



Keraunos

ESTUDIO PARÁMETROS DEL RAYO PARA PROYECTOS SUBTRANSMISIÓN 138 kV Y 60 kV.

LÍNEAS: Huamachuco y Huaraz

Orden de servicio: 5820001250

Julio de 2022

Contenido

1	RESUMEN EJECUTIVO	3
2	ALCANCE.....	3
3	CONCEPTOS TÉCNICOS.....	3
3.1	Nivel Ceráunico.....	3
3.2	Densidad de descargas a tierra – DDT (GROUND FLASH DENSITY):	3
4	TRAZADOS DE ANÁLISIS	4
5	INFORMACIÓN HISTÓRICA DE ACTIVIDAD DE RAYOS.....	5
5.1	Red de detección total de rayos LINET	6
5.1.1	Red de Detección Total de Rayos LINET en Perú	8
6	METODOLOGÍA.....	9
7	RESULTADOS.....	10
7.1	Nivel Ceráunico – NC	10
7.2	Densidad de descarga a tierra – DDT (Ground Flash Density – GFD)	13
7.3	ESTANDARIZACIÓN DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	17
8	FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE CORRIENTE	18
8.1	Línea Huamachuco	18
8.2	Líneas Huaraz.....	19
9	CONCLUSIONES	21
10	REFERENCIAS	22

1 RESUMEN EJECUTIVO

La presente propuesta plantea el cálculo de los parámetros de Densidad de Descargas a Tierra– DDT, Nivel Ceráunico – NC y curva de distribución de probabilidad de la corriente pico sobre los trazados de las líneas Huamachuco (138 kV) y Huaraz (60 kV), con base en la información de rayos disponible.

2 ALCANCE

El alcance de esta propuesta se circunscribe al desarrollo de las siguientes actividades:

- Suministrar el parámetro Densidad de Descargas a Tierra - DDT para las líneas especificadas
- Calcular de parámetro de Nivel Ceráunico – NC anual para el área circundante a las líneas de subtransmisión.
- Determinar de la curva de distribución de probabilidad de la corriente pico de los rayos registrados sobre el área analizada.

3 CONCEPTOS TÉCNICOS

3.1 Nivel Ceráunico

El Nivel Ceráunico – NC hace referencia a la cantidad de días de tormenta al año que se presentan en un área determinada. Un día de tormenta es aquel en el que por lo menos se escucha un trueno [1]. El NC proporciona información preliminar de la actividad eléctrica atmosférica en las diferentes zonas de interés. El NC, definido por la Organización Meteorológica Mundial (WMO), depende de la audibilidad del trueno, respecto a la distancia. Se considera que la probabilidad de oír truenos, entre 0 y 5 km es máxima, mientras que a 15 km puede estar del orden menor a 20%. Por tanto, un valor de área para calcular el NC de 30x30 km es aceptable, su unidad de medida es el “Día con trueno oído - Day with Thunder Heard” [1 – 3].

3.2 Densidad de descargas a tierra – DDT (GROUND FLASH DENSITY):

El parámetro de Densidad de Descargas a Tierra se define como el número de rayos nube-tierra que se presentan en un área de 1 km² durante un año. La DDT es considerada como el primer indicador de la incidencia de rayos en una región. Típicamente la DDT se calcula a partir de las medidas de contadores de rayos, sistemas de localización de rayos y sistemas ópticos instalados en satélites [1-3]. Estos mapas de DDT han sido generados inicialmente con base en información generada por sistemas ópticos satelitales, como el Lightning Imaging System – LIS de la NASA, el cual detecta la energía irradiada de la actividad total de rayos – TLD (Total Lightning Density – actividad de rayos producidos entre nubes y nube a tierra), aunque con errores considerables de localización.

En las últimas décadas se han podido generar mapas de Densidad total de rayos, utilizando información obtenida de redes de localización de rayos, algunas de estas con sensores instalados alrededor del mundo, aunque con limitada eficiencia y exactitud, sin embargo, su información es útil para determinar parámetros básicos de la actividad de rayos, como el NC y la DDT.

La metodología de cálculo de este parámetro se ha efectuado de acuerdo a lo indicado en los documentos [5-7], donde se especifican los criterios que se deben tener en cuenta al usar redes de localización de rayos para la determinación de los parámetros asociados a descargas eléctricas atmosféricas.

4 TRAZADOS DE ANÁLISIS

Las Figura 1 y Figura 2 presentan los trazados de las diferentes líneas de subtransmisión, junto con el área de estudio para cada una de ellas. Dichas áreas se generan a partir de un radio de 5 km. Las líneas estudiadas se listan a continuación:

- Línea de Transmisión 138 kV SE Derivación – SE Huamachuco
- Línea de Transmisión 60 kV SE Huaraz Oeste – Huaraz Nueva – Ticapampa

El área de análisis de la línea ilustrada en la Figura 1 corresponde a 429 km², y se encuentra en el departamento de La Libertad. Y la línea de la Figura 2 se encuentran en el departamento de Áncash, abarcando un área de estudio de 467 km².



Figura 1 Área de estudio en la línea Huamachuco (138 kV)

