



Revista EDUCATECONCIENCIA.  
Volumen 20, No. 21.  
E-ISSN: 2683-2836  
ISSN: 2007-6347  
Periodo: octubre - diciembre 2018  
Tepic, Nayarit. México  
Pp. 104 - 133  
Doi: <https://doi.org/10.58299/edu.v20i21.92>

Recibido: 12 de noviembre del 2018  
Aprobado: 04 de diciembre del 2018  
Publicado: 30 de diciembre del 2018

**Importancia estadística de la Densidad de Descargas Atmosféricas a tierra;  
Lógica Difusa en la Evaluación de riesgos de Impacto de rayo en el Valle de  
Matatipac**

**Statistical importance of Atmospheric Discharge Density to Earth, Fussy Logic to  
Lightning Impact Risk Assessment in the Matatipac Valley**

**Autor**

**Eduardo Enrique Castillo Anaya**  
Universidad De Baja California, México  
[eduardo@xtension.com.mx](mailto:eduardo@xtension.com.mx)

## **Importancia estadística de la Densidad de Descargas Atmosféricas a tierra; Lógica Difusa en la Evaluación de riesgos de Impacto de rayo en el Valle de Matatipac**

### **Statistical importance of Atmospheric Discharge Density to Earth, Fussy Logic to Lightning Impact Risk Assessment in the Matatipac Valley**

**Autor**

**Eduardo Enrique Castillo Anaya**  
Universidad De Baja California, México  
eduardo@xtension.com.mx

#### **Resumen**

La densidad de descargas atmosféricas a tierra es una variable importante y difícil de seleccionar al momento de determinar el riesgo por impacto de rayo. Se presenta la demostración experimental de la importancia estadística de éste parámetro empleando información histórica de cinco años, obtenidos del registro de un radar de detección local. Se validan y corroboran los resultados de los cálculos efectuados a través de un estudio comparativo contra datos oficiales. Los resultados fueron aceptables; los datos objetivos de la zona se convierten en herramientas para incrementar la fiabilidad de la evaluación y su interpretación en seguridad atmosférica; con base en evaluaciones de casos prácticos con valores de Frontera, incluyendo aspectos de lógica difusa en la determinación.

**Palabras clave:** Densidad de descargas atmosféricas, Rayos nube-tierra, Evaluación de riesgo, Estadísticas de descargas, Lógica Difusa

#### **Abstract**

The density of atmospheric discharges to earth is an important and difficult variable to select when determining the risk of lightning. Mixed research of the historical-logical method, whose objective is to demonstrate the statistical importance of this parameter; using historical information of five years, obtained from the registration of a local detection radar. The results of the calculations made through a comparative study against official data are validated and corroborated. The results were satisfactory; the objective data of the area become tools to increase the reliability of the evaluation and its interpretation in atmospheric safety; based on evaluations of practical cases with border values, including aspects of fuzzy logic in the determination.

**Keywords:** Density of atmospheric discharges, Cloud to ground lightning, Risk assessment, Discharge's Statistics, Fuzzy logic

## **Introducción**

El relámpago y el rayo han producido tanto respeto como temor a la humanidad desde tiempos inmemoriales, y como es evidente esto ha tenido un importante rol tanto en la mitología como en la religión hasta los tiempos modernos (Uman M. A., *The Lightning Discharge*, 1987).

Una Descarga atmosférica, popularmente conocida como rayo, es una poderosa descarga electrostática natural producida durante una tormenta eléctrica; generando un pulso electromagnético. La descarga eléctrica precipitada del rayo es acompañada por la emisión de luz (el relámpago), causada por el paso de corriente eléctrica que ioniza las moléculas de aire, y por el sonido del trueno, desarrollado por la onda de choque. La electricidad (corriente eléctrica) que pasa a través de la atmósfera calienta y expande rápidamente el aire, produciendo el ruido característico del rayo; es decir, el trueno. Los rayos se encuentran en Estado plasmático (Nicora, 2014).

Existen diversos tipos de descargas atmosféricas (Cooray, 2003), las cuales han sido resultado de diferentes clasificaciones cada vez con un mayor grado de completitud conforme se conoce más del fenómeno y se emplean modernos equipos para su identificación (Uman V. A., 2006).

De las diferentes clasificaciones existentes, las descargas atmosféricas que son de interés para este trabajo son los rayos Nube-Tierra (Cloud-to-Ground) (Grupo Protección contra Descargas Atmosféricas, 2016) ya sean de carga negativa o positiva. Los relámpagos generalmente son producidos por nubes cumulonimbos, cuyas bases suelen ser de 1 a 2 km (0,6 a 1,25 millas) sobre el suelo y que tienen una altura máxima de 15 km (9,3 millas).

Con los cambios climatológicos que se presentan a nivel mundial (Martínez & Fernández, 2004), las estadísticas son cambiantes año con año, por lo que datos con una antigüedad superior a los 5 años no representan la actualidad del comportamiento de descargas atmosféricas en la zona de interés (Sánchez, 1999).

El Valle de Matatipac se encuentra ubicado en el estado de Nayarit, perteneciente a la República Mexicana; lo conforma una parte del municipio de Tepic (Elevación: 922 m, Área: 1,619.287 km<sup>2</sup>) donde se encuentra la capital del estado y una parte del municipio de Xalisco (Elevación: 1,014 m, Área: 27,857 km<sup>2</sup>) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015), que abarca también la capital del municipio del mismo nombre.

En cualquier momento hay alrededor de 1,800 tormentas en curso en todo el mundo; aproximadamente 40,000 tormentas diarias; cada día caen en la Tierra más de 17 millones de rayos; que equivale a unos 200 rayos por segundo (Parra, 2013). Sin embargo, es importante aclarar que no todas las zonas geográficas resultan afectadas de manera uniforme. Hay dos parámetros que facilitan su clasificación (ANCE, 2005):

- La Densidad de descarga (nivel Ng) que define la cantidad de impactos por año y por km<sup>2</sup> en una región, y
- El Nivel keráunico o Ceráunico (nivel Nk) que define el número de días de tormenta por año. Estos 2 parámetros están vinculados por una relación aproximativa:
  - $Ng \approx Nk/10$

La norma mexicana NMX-J-549-ANCE-2005, define la valoración de riesgo (Evaluación de riesgo) como una medida empírica, la cual estima en forma razonable, la probabilidad de incidencia de un rayo directo sobre una estructura tomando en cuenta la complejidad del fenómeno del rayo (ANCE, 2005).

Con la finalidad de tratar de un modo sistemático el tipo de imprecisión que aparece cuando los límites o fronteras de datos no están claramente definidos, se propone el uso de herramientas de la lógica difusa. La lógica difusa es una disciplina matemática que utiliza expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas, es decir, es la lógica aplicada a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre dos extremos, la verdad absoluta o la falsedad Total (Morcillo, 2011).

En este trabajo, el objetivo se centra en averiguar experimentalmente la importancia estadística de la Densidad de Descargas Atmosféricas a tierra en la Evaluación de riesgos de Impacto de rayo en el Valle de Matatipac; calculándolo por medio de datos de información histórica de impactos de cinco años, obtenidos del registro de un radar local de detección de rayos y presentar una propuesta de mejora para esta valoración. El problema de investigación está dado por la delgada frontera que existe en los dos posibles resultados de la evaluación de riesgos de impacto, debido a que una mínima variación en la variable de densidad de descargas atmosféricas a tierra, puede dar como resultado el que no es necesario contar con un sistema de protección contra descargas atmosféricas y esa conclusión puede ser errónea debido a la variación mencionada, lo que representa un elevado riesgo de seguridad humana y patrimonial. El uso de las herramientas de lógica difusa, permite establecer una serie de conceptos para tratar de un modo sistemático el tipo de imprecisión que aparece cuando los límites de las resultantes no están claramente definidos; dado que hay una progresión gradual desde la pertenencia al conjunto hasta la no pertenencia.

El estudio es justificado con base en que México presenta un elevado nivel de mortandad debido a descargas atmosféricas. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), a nivel mundial, en los últimos años, México ha ocupado los primeros lugares en muerte por rayo, y en el 2012 se ubicó en el primer lugar con 234 muertes (Kucienska, 2012). Lo anterior reviste la importancia de contar con una adecuada herramienta para determinar el uso de sistemas de protección derivado de la evaluación de riesgos.

Como hilo conductor de la investigación, en aras de dar cumplimiento del objetivo propuesto y brindar solución al problema científico, se formulan las preguntas científicas siguientes:

- a) ¿Cuáles son los referentes teóricos metodológicos para determinar los valores de Densidad de descargas atmosféricas en el Valle de Matatipac?
- b) ¿Cuál es el estado actual referente a la información sobre Densidad de descargas atmosféricas en el Valle de Matatipac?

