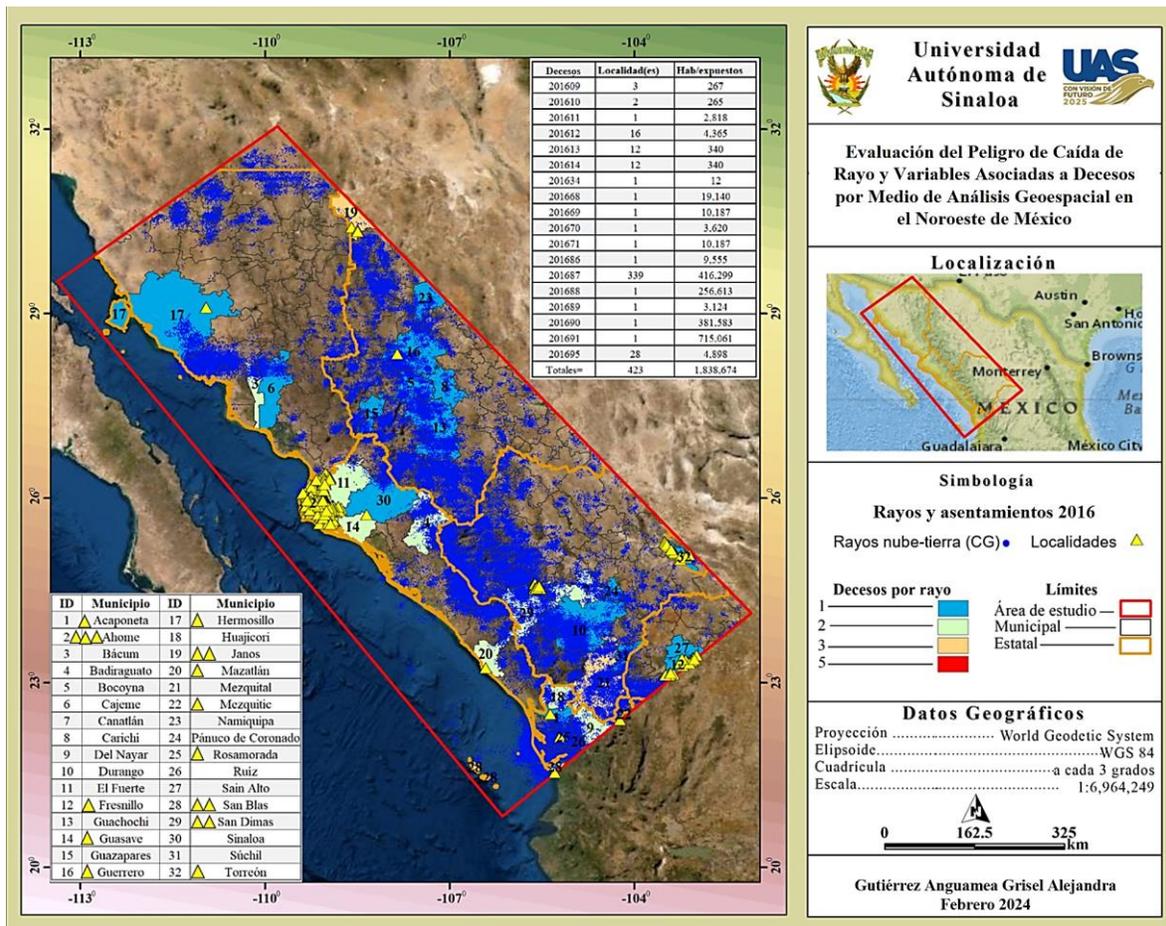


Figura D2. Rayos nube-tierra (CG) y asentamientos del año 2016.

