

Metodología de mantenimiento de líneas de transmisión eléctrica



**Metodología para el mantenimiento de líneas de transmisión eléctrica de alta tensión en
el Valle del Cauca, Colombia.**

Autor:

Ledher Antonio Jurado C.

Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

Agosto de 2025

Metodología de mantenimiento de líneas de transmisión eléctrica

Metodología para el mantenimiento de líneas de transmisión eléctrica de alta tensión en el Valle del Cauca, Colombia.

Autor:

Ledher Antonio Jurado C.

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de Proyectos

Asesor(a)

Hugo Alejandro Muñoz Bonilla

Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

Agosto de 2025

Contenido

Lista de tablas.....	5
Lista de figuras	6
Lista de anexos.....	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.1. La pregunta de investigación.....	14
1.2. Los objetivos de investigación.....	14
1.2.1. Objetivo general	14
1.2.2. Objetivos específicos.....	14
1.3. Justificación de la investigación.....	15
2. MARCO DE REFERENCIA	17
2.1. Marco de Antecedentes	17
2.2. Marco Teórico	19
2.2.1. Fundamentos del mantenimiento en líneas de transmisión	20
2.2.2. Estrategias modernas de mantenimiento.....	20
2.2.3. Enfoques técnicos aplicados al contexto de Sur América	21
2.3. Marco Legal.....	22
2.3.1. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE	22
2.3.2. Código de Redes del Sistema Interconectado Nacional SIN	23
2.3.3. Ley 143 de 1994 de la Ley Eléctrico	23
3. METODOLOGÍA.....	24
3.1 Enfoque y alcance de la investigación.....	24
3.1.1. Enfoque de la Investigación.....	24
3.1.2. Alcance de la Investigación	25
3.2 Población y muestra	26
3.2.1 Definición de la población	26
3.2.2 Selección de muestra	27

Metodología de construcción de líneas de transmisión eléctrica

3.3 Instrumentos de recolección de datos	27
3.3.1 Recolección de Datos.....	28
3.3.2 Codificación de Datos.....	37
3.4 Análisis de Datos.....	43
3.4.1 Orden Publico	44
3.4.2 Accesibilidad	47
3.4.3 Análisis de fuentes documentales para para la parte técnica:.....	49
3.4.4 Análisis de fuentes documentales para para la parte normativa:.....	52
3.5 Análisis de Resultados	54
3.5.1 Orden público y accesibilidad en las líneas de transmisión en el Valle del Cauca: 54	
3.5.2 Aspectos técnicos y logísticos de las líneas de transmisión en el Valle del Cauca: 56	
3.5.3 Aspectos normativos de las líneas de transmisión en el Valle del Cauca:	58
3.5.4 Validación de datos con experto del sector eléctrico:	61
3.6 Consideraciones Éticas.....	63
4. CONEXIÓN DE RESULTADOS PARA LA METODOLOGÍA.....	64
4.1.1. Resultados.....	64
4.1.2. Metodología propuesta para el mantenimiento	65
4.1.3. Propuesta metodológica para el mantenimiento de líneas de transmisión eléctrica de alta tensión en el Valle del Cauca.....	66
4.1.4. Discusión de resultados	68
5. LIMITACIONES Y PROYECCIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES.....	69
6. CONCLUSIONES.....	71
Referencias	73
Anexos	81

Lista de tablas

Tabla 1. Tabla de datos líneas de transmisión Valle del Cauca.....	30
Tabla 2. Tabla de datos documentales técnicos.....	33
Tabla 3. Tabla de datos de documentos normativos	36
Tabla 4. Tabla de orden público vs zona, nivel de tensión, longitud, apoyos y accesibilidad....	44
Tabla 5. Tabla de accesibilidad vs zona, nivel de tensión, longitud, apoyos y orden público....	47
Tabla 6. Tabla de fuentes documentales para la parte técnica.....	50
Tabla 7. Tabla de fuentes normativas para el mantenimiento de líneas de transmisión	52

Lista de figuras

Figura 1. Datos codificados líneas de transmisión del 1 al 19 e introducidos en JASP.....	38
Figura 2. Datos codificados líneas de transmisión del 20 al 43 e introducidos en JASP.....	39
Figura 3. Datos codificados de documentos técnicos en JASP	41
Figura 4. Datos codificados de documentos normativos en JASP.....	43
Figura 5. Orden público en Zona sur y norte del Valle del Cauca.....	44
Figura 6. Riesgo de orden público líneas de tensión en el Valle del Cauca.....	45
Figura 7. Riesgo de orden público por longitud de líneas de transmisión en Valle del Cauca ..	45
Figura 8. Riesgo de orden público por cantidad de apoyos en las líneas de transmisión.	46
Figura 9. Riesgo de orden público por accesibilidad en las líneas de transmisión.....	46
Figura 10. Difícil accesibilidad de acuerdo a las zonas en el Valle del Cauca.	47
Figura 11. Difícil accesibilidad de acuerdo a los niveles de tensión en el Valle del Cauca	48
Figura 12. Difícil accesibilidad de acuerdo a la longitud de las líneas de transmisión.....	48
Figura 13. Difícil accesibilidad de acuerdo a número de apoyos en las líneas de transmisión .	49
Figura 14. Fuentes del tipo preventivo - logístico	50
Figura 15. Fuentes del tipo preventivo/correctivo - Logístico.....	50
Figura 16. Fuentes del tipo Preventivo – Técnico.....	50
Figura 17. Fuentes del tipo Preventivo/correctivo – técnico	51
Figura 18. Fuentes para mantenimientos preventivos	51
Figura 19. Fuentes para mantenimientos preventivos/correctivos	51
Figura 20. Fuentes de mantenimiento preventivo de los años 2000 al 2025	51
Figura 21. Fuentes de mantenimiento preventivo/correctivo de los años 2000 al 2025	52
Figura 22. Entidades encargadas de la parte técnica	53
Figura 23. Entidades encargadas de la parte regulatoria	53
Figura 24. Normas que se aplican al área técnica.....	53
Figura 25. Normas aplicables al área regulatoria	53
Figura 26. Aplicabilidad técnica a nivel nacional	53
Figura 27. Aplicabilidad regulatoria a nivel nacional.....	53
Figura 28. Obligatoriedad de normas técnicas.	54
Figura 29. Obligatoriedad de normas regulatorias.....	¡Error! Marcador no definido.4

Lista de anexos

Anexo 1. Correlación de graficas para accesibilidad y orden público, utilizando JASP.....	81
Anexo 2. Correlación de graficas para aspectos tecnicos y logísticos, utilizando JASP	81
Tabla 3. Correlación de graficas para normativas de mantenimiento de LAT, utilizando JASP .	82

RESUMEN

La investigación evaluara una metodología para el mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión en el Valle del Cauca, donde se integren variables de accesibilidad, orden público, técnicas, logísticas y normativas, de tal forma que se pueda asegurar una operación eficiente, segura y continua. Para esto se realizó mediante un enfoque cualitativo descriptivo, a través de revisiones documentales con distintas fuentes, matrices de datos y la codificación de variables; los datos fueron procesados en JASP, y La evidencia se complementó mediante una validación experta.

Los resultados obtenidos muestran que hay mayor de riesgo de orden público y dificultad en cuanto a accesibilidad para la zona de Valle Sur; se analizaron datos de longitud y número de apoyos de las líneas entre otros, que aumentarían los desafíos operativos. en la investigación predomina las fuentes de mantenimiento preventivo, y especialmente las que destacan en el aspecto logístico de personal capacitado y herramientas especializadas.

En la monografía se propone una metodología en base al diagnóstico de orden público, accesibilidad, técnico y logístico; posteriormente realizar la priorización de las líneas de transmisión; y realizar los mantenimientos de acuerdo a las condiciones de monitoreo e inspecciones; finalmente se debe asegurar los marcos normativos y regulatorios aplicables en Colombia. Con esto se espera reducir indisponibilidades, optimizar recursos y fortalecer la sostenibilidad para los distintos operadores y usuarios. Una de las limitaciones en la investigación esta en el uso de fuentes documentales con ausencia del trabajo en campo debido a la accesibilidad, por lo que es recomendable realizar verificaciones en sitio para futuras investigaciones.

ABSTRACT

This research evaluates a methodology for the maintenance of high-voltage transmission lines in Valle del Cauca, integrating variables of accessibility, public order, technical, logistical, and regulatory aspects to ensure efficient, safe, and continuous operation. A qualitative descriptive approach was applied, based on documentary reviews from diverse sources, data matrices, and variable coding. The information was processed using JASP, and the evidence was complemented through expert validation.

The results indicate that the southern area of Valle del Cauca presents the greatest risks regarding public order and accessibility. Data such as line length and the number of supports were analyzed, revealing operational challenges. The review highlighted preventive maintenance strategies, particularly those emphasizing logistical aspects, including trained personnel and specialized tools.