- c) ¿Cómo implementar una estrategia que evite la dualidad de resultados en la Evaluación de riesgos por descargas atmosféricas?
- d) ¿Qué resultados se obtienen con la validación de la estrategia?

Para dar respuesta a las preguntas científicas formuladas se ejecutaron esencialmente las tareas de la investigación siguientes:

- a) Obtención de las fuentes de información sobre los referentes de los valores de Densidad de descargas atmosféricas en el Valle de Matatipac.
- b) Diagnóstico del estado actual de la información oficial sobre Densidad de descargas atmosféricas en el Valle de Matatipac y el método de valoración de riesgo de impacto
- c) Elaboración de una propuesta que minimice el problema de la dualidad de resultados en la Evaluación de riesgos por descargas atmosféricas.
- d) Valoración de los resultados obtenidos en la validación de la estrategia propuesta.

Se validan y corroboran los resultados de los cálculos efectuados a través de un estudio comparativo entre los datos oficiales del mapa de densidad de descargas atmosféricas a tierra de la CFE y el IIE; y los datos obtenidos por el radar en sitio. Los resultados fueron aceptables; los datos objetivos de la zona se convierten en herramientas para incrementar la fiabilidad de la evaluación y su interpretación en seguridad atmosférica; con base en evaluaciones de casos prácticos con valores de Frontera, incluyendo aspectos de lógica difusa en la determinación.

En la siguiente sección se presenta la información sobre los referentes de los valores de Densidad de descargas atmosféricas en el Valle de Matatipac, se presenta el estado del arte sobre la Densidad de descargas atmosféricas y la Evaluación de Riesgos de impacto por descarga Atmosférica; se discute la importancia de contar con parámetros actualizados de la densidad de impactos de rayos a Tierra, se presenta un caso de valor de frontera mostrando el problema que representa; posteriormente, se trata el tema de actualización de mapas de Densidad de descargas en el Valle de Matatipac y se propone el uso de elementos

de la lógica difusa para su mejor valoración a través de una propuesta de mejora al método de valoración de riesgos descrito por la norma NMX-J-549-ANCE-2005 (ANCE, 2005). En las conclusiones se resalta la importancia de la adecuada información para la toma de decisiones y el uso de las herramientas adecuadas para la valoración; se plantea el desarrollo de una aplicación móvil que en tiempo real brinde los valores de densidad atmosférica al usuario, y finalmente se presentan los agradecimientos y las referencias.

### **Revisión bibliográfica (marco teórico)**

#### **Referentes de los valores de Densidad de descargas atmosféricas en el Valle de Matatipac.**

El valle de Matatipac es una zona donde se han presentado decesos de personas y daños en infraestructura y equipo debido a descargas atmosféricas, de los cuales hasta hace algunos años no había registros (Anaya, 2017). Así mismo, existen poco más de una decena de empresas formales dedicadas a las instalaciones eléctricas, que si se les solicita pueden realizar instalaciones de sistemas pararrayos, sin embargo, en ninguno de los casos, estas instalaciones se basan en la normativa nacional vigente, esto debido a la ignorancia en el tema por parte de los instaladores, quienes están convencidos que el solo subir una o más puntas metálicas a la parte superior de la instalación conectada a una puesta a tierra, logra el cometido de proteger las instalaciones.

Antes de que la tecnología se desarrollara para detectar y registrar con precisión los rayos, los meteorólogos se basaban en el número de detección audible de truenos. El nivel keráunico (o ceráunico) fue el número promedio de días por año cuando se escuchó al menos un trueno en un área determinada. Se utilizó un mapa de contornos isoceráunicos para dar una estimación aproximada de las frecuencias de rayos relativas. Sin embargo, las variaciones en la población, la distancia que recorre el sonido debido al terreno hace que estos mapas sean poco fiables, y la audición humana hace que estos mapas sean imprecisos, adicionalmente, tampoco podía esperar distinguir entre diferentes tipos de rayos (Cooray, 2003).

Los sensores de rayos electrónicos avanzaron durante el siglo XX utilizando interrupciones de ondas de radio. Originalmente, el gasto de tales instrumentos causó solo un desarrollo esporádico. Sin embargo, un pequeño conjunto de sensores en los EE. UU. Empleados durante un proyecto de 1979 por el Laboratorio Nacional de Tormentas Severas de NOAA creció en la Red Nacional de Detección de Rayos (NLDN), logrando cobertura a nivel nacional en 1989 (The National Severe Storms Laboratory, 2010).

Los primeros datos publicados sobre niveles Isoceráunicos en México forman parte de mapas impresos en libros de consulta en poder de lo que hoy es la Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación y datan de 1979. Sin embargo, como se mencionó, su precisión es baja debido a la manera en que se obtienen. Por lo que ya referente a la Densidad de descargas atmosféricas para la zona en estudio, los mapas datan del año 1986 y fueron publicados por la Comisión Federal de Electricidad (Comisión Federal de Electricidad, 1986). El siguiente estudio fue realizado entre la misma CFE y el Instituto de Investigaciones Eléctricas en el periodo de 1983 a 1993 (CFE, IIE, 1993). Finalmente, con un mayor nivel de detalle, pero como un grupo de mapas mensuales (no anuales), la UNAM a través del Centro de Ciencias de la Atmósfera, publica el Atlas Climático Digital de México con información del 2006- al 2010 (Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, 2012).

Existe un mapa denominado Susceptibilidad por Tormentas Eléctricas, elaborado de acuerdo al autor por Modelación Cartográfica (SIGPOT, Sistemas de información Geográfica para la Planeación y Ordenamiento del Territorio, 2014) el cual dice ser del año 2014, sin embargo, el autor de este artículo científico no coincide con el método empleado para la generación del mapa, ya que aunque el autor cita en su objetivo “*Determinar las zonas de afectación por Tormentas Eléctricas en el área de estudio. Esto ayudará a identificar los sistemas expuestos que se encuentren en la zona para, posteriormente, revisar su vulnerabilidad y establecer escenarios de riesgo*”, menciona en el siguiente párrafo las capas originales empleadas, y se lee “*Hidrometeorológicos (Tormentas Eléctricas). Es una capa de puntos que contiene los datos de la cantidad de veces que se ha presentado una tormenta de granizo en la zona de estudio*”. Aquí de forma errónea, están

relacionando las tormentas de granizo con las tormentas eléctricas; y una no implica la otra y viceversa; de hecho, las tormentas eléctricas por lo general están acompañadas por vientos fuertes, lluvia copiosa y a veces nieve, granizo, o sin ninguna precipitación. Adicionalmente, ofrece un par de rangos que denomina nivel medio y nivel alto, los cuales no son información cuantitativa que se pueda emplear para una valoración de riesgo. Al revisar el mapa presentado (ver Figura 1) este no tiene ningún tipo de coincidencia con la realidad de la zona (pasada y presente) y es erróneo su sustento, por lo cual se desestima su utilidad.

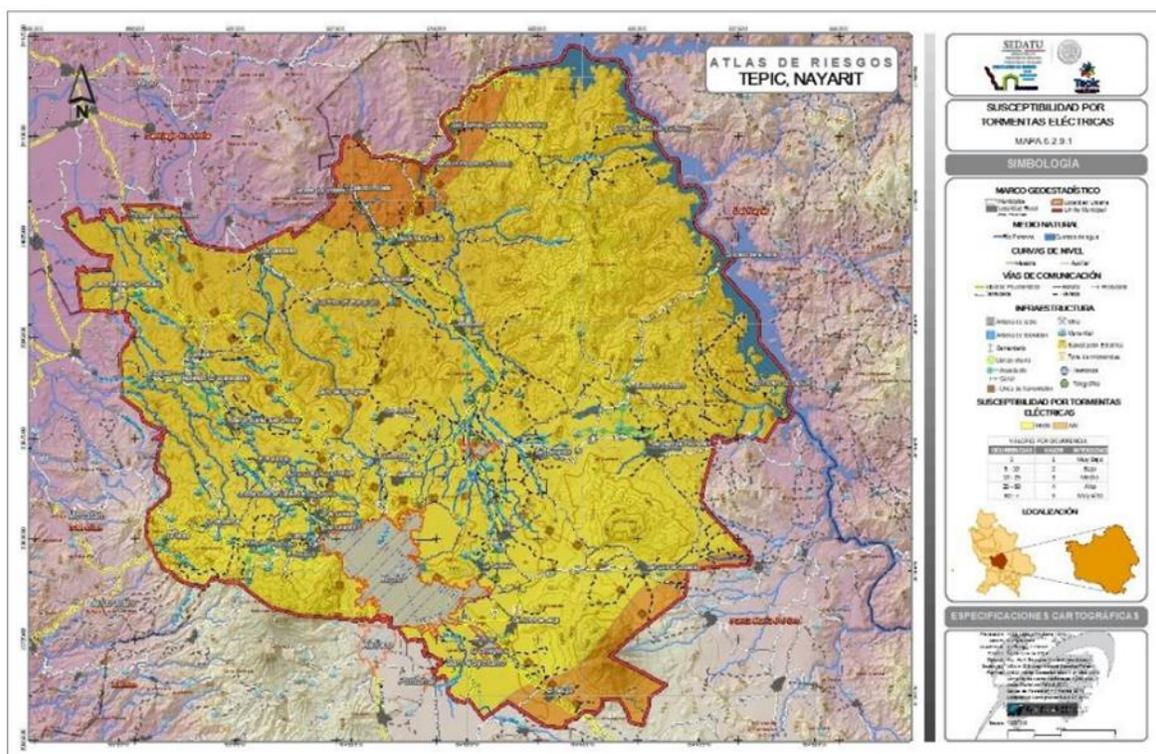


Figura 1. Susceptibilidad por Tormentas Eléctricas, Modelación Cartográfica (SIGPOT, Sistemas de información Geográfica para la Planeación y Ordenamiento del Territorio, 2014)

## Estado del arte sobre la Densidad de descargas atmosféricas y de la Evaluación de Riesgos de impacto por descarga Atmosférica

¿Por qué es importante el mapeo de rayos?