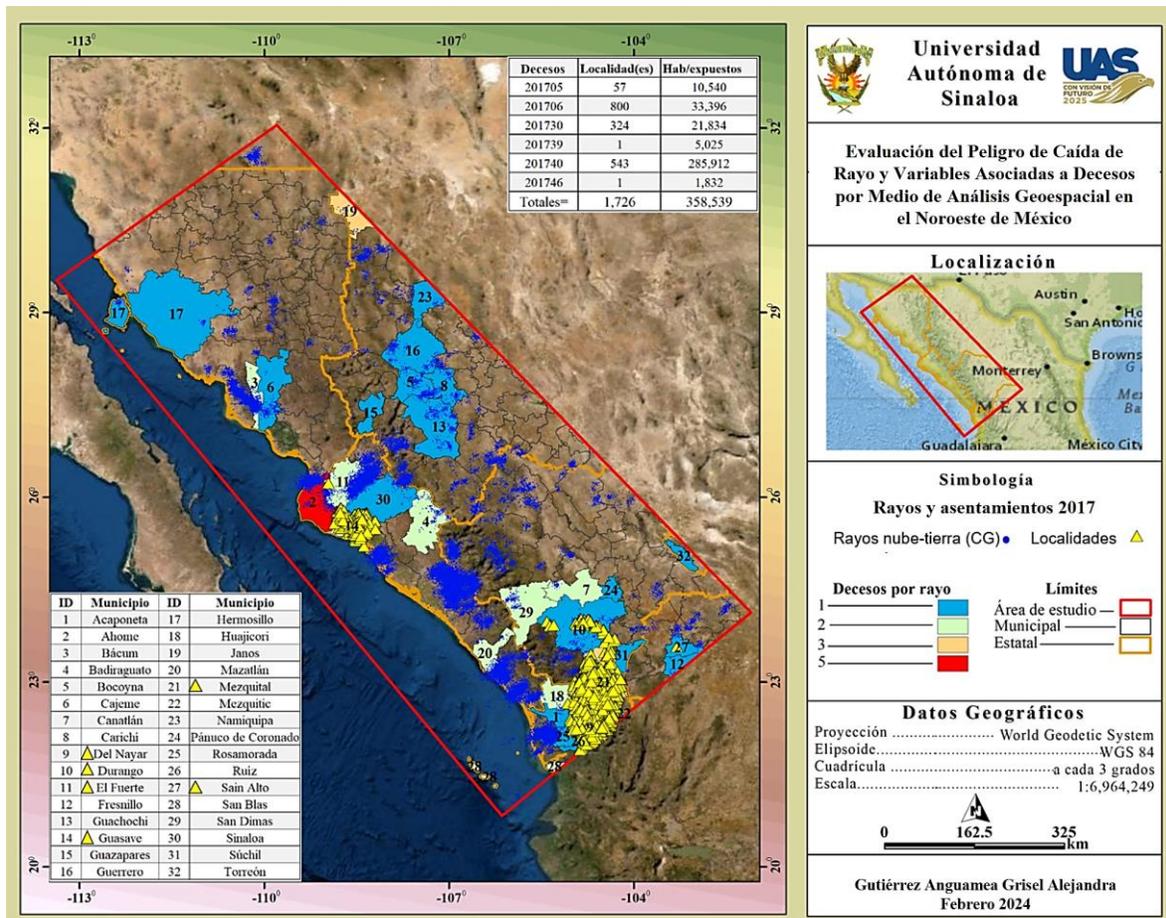


Figura D3. Rayos nube-tierra (CG) y asentamientos del año 2017.