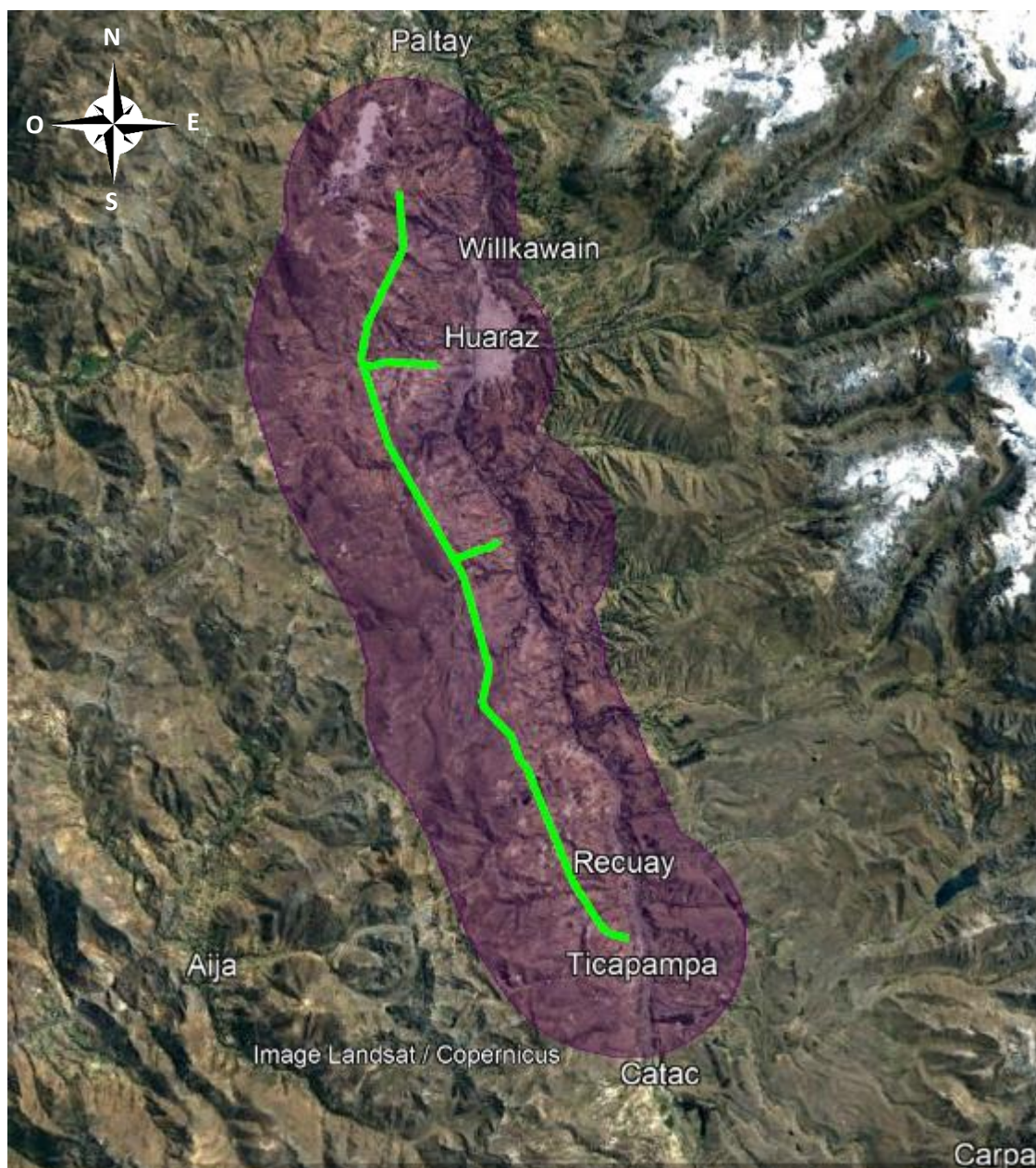


Figura 2 Área de estudio en la línea Huaraz (60 kV)

5 INFORMACIÓN HISTÓRICA DE ACTIVIDAD DE RAYOS

El cálculo de los parámetros del rayo descritos en este documento se realizó con base en información histórica de la actividad de rayos detectada durante los años 2012 a 2021 sobre el área de interés. Esta información ha sido generada por la red global de localización de rayos administrada por la Universidad de Sao Paulo en Brasil, cuya eficiencia de detección varía entre 50 y 80% sobre Suramérica [8-9]. Para la detección del rayo esta red utiliza el

método de la diferencia del tiempo de arribo – (Arrival Time Difference – ATD). A pesar de los valores de eficiencia en la detección de rayos, valores más precisos de los parámetros como la DDT y el NC pueden calcularse. Dado que el Nivel Ceráunico se define como la cantidad de días de tormenta en la que por lo menos se escucha un trueno, en este sentido la eficiencia de detección no afecta en gran proporción el cálculo de los valores reales de este parámetro.

En la Figura 3 se ilustra la ubicación de las antenas que componen esta red, la cual detecta y localiza descargas eléctricas atmosféricas sobre Suramérica, parte del Caribe y en menor proporción sobre África occidental [10].



Figura 3 Ubicación de las antenas de la red detección de rayos

5.1 Red de detección total de rayos LINET

LINET es una tecnología de detección de actividad total de rayos (rayos intra nube y nube-tierra). La técnica de detección se basa en medidas de las radiaciones VLF y LF producidas

por rayos, con las cuales se hace un análisis de soluciones en 3D a partir del método de detección TOA (Time Of Arrival). Para su evaluación se adelantaron campañas de medida en diferentes lugares del mundo (en toda Europa, Brasil, Australia, África y EE.UU.) donde su funcionamiento fue comparado con redes comúnmente usadas de LF y con sistemas avanzados y altamente costosos de VHF como SAFIR. Los resultados de estos estudios se presentan en [5-7]. La Figura 4 muestra el tipo de antena desarrollado y la red LINET que actualmente opera en Europa.



Antena LINET

Figura 4 Red Europea para la Detección Total de Rayos – LINET

La Figura 5 muestra un ejemplo de una tormenta severa observada por los sensores de LINET. El tipo de tormenta puede ser fácilmente identificado mediante tres parámetros principales: la relación entre la tasa de ocurrencia de rayos intra-nube IC y nube-tierra CG (IC flash rate/CG flash rate); las alturas de emisión de rayos intra-nube y las áreas de las celdas identificadas.

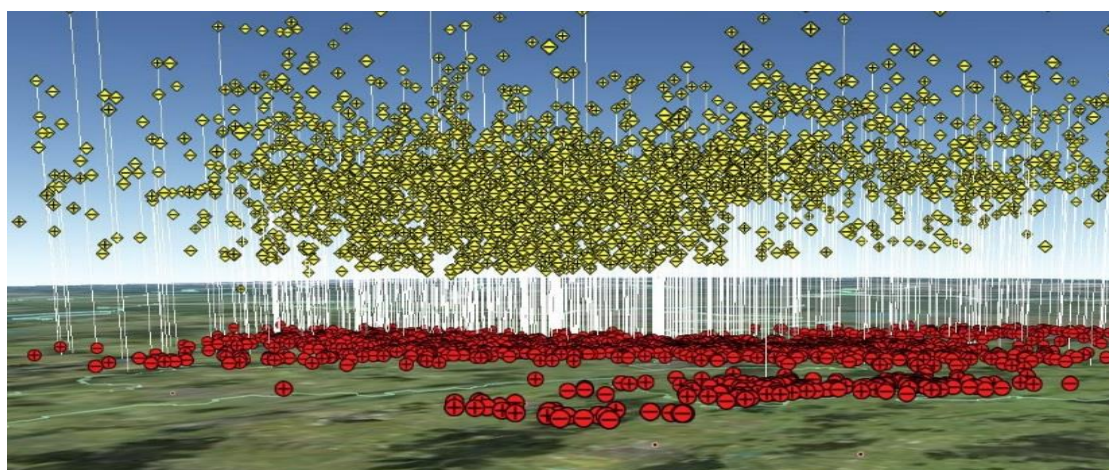


Figura 5 Detección Total de Rayos en 3D. Los puntos rojos ilustran los sitios de impacto en tierra mientras que los puntos amarillos muestran la ubicación y alturas de descargas intra-nube