Los mapas de rayos, el seguimiento de rayos y las bases de datos de rayos tienen muchos usos prácticos y académicos. De acuerdo con el Centro de Investigación de Electricidad Atmosférica y Rayos de la NASA (King, 2016), se utilizan como parte de las actividades mencionadas a continuación entre otras más:

- Detección y advertencia de tormentas severas.
- Estimación de la lluvia convectiva.
- Seguimiento de la tormenta.
- Predecir los peligros de la aviación.
- Advertencias a empresas energéticas, depósitos de combustible, campos de golf, etc.
- Previsión de incendios forestales.
- Predecir el desarrollo del ciclón.
- Comprender la física del circuito eléctrico global.
- Entendiendo la magnetosfera y la ionosfera.
- Estudios de generación de NOx.
- Estudios de silbido y otros fenómenos de propagación de las olas.
- Investigación magnetosférica-ionosférica.
- Estudios solar-troposféricos.

Actualmente existen diversas redes de monitoreo a nivel mundial o para regiones específicas, son generalmente servicios cuyo acceso a la información requiere registro, uso de aplicaciones especiales o tiene un costo; así mismo algunos solo presentan los eventos que se están sucediendo mas no ofrecen datos históricos acumulados sobre la Densidad de Descargas atmosféricas. El último mapa publicado, data del año 2013, contiene información en un mapa con diferentes tonos de colores asociados a la Densidad de Descargas atmosféricas en el periodo de 1998 a 2013 (Anaya, 2017); sin embargo, aunque es de alta resolución, no es posible identificar los valores para el valle de Matatipac; solo brinda una idea muy general de lo que sucede a nivel del estado de Nayarit al no permitir una mayor nivel de acercamiento de la imagen como lo muestra la Figura 2.

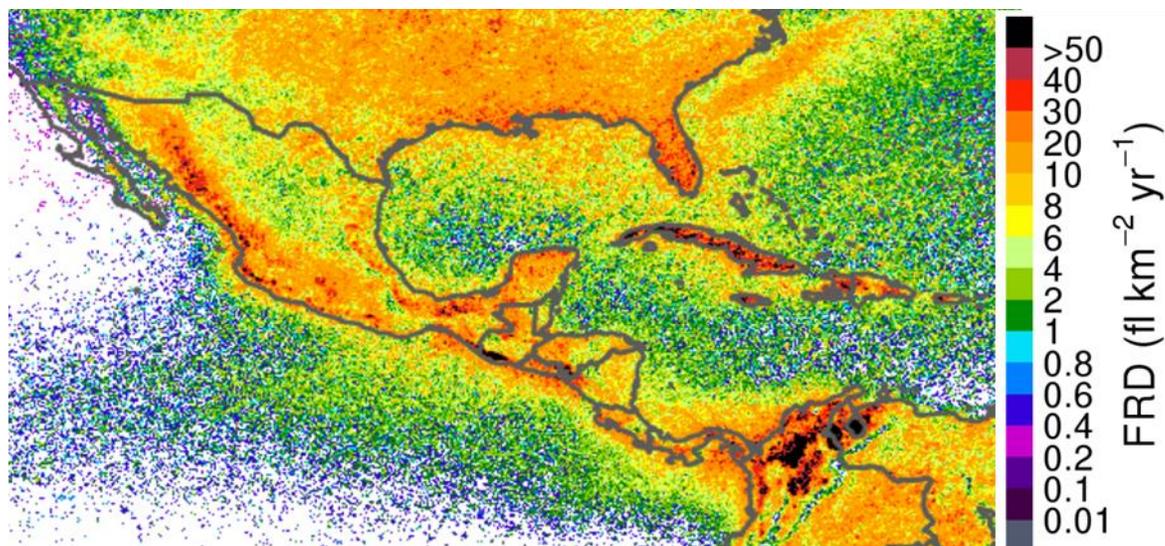


Figura 2. Sección del mapa LIS 0.1 Rejilla de Densidad de descargas atmosféricas de muy alta resolución (VHRFC) V1, 1998-2013, (NASA, 2014)

A continuación se enlistan diferentes alternativas para obtención de datos sobre descargas atmosféricas en el GHRC DAAC (Global Hydrology Resource Center, Distributed Active Archive Center). La mayoría de los datos están disponibles de forma gratuita, con registro e inicio de sesión desde el portal de Earthdata, con la excepción de unos pocos que requieren el permiso del equipo de investigación de rayos para obtenerlos. En la mayoría de los casos, las imágenes de navegación y los paquetes de software adicionales están disponibles. Cada conjunto de datos tiene lo que se llama una 'Página de inicio de conjunto de datos', una página web única con información de fondo y enlaces a acceso a datos, documentación, ejemplo de citas de datos y software para el uso de datos (Global Hydrology and Climate Center, 1997).

- ISS Lightning Imaging Sensor (LIS). Sensor de rayos basado en el espacio a bordo de la Estación Espacial Internacional
- TRMM Lightning Imaging Sensor (LIS). Fue un sensor de rayos basado en el espacio a bordo del satélite Tropical Rainfall Measuring Mission
- Optical Transient Detector (OTD). se implementó en el satélite Orbview-1 (anteriormente Microlab-1) (1995-2000). El OTD se utilizó para determinar la distribución de la actividad de rayos en todo el mundo.

- TRMM LIS Very High Resolution Climatology. Contiene características de rayos medidos en el satélite de la Misión de medición de precipitaciones tropicales (TRMM).
- TRMM LIS/OTD Climatology. Contiene climatologías de rayos de la combinación de las mediciones del (OTD) y del TRMM (LIS).
- Geostationary Lightning Mapper. Detector óptico transitorio infrarrojo de un solo canal, colocado en el satélite GOES-16 en una órbita geoestacionaria.

## **Metodología**

### **La Evaluación de Riesgos de impacto por descarga Atmosférica en México**

Como se mencionó anteriormente, la valoración de riesgo es una medida empírica, la cual estima en forma razonable, la probabilidad de incidencia de un rayo directo sobre una estructura tomando en cuenta la complejidad del fenómeno del rayo (ANCE, 2005).

Esta valoración tiene como objetivo definir la necesidad de contar o no con sistemas de protección contra tormentas eléctricas (SPTE) en instalaciones en donde hay riesgo de afectación directa o indirecta a personas, animales domésticos y/o bienes materiales.

La Evaluación de riesgos requiere de la estimación de la frecuencia anual promedio de rayos directos a una estructura, y para poder determinarla, se requiere de dos parámetros, uno de ellos es el área equivalente de captura de la estructura, expresada en  $m^2$ ; y que depende de la geometría del inmueble y de la topografía del terreno en que se ubica. El otro parámetro es la densidad promedio anual de rayos a tierra por  $km^2$ , este valor tradicionalmente se ha tomado de tablas o gráficas que datan de 1993 las más recientes.

Adicionalmente al problema de la antigüedad de la información, los mapas con que se cuenta de forma libre tienen una muy baja resolución, por lo que se consiguen de países completos o cuando muy cercano de estados, pero no de zonas en particular.

La Figura 3 muestra información de la densidad de descargas atmosféricas a tierra en México (se muestra el estado de Nayarit) en 1986.