The monograph proposes a methodology based on diagnosing public order, accessibility, technical, and logistical conditions; subsequently prioritizing transmission lines; and implementing maintenance according to monitoring and inspection outcomes. Additionally, compliance with Colombian regulatory frameworks must be ensured. This approach is expected to reduce unavailability, optimize resources, and strengthen sustainability for operators and users. A limitation of the study lies in the reliance on documentary sources without fieldwork due to accessibility restrictions; therefore, future research is recommended to include on-site verification.

Palabras clave: Líneas de transmisión, Mantenimiento preventivo, Orden público.

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de las líneas de transmisión eléctrica de alta tensión es muy importante porque a través de ellas es posible garantizar la confiabilidad y continuidad del suministro eléctrico en distintas regiones del país, especialmente en lugares que cuentan con una infraestructura que ya está envejecida o que tienen condiciones geográficas desafiantes, como es el caso del Valle del Cauca. Estas estructuras eléctricas operan dentro del Sistema Interconectado Nacional, y han cumplido funciones fundamentales durante décadas, debido a esto requieren estrategias de mantenimiento planeadas para asegurar su operación segura, eficiente y sostenible en el tiempo.

El mantenimiento de las líneas de transmisión eléctrica de alta tensión es exigente porque requiere enfoques muy precisos y continuos, que combine metodologías preventivas y correctivas. Si lo vemos para el caso de Colombia, se han aplicado metodologías como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad a líneas de 115 kV, 230 kV o de 500 kV, que están integradas con normas como la CREG 015 de 2018; en este campo se emplean tecnologías como termografía, monitoreo de condición en tiempo real, y se lo combina con sistemas de gestión ERP como SAP para optimizar recursos y cumplir con la regulación.

Para el Valle del Cauca, muchas líneas de transmisión eléctrica de alta tensión tienen más de 50 años desde que entraron en operación, lo que genera la necesidad de realizar campañas de mantenimiento, para poder evitar fallas que provoquen interrupciones prolongadas y afectan a los sectores residenciales y a los industriales. Las estrategias de mantenimiento se deben hacer mediante inspecciones periódicas, con reubicación de servidumbres, medición de puesta a tierra, realizar monitoreo de aisladores y estar a la vanguardia en las actualizaciones tecnológicas para optimizar los costos operacionales para de esta forma evitar el reemplazo prematuro de activos solo cuando sea necesario.

También es importante ver que el enfoque del mantenimiento preventivo se fortalece cuando integra tecnologías, como sistemas de monitoreo en tiempo real (PMUs, WAMS), detección de descargas parciales y modelados dinámicos, que van a permitir detectar las anomalías y se podrán programar intervenciones oportunas, que reduzcan el riesgo de fallas y mejoren la capacidad de respuesta del sistema interconectado.

El propósito de esta monografía es proponer una metodología funcional para el mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión en el Valle del Cauca. La intención es que se integren técnicas que permitan mantener la infraestructura existente y prolongar su vida útil de una manera eficiente. Con esta investigación se abordará la planificación de tareas preventivas y correctivas, la adopción de tecnologías de monitoreo y análisis de riesgo, así como los modelos normativos aplicables.

Con este enfoque sería posible generar recomendaciones para operadores como Celsia o EPSA, y reducir impactos operativos asociados a interrupciones, para después tener lineamientos que orienten a políticas que impulsen a una gestión sostenible de la infraestructura eléctrica. También, se busca que esta investigación se pueda servir como referencia técnico académica para mantenimientos, a los interesados en planes de renovación de activos de alta tensión en Colombia.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las líneas de transmisión de alta tensión eléctrica son muy importantes para garantizar un suministro continuo y confiable de la energía eléctrica a nivel nacional. Para el caso del departamento del Valle del Cauca, el crecimiento económico e industrial hace que se genere una mayor demanda energética, y esto a su vez incrementa la presión sobre los sistemas de transmisión que ya están existentes. Mucha de esta infraestructura presenta retos que se relacionan con el envejecimiento de sus componentes, la exposición a las condiciones climáticas, y la limitada intervención de mantenimientos preventivo y correctivo. Cuando se unen estas condiciones se eleva la probabilidad de fallas, que a su vez se derivan en interrupciones del servicio eléctrico y hay afectaciones a la estabilidad del sistema interconectado nacional con pérdidas económicas tanto para las empresas operadoras como para los usuarios finales.

Para tener un enfoque centrado en el mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión, y sobre todo en zonas que tienen problemas de orden público o de difícil acceso como son las áreas montañosas o rurales del Valle del Cauca. De lo anterior vemos que hay deficiencias en la identificación oportuna de posibles riesgos técnicos. De acuerdo con Rosa y Silva (2021), las fallas técnicas en la infraestructura eléctrica están relacionadas con la obsolescencia tecnológica, y también con la ausencia de programas de mantenimiento predictivo basados en tecnologías de diagnóstico avanzado. A esto se suma la escasa implementación de herramientas como drones, sensores inteligentes o sistemas de inspección térmica por infrarrojos, tecnologías que han demostrado ser eficaces en otros países para anticipar y mitigar riesgos.

En Colombia tenemos el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), actualizado por el Ministerio de Minas y Energía (2024), en él se establecen los lineamientos

mínimos de seguridad y operación para los sistemas eléctricos, pero, no especifica un marco operativo obligatorio para el mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión. Debido a esta ausencia de estandarización se dificulta la articulación de políticas técnicas preventivas con un enfoque territorial, lo que limita la efectividad de las inversiones en infraestructura energética. Además, debemos tener en cuenta que según el Plan de Expansión de Transmisión 2022-2036, se proyecta una mayor densidad de líneas en la región, lo que hace aún más crítica la necesidad de mecanismos de monitoreo continuo y mantenimiento con base en análisis de riesgos.

De acuerdo a Ramírez, Vargas & Castro, (2021) debemos analizar los riesgos del entorno geográfico del Valle del Cauca, como la humedad, la corrosión por salinidad en áreas costeras como Buenaventura y el vandalismo, estos requieren enfoques especializados en el mantenimiento, tanto en torres como en conductores y componentes de aislamiento. Si se ignoran los anteriores factores se podría comprometer la seguridad de la infraestructura, y la integridad de los trabajadores.

Por lo anterior existe la necesidad de investigar y formular estrategias técnicas y operativas para el mantenimiento de las líneas de transmisión de alta tensión en el Valle del Cauca. Estas estrategias incluirán diagnósticos basados en tecnologías emergentes, análisis de riesgos, políticas del mantenimiento correctivo, predictivo y preventivo, y planes de formación para los equipos técnicos responsables de la operación y mantenimiento.

1.1. La pregunta de investigación

¿Cómo evaluar una metodología de mantenimiento para líneas de transmisión eléctrica de alta tensión que considere factores geográficos, técnicos y logísticos para garantizar una ejecución eficiente y adecuada en el Valle del Cauca?

1.2. Los objetivos de investigación

1.2.1. Objetivo general

Evaluar una metodología para el mantenimiento de líneas de transmisión eléctrica de alta tensión en el Valle del Cauca, que considere variables geográficas, técnicas, logísticos y normativos, con el propósito de garantizar su operación eficiente, segura y continua.

1.2.2. Objetivos específicos

Analizar los factores geográficos y orden público que influyen en la planificación y ejecución del mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión eléctrica en el Valle del Cauca.

Identificar los aspectos técnicos y logísticos que se involucran en las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo de las líneas de transmisión de alta tensión en el Valle del Cauca.

Examinar las normas y regulaciones de Colombia que se aplican al mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión, para incorporarlas en la metodología adecuada en el Valle del Cauca.

1.3. Justificación de la investigación

El sistema de transmisión de energía eléctrica de Colombia es muy importante para garantizar la continuidad y calidad del servicio en los sectores empresariales y residenciales. De acuerdo a los datos del Informe de Expansión de Referencia Generación - Transmisión publicado por la UPME (2022), el sistema de transmisión nacional tiene más de 27.000 km de líneas de alta tensión, de los cuales en su mayoría atraviesan lugares con condiciones geográficas difíciles, como es el caso del Valle del Cauca. En esta región hay mucha diversidad topográfica en la que se incluye zonas montañosas, selváticas y costeras, con condiciones climáticas difíciles, y también con presencia de comunidades étnicas o conflictos de orden público que dificultan el acceso y la ejecución de labores técnicas.

Debido a esto, el mantenimiento preventivo y correctivo de las líneas de transmisión son importantes porque permiten evitar fallas catastróficas, reducir la indisponibilidad del sistema y aumentar la vida útil de los activos. De acuerdo con el operador del sistema XM S.A., durante el primer semestre de 2023 se presentaron más de 120 eventos de indisponibilidad por fallas en líneas de transmisión en todo el país, siendo varios de ellos localizados en el suroccidente colombiano, incluyendo el Valle del Cauca (XM, 2023). Estos eventos generan pérdidas económicas muy altas y ponen en riesgo el suministro energético a industrias, centros urbanos y zonas rurales.