5.1.1 Red de Detección Total de Rayos LINET en Perú

Durante el año 2018 se instalaron 15 antenas de campo magnético de tecnología LINET a lo largo del Perú. Desde el inicio de operación de la red, se han detectado más de 12.000.000 de rayos. Estos datos se utilizaron para validar los resultados obtenidos en el presente estudio. En la Figura 6 se presenta la configuración de la red a lo largo del territorio peruano, la cual permite realizar la detección de rayos en el área de interés actualmente.



Figura 6 Red de localización de rayos LINET en Perú

El esquema de manejo de información es ilustrado en la Figura 7. Todas las estaciones transmiten las señales detectadas hasta la Unidad de Procesamiento Central, allí se obtienen las soluciones para cada descarga arrojando la siguiente información:

- Tiempo de ocurrencia (con precisión de 100 ns)
- Amplitud de la corriente de retorno
- Discriminación (stroke intra-nube IC o nube-tierra CG)
- Latitud y longitud
- Polaridad
- Altura de emisión

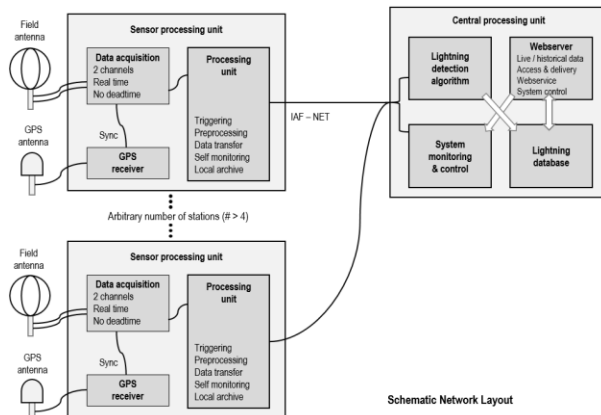


Figura 7 Descripción esquemática de los componentes de la red

6 METODOLOGÍA

Los registros históricos de rayos empleados para el cálculo de los siguientes parámetros han sido tomados de una de las redes de detección de rayos disponibles en la zona de análisis. Dado que la eficiencia de detección de redes globales es reducida, se han tomado como referencia estudios que evalúan su desempeño para obtener valores más precisos; así mismo, la comparación con otras redes de muy alta eficiencia, como la red LINET que opera en Colombia (desde 2011) y la Red LINET en Perú (2018), permiten validar los valores determinados de los parámetros de Nivel Ceráunico y Densidad de Descargas a Tierra.

La fuente de información es válida para analizar variables climáticas, como es el caso de la Densidad de Descargas a Tierra – DDT y el Nivel Ceráunico – NC de una región.

El Nivel Ceráunico se ha calculado teniendo en cuenta el número de días de tormentas eléctricas al año, registrados en áreas de 30 x 30 km. Se ha incluido el valor de este parámetro a través de isolíneas como se ve en la Figura 8. Para el cálculo de la DDT se utilizó la información de la red global de localización de rayos dado el tiempo de información sobre el área de interés y los registros disponibles de la Red LINET en el Perú desde 2018, permitiendo generar un análisis sobre áreas de 3x3 km².

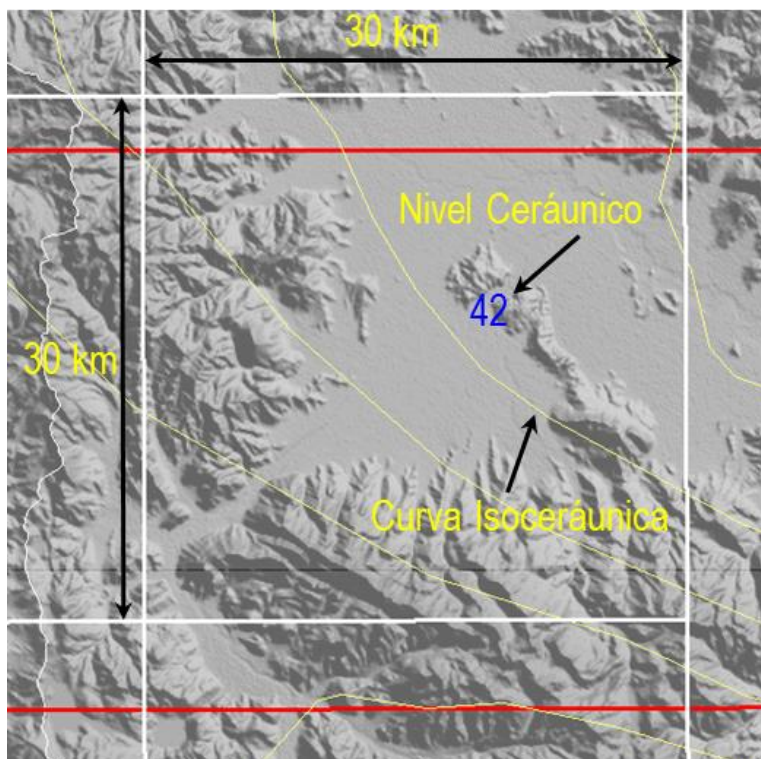


Figura 8 Área de cálculo del Nivel Ceráunico en una región

7 RESULTADOS

7.1 Nivel Ceráunico – NC

En la Figura 9 y Figura 10 se presenta el parámetro de NC por medio de líneas isoceráunicas, calculado para las regiones de análisis. Alrededor de la línea Huamachuco, ubicadas en los departamentos de La Libertad los valores de NC oscilan entre 45 y 70 días de tormenta promedio multianual, lo cual puede indicar que entre el 12% y 19% del año las líneas presentan riesgos de afectación por rayos. Este parámetro va aumentando en dirección suroeste.

En términos generales, sobre el trazado de la línea Huaraz el NC varía entre 70 y 95 días de tormenta al año, reduciéndose en dirección oeste. Los valores más altos se registran en el extremo sur de la línea.