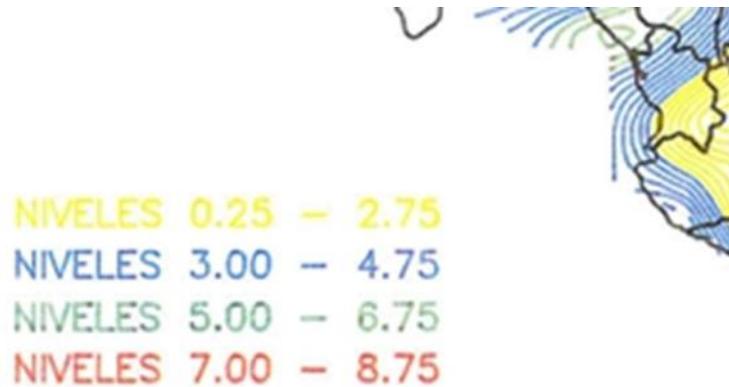


Figura 3. Densidad de descargas a tierra, Segmento Nayarit, (Comisión Federal de Electricidad, 1986)

Como se puede apreciar, de acuerdo a la Figura 3Figura 2, el estado de Nayarit está dividido en 2 zonas de densidad de descargas a Tierra, Nivel 0.25 a 2.75 rayos por Km<sup>2</sup> (en color amarillo) y Nivel 3.00 a 4.75 rayos por Km<sup>2</sup> (en color azul).

Si nuestra herramienta para la valoración de riesgo es este mapa, los valores de densidad promedio anual para el Valle de Matatipac serían válidos en el rango de 0.25 a 2.75 rayos por Km<sup>2</sup>.

La frecuencia anual promedio de rayos directos a una estructura (N<sub>0</sub>), puede calcularse mediante la ecuación siguiente (ANCE, 2005) :

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

Ecuación 1. Frecuencia anual promedio de rayos directos a una estructura (ANCE, 2005)

En donde:

N<sub>0</sub> es la frecuencia anual promedio de rayos directos a una estructura;

N<sub>g</sub> es la densidad promedio anual de rayos a tierra por km<sup>2</sup>;

A<sub>e</sub> es el área equivalente de captura de la estructura, en m<sup>2</sup>.

La frecuencia anual permitida de rayos directos a una estructura,  $N_d$ , es el riesgo permitido de incidencia de un rayo directo a una estructura de acuerdo al tipo de estructura, uso y contenido, definidos en la *Tabla 1* (ANCE, 2005).

Estructuras comunes	Efectos de las tormentas eléctricas	Frecuencia ( $M_d$ )
Residencia	Daño a instalación eléctrica, equipo y daños materiales a la estructura. Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra.	0,04
Granja	Riesgo principal de incendio y potenciales de paso. Riesgo secundario derivado de la pérdida de suministro eléctrico provocando posibles desperfectos por falla de controles de ventilación y de suministro de alimentos para animales.	0,02
Tanques de agua elevados: metálicos. Concreto con elementos metálicos salientes.	Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra, así como posibles daños al equipo de control de flujo de agua.	0,04
Edificios de servicios tales como: Aseguradoras, centros comerciales, aeropuertos, puertos marítimos, centros de espectáculos, escuelas, estacionamientos, centros deportivos, estaciones de autobuses, estaciones de trenes, estaciones de tren ligero o metropolitano.	Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	0,02
Hospital Asilo Reclusorio	Falla de equipo de terapia intensiva. Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	0,02
Industria tales como: Máquinas herramientas, ensambladoras, textil, papelería, manufactura, almacenamiento no inflamable, fábrica de conductores, fábrica de electrodomésticos, armado equipo de cómputo, muebles, artefactos eléctricos, curtidurías, agrícola, cementeras, caleras, laboratorios y plantas bioquímicas, potabilizadoras.	Efectos diversos dependientes del contenido, variando desde menor hasta inaceptable y pérdida de producción.	0,01
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de vestigios culturales irremplazables	0,02
Telecomunicaciones Véase nota	Interrupciones inaceptables, pérdidas por daños a la electrónica, altos costos de reparación y pérdidas por falta de continuidad de servicio.	0,02
<b>NOTAS</b>		
1 Para cualquier estructura común debe evaluarse el nivel de riesgo en función de su localización, densidad, altura y área equivalente de captura, para decidir la protección.		
2 Para estructuras en zonas con densidad de rayos a tierra mayor a 2, y si el techo de la construcción es de material inflamable (madera o paja), debe instalarse un SEPTE.		

*Tabla 1.* Frecuencia media anual permitida de rayos directos sobre estructuras comunes, (ANCE, 2005)

### Evaluación de la necesidad de protección.

Una vez estimado el valor  $N_0$  debe compararse con el valor de la frecuencia media anual permitida  $N_d$  (*Tabla 1*) para evaluar la necesidad de protección (ANCE, 2005), considerando lo siguiente:

- Si  $N_0$  (estimado) es  $\leq N_d$  (*Tabla 1*, valor permitido), el SEPTE<sup>1</sup> es opcional.
- Si  $N_0$  (estimado) es  $> N_d$  (*Tabla 1*, valor permitido) debe instalarse un SEPTE.

<sup>1</sup> Sistema Externo de Protección contra Tormentas Eléctricas

Avances y cambios en la información disponible sobre la densidad de rayos a tierra en la zona del estado de Nayarit.

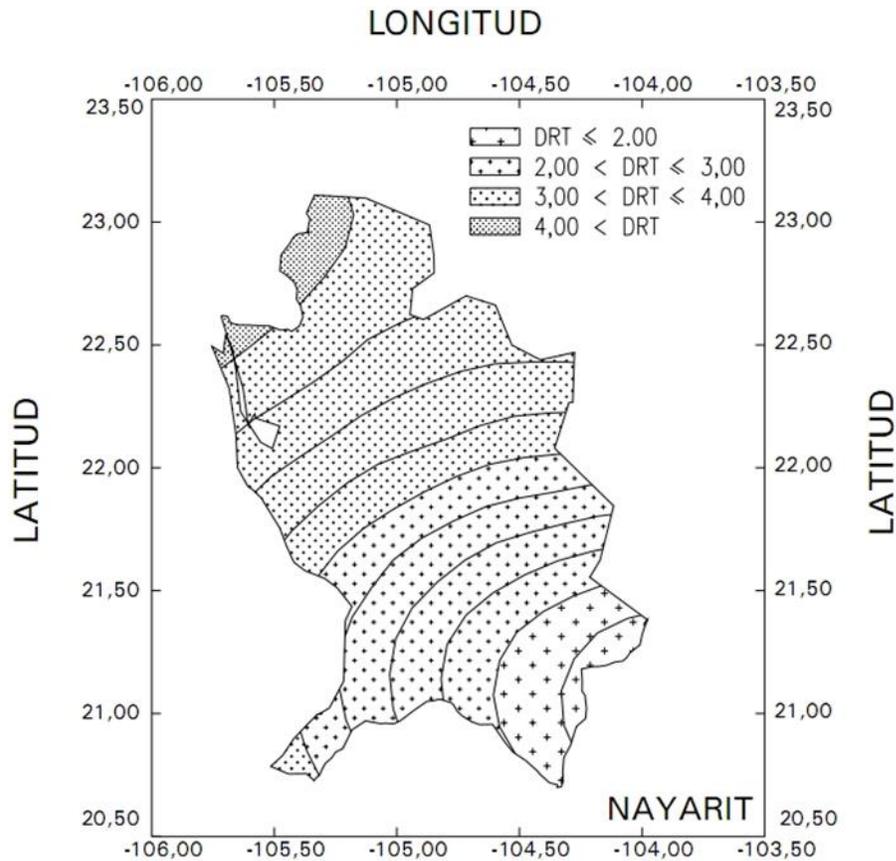


Figura 4. Densidad de rayos a tierra, Estado de Nayarit, 1983-1993, (CFE, IIE, 1993)

A diferencia del mapa anteriormente mostrado en la Figura 3, en la Figura 4, en el estado de Nayarit se identifican ya no 2 sino 4 zonas o niveles de densidad de rayos a tierra. Para la zona que comprende el Valle de Matatipac, los valores de densidad promedio anual estarían en el rango de 2 a 3 rayos por Km<sup>2</sup>.

### Ejemplificación del problema en la toma de decisiones

Se presenta a manera de ejemplo, una estructura con techo plano y ubicada aislada (sin vecinos) en un terreno plano como la mostrada en la Figura 5; con las siguientes dimensiones: Largo (a) de 25 metros, Ancho (b) de 15 metros y altura (h) de 8.135 metros, el área equivalente de captura correspondiente es de 4,199 metros cuadrados como se

muestra en la Figura 5.