Aunque es muy importante, el mantenimiento en Colombia todavía tiene deficiencias por los distintos retos que aún existen como la falta de metodologías adaptadas a las realidades locales, la integración de tecnologías emergentes como son drones, sensores remotos o mantenimiento, y debilidades por la logística en zonas de difícil acceso. Adicional, la Resolución CREG 015 de 2018 establece requisitos técnicos y de calidad que obligan a las

empresas a implementar programas de mantenimiento confiables, supervisables y trazables, lo que aumenta la necesidad de contar con metodologías sólidas y adaptables.

Esta investigación se justifica por la necesidad de diseñar una metodología para el mantenimiento de líneas de transmisión en el Valle del Cauca, considerando factores geográficos, técnicos, logísticos y de gestión de riesgos. Esta metodología debe responder a las exigencias normativas, aprovechar tecnologías modernas y que exista sostenibilidad del sistema eléctrico. También sirve para la formulación de planes estratégicos por parte de las empresas, entidades y los agentes del mercado eléctrico.

Si vemos el punto de vista metodológico, con la investigación se buscará estructurar un enfoque que sea descriptivo con análisis cualitativo y permita sistematizar la información técnica y normativa del mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión, que será un insumo metodológico que se aplicara a los diferentes estudios académicos, se utilizara una triangulación documental, y análisis de información que aporte profundidad al tratamiento de datos que se está estudiando.

Esta investigación se alinea a la innovación, sostenibilidad empresarial y valor compartido porque quiere representar un aporte a la literatura nacional acerca de la gestión de infraestructura eléctrica enfocada a las líneas de transmisión de alta tensión con mantenimientos eficientes que contribuyan a la sostenibilidad empresarial con reducción de costos, con mejor seguridad, evitar fallas en las líneas, que a su vez generara la confiabilidad del sistema eléctrico, sostenibilidad y eficiencia operativa en el Valle del Cauca, lo que sería un valor compartido. La investigación se fortalecerá mediante la aplicación de metodologías cualitativas al estudio de un problema que es actual y será vigente en los próximos años.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Marco de Antecedentes

El mantenimiento de las líneas de transmisión eléctrica de alta tensión es importante por la confiabilidad que debe haber en el sistema de transmisión y en la seguridad operativa. Durante mucho tiempo, varias investigaciones han abordado metodologías, tecnologías y enfoques para garantizar un funcionamiento continuo y seguro de estas infraestructuras críticas.

En el estudio de Díaz Concepción, A., Villar Ledo, L., Cabrera Gómez, J., Alfonso Álvarez, A., Guillén, J., & Palomino Marín, E. (2021). Con título “Análisis de una estrategia de mantenimiento a implementar en empresas de transmisión eléctrica”, nos dice que un modelo de gestión de mantenimiento se basa en criterios de evaluación por el estado de la infraestructura y en el análisis de riesgo asociado a cada componente de las líneas de transmisión. Los autores destacan la importancia de integrar datos de monitoreo remoto con inspecciones periódicas para lograr decisiones de mantenimiento más precisas y oportunas.

El Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan en Argentina tiene investigaciones de mantenimiento predictivo y de confiabilidad en líneas de transmisión, especialmente en regiones con geografía compleja como es en la cordillera de los Andes. En el trabajo de Olivares y Patiño (2019), se describe cómo los factores geográficos y climáticos afectan directamente la frecuencia de fallos en componentes como torres, aisladores y conductores, lo que obliga a adaptar metodologías de mantenimiento según la zona de intervención.

En Colombia, estudios como los de Ramírez y Castellanos (2021) en la Universidad Nacional de Colombia nos muestran la necesidad de implementar una modernización en las

estrategias de mantenimiento aplicadas por empresas como ISA Inter Colombia y Celsia. Estos autores dan importancia a las recomendaciones técnicas y la ejecución real del mantenimiento, debido a limitaciones logísticas, presupuestales y operativas, especialmente en zonas rurales o de difícil acceso como algunas regiones del Valle del Cauca.

También, la comisión de Regulación de Energía y Gas (2023), en la “Resolución CREG 101-009 de 2023” se tiene lineamientos para la eficiencia, calidad y continuidad de los servicios en redes de transmisión para mantenimientos y esquemas correctivos y hacia modelos más preventivos y predictivos, especialmente apoyados en tecnologías como inspección con drones, sensores y análisis de datos. Estos lineamientos, aunque se han adoptado parcialmente por los operadores de red en Colombia, aún existen vacíos a gran escala.

En el estudio de Li, J., Zhang, Y., Guo, S., Liu, B., & Sun, J. (2021), titulado “Risk analysis using failure modes, effects, and criticality analysis for transmission network assets. Energies”, se clasifica la ocurrencia de fallos y el impacto que tendrían sobre un sistema de transmisión, haciendo énfasis y priorizando los componentes críticos que componen a la infraestructura de transmisión como son las torres, conductores y aisladores, teniendo una priorización se podrá facilitar tomar decisiones y estimar programación de mantenimientos optimizando recursos técnicos y económicos, En este enfoque también se tiene en cuenta exigencias del sector eléctrico como la confiabilidad, seguridad y sostenibilidad del suministro.

De Europa podemos ver la experiencia de países como España y Noruega que se ha documentado en investigaciones como la de García et al. (2021), “Advanced inspection and predictive maintenance technologies for overhead power lines in mountainous terrains”, en la que se destaca el uso de drones, inteligencia artificial y sensores para monitorear el estado de los componentes estructurales de las líneas. El estudio nos muestra cómo las tecnologías permiten detectar fallas y reducir los costos operativos, lo que representa mejoras de eficiencia

en zonas que son difíciles por su geografía como el Valle del Cauca, especialmente en áreas rurales de difícil acceso.

Otro referente es el estudio realizado por Mahdavi, Tavakkoli-Moghaddam y Rahimi (2020), titulada “A comprehensive review on maintenance planning and scheduling in power transmission systems”. Donde se aborda temas de la planificación del mantenimiento. Y donde los autores concluyen que las principales brechas que existen están en la falta de integración entre planificación técnica y la gestión logística.

Si tenemos una perspectiva internacional, autores como Sarma et al. (2021) con su estudio “Condition based maintenance” proponen enfoques de mantenimiento centrados a redes de alta tensión en India, donde obtuvieron resultados en reducción de interrupciones no planificadas. Este tipo de estudios son muy importantes para el contexto colombiano, porque va a optimizar recursos y reducir el impacto de las operaciones de mantenimiento.

Así vemos que los antecedentes investigativos demuestran que la gestión efectiva del mantenimiento en líneas de transmisión de alta tensión requiere una integración entre tecnología, análisis de riesgos, planificación logística y adaptación geográfica. Y de acuerdo a esto es posible ver la importancia de desarrollar una metodología específica para el caso del Valle del Cauca, en donde convergen desafíos técnicos y territoriales únicos que condicionan la eficiencia del servicio eléctrico.

2.2. Marco Teórico

Ahora, en el marco teórico analizaremos las fuentes y teorías que explican los métodos involucrados en la planificación y mantenimiento de las líneas de transmisión eléctrica de alta tensión en este caso para el departamento del Valle del Cauca.

2.2.1. Fundamentos del mantenimiento en líneas de transmisión

El mantenimiento de líneas de transmisión eléctrica de alta tensión es esencial para que haya una continuidad del servicio, para minimizar interrupciones de energía y prolongar la vida útil de los activos que la componen. Existen tres tipos principales de mantenimiento: correctivo, preventivo y predictivo. El mantenimiento correctivo se realiza tras una falla y puede implicar riesgos operativos y altos costos. En contraste, el mantenimiento preventivo se realiza periódicamente según un calendario preestablecido, mientras que el predictivo se basa en la condición real de los equipos, utilizando sensores y sistemas de monitoreo para detectar fallos inminentes según IEEE Power and Energy Society, (2019).

Según Sosa Gómez (2023), el mantenimiento preventivo es el más común que realizan las empresas dedicadas a este sector en América Latina porque su costo operativo frente al correctivo es menor, pero la eficacia de este preventivo depende de una correcta planificación y diagnóstico de las condiciones del sistema de transmisión. Este autor también nos dice que la alta tensión implica riesgos más grandes, por lo que la rigurosidad en cuanto a protocolos y capacitación técnica es mayor.

También, la Guía CIGRÉ 657 (2016) que habla sobre el mantenimiento de líneas aéreas de transmisión destaca la importancia de planes que tengan incluidos cronogramas ajustados al ciclo de vida de los componentes, con inspecciones anuales, mantenimientos cada cinco años y monitoreo constante en zonas de riesgo.