Figura 9 Mapa de Nivel Cerámico sobre el trazado de la línea Huamachuco.

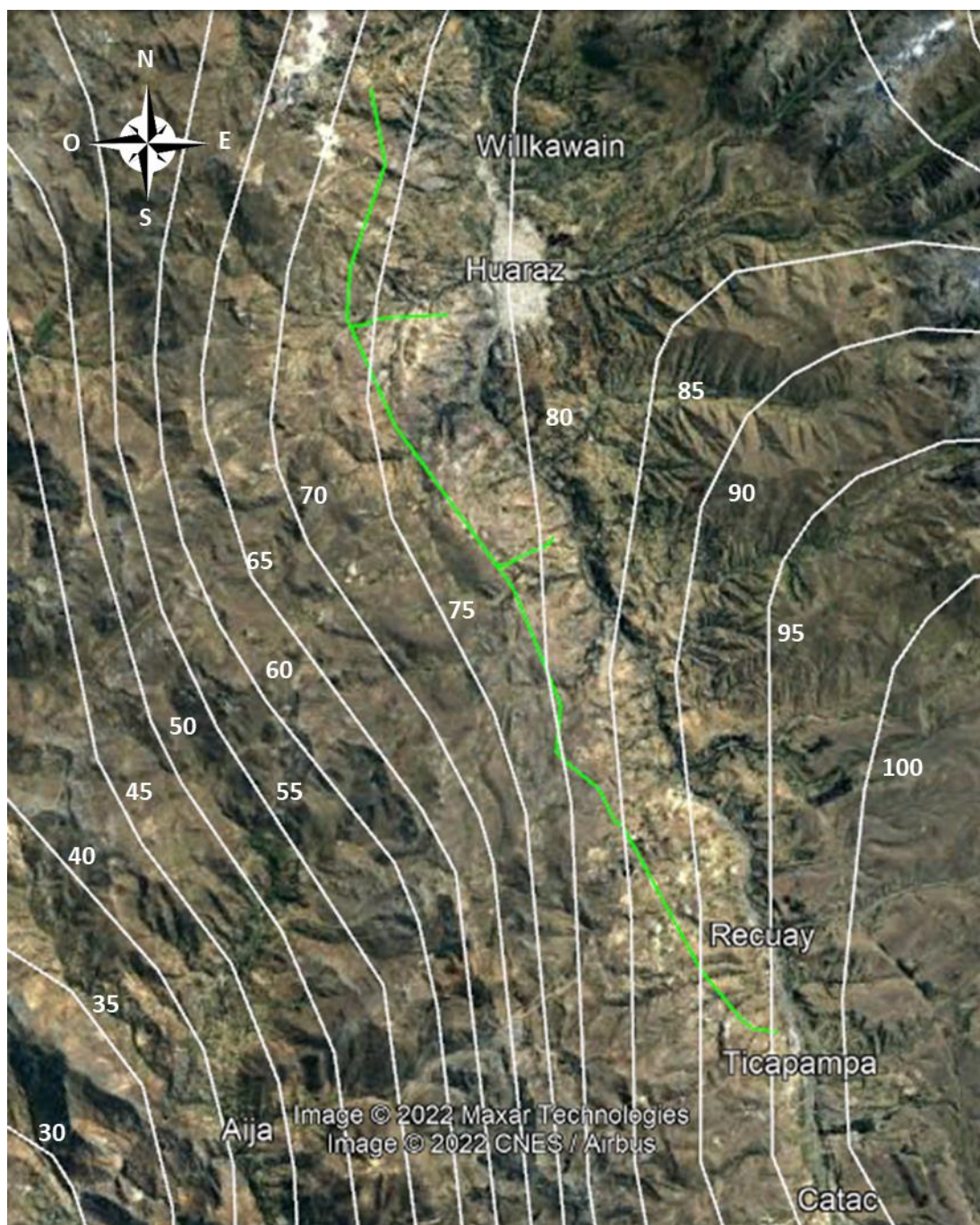


Figura 10 Mapa de Nivel Cerámico sobre el trazado de la línea Huaraz

7.2 Densidad de descarga a tierra – DDT (Ground Flash Density – GFD)

La Figura 11 y Figura 12 presentan se presentan los mapas de Densidad de Descargas a Tierras (DDT) en áreas con radios de 5 km a partir de los trazados analizados. Para cada mapa se presenta una escala de color que indica la cantidad de Rayos/km²-año, promedio multianual. Los valores de DDT fueron calculados en áreas de 3x3 km².

La región por la que atraviesa la línea Huamachuco presenta valores de DDT inferiores a 2,6 Rayos/km²-año. Específicamente, los valores máximos se registran en el centro y sur de este trazado alcanzando valores máximos cercanos a 2,4 Rayos/km²-año, mientras que los valores mínimos se presentan al norte de la línea, con valores cercanos a 1,2 Rayos/km²-año. El valor promedio de DDT en esta región corresponde a 1,7 Rayos/km²-año (Figura 11).

La zona de mayor actividad de rayos en la línea Huaraz se presenta al sur del trazado con 19,4 Rayos/km²-año. Los valores de DDT oscilan entre 1,3 y 19,4 Rayos/km²-año. El valor promedio de DDT en esta zona es de 7,7 Rayos/km²-año (Ver Figura 12).

En la Figura 13 y Figura 14 se presentan los perfiles de DDT y altitud para cada línea, tomando como referencia para la línea Huamachuco, puntos espaciados de 1 km, y para la línea Huaraz la ubicación propuesta de torres. En el Anexo A se detallan los valores de DDT para cada punto de referencia junto con la altitud, longitud y latitud.