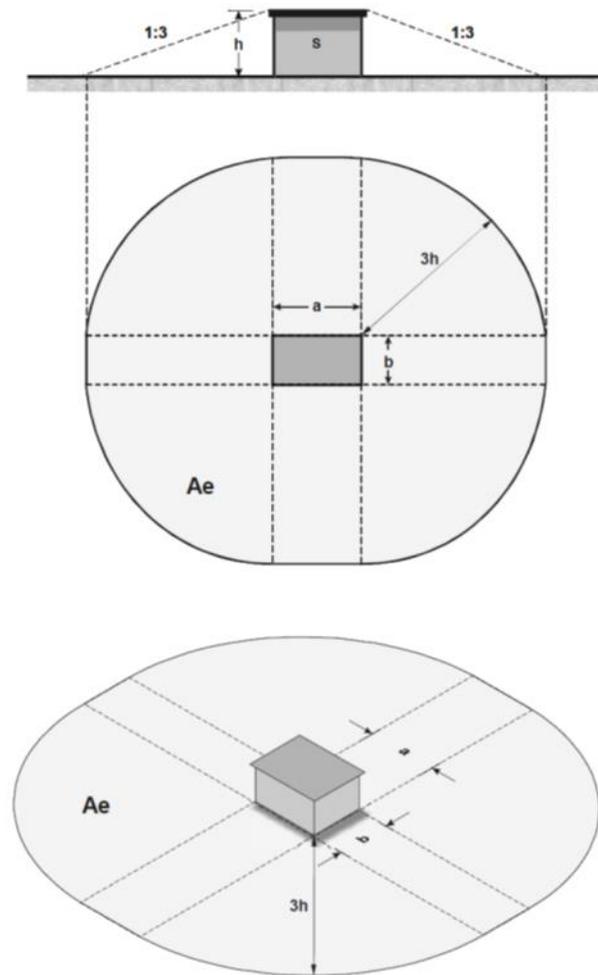


Figura 5. Área de captura equivalente para una estructura con techo plano y terreno plano, (ANCE, 2005)

Ahora, consideremos que las instalaciones son para el almacenamiento de materiales No inflamables, por lo que de acuerdo a la Tabla 1. Frecuencia media anual permitida de rayos directos sobre estructuras comunes, el valor correspondiente para la frecuencia anual permitida  $N_d$  es de 0.01 que equivale a 1 rayo cada 100 años.

Con los valores del mapa de la Figura 3, Valle de Matatipac en el rango de 0.25 a 2.75 rayos por  $\text{Km}^2$ , obtenemos la Tabla 2.

$N_g$	$A_e$	$N_O$	$N_d$	Valoración
0.25	4199	0.001050	0.01	SEPTE Opcional
0.5	4199	0.002100	0.01	SEPTE Opcional
0.75	4199	0.003149	0.01	SEPTE Opcional
1	4199	0.004199	0.01	SEPTE Opcional
1.25	4199	0.005249	0.01	SEPTE Opcional
1.5	4199	0.006299	0.01	SEPTE Opcional
1.75	4199	0.007348	0.01	SEPTE Opcional
2	4199	0.008398	0.01	SEPTE Opcional
2.25	4199	0.009448	0.01	SEPTE Opcional
2.5	4199	0.010498	0.01	Instalar SEPTE
2.75	4199	0.011547	0.01	Instalar SEPTE

Tabla 2. Valores para el Valle de Matatipac en el rango de 0.25 a 2.75 rayos por Km<sup>2</sup>, de acuerdo a datos de (Comisión Federal de Electricidad, 1986)

En la Tabla 2 podemos apreciar la ambigüedad de resultados al tener que instalar de forma obligatoria un SEPTE si consideramos una densidad de descargas a tierra igual o superior a 2.5 rayos por Km<sup>2</sup> o considerarlo de forma opcional si empleamos valores inferiores (2.25 o menores).

Se realizó el ejercicio con los valores del mapa de la Figura 4, Valle de Matatipac en el rango de 2 a 3 rayos por Km<sup>2</sup>, obtenemos la Tabla 3.

$N_g$	$A_e$	$N_O$	$N_d$	Valoración
2	4199	0.008398	0.01	SEPTE Opcional
2.25	4199	0.009448	0.01	SEPTE Opcional
2.5	4199	0.010498	0.01	Instalar SEPTE
2.75	4199	0.011547	0.01	Instalar SEPTE
3	4199	0.012597	0.01	Instalar SEPTE

Tabla 3. Valle de Matatipac en el rango de 2 a 3 rayos por Km<sup>2</sup>, (CFE, IIE, 1993)

En la Tabla 3, aunque el rango es menos difuso, también hay ambigüedad de resultados, de hecho, se pudo determinar los puntos del límite entre tener que instalar de forma obligatoria un SEPTE o considerarlo de forma opcional para los datos empleados. Estos valores se muestran en la Tabla 4.

$N_g$	$A_e$	$N_O$	$N_d$	Valoración
2.381	4199	0.009998	0.01	SEPTE Opcional
2.382	4199	0.010002	0.01	Instalar SEPTE

Tabla 4. Frontera de valores para instalación de SEPTE

Con lo anterior, se estableció que podemos estar en una situación en la que invertimos en un SEPTE sin requerirlo, o la omisión de su instalación requiriéndolo como medio de protección; y esto debido a que no tenemos certidumbre acerca del valor actual de la densidad de descargas a tierra en una zona específica porque la información disponible no ofrece la resolución requerida y deja a criterio del diseñador el valor a seleccionar.

### Actualización de mapas de Densidad de descargas en el Valle de Matatipac

El Valle de Matatipac se encuentra localizado en el estado de Nayarit, cubre un área aproximada de 120 Km<sup>2</sup>, en las coordenadas Latitud 21°30'N y Longitud 104°54'O (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015).

En los últimos 15 años, ha sido gradual pero al mismo tiempo notorio el cambio climático en el estado de Nayarit; incluso como parte del plan estatal de desarrollo 2005-2011 se propuso un programa contra el cambio climático en Nayarit.

Por lo que la actividad de Tormentas eléctricas ha también cambiado en su comportamiento en el valle de Matatipac, pasando de tener duraciones de 6 a 9 horas con intensidad moderada en las décadas de los 70's hasta parte de los 90's, a tormentas de 1 a 3 horas con una intensidad elevada a severa (de los 90's a la fecha), lo cual en el tema de descargas atmosféricas se ve reflejado en una mayor incidencia del fenómeno atmosférico (Uman, The Art and Science of Lightning Protection, 2008).

Para el proceso de actualización de datos sobre tormentas eléctricas en la zona, se instaló en el año 2009 un equipo de detección de rayos en la zona del Valle de Matatipac, en las coordenadas Latitud 21°27'6.70"N, Longitud 104°53'20.02"O (Anaya, 2017). El sistema es marca Boltek y registra descargas atmosféricas de ambas polaridades (+ ó -) identificando si son Nube-Tierra (CG) o Nube-Nube (CC). Si en el rango de alcance del

radar al menos una descarga atmosférica es detectada, se genera un archivo donde la actividad electro-atmosférica del día es registrada. La información almacenada incluye un ángulo de dirección, una distancia (coordenadas polares), polaridad del rayo y tipo de descarga (CG ó CC) (Boltek Lightning Detection Systems, 2000).

La resolución del radar es de 1.2 Kms (Boltek Lightning Detection Systems, 2000), lo que significa que la descarga detectada por este método pudo haberse generado en un radio de 1.2 Kms alrededor de la coordenada registrada en el sistema.

La información obtenida en los años de registro (2009 a 2013), es procesada de forma estadística. La primer parte del proceso es dividir la zona de estudio (Valle de Matatipac) en sectores de 1 Km<sup>2</sup> dada la resolución del sistema de detección. Cada uno de los sectores cubre un área geográfica, por lo que en la segunda etapa se realiza un conteo anual de impactos detectados por sector, esto se realiza con el uso de aplicaciones de software diseñadas para ese fin; el resultado de este proceso es una densidad de descargas a tierra por cada año de evaluación estadística. La tercer etapa del proceso consiste en realizar el promedio de descargas a tierra de cada uno de los sectores para el periodo con el que se cuenta información; con lo que el resultado será un valor de densidad de descargas a tierra por Km<sup>2</sup> actualizado, el cual es representado en la cuarta etapa de manera gráfica mediante el uso de herramientas tipo GIS (Sistemas de Información Geográfica) con la cual un color es asignado a la escala empleada por la NASA para niveles Isoceráunicos<sup>2</sup> (High Resolution Full Climatology Annual Flash Rate) como se aprecia en la *Figura 6*. (Global Hydrology and Climate Center, 1997)



*Figura 6.* Escala de colores para niveles Isoceráunicos de la NASA (Global Hydrology and Climate Center, 1997)

<sup>2</sup> Días con tormenta eléctrica registrada en una zona geográfica

A continuación se presenta uno de los resultados de este trabajo; la Figura 7 muestra la Densidad de descargas a tierra por  $\text{km}^2$  de los años 2009 a 2013. Resalta de forma notoria que las zonas pueden distinguirse entre sí con relativa facilidad, permitiendo al analista-diseñador tomar una decisión certera acerca del valor de Densidad de descargas a tierra a considerar y minimizar así la incertidumbre que los mapas con amplios rangos ocasionan debido a su falta de precisión.