2.2.2. Estrategias modernas de mantenimiento

De acuerdo al avance de la tecnología, actualmente existen metodologías basadas en la condición (CBM, Condition-Based Maintenance), las cuales utilizan datos en tiempo real y de esta forma se pueden tomar decisiones. Según Mahdavi et al. (2020), en su artículo "Condition

monitoring of overhead transmission lines using artificial intelligence” afirman que la implementación de inteligencia artificial en los monitoreos ayuda a detectar posibles daños antes de que se conviertan en fallos críticos, y de esta forma se mejora la confiabilidad del sistema.

También es importante el uso de drones para realizar inspecciones visuales de forma remota, y se ha estado adoptando en países como Brasil y Colombia, estos ayudan a reducir riesgos humanos y de esta forma se mejora la cobertura total de la infraestructura que se encuentre en zonas de difícil acceso de acuerdo a Navarro & Tavares, (2021). Podemos examinar que la norma IEC 60826 (2021) recomienda hacer uso de tecnología que no sea invasiva como cámaras termográficas, ultrasonido y análisis de descargas para poder evaluar el estado de componentes sin necesidad de desenergizar las líneas.

De acuerdo con Boada y Vahos Zuleta (2021), la implementación de estas estrategias debe ir acompañada de una evaluación financiera, donde se considere el ciclo de vida de los activos, los costos que tienen las posibles falla y cuáles serían los beneficios.

2.2.3. Enfoques técnicos aplicados al contexto de Sur América

En los modelos de mantenimiento de Sur América se debe considerar siempre la geografía compleja, y como la inversión se da de acuerdo a las zonas donde se ejecutan. En el estudio de Chowdhury y Koval (2022) con título “A strategic maintenance framework for developing countries”, se realiza un planteamiento que se adapta a los países que están en desarrollo y se centra a eventos climáticos extremos, vandalismo y desastres naturales. De acuerdo a este enfoque se promueve el uso de sistemas georreferenciados, mapas de vulnerabilidad y alertas tempranas ante cualquier hecho.

Mirando el caso de Colombia, para el mantenimiento de redes eléctricas en el Valle del Cauca, vemos la necesidad de adoptar metodologías integradas que combinen inspección terrestre, satelital y aérea para que se maximice la eficiencia en regiones montañosas y de difícil acceso. Y que a su vez se profundice en la capacitación del personal de campo, los procedimientos y la documentación de hallazgos para retroalimentar la gestión del mantenimiento.

Finalmente, hacer uso de plataformas digitales como SAP PM va a permitir integrar los mantenimientos en los sistemas de gestión, esto ayuda a optimizar la toma de decisiones. Según De Arco Paternina et al. (2022), estas herramientas permiten planificar y ejecutar mantenimientos de forma eficiente, además que nos ayudan a analizar tendencias, prever costos y cumplir con las regulaciones ambientales y de seguridad.

2.3. Marco Legal

Para el mantenimiento de las líneas de transmisión de alta tensión en Colombia se encuentra regulado por unas disposiciones técnicas, regulatorias, laborales y ambientales que garantizan la continuidad del servicio eléctrico, la seguridad de los trabajadores y vela por la sostenibilidad de las operaciones. A continuación, veremos cómo se describen estas normativas:

2.3.1. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE

El RETIE, que está establecido mediante la Resolución 90708 de 2013 y actualizado con la Resolución 40251 de 2022, regula las condiciones de seguridad y calidad de las instalaciones eléctricas en Colombia. Incluye acciones específicas sobre la inspección, diagnóstico y mantenimiento de líneas de transmisión, indicando que deben garantizar

condiciones de seguridad para las personas, los animales y el medio ambiente Ministerio de Minas y Energía, (2022). En este reglamento indica la obligación de utilizar materiales certificados y realizar mantenimientos preventivos y correctivos cuando se detecten fallas de estructuras, corrosión, daños en el aislamiento o existan afectaciones ambientales.

2.3.2. Código de Redes del Sistema Interconectado Nacional SIN

La comisión de regulación de energía y gas (CREG) que a través de la Resolución CREG 025 de 1995 y su actualización de la Resolución CREG 060 de 2019, establece los estándares técnicos que se deben cumplir en cuanto a operación y mantenimiento. Este exige a los operadores contar con programas de mantenimiento, reportes periódicos, y planes de contingencia por eventos no programados.

2.3.3. Ley 143 de 1994 de la Ley Eléctrico

Con esta ley se establece el régimen general para la generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica en Colombia, en su artículo 23 podemos ver que la responsabilidad de operar, mantener y la ampliación de las redes está a cargo de los operadores con el fin de garantizar confiabilidad, calidad y continuidad de este servicio esencial. Para el contexto del mantenimiento vemos que esta ley obliga a los operadores a tener protocolos de seguimiento, inspección y actualización continua de la infraestructura que este mas critica.

3. METODOLOGÍA

3.1 Enfoque y alcance de la investigación

3.1.1. Enfoque de la Investigación

El enfoque seleccionado para la investigación es el cualitativo, porque nos llevara a comprender con mejor precisión los procesos y perspectivas que tiene el mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión en el Valle del Cauca, Colombia. Este tipo de enfoque es adecuado para analizar este tipo de problemas en sus contextos reales.

De acuerdo con Flick (2015), en su libro *An Introduction to Qualitative Research*, el enfoque cualitativo permite investigar fenómenos sociales y organizacionales desde la perspectiva de los actores involucrados, enfocándose en la interpretación de significados y procesos más que en la medición de variables numéricas. Esto es particularmente relevante en el estudio de prácticas de mantenimiento, donde las decisiones técnicas y operativas están profundamente influenciadas por factores contextuales, como la geografía, la cultura organizacional, la infraestructura y el entorno regulatorio. De acuerdo a lo anterior y según Creswell (2013), en su obra *“Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing Among Five Approaches”*, nos indica que el enfoque cualitativo es útil para explorar un problema que aún no está descrito o ya este comprendido, lo que se aplica en este caso, porque no se encuentran suficientes estudios acerca de mantenimiento en líneas de transmisión en el Valle del Cauca. Con este enfoque será posible recopilar información, mediante, observaciones y revisión documental, fue permitirá tener una visión integral de los procedimientos actuales.

También para Hernández Sampieri et al. (2014), en su libro *“Metodología de la investigación”*, nos afirma que el enfoque cualitativo es ideal cuando el objetivo es tener descripciones donde se pueda comprender fenómenos desde una perspectiva holística y que

no esté limitado a mediciones numéricas, para que de esta formase puedan interpretar experiencias, percepciones y significados de quienes estarán involucrados y de esta forma que las condiciones de sostenibilidad en el mantenimiento de infraestructura eléctrica de alta tensión sea correcto..

3.1.2. Alcance de la Investigación

La investigación será del tipo descriptivo, porque se buscará explicar las practicas actuales del mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión en el Valle del Cauca, Colombia. La investigación documentara y analizara fenómenos como se presentan en la realidad, teniendo en cuenta la observación, el análisis documental y las percepciones de los distintos autores consultados.

Según Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2014) en libro “Metodología de la investigación”, los estudios descriptivos especifican las propiedades, características y perfiles importantes de personas, grupos, comunidades, procesos o cualquier fenómeno que sea sometido a análisis. En este caso, se pretende describir cómo se ejecutan los mantenimientos preventivos y correctivos en líneas de transmisión de alta tensión, cuáles son los protocolos técnicos y normativos empleados, y qué factores inciden en su efectividad.

También de acuerdo a lo que explica Tamayo y Tamayo (2013) en su obra “El proceso de investigación científica”, la investigación descriptiva es muy importante cuando se quiere tener el diagnóstico de una situación determinada. De esta forma, la investigación permitir identificar y sistematizar los procesos que intervienen en los procesos de mantenimiento para el contexto específico del suroccidente colombiano.

Finalmente, con este alcance descriptivo se tendrá una visión clara del estado actual de los procedimientos de mantenimiento en líneas de alta tensión en el Valle del Cauca, que será

importante para plantear mejoras prácticas, identificar brechas en la operación y contribuir al fortalecimiento del sector energético regional.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Definición de la población

Para la población de esta investigación estará enfocada en el conjunto de documentos, archivos, estudios, informes y normativas relacionadas con el mantenimiento de líneas de transmisión eléctricas de alta tensión (LAT) y su aplicación en el mantenimiento para el Valle del Cauca. En este conjunto estaremos integrando normativas del sector eléctrico colombiano y los organismos que lo regulan como la CREG con las distintas publicaciones académicas, revistas científicas o reportes realizados que nos permitan regular en la práctica para nuestra investigación.