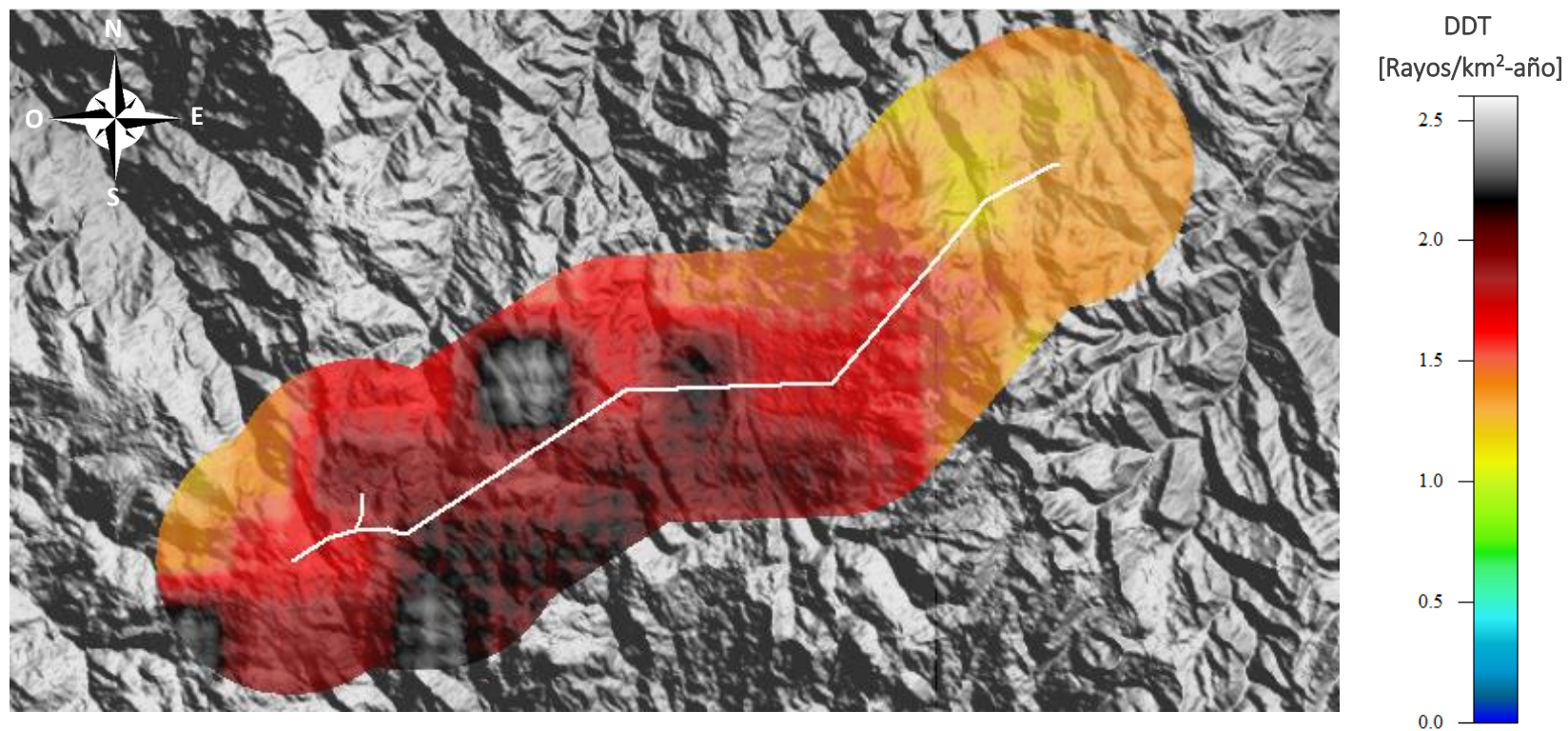


Figura 11 Mapa de Densidad de Descargas a Tierra sobre el trazado de la línea Huamachuco

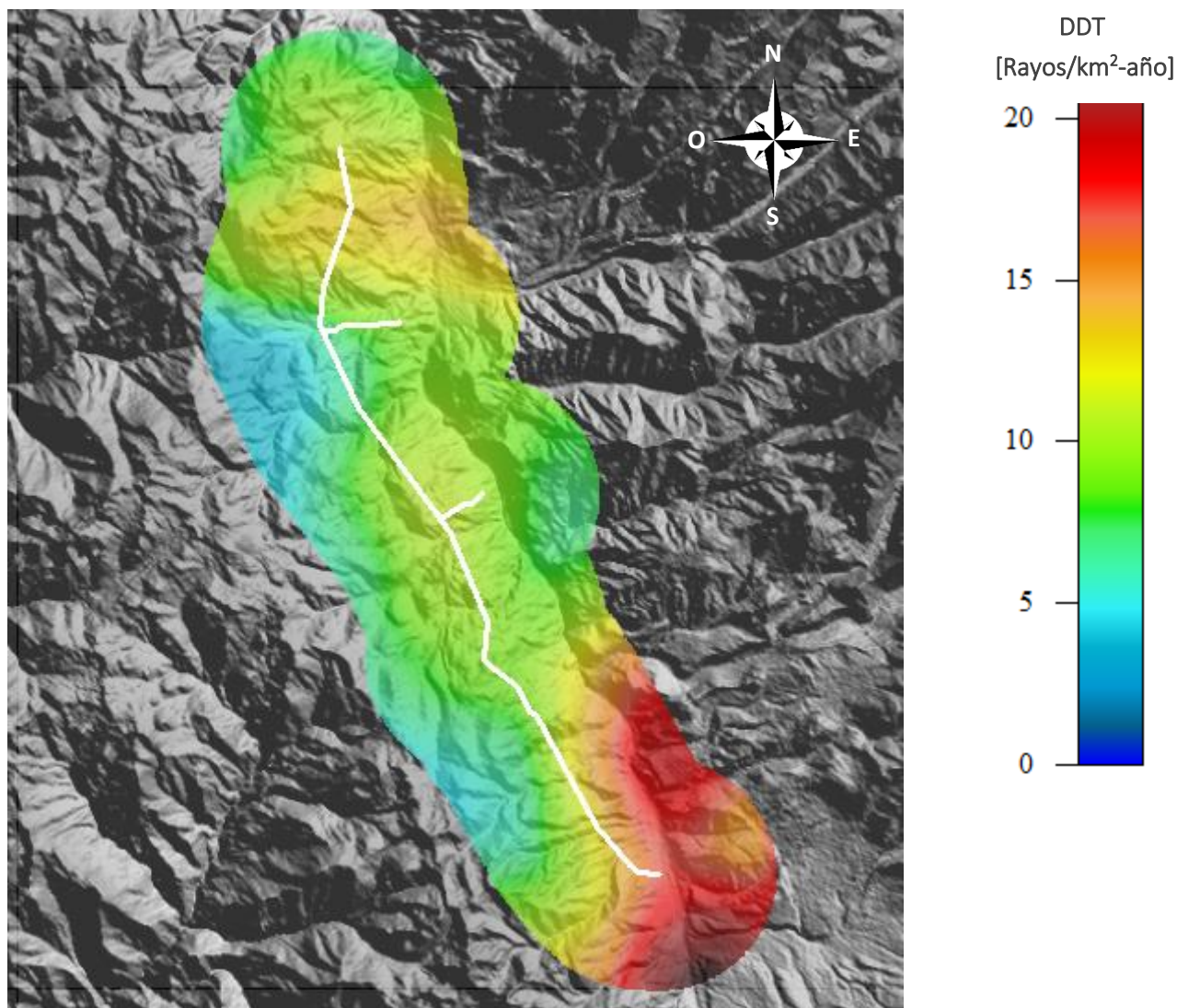


Figura 12 Mapa de Densidad de Descargas a Tierra sobre el trazado de la línea Huaraz