Figura 7. Densidad de Descargas atmosféricas 2009-2013 Valle de Matatipac

### Uso de elementos de la lógica difusa para una mejor valoración del riesgo

De acuerdo con (Morcillo, 2011) los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos; la teoría clásica de conjuntos sólo

contempla la pertenencia o no pertenencia de un elemento a un conjunto, sin embargo la teoría de conjuntos difusos contempla la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto, es decir, cada elemento presenta un grado de pertenencia a un conjunto difuso que puede tomar cualquier valor entre 0 y 1 (falso o verdadero). Este grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso.

Para este caso, el interés se centra en la variable denominada Densidad de descargas atmosféricas, la cual, como se ha mostrado, es de difícil selección, debido a diversos factores, como son la actualidad y precisión de los mapas, la definición y resolución obtenida y el criterio del evaluador.

La Figura 8 muestra la interpretación de la información de densidad de descargas atmosféricas tanto para la lógica difusa como para la lógica clásica, con lo cual para cada valor que pueda tomar un elemento o variable de entrada 'x' la función característica  $\mu_A(x)$  proporciona el grado de pertenencia de este valor de 'x' al conjunto difuso A.

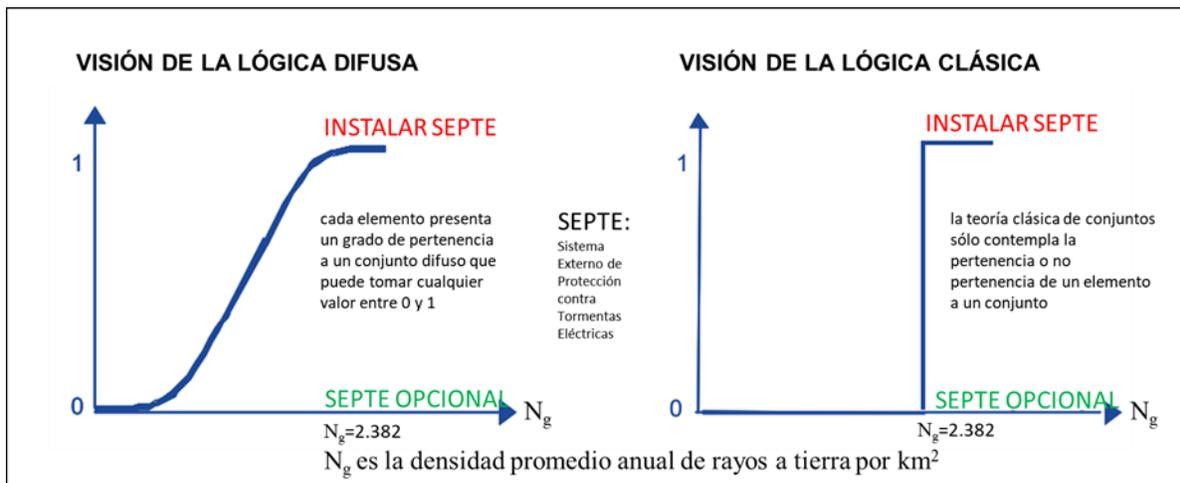


Figura 8. Lógica Clásica vs Lógica Difusa

Las coordenadas detectadas por los sistemas de radar de descargas atmosféricas son del punto donde estas se originaron en la nube. De acuerdo con (Cooray, 2003), el rayo promedio mide aproximadamente una pulgada de ancho (2.54 cms) y cinco millas de largo (8 km en número cerrado). Con base a estos datos, la propuesta de mejora en la valoración

de riesgo es considerar el valor obtenido en la zona de interés y realizar la evaluación con datos de las zonas aledañas en un radio promedio de 3.6 km.

Este radio de Evaluación se ha obtenido considerando la sección media entre descargas casi verticales y la longitud del rayo promedio, tomando en cuenta las alturas típicas de la base de las nubes de tormenta (2 a 3 km) y empleando el teorema de Pitágoras para su determinación como se muestra en la Figura 9 y en las ilustraciones Figura 10 e Figura 11.

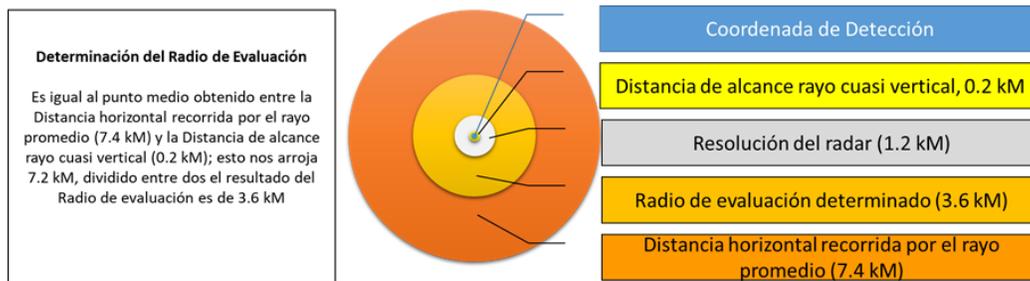


Figura 9. Vista superior de las zonas de influencia de las descargas atmosféricas típicas

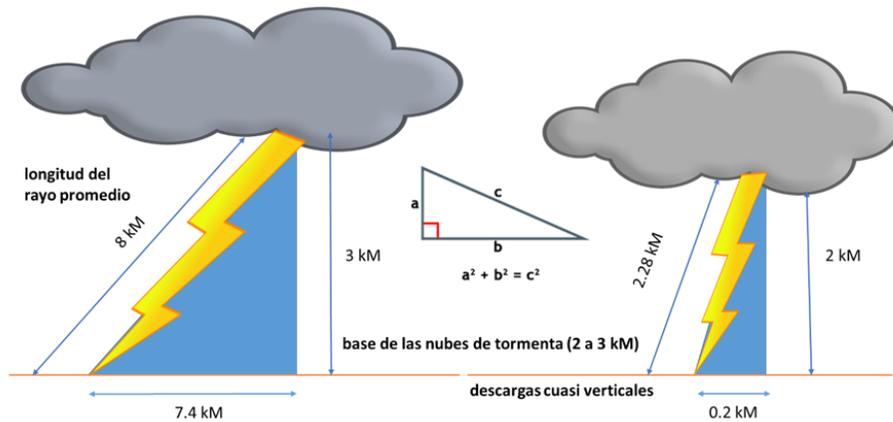


Figura 10. Vista representativa en corte de la Figura 9

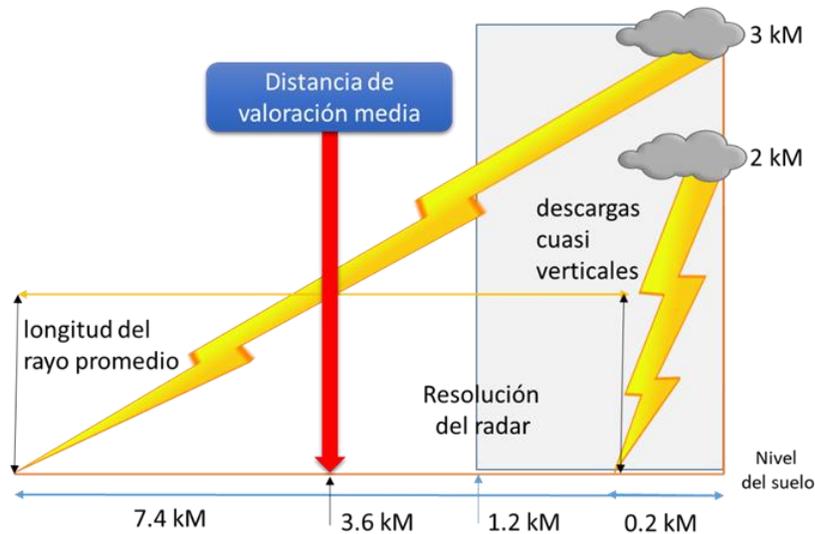


Figura 11. Representación gráfica de la Distancia de valoración media propuesta

Considerando los elementos presentados, la propuesta para mejorar significativamente el grado de validez y certidumbre en la valoración de riesgos por descargas atmosféricas en el valle de Matatipac, consiste en los siguientes pasos:

1. Emplear el mapa de densidades de descarga atmosférica anual más reciente y cuya veracidad de información sea comprobable.
2. Identificar el punto geográfico de ubicación de las instalaciones a evaluar
3. Centrados en el punto de la ubicación, trazar sobre el mapa una circunferencia de diámetro equivalente a 3.6 km (revisar escalas). En el caso del mapa presentado en la esto equivale a 3 recuadros de 1.2 km cada uno.
4. Obtener la relación de todos y cada uno de los valores de  $N_g$  (es la densidad promedio anual de rayos a tierra por  $\text{km}^2$ ) Incluidos en el área que cubre la circunferencia trazada, sin repetir valores.
5. Ordenar de forma ascendente (menor a mayor) los valores
6. Procesar la información para obtener la estadística de la muestra; en este caso, los valores a obtener son: media (promedio), mediana, moda, desviación estándar, valores mínimo y máximo.
7. Graficar los resultados y determinar el valor del sesgo o asimetría de la distribución normal obtenida.