Con una investigación descriptiva los documentos o archivos brindan información importante que detalles valiosos y relacionados, de acuerdo a Sampieri (2018), los documentos y archivos son fuentes de información que permiten el acceso a datos previos sobre un fenómeno sin necesidad de recolectar nueva información desde campo, Así con la información ya recopilada y teniendo los antecedentes de distintos procesos de mantenimientos, estos serán esenciales porque tendrán información de ingeniería, seguridad, normas y garantizaran se lleve a cabo dentro de cada margen.

De acuerdo a Bernal Torres (2022), nos argumenta que, con la revisión de documentos, nos permite enriquecer y realizar análisis al proporcionar contextos históricos y técnicos, y permite que el investigador pueda describir con mayor precisión el entorno de lo que se investigara. Con los documentos y archivos el investigador obtiene datos importantes sobre los

materiales utilizados, estrategias de gestión, Zonas de difícil acceso, orden público y la normatividad.

Finalmente, con los documentos y archivos tendremos una fuente robusta para la recolección de datos de esta investigación descriptiva y con ellos el investigador podrá acceder a información que le permita comprender los procesos de mantenimientos.

3.2.2 Selección de muestra

Como la investigación será cualitativa y estará formada por una población de documentos, archivos, informes y normativas, se ha optado por un muestreo no probabilístico de tipo intencional o por conveniencia, y la selección se centrará en los documentos publicados y su vigencia de acuerdo al año de publicación y su aplicabilidad al contexto colombiano especialmente en el Valle del Cauca, y se seleccionará las fuentes de información que se consideren más importantes. Según Bernal Torres (2022), deber haber una comprensión profunda del estudio a partir de fuentes puntuales y claves para la investigación por eso es importante destacar la recolección de información y posibles hallazgos. En total la muestra estará compuesta por al menos 30 documentos clave entre informes técnicos, normativos, académicos y los estudios relacionados a este caso de investigación.

3.3 Instrumentos de recolección de datos

De acuerdo a Sampieri (2018), en estudios descriptivos, y cualitativos, es esencial emplear herramientas que nos permitan sistematizar o comparar datos, para que de esta forma se puedan identificar patrones o relaciones de las distintas variables que se vayan a analizar. Es por eso que se utilizarán matrices de análisis documental que nos permita categorizar información como normativas, Zonas de difícil acceso u orden público, aspectos técnicos. Y así

se facilite la identificación de cada relación entre los documentos. Adicionalmente, con el fin de complementar el análisis documental, se realizó la revisión técnica y logística con un experto en mantenimiento del sector eléctrico, el Ingeniero Electricista y Magister Miguel Fajardo Solarte quien es el líder de mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión de la compañía Celsia S.A y cuenta con más de 20 años de experiencia en el sector, y así poder tener una validación y triangulación en la sección de análisis de resultados para reducir posibles sesgos al depender únicamente de información documental. Aunque es de aclarar que la investigación se seguirá fundamentando en las fuentes documentales consultadas.

3.3.1 Recolección de Datos

Objetivo Especifico 1: Para este objetivo se analizó el factor geográfico y de orden público que van a influir en la planificación y ejecución del mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión eléctrica en el Valle del Cauca para una metodología cualitativa de tipo descriptivo.

Categorías de los datos que se recolectaron

- Nombre de la línea de transmisión entre las subestaciones de cada ubicación o ciudad.
- Zona geográfica de acuerdo a la ubicación en Valle en Sur o Valle Norte.
- Nivel de tensión de acuerdo al nivel de tensión de las líneas de transmisión.
- Longitud de la línea en kilómetro (km).
- Cantidad de apoyos con los cuales están compuesto la línea de transmisión.

- Orden público que afecta las zonas en las cuales se encuentran ubicadas las líneas de transmisión.
- Accesibilidad en cuanto a la dificultad de ingreso hasta las líneas de transmisión.

Origen de los datos

Los datos se obtuvieron a partir de las siguientes fuentes:

- Informes técnicos de la empresa operadora Celsia, con sede principal en Yumbo, Valle del Cauca.
- Mapas operacionales y de infraestructura del Sistema de Transmisión Regional (STR) y del Sistema de Transmisión Nacional (STN).
- Bases de datos y catálogos de infraestructura disponibles en XM (operador del Sistema Interconectado Nacional).
- Documentos de planeación del sector eléctrico colombiano proporcionados por la UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) y la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas).
- Fuentes académicas sobre infraestructura eléctrica, mantenimiento de líneas de transmisión y geografía regional del Valle del Cauca.

Después de la recolección de datos se realizó una tabla para tener una mejor comprensión y realizar una codificación de datos que se explicara más adelante.

Tabla 1: Tabla de datos para líneas de transmisión en el Valle del Cauca

Ítem	Nombre de la Línea de transmisión	Zona	Nivel de tensión (kV)	Longitud (km)	Cantidad de apoyos	Orden Publico	Accesibilidad
1	Alto Anchicayá-Pance	Valle Sur	230	53,7	97	Alto Riesgo	Difícil
2	Alto Anchicayá-Pance-Der Yumbo	Valle Sur	230	10,5	24	Alto Riesgo	Difícil
3	Salvajina-Pance	Valle Sur	230	49,2	98	Alto Riesgo	Difícil
4	Salvajina-Pance-Der Juanchito	Valle Sur	230	17	42	Normal	Difícil
5	San Marcos-La Virginia-Der Cartago	Valle Norte	230	1,7	7	Normal	Normal
6	Juanchito 115-Aguablanca	Valle Sur	115	4,3	11	Normal	Normal
7	Bajo Anchicayá-Chipichape	Valle Sur	115	50,2	93	Alto Riesgo	Difícil
8	Chipichape-Termoyumbo	Valle Sur	115	10,8	20	Normal	Normal
9	Chipichape-Termoyumbo-Der La Campiña	Valle Sur	115	0,08	2	Normal	Normal
10	Guachal-Sta Bárbara	Valle Sur	115	20,4	58	Normal	Normal
11	Guachal-Sta Bárbara-Der Palmaseca	Valle Sur	115	0,8	5	Normal	Normal
12	Guachal-Sta Bárbara-Der Sucromiles	Valle Sur	115	0,4	1	Normal	Normal
13	Guachal-Termovalle	Valle Sur	115	4	8	Normal	Normal
14	Juanchito 115-Candelaria	Valle Sur	115	15,4	36	Normal	Normal
15	Juanchito 220-Juanchito 115	Valle Sur	115	2,2	10	Normal	Normal
16	Pance-Aguablanca	Valle Sur	115	13	31	Normal	Normal
17	Pance-Aguablanca-Der Alferez 1	Valle Sur	115	2,7	16	Normal	Normal
18	Pance-Aguablanca-Der Meléndez	Valle Sur	115	4,05	19	Normal	Normal
19	Pance-Aguablanca-Der Alferez 2	Valle Sur	115	0,2	5	Normal	Normal
20	Pance-Aguablanca-Der Papeles	Valle Sur	115	11,6	32	Normal	Normal
21	Pance-Santander-Der Jamundí	Valle Sur	115	0,07	1	Normal	Normal
22	Pance-San Antonio	Valle Sur	115	12,3	31	Normal	Normal
23	San Antonio-Chipichape	Valle Sur	115	3,8	12	Normal	Normal
24	San Luis-Juanchito 115	Valle Sur	115	8,4	20	Normal	Normal

25	San Marcos-Guachal	Valle Sur	115	7,2	19	Normal	Normal
26	Termoyumbo-Guachal	Valle Sur	115	5	14	Normal	Normal
27	Termoyumbo-San Luis	Valle Sur	115	9,2	25	Normal	Normal
28	Termoyumbo-San Marcos	Valle Sur	115	7,5	20	Normal	Normal
29	Yumbo-Termoyumbo (Ctos 1 y 3)	Valle Sur	115	0,43	2	Normal	Normal
30	San Marcos-Codazzi	Valle Sur	115	36,7	81	Normal	Normal
31	Sta Bárbara-Cerrito	Valle Sur	115	18,4	95	Normal	Normal
32	Sta Bárbara-Codazzi	Valle Sur	115	6,8	32	Normal	Normal
33	Bajo Anchicayá-Tabor	Valle Sur	115	35,4	69	Alto Riesgo	Difícil
34	Bajo Anchicayá-Tabor-Der Pailón	Valle Sur	115	3,8	12	Alto Riesgo	Difícil
35	Pailón-Málaga	Valle Sur	115	69,6	203	Alto Riesgo	Difícil
36	Tuluá-Zarzal	Valle Norte	115	37,6	98	Normal	Normal
37	Zarzal-Cartago	Valle Norte	115	41,8	106	Normal	Normal
38	Zarzal-Cartago-Der la Unión	Valle Norte	115	8,2	18	Normal	Normal
39	Buga-Tuluá	Valle Norte	115	27,6	72	Normal	Normal
40	Calima-Buga	Valle Norte	115	32,8	101	Normal	Normal
41	San Marcos-Buga	Valle Norte	115	37,5	85	Normal	Normal
42	Pance-Salvajina 34.5 kV	Valle Sur	34,5	49,2	149	Alto Riesgo	Difícil
43	CH Alto-Bajo Tuluá-Tuluá	Valle Norte	34,5	24,5	56	Alto Riesgo	Normal

En la anterior tabla se encuentran relacionados los aspectos a tener en cuenta en las líneas de transmisión de alta tensión para el Valle del Cauca considerando aspectos como la ubicación de las líneas de transmisión, sector, orden público, y accesibilidad entre otros.