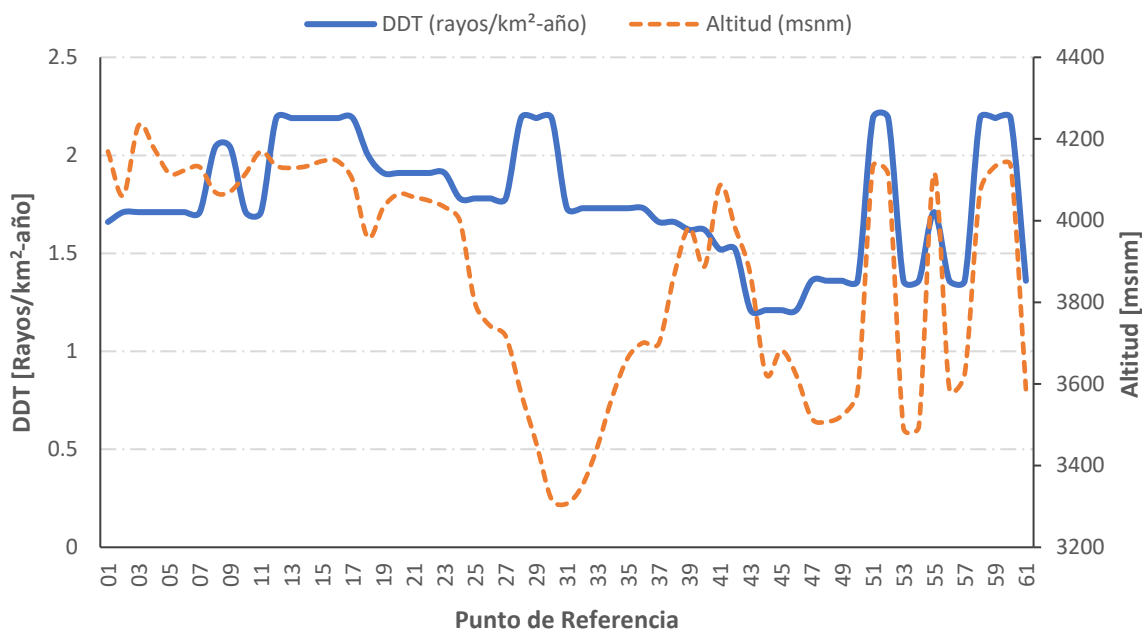


Figura 13 Parámetro de DDT sobre la línea Huamachuco

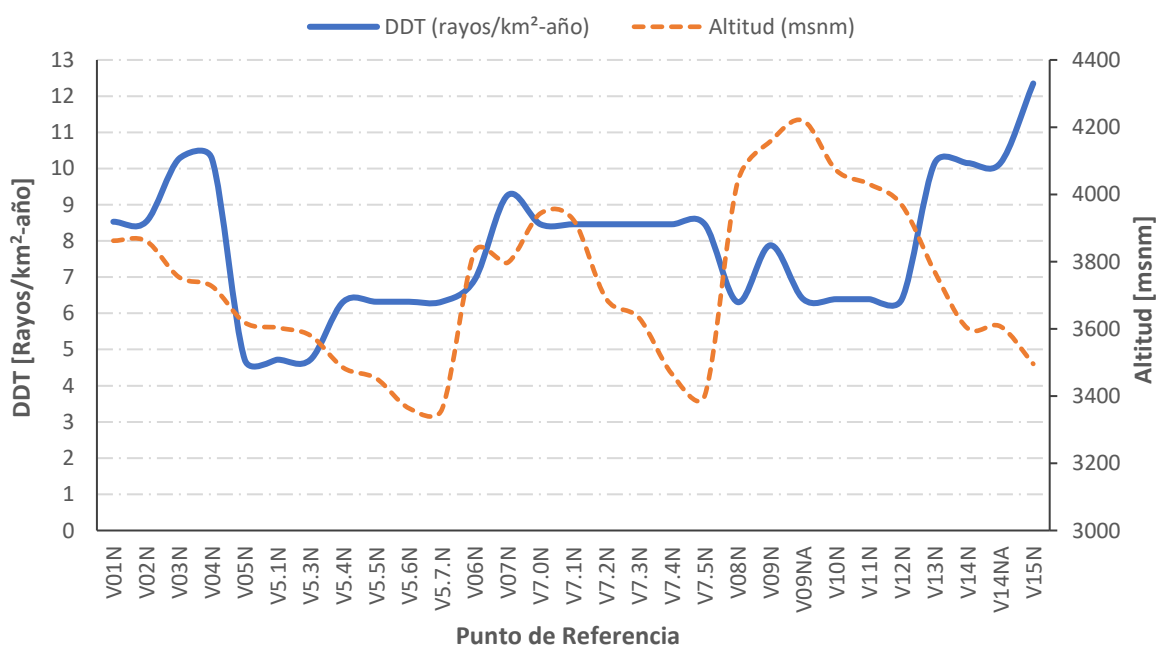


Figura 14 Parámetro de DDT sobre la línea Huaraz

7.3 ESTANDARIZACIÓN DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del parámetro de Densidad de Descargas a Tierra basados en sistemas de localización de alta eficiencia con frecuencia requieren ser comparados en estudios de ingeniería, con datos de otros sistemas de información de rayos previos. Tal información no puede ser comparada directamente debido a que tanto el desempeño de los sistemas, como los criterios de cálculo, son diferentes.

El presente numeral proporciona los criterios para que la información de diferentes fuentes pueda ser comparada y correctamente interpretada, con base en las normas internacionales más relevantes en el tema:

- “Cloud-to-Ground Lightning Parameters derived from Lightning Detection Systems. The effects of the performance” CIGRE Technical Brochure, num. 376, 2009.
- IEC62858 “Lightning density based on lightning location systems (LLS) – General principles”, 2015.