8. Realizar el procedimiento de valoración de riesgo como se mostró en la Ejemplificación del problema en la toma de decisiones considerando 3 valores de  $N_g$ :
  - a. El correspondiente a la ubicación del sitio
  - b. El de la media de los valores
  - c. El máximo de los valores
9. Con la tabla generada de resultados, obtendremos un grado de pertenencia (requiere SEPTE o este es Opcional), si al menos una de las posibilidades da como resultado que requiere SEPTE, al ser definida como una función tipo OR (compuertas lógicas) implicará que es obligatorio el SEPTE, y solo si todos los resultados arrojan que es opcional, así se considerará, como se muestra en la Tabla 5.
10. Una forma simplificada del procedimiento sería solo emplear el valor máximo de  $N_g$  obtenido en el área, sin embargo la propuesta considera que se realicen las otras dos valoraciones (a y b) con la finalidad de brindar un panorama más amplio al evaluador respecto a la decisión a tomar.
11. Finalmente, se debe de realizar una valoración probabilística que le muestre al evaluador el grado de pertenencia de cada uno de los grupos de valores de  $N_g$  empleados en la valoración para poder emitir una valoración de riesgo con un mayor grado de objetividad.

Para $N_{g1}$ , Valoración 1	....	Para $N_{gn}$ , Valoración n	OR	Valoración resultante (0 SEPTE Opcional, 1 Requiere SEPTE)
0	....	0	0	0 Instalación de SEPTE es Opcional
0	....	1	1	1 Debe obligatoriamente instalar SEPTE
1	....	0	1	1 Debe obligatoriamente instalar SEPTE
1	....	1	1	1 Debe obligatoriamente instalar SEPTE

Tabla 5. Tabla de verdad función OR para determinar la Valoración resultante del conjunto de pruebas aplicadas bajo la propuesta presentada

### Ejemplo de aplicación de la propuesta

Considérese el mismo problema planteado con anterioridad. Ahora ubicamos el sitio de interés y trazamos la circunferencia de acuerdo a los puntos 1, 2 y 3 de la propuesta de mejora en la valoración.

La Figura 12 muestra la información clasificada del ejemplo para el paso 4 del procedimiento.

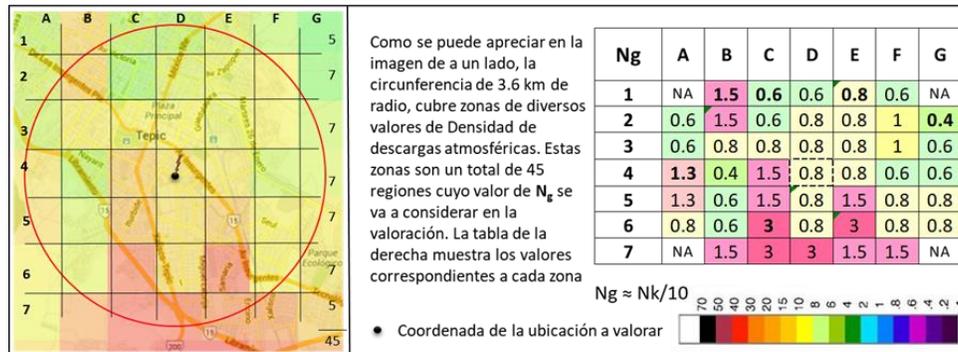


Figura 12. Obtención de la relación de todos y cada uno de los valores de  $N_g$  (es la densidad promedio anual de rayos a tierra por  $km^2$ ) Incluidos en el área que cubre la circunferencia trazada.

Esta información es ordenada de forma ascendente (menor a mayor) de acuerdo a lo indicado en el paso 5 (cinco) del procedimiento.

Al realizar la actividad del punto 6; los cálculos estadísticos para este ejercicio de ejemplo arrojan los siguientes valores mostrados en la Tabla 6:

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
mínimo	0.400	moda	0.800
máximo	3.000	mediana	0.800
desviación estándar	0.691	promedio	1.084

Tabla 6. Estadística de la muestra

Los resultados gráficos se muestran en la Figura 13, donde podemos apreciar que la distribución normal presenta una asimetría o sesgo positivo ya que no coinciden moda, mediana y media (la media se encuentra a la derecha) (López, 2016). Este tipo de

resultados gráficos con asimetría es muy común en análisis de datos climatológicos (King, 2016); como evidencia de esta aseveración, se realizó la misma prueba para datos obtenidos de los mapas de la UNAM (Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, 2012), y el resultado es similar, una distribución normal con asimetría o sesgo positivo.

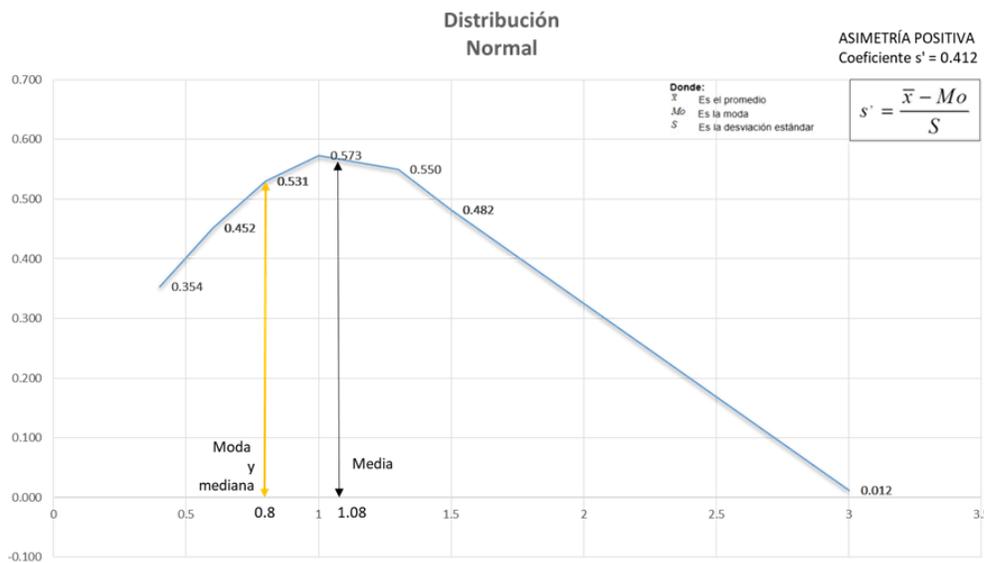


Figura 13. Graficación de los datos en una distribución normal

Ahora, en la Tabla 7, se muestran los resultados de la valoración del riesgo para los casos indicados, con  $N_g$  (a) El correspondiente a la ubicación del sitio, (b) El de la media de los valores, y (c) El máximo de los valores.

Datos de	$N_g$	$A_e$	$N_o$	$N_d$	Valoración
Ubicación	0.8	4199	0.003359	0.01	SEPTE Opcional
Media	1.0844	4199	0.004553	0.01	SEPTE Opcional
Máximo	3	4199	0.012597	0.01	Instalar SEPTE

Tabla 7. Valoración para los tres datos de  $N_g$

De acuerdo con lo que señala el paso 9, ésta valoración indica la necesidad de instalar el SEPTE, esto se justifica con el análisis realizado de los valores de frontera; así como por la posible longitud promedio que puede alcanzar una descarga atmosférica (7.6 km horizontalmente). Tomando en cuenta lo que el punto 10 y 11 mencionan, el evaluador

puede tomar la decisión (basada en los resultados) con base en la probabilidad, ya que al analizar los valores de  $N_g$ , se puede apreciar que el caso que obliga instalar un SEPTTE ( $N_g=3$ ) solo representa el 8.89 % de acuerdo con la Figura 14.