Objetivo específico 2: Para este objetivo se recolectaron fuentes documentales donde se pueda identificar aspectos técnicos y logísticos que se involucran en los trabajos de mantenimientos preventivos y correctivos de las líneas de transmisión de alta tensión y de acuerdo a sus niveles en el Valle del Cauca, Colombia. Para poder consolidarla en una tabla.

Origen de los datos

Los datos se encontraron de población documental que se compone por 24 fuentes reales y verificables, que son seleccionadas de acuerdo a la temática y aspectos técnicos.

- Informes técnicos de empresas de transmisión.
- Libros técnicos y manuales reconocidos en el sector eléctrico.
- Artículos académicos y científicos disponibles en bases de datos como IEEE.
- Documentación de entidades regulatorias y de planificación energética como la UPME.

Las fuentes se validaron de acuerdo a su aplicabilidad técnica, y relevancia directa con el mantenimiento de líneas de alta tensión y fueron organizados de acuerdo a variables clave como son las siguientes:

- Tipo de mantenimiento
- Aspecto técnico abordado
- Logística involucrada
- Tipo de fuente
- Año de publicación

Con la recolección de datos se organizó la siguiente tabla teniendo en cuenta la población documental consultada:

Tabla 2: Tabla de datos documentales.

No.	Fuente / Documento	Tipo de Mantenimiento	Aspecto Técnico	Aspecto Logístico	Tipo Fuente	Año
1	CHEC S.A. E.S.P. (2020), <i>Informe técnico transmisión y distribución CHEC 2020</i>	Preventivo / Correctivo	Inspección de Infraestructura	Infraestructura eléctrica	Informe	2020
2	CHEC S.A. E.S.P. (2016), <i>Manual mantenimiento subestaciones MA-DI-08-001-001</i>	Preventivo / Correctivo	Mantenimientos	Personal Operativo	Informe	2016
3	Celsia Colombia S.A. E.S.P. (2021), <i>Reporte integrado 2021: salud y seguridad</i>	Preventivo	Seguridad operacional	Personal Operativo	Informe	2021
4	Celsia Colombia S.A. E.S.P. (2022), <i>Reporte integrado 2022</i>	Preventivo / Correctivo	Inspecciones y Mantenimientos	Equipos y Herramientas	Informe	2022
5	ISA Interconexión Eléctrica (2020), <i>Mantenimiento línea viva 230 kV Valle del Cauca</i>	Preventivo / Correctivo	Mantenimientos	Equipos y Herramientas	Informe	2020
6	Universidad Distrital (2021), <i>Diagnóstico y mantenimiento laboratorio alta tensión</i>	Preventivo	Inspección de Infraestructura	Equipos y Herramientas	Informe	2021
7	CAR (2022), <i>Supervisión obras mantenimiento redes eléctricas</i>	Preventivo / Correctivo	Mantenimientos	Personal Operativo	Libro Tecnico	2022
8	UPME (2023), <i>Logística de mantenimiento en zonas rurales</i>	Preventivo	Seguridad operacional	Personal Operativo	Informe	2023
9	Applus+ (2022), <i>Mantenimiento subestaciones Panamá</i>	Preventivo / Correctivo	Inspección de Infraestructura	Personal Operativo	Informe	2022
10	Khuntia et al. (2023), <i>Survival analysis for instrument transformers</i>	Preventivo	Inspección de Infraestructura	Infraestructura eléctrica	Artículo	2023
11	Pernebayeva et al. (2017), <i>Insulator surface evaluation via image processing</i>	Preventivo	Inspección de Infraestructura	Equipos y Herramientas	Artículo	2017
12	Athari & Wang (2017), <i>Transmission branch</i>	Preventivo	Inspección de Infraestructura	Personal Operativo	Artículo	2017

13	<i>param. voltage interdependence</i> Ren (2021), <i>Fault analysis and maintenance high voltage line</i>	Correctivo	Inspección de Infraestructura	Equipos y Herramientas	Artículo	2021
14	Rokhforoz et al. (2020), <i>Multi-agent maintenance scheduling</i>	Preventivo	Seguridad operacional	Equipos y Herramientas	Artículo	2020
15	CIGRE e-session (2024), <i>Tecnología drones en mantenimiento ISA</i>	Preventivo	Inspección de Infraestructura	Personal Operativo	Libro Técnico	2024
16	Liu et al. (2023), <i>Fault diagnosis techniques review</i>	Preventivo	Inspección de Infraestructura	Equipos y Herramientas	Libro Técnico	2023
17	Pansini (2000), <i>Substation and transmission line maintenance</i>	Preventivo / Correctivo	Inspecciones y Mantenimientos	Personal Operativo	Manual	2000
18	Grigsby (2007), <i>Electric power engineering handbook</i>	Preventivo / Correctivo	Inspección de Infraestructura	Personal Operativo	Manual	2007
19	Short (2015), <i>Distribution handbook</i>	Preventivo	Inspecciones y Mantenimientos	Infraestructura eléctrica	Manual	2015
20	Gorur (2017), <i>Live line working and insulators</i>	Preventivo	Mantenimientos	Infraestructura eléctrica	Informe	2017
21	EPRI (2010), <i>Guidelines for HVDC electrode design</i>	Preventivo / Correctivo	Inspecciones y Mantenimientos	Personal Operativo	Informe	2010
22	MDPI Sustainability (2018), <i>Noise impact maintenance overhead lines</i>	Preventivo	Inspección de Infraestructura	Personal Operativo	Artículo	2018
23	IEEE Xplore (2013), <i>Maintenance practices overhead lines</i>	Preventivo / Correctivo	Inspecciones y Mantenimientos	Infraestructura eléctrica	Artículo	2013
24	Terna (2022), <i>EHV test system for transmission planning</i>	Preventivo	Seguridad operacional	Equipos y Herramientas	Artículo	2022

En la anterior tabla se encuentran relacionados los aspectos técnicos más relevantes que se deben tener en cuenta para los mantenimientos preventivos o correctivos de acuerdo a las fuentes consultadas y son aplicables para las líneas de transmisión de alta tensión en el Valle.

Objetivo Especifico 3: Con este objetivo se examinaron las normas y regulaciones de Colombia y que se aplican al mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión, la recolección se hizo de documentos normativos oficiales, que se estructuraran en una tabla identificando aspectos legales, técnicos y operativos que van a regir el mantenimiento de la infraestructura de transmisión eléctrica para el Valle del Cauca.

Origen de los datos

Los datos vienen a partir de 15 documentos normativos y regulatorios vigentes en Colombia, que fueron emitidos por entidades y organismos reguladores del sector eléctrico. Las fuentes incluyen:

- Normas técnicas colombianas del ICONTEC.
- Resoluciones del Ministerio de Minas y Energía (MME).
- Normativa de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).
- Leyes nacionales relacionadas con el sector energético e infraestructura eléctrica.
- Guías técnicas y manuales de operadores del sistema interconectado nacional (SIN).

Todos los documentos utilizados son reales, verificables y de acceso público, lo cual garantiza su aplicabilidad y validez.

Con la obtención de los datos se clasificaron de acuerdo a su incidencia en los mantenimientos con su estandarización para facilitar posteriormente el análisis, la forma en que se realizó fue la siguiente:

- Tipo de documento (resolución o norma técnica)

- Ente emisor
- Año de publicación
- Tema principal abordado
- Aplicabilidad técnica y legal

Después con estos datos se sistematizaron en la siguiente Tabla para facilitar la interpretación normativa que influirá en los mantenimientos de líneas de alta tensión en el Valle del Cauca, de acuerdo al cumplimiento legal, y operatividad técnica y la planeación logística.