La norma IEC62858 proporciona las condiciones de calidad de información mínima que se requieren en un sistema de localización de rayos para poder estimar la Densidad de Descargas a Tierra en una región; dichos parámetros son:

- Eficiencia de detección de rayos nube-tierra: >80%
- Precisión de localización: < 500m
- Precisión en la clasificación de rayos intranube y nube-tierra: >85%

La Red Colombiana de Detección Total de Rayos - LINET”, cuyas características principales están asociadas a la eficiencia de detección de rayos nube-tierra que es superior a 90% en la mayor parte del territorio y en el área considerada en el presente estudio, la precisión de localización es inferior a 250 m. Con lo anterior, el sistema LINET representa una fuente adecuada para estudiar el parámetro DDT.

En particular, los sistemas con grandes distancias entre sensores o redes en las que el número de sensores que intervienen en una solución es menor a 4, presentan bajos valores de eficiencia en la detección y discriminación; tales sistemas cumplen parcialmente con todos los requerimientos descritos en la norma IEC62858. Por lo anterior, para lograr obtener conclusiones de aplicación en ingeniería, se hace necesario poder comparar los resultados de dichos sistemas con base en ciertos criterios.

Las diferencias en los resultados entre distintas fuentes dependen de la eficiencia del sistema y de los criterios de cálculo del parámetro DDT. Los sistemas convencionales de detección de rayos generalmente no incluyen la información de rayos con corrientes menores a 10 kA,

debido a que dichos datos pueden estar relacionados con rayos intra-nube mal discriminados o porque no logran detectar rayos con magnitudes inferiores a 10 kA de forma eficiente. De otro lado, las áreas de las grillas de cálculo usualmente son de 3 x 3 km² o 10 x 10 km² dependiendo del sistema. El área de cálculo usada en el presente estudio es de 3 x 3 km ≈ 9 km², obtenido de la siguiente regla dada por la norma IEC62858:

$$N_G \times T_{obs} \times A_{cell} \geq 80 \quad \text{Donde:}$$

N_G : Densidad de Descargas a Tierra, en Rayos/km²año.

T_{obs} : Periodo de observación en años.

A_{cell} : Área de la grilla de cálculo en km².

Teniendo en cuenta los valores de DDT esperados para la zona de estudio y con un tiempo de observación superior a 6 años es válido usarse un área de 3 x 3 km como resolución de análisis.

Para realizar la comparación de datos entre sistemas es necesario entonces considerar los mismos criterios de cálculo y de eficiencia; una aproximación es usar únicamente datos donde las magnitudes de corriente sean mayores a 10 kA y grillas de cálculo de 3 x 3 km.

8 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE CORRIENTE

En este numeral se presenta el análisis estadístico de la magnitud de la corriente pico de retorno de los rayos detectados sobre las áreas de análisis.

8.1 Línea Huamachuco

En la Figura 15 muestra la curva de probabilidad acumulada de corriente de los rayos detectados sobre la línea Huamachuco. En la Tabla 1 se presentan los datos estadísticos de la curva de corriente. El promedio de la magnitud de corriente en la zona es de 20,8 kA y su mediana de 12,5 kA. La corriente mínima detectada por la red es de 3,1 kA y la corriente que corresponde al percentil del 1% es de 4,3 kA.

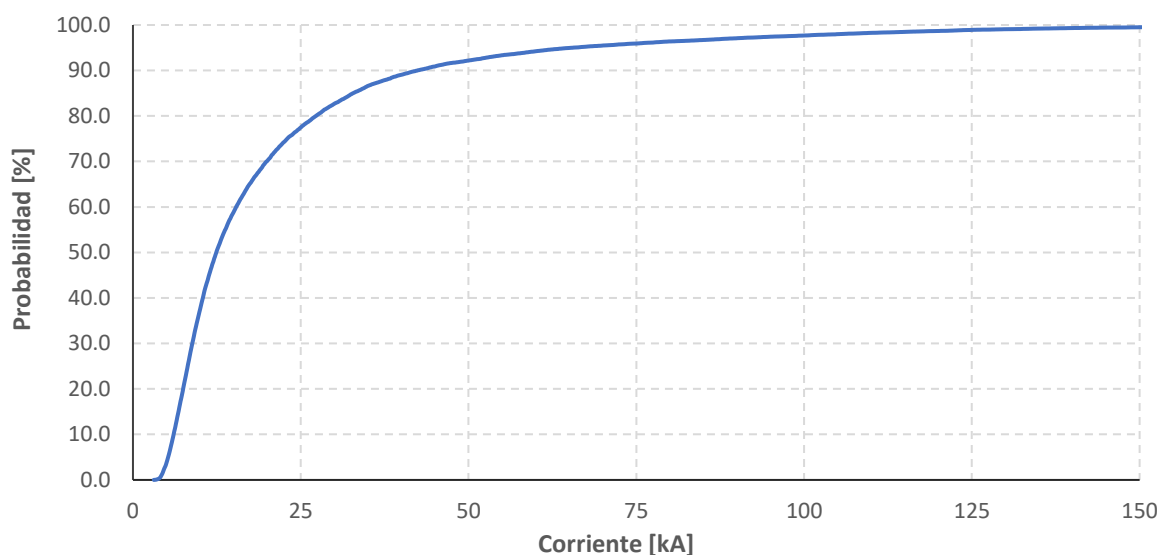


Figura 15 Curva de probabilidad acumulada de la magnitud de corriente en el área alrededor de la línea Huamachuco

Tabla 1 Parámetros estadísticos de la corriente de los rayos registrados alrededor de la línea Huamachuco

Número de rayos nube-tierra	21.359
Corriente promedio [kA]	20,8
Corriente mediana [kA]	12,5
Corriente mínima [kA]	3,1
Corriente máxima [kA]	246,3
Percentil 1 % [kA]	4,3
Percentil 10 % [kA]	6,1
Percentil 90 % [kA]	42,3
Percentil 99 % [kA]	125,7

8.2 Líneas Huaraz

En la Figura 16Figura 15 muestra la curva de probabilidad acumulada de corriente de los rayos detectados sobre la línea Huaraz. En la Tabla 2Tabla 1 se presentan los datos estadísticos de la curva de corriente. El promedio de la magnitud de corriente en la zona es de 13,5 kA y su mediana de 8,0 kA. La corriente mínima detectada por la red es de 2,1 kA y la corriente que corresponde al percentil del 1% es de 3,6 kA.