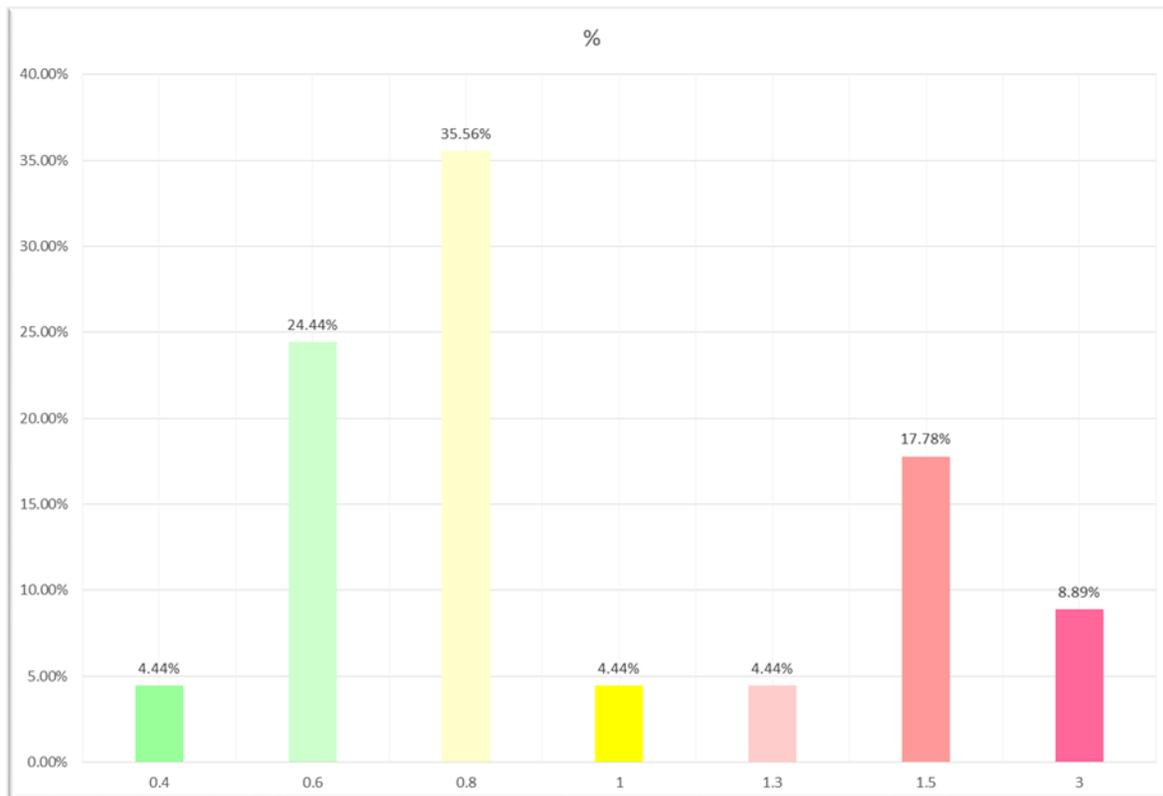


Figura 14. Porcentajes para cada valor de  $N_g$  del área de estudio

En otras palabras, para el ejemplo mostrado, se cuenta con una zona que puede representar un riesgo de descarga al sitio con un 8.89 % de probabilidad, lo que representaría su grado de pertenencia (bajo) y una probabilidad de 91.11% de que la instalación del SEPTTE sea opcional (mayor grado de pertenencia).

## Resultados y Conclusiones

Dadas las condiciones actuales que ubican a México como el primer lugar en muertes por descargas atmosféricas, es trascendental trabajar en diversos vectores de acción, en este caso particular, la valoración de riesgos por descarga atmosférica.

Existe carencia de conocimiento acerca de la valoración de riesgo por parte de los “diseñadores” de soluciones de protección atmosférica, no emplean métodos aprobados de diseño basados en la normatividad vigente y el usuario, generalmente con menor conocimiento, obtiene un “protector mental”, mentalmente cree que está protegido.

Es por lo anterior que contar con información actualizada y de mayor precisión representa un importante avance en la valoración de riesgos de descargas atmosféricas; lo que permite al analista-diseñador profesional, contar con elementos de decisión basados en datos que corresponden a la situación climatológica más reciente.

Se demostró como la lógica difusa ofrece una alternativa que abre posibilidades en la toma de decisiones cuando se tienen valores de frontera, cambiando el sentido estricto de la lógica clásica (0/1, negro/blanco, falso/verdadero) a una visión continua de los fenómenos que muestra una gama de valores intermedios y su valor de pertenencia.

El uso de herramientas de la probabilidad y la estadística amplían la visión del evaluador al mostrar las posibilidades de ocurrencia y las tendencias presentes en la valoración del riesgo por descargas atmosféricas.

Se demuestra a través de los ejemplos presentados, la validez de la propuesta que amplía los alcances de la valoración de riesgos y su utilidad en la toma de decisiones.

Se sugiere para trabajos posteriores considerar un sistema de modelado predictivo que permita conocer la tendencia del comportamiento de la Densidad de descargas atmosféricas para que los analistas-diseñadores puedan elaborar proyectos de protección con factibilidad futura y de mediano plazo (al menos 5 años), contar con datos a través de una App para dispositivos móviles; así como considerar la integración de esta propuesta en el método de valoración de riesgo en una futura revisión de la norma NMX-J-549-ANCE-2005.

### **Agradecimientos**

Este trabajo ha sido desarrollado con el apoyo de los Ingenieros Martha Melissa Meza Breceda y Oscar Francisco Ramírez Andalón; ambos egresados de la carrera de

Ingeniería en Tecnologías de la Información y Comunicaciones del Instituto Tecnológico de Tepic, y el Maestro Ernesto Martínez Becerra, egresado del Master en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad de Girona en España. Así como del Ing. Jesús Alberto Cobian Torres, ex colaborador en la empresa Xtension.

## Referencias

- Anaya, E. E. (2017). *MEJORA DE LA CAPACIDAD REACTIVA PERSONAL ANTE AMENAZAS DE IMPACTO DE RAYO*. Monterrey, Nuevo León: Insituto Internacional para el Desarrollo.
- ANCE. (25 de 03 de 2005). Norma NMX-J-549-ANCE-2005. *SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA TORMENTAS ELÉCTRICAS - ESPECIFICACIONES, MATERIALES Y METODOS DE MEDICIÓN*. México, D.F., México: Asociación Nacional de Normalización y Certificación.
- Boltek Lightning Detection Systems. (01 de 01 de 2000). *Boltek Lightning Detection Systems*. Obtenido de Boltek Lightning Detection Systems: <http://www.boltek.com/about.html>
- Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. (2012). *Atlas Climático Digital de México (Nayarit)*. CDMX: UNAM.
- CFE, IIE. (1993). *Proyecto para la determinación de Isolíneas de densidad de descargas de rayos a tierra*. Cuernavaca, Morelos: IIE.
- Comisión Federal de Electricidad. (1986). *Mapa de isodensidad de descargas atmosféricas en la república Mexicana*. México DF: CFE.
- Cooray, V. (2003). *The Lightning Flash*. London, United Kingdom: The Institution fo Engineering and Technology.
- Curiosity Staff. (2015). *How Big Is A Lightning Bolt?* San José, California: Curiosity.
- ESLAVA, M. Á. (2014). *TESIS: PROPUESTA DE PROTECCIÓN ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN CAMPOS DE FÚTBOL DE PUMITAS, EN CU*. CDMX: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Global Hydrology and Climate Center. (1997). *NASA. Lightning & Atmospheric Electricity Research at the GHCC*. Huntsville, Alabama: The University of Alabama in Huntsville's Information Technology & Systems Center. Obtenido de <http://thunder.nsstc.nasa.gov/>

- Grupo Protección contra Descargas Atmosféricas. (2016). *Notas preliminares para el curso de Protección contra Descargas Atmosféricas*. CDMX: Instituto de Ingeniería Eléctrica.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). *Anuario estadístico y geográfico de Nayarit 2015*. Tepic, Nayarit: INEGI.
- King, H. M. (2016). *World Lightning Map, Lightning is not uniformly distributed across the Earth*. . Houston, Texas: Geoscience News and Information.
- Kucienska, B. (2012). *Fulminados por rayos, UNAMirada a la ciencia*. México D.F.: Fundación UNAM, Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- López, Y. M. (2016). *Medidas de forma: Asimetría y Curtosis*. Ciudad de Guatemala: Organización DIHA.
- Martínez, J., & Fernández, A. (2004). *Cambio Climático: Una visión desde México*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Morcillo, C. G. (2011). *Lógica Difusa, una introducción práctica*. Ciudad Real, España: Softcomputing.
- Nicora, G. (2014). *Meteoros eléctricos (electrometeoros)*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de La Plata.
- Parra, S. (2013). *Diez cifras sorprendentes de las tormentas, los rayos, las nubes y la lluvia*. Barcelona, España: Xataka Ciencia.
- Sánchez, R. V. (1999). *Descargas atmosféricas y sistema de conexión a tierra*. Cuernavaca, Morelos: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- SIGPOT, Sistemas de información Geográfica para la Planeación y Ordenamiento del Territorio. (2014). *Atlas de Riesgos de Tepic Nayarit*. Tepic Nayarit: H. XL Ayuntamiento del Municipio de Tepic.
- The National Severe Storms Laboratory. (2010). *Lightning Detection*. Norman, Oakland: NOAA.
- Uman, M. A. (1987). *The Lightning Discharge*. Gainesville, Florida: Academic Press, Inc.
- Uman, M. A. (2008). *The Art and Science of Lightning Protection*. Cambridge, UK: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- Uman, V. A. (2006). *Lightning Physics and Effects*. New York: Cambridge University Press.