Tabla 3: Tabla de datos de documentos normativos

Nº	Norma / Resolución	Tipo de Norma	Entidad	Aspecto Regulador	Aplicabilidad	Obligatoriedad
1	RETIE (Resolución 90708/2013)	Técnica	Ministerio de energía	Certificación de equipos	Nacional	Obligatoria
2	RETIE modificación (Resol. 40117/2024) CAPÍTULO 5 RETIE	Técnica	Ministerio de energía	Capacitación y registros	Nacional	Obligatoria
3	(Transmisión ≥ 57.5 kV)	Técnica	Ministerio de energía	Diseño, infraestructura y servidumbre	Nacional	Obligatoria
4	Resolución 25 de 1995 CREG	Regulatoria	CREG	Frecuencia de mantenimiento	Nacional	Obligatoria
5	Resolución 20 de 2012 CREG (medición/calibración)	Regulatoria	CREG	Frecuencia de mantenimiento	Nacional	Obligatoria
6	Resolución 098-2000 CREG (diseño líneas)	Regulatoria	CREG	Diseño, infraestructura y servidumbre	Nacional	Obligatoria
7	Resolución MinMinas 180498/2005	Regulatoria	Ministerio de energía	Diseño, infraestructura y servidumbre	Nacional	Obligatoria
8	Resolución MinMinas 181294/2008 (capacitación)	Regulatoria	Ministerio de energía	Capacitación y registros	Nacional	Obligatoria
9	Resolución 5018/2019 SST (transmisión)	Regulatoria	Ministerio de energía	Seguridad Operacional	Nacional	Obligatoria

10	NTC 2050-2020 (código eléctrico colombiano)	Técnica	Ministerio de energía	Diseño, infraestructura y servidumbre	Nacional	Obligatoria
11	NFPA 70E-2020 (seguridad en el trabajo eléctrico)	Técnica	Ministerio de energía	Seguridad Operacional	Nacional	Obligatoria
12	NFPA 70B-2019 (mantenimiento equipos eléctricos)	Técnica	Ministerio de energía	Frecuencia de mantenimiento	Nacional	Obligatoria
13	ANSI NETA MTS-2019 (especificaciones prueba mantenimiento)	Técnica	Ministerio de energía	Frecuencia de mantenimiento	Nacional	Obligatoria
14	NTC 3949 (estaciones regulación y transporte gas)	Técnica	Ministerio de energía	Diseño, infraestructura y servidumbre	Nacional	Obligatoria
15	Reglas de oro (zona sin tensión – RETIE/40117)	Técnica	Ministerio de energía	Seguridad Operacional	Nacional	Obligatoria

En la anterior tabla vemos como se clasificaron las normativas colombianas y su aplicabilidad para el mantenimiento de líneas de alta tensión en el valle del Cauca.

3.3.2 Codificación de Datos

Objetivo específico 1: La codificación de datos que se utilizó para después introducirlo en la herramienta seleccionada para esta Investigación JASP fue la siguiente:

- Las zonas geográficas de acuerdo a su zona: Valle Sur = 1, Valle norte = 2.
- Los niveles de tensión de las líneas de transmisión en el Valle del Cauca, 34.5 kV, 115 kV y 230 kV

Se codificaron las variables de longitud y cantidad de apoyos en escalas ordinales (1, 2, 3) según rangos predefinidos:

- Longitud: menor a 10 km (1), entre 10.1 y 30 km (2), mayor a 30.1 km (3).

- Cantidad de apoyos: hasta 30 (1), entre 31 y 90 (2), más de 90 (3).

Se asignó codificación en cuanto a orden público y dificultad de accesibilidad teniendo en reportes del Ministerio de Defensa, medios de comunicación regionales.

- Orden Público: Normal (0) y alto riesgo (1)

- Accesibilidad: Normal (0) y difícil (1)

Figura 1: Datos codificados líneas de transmisión del 1 al 19 e introducidos a JASP.

Ítem	Zona	Nivel de tensión (kV)	Longitud (km)	Cantidad de apoyos	Orden Publico	Accesibilidad
1	Valle Sur	230	Mayor a 30 Km	Mas de 90 Apoyos	Peligro	Difícil
2	Valle Sur	230	De 10 Km a 30 Km	De 1 a 30 Apoyos	Peligro	Difícil
3	Valle Sur	230	Mayor a 30 Km	Mas de 90 Apoyos	Peligro	Difícil
4	Valle Sur	230	De 10 Km a 30 Km	De 30 a 90 Apoyos	Normal	Difícil
5	Valle Norte	230	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
6	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
7	Valle Sur	115	Mayor a 30 Km	Mas de 90 Apoyos	Peligro	Difícil
8	Valle Sur	115	De 10 Km a 30 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
9	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
10	Valle Sur	115	De 10 Km a 30 Km	De 30 a 90 Apoyos	Normal	Normal
11	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
12	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
13	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
14	Valle Sur	115	De 10 Km a 30 Km	De 30 a 90 Apoyos	Normal	Normal
15	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
16	Valle Sur	115	De 10 Km a 30 Km	De 30 a 90 Apoyos	Normal	Normal
17	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
18	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
19	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal

Figura 2: Datos codificados líneas de transmisión del 20 al 43 e introducidos a JASP.

Ítem	Zona	Nivel de tensión (kV)	Longitud (km)	Cantidad de apoyos	Orden Publico	Accesibilidad
20	Valle Sur	115	De 10 Km a 30 Km	De 30 a 90 Apoyos	Normal	Normal
21	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
22	Valle Sur	115	De 10 Km a 30 Km	De 30 a 90 Apoyos	Normal	Normal
23	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
24	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
25	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
26	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
27	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
28	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
29	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
30	Valle Sur	115	Mayor a 30 Km	De 30 a 90 Apoyos	Normal	Normal
31	Valle Sur	115	De 10 Km a 30 Km	Mas de 90 Apoyos	Normal	Normal
32	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 30 a 90 Apoyos	Normal	Normal
33	Valle Sur	115	Mayor a 30 Km	De 30 a 90 Apoyos	Peligro	Difícil
34	Valle Sur	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Peligro	Difícil
35	Valle Sur	115	Mayor a 30 Km	Mas de 90 Apoyos	Peligro	Difícil
36	Valle Norte	115	Mayor a 30 Km	Mas de 90 Apoyos	Normal	Normal
37	Valle Norte	115	Mayor a 30 Km	Mas de 90 Apoyos	Normal	Normal
38	Valle Norte	115	De 0 Km a 10 Km	De 1 a 30 Apoyos	Normal	Normal
39	Valle Norte	115	De 10 Km a 30 Km	De 30 a 90 Apoyos	Normal	Normal
40	Valle Norte	115	Mayor a 30 Km	Mas de 90 Apoyos	Normal	Normal
41	Valle Norte	115	Mayor a 30 Km	De 30 a 90 Apoyos	Normal	Normal
42	Valle Sur	34.5	Mayor a 30 Km	Mas de 90 Apoyos	Peligro	Difícil
43	Valle Norte	34.5	De 10 Km a 30 Km	De 30 a 90 Apoyos	Peligro	Normal

Objetivo Especifico 2: Para el objetivo específico 2 de acuerdo a las fuentes

documentales consultadas se realizó la codificación de acuerdo a las siguientes columnas:

Tipo de Mantenimiento

- 1: El documento aborda el mantenimiento preventivo.
- 2: El documento aborda el mantenimiento correctivo.

- 3: El documento aborda ambos tipos de mantenimiento preventivo y correctivo.

Aspecto Técnico

- 1: Si se enfoca en la inspección de infraestructura (revisión de torres, cables, componentes, entre otros).
- 2: Si aborda temas sobre ejecución de mantenimientos técnicos como tal.
- 3: Cuando se centra en procedimientos de seguridad operacional.
- 4: si aborda tanto inspección como mantenimiento, de manera conjunta.

Aspecto Logístico

- 1: Cuando el documento resalta la infraestructura eléctrica como aspecto clave (Aisladores de torres, conductores, herrajería).
- 2: Se enfoca en el personal operativo involucrado en las tareas de mantenimiento.
- 3: cuando el eje principal son los equipos y herramientas necesarios para la operación.

Tipo de Fuente

- 1: para informes institucionales o técnicos.
- 2: para libros técnicos especializados.
- 3: para artículos científicos publicados en revistas académicas.

- 4: para manuales operativos o instructivos.

Año de Publicación

- 1: Documentos entre los años 2000 y 2015.
- 2: Documentos entre 2016 y 2020.
- 3: Documentos recientes, publicados desde 2021 en adelante.

Figura 3: Datos codificados de documentos técnicos en JASP.