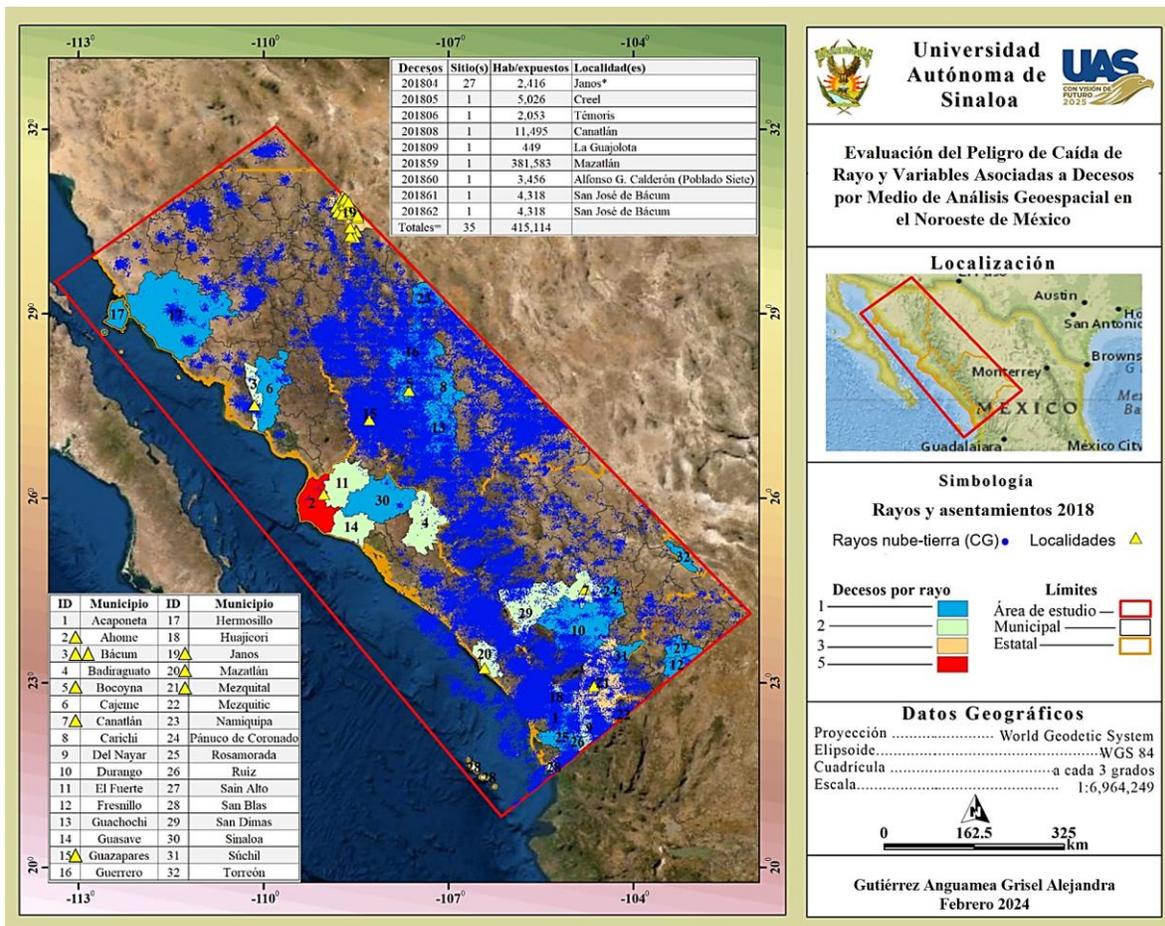


Figura D4. Rayos nube-tierra (CG) y asentamientos del año 2018.

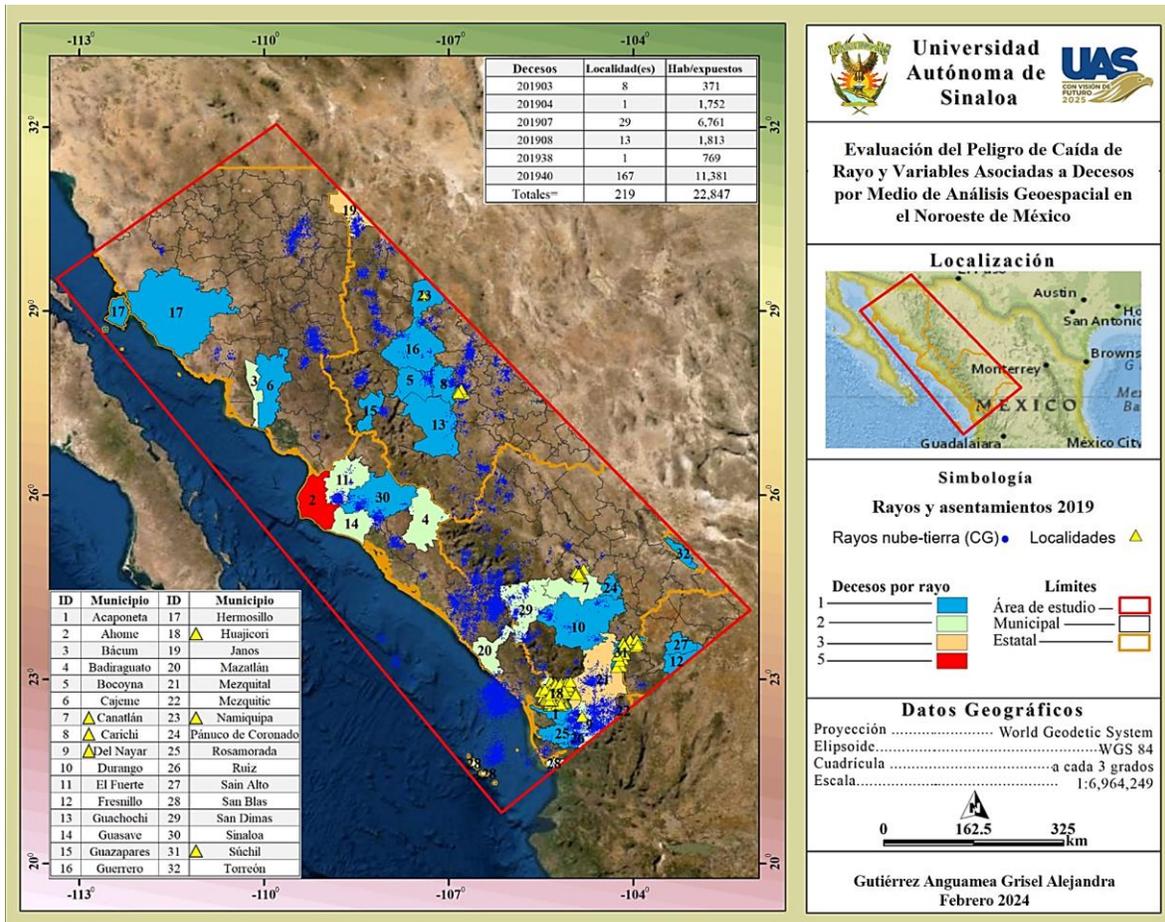


Figura D5. Rayos nube-tierra (CG) y asentamientos del año 2019.