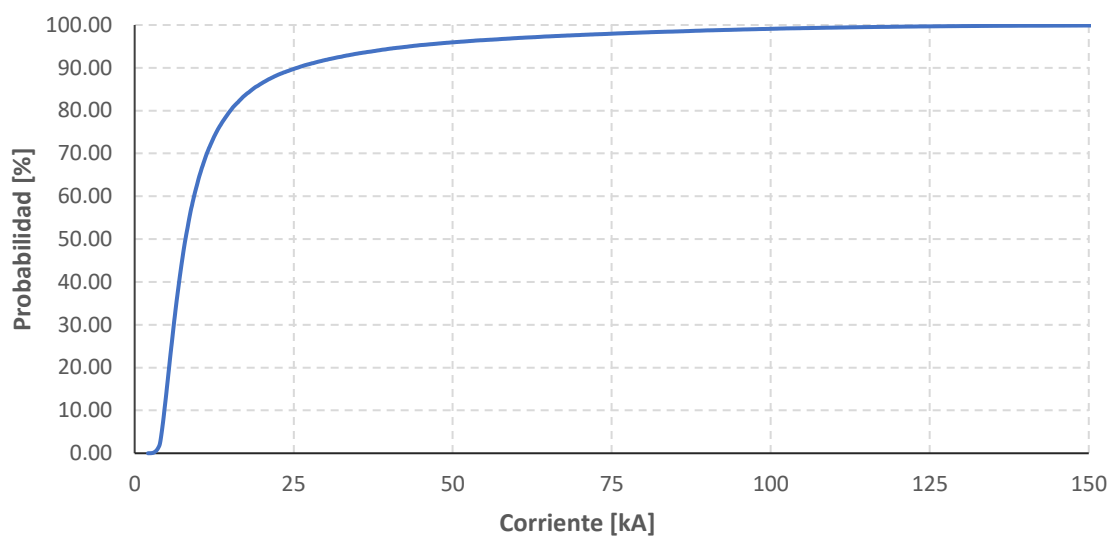


Figura 16 Curva de probabilidad acumulada de la magnitud de corriente en el área alrededor de la línea Huaraz

Tabla 2 Parámetros estadísticos de la corriente de los rayos registrados alrededor de la línea Huaraz

Número de rayos nube-tierra	67.247
Corriente promedio [kA]	13,5
Corriente mediana [kA]	8,0
Corriente mínima [kA]	2,1
Corriente máxima [kA]	238,7
Percentil 1 % [kA]	3,6
Percentil 10 % [kA]	4,7
Percentil 90 % [kA]	25,6
Percentil 99 % [kA]	96,9

9 CONCLUSIONES

- El nivel ceráunico sobre la línea Huamachuco oscila entre 45 y 70 días de tormenta al año lo cual indica que entre el 12% y 19% de los días del año existe riesgo de afectación sobre la infraestructura eléctrica por rayos.
- El nivel ceráunico sobre la línea Huaraz oscila entre 70 y 95 días de tormenta al año, registrando los valores más altos en el extremo sur de la línea.
- Los valores de DDT en la línea Huamachuco son inferiores a 3 Rayos/km²-año, variando entre 1,2 y 2,6 Rayos/km²-año. El valor promedio de DDT en esta región corresponde a 1,7 Rayos/km²-año.
- Los valores de DDT en la línea Huaraz oscilan entre 1,3 y 19,4 Rayos/km²-año. El valor promedio de DDT en esta zona es de 7,7 Rayos/km²-año.
- Los valores promedio, mediana, y percentil del 1% de la magnitud de corriente de los rayos detectados sobre el área circundante de la línea Huamachuco, para la totalidad de rayos son 20,8 kA, 12,5 kA y 4,3 kA, respectivamente.
- Los valores promedio, mediana, y percentil del 1% de la magnitud de corriente de los rayos detectados sobre el área circundante de la línea Huaraz, para la totalidad de rayos son 13,5 kA, 8,0 kA y 3,6 kA, respectivamente.

10 REFERENCIAS

- [1] Rakov, V. and Uman, M. Lightning. Physics and effects. Cambridge University Press; 2005.
- [2] Torres, H. El Rayo, Mitos leyendas Ciencia y Tecnología. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, 2002.
- [3] McGorman, W., Donald, T., Rust, D. The Electrical Nature of Storms, Oxford University Press, 1998.
- [4] Rodger, C. J., S. Werner, J. B. Brundell, E. H. Lay, N. R. Thomson, R. H. Holzworth, 251 and R. L. Dowden, Detection e_iciency of the VLF World-Wide Lightning Location 252 Network (WWLLN): initial case study, Annalesgeophysicae, 24, 3197-3214, 2006.
- [5] Holler, H., H.-D. Betz, K. Schmidt, R. V. Calheiros, P. May, E. Houngrinou, and G. Scialom, "Lightning characteristics observed by a VLF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany, Atmos. Chem. Phys., 9, 7795-7824, 2009.
- [6] Detection of Cloud Lightning with LINET Campaign at Kennedy Space Center, Florida. Report LINET Cloud Lightning by Nowcast. Summer 2010.
- [7] Holler, H., H.-D. Betz, K. Schmidt, R.V. Calheiros, P. May, E. Houngrinou, and G. Scialom, "LINET lightning characteristics observed on 4 different continents", EGU General Assembly, April 19-24, Vienna, 2009.IEEE 1410. Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Power Distribution Society, Transmission and Distribution Committee, 2004.
- [8] CIGRE Task Force C4.404A "Cloud to Ground Parameters Derived from Lightning Detection Systems", 2009.
- [9] "Cloud-to-Ground Lightning Parameters derived from Lightning Detection Systems. The effects of the performance" CIGRE Technical Brochure, num. 376, 2009.
- [10] IEC62858 "Lightning density based on lightning location systems (LLS) – General principles", 2015.
- [11] Morales.C.A., Neves. J. R. and others, "8 years of Sferics Timing And Ranging NETwork - STARNET: A Lightning Climatology over South America" 23rd International Lightning Detection Conference. Tucson – Arizona. 2014.
- [12] Morales.C.A., Neves. J. R. and others, "Sferics Timing And Ranging NETwork – STARNET: 8 years of measurements in South America". XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A.
- [13] D. Aranguren, J. Inampué, J. López, H. Torres, H. Betz. "Cloud to ground lightning activity in Colombia and the influence of Topography". Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 154, pp. 182–189, February 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2016.08.010>. 2016.