Y	No.	TipoMantenimiento	AspectoTécnico	AspectoLogístico	TipoFuente	Año	
1	1	Preventivo/Correctivo	3 Inspeccion de Infraestructura	1 Materiales	3 Informes	1 Entre el año 2016 al 2020	2
2	2	Preventivo/Correctivo	3 Mantenimientos	3 Personal Operativo	1 Informes	1 Entre el año 2016 al 2020	2
3	3	Preventivo	1 Seguridad Operacional	4 Personal Operativo	1 Informes	1 Del 2021 en Adelante	3
4	4	Preventivo/Correctivo	3 Inspecciones y Mantenimientos	2 Equipos y Herramientas	2 Informes	1 Del 2021 en Adelante	3
5	5	Preventivo/Correctivo	3 Mantenimientos	3 Equipos y Herramientas	2 Informes	1 Entre el año 2016 al 2020	2
6	6	Preventivo	1 Inspeccion de Infraestructura	1 Equipos y Herramientas	2 Informes	1 Del 2021 en Adelante	3
7	7	Preventivo/Correctivo	3 Mantenimientos	3 Personal Operativo	1 Libro Tecnico	2 Del 2021 en Adelante	3
8	8	Preventivo	1 Seguridad Operacional	4 Personal Operativo	1 Informes	1 Del 2021 en Adelante	3
9	9	Preventivo	1 Inspeccion de Infraestructura	1 Personal Operativo	1 Informes	1 Del 2021 en Adelante	3
10	10	Preventivo	1 Inspeccion de Infraestructura	1 Materiales	3 Articulo	3 Del 2021 en Adelante	3
11	11	Preventivo	1 Inspeccion de Infraestructura	1 Equipos y Herramientas	2 Articulo	3 Entre el año 2016 al 2020	2
12	12	Preventivo	1 Inspeccion de Infraestructura	1 Personal Operativo	1 Articulo	3 Entre el año 2016 al 2020	2
13	13	Correctivo	2 Inspeccion de Infraestructura	1 Equipos y Herramientas	2 Articulo	3 Del 2021 en Adelante	3
14	14	Preventivo	1 Seguridad Operacional	4 Equipos y Herramientas	2 Articulo	3 Entre el año 2016 al 2020	2
15	15	Preventivo	1 Inspeccion de Infraestructura	1 Personal Operativo	1 Libro Tecnico	2 Del 2021 en Adelante	3
16	16	Preventivo	1 Inspeccion de Infraestructura	1 Equipos y Herramientas	2 Libro Tecnico	2 Del 2021 en Adelante	3
17	17	Preventivo/Correctivo	3 Inspecciones y Mantenimientos	2 Personal Operativo	1 Manual	4 Entre el año 2000 al 2015	1
18	18	Preventivo/Correctivo	3 Inspeccion de Infraestructura	1 Personal Operativo	1 Manual	4 Entre el año 2000 al 2015	1
19	19	Preventivo	1 Inspecciones y Mantenimientos	2 Materiales	3 Manual	4 Entre el año 2000 al 2015	1
20	20	Preventivo	1 Mantenimientos	3 Materiales	3 Informes	1 Entre el año 2016 al 2020	2
21	21	Preventivo/Correctivo	3 Inspecciones y Mantenimientos	2 Personal Operativo	1 Informes	1 Entre el año 2000 al 2015	1
22	22	Preventivo	1 Inspeccion de Infraestructura	1 Personal Operativo	1 Articulo	3 Entre el año 2016 al 2020	2
23	23	Preventivo/Correctivo	3 Inspecciones y Mantenimientos	2 Materiales	3 Articulo	3 Entre el año 2000 al 2015	1
24	24	Preventivo	1 Seguridad Operacional	4 Equipos y Herramientas	2 Articulo	3 Del 2021 en Adelante	3

Objetivo específico 3: Para el objetivo específico 3 de acuerdo a las normativas consultadas se hizo a través de la siguiente codificación en cada Columna:

Tipo de Norma:

- 0: Para norma técnica
- 1: Para norma Regulatoria

Para la entidad:

- 0: Ministerio de energía
- 1: Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)

Aspecto Regulatorio:

- 0: Normas y regulaciones relacionadas a la seguridad operacional
- 1: Normas y regulaciones relacionadas a la frecuencia de los mantenimientos
- 2: Normas y regulaciones relacionadas a la certificación de equipos
- 3: Normas y regulaciones relacionadas al diseño, infraestructura y servidumbre
- 4: Normas y regulaciones relacionadas a las capacitaciones y registros.

Para la aplicabilidad y obligatoriedad se tuvo en cuenta los siguientes códigos:

- 0: Aplicabilidad (todas estas normas se aplican a nivel nacional)
- 1: Todas las normas son obligatorias.

Figura 4: Datos codificados de documentos normativos en JASP:

	N°	TipoNorma_Cod	Entidad_Cod	AspectoRegulado_Cod	Aplicabilidad_Cod	Obligatoriedad_Cod
1	1	Tecnica 0	Ministerio de Energía	0	Certificacion de Equipos	2 Nacional 0 Obligatoria 1
2	2	Tecnica 0	Ministerio de Energía	0	Capacitacion y Registros	4 Nacional 0 Obligatoria 1
3	3	Tecnica 0	Ministerio de Energía	0	Diseño, Infraestructura y Servidumbre	3 Nacional 0 Obligatoria 1
4	4	Regulatoria 1	CREG	1	Frecuencia de Mantenimiento	1 Nacional 0 Obligatoria 1
5	5	Regulatoria 1	CREG	1	Frecuencia de Mantenimiento	1 Nacional 0 Obligatoria 1
6	6	Regulatoria 1	CREG	1	Diseño, Infraestructura y Servidumbre	3 Nacional 0 Obligatoria 1
7	7	Regulatoria 1	Ministerio de Energía	0	Diseño, Infraestructura y Servidumbre	3 Nacional 0 Obligatoria 1
8	8	Regulatoria 1	Ministerio de Energía	0	Capacitacion y Registros	4 Nacional 0 Obligatoria 1
9	9	Regulatoria 1	Ministerio de Energía	0	Seguridad Operacional	0 Nacional 0 Obligatoria 1
10	10	Tecnica 0	Ministerio de Energía	0	Diseño, Infraestructura y Servidumbre	3 Nacional 0 Obligatoria 1
11	11	Tecnica 0	Ministerio de Energía	0	Seguridad Operacional	0 Nacional 0 Obligatoria 1
12	12	Tecnica 0	Ministerio de Energía	0	Frecuencia de Mantenimiento	1 Nacional 0 Obligatoria 1
13	13	Tecnica 0	Ministerio de Energía	0	Frecuencia de Mantenimiento	1 Nacional 0 Obligatoria 1
14	14	Tecnica 0	Ministerio de Energía	0	Diseño, Infraestructura y Servidumbre	3 Nacional 0 Obligatoria 1
15	15	Tecnica 0	Ministerio de Energía	0	Seguridad Operacional	0 Nacional 0 Obligatoria 1

3.4 Análisis de Datos

Como la investigación tiene una metodología cualitativa de tipo descriptivo y la recolección de datos se realizó en base a documentos técnicos, mapas, informes y archivos, se utilizó JASP como herramienta de análisis por su capacidad para procesar variables codificadas y generar salidas gráficas e interpretativas que sean útiles, que nos servirán para los analizar los datos categóricos no numéricos.

Aunque el enfoque es cualitativo, fue necesario aplicar técnicas estadísticas descriptivas para identificar patrones y relaciones que hay entre las variables. De esta forma se evaluaron variables como la zona geográfica, nivel de tensión, longitudes y cantidad de apoyos, contra las variables de interés de riesgo público y accesibilidad.

Con esto se generaron gráficos de barras para representar la distribución de las variables categorizadas, facilitando una comprensión visual de los hallazgos.

3.4.1 Orden Publico

A continuación, podemos analizar gráficamente el orden público de acuerdo a la Zona, Nivel de tensión, Longitud de la línea de transmisión, cantidad de Apoyos y Accesibilidad.

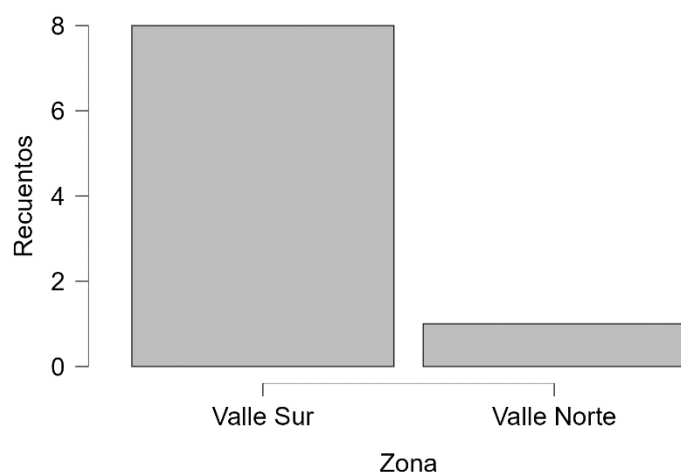
Tabla 4. Tabla de orden público vs Zona, nivel de tensión, longitud, apoyos y accesibilidad.

	<i>Estadísticos Descriptivos</i>									
	Zona		Nivel de tensión (kV)		Longitud (km)		Cantidad de apoyos		Accesibilidad	
	Normal	Peligro	Normal	Peligro	Normal	Peligro	Normal	Peligro	Normal	Peligro
Válido	34	9	34	9	34	9	34	9	34	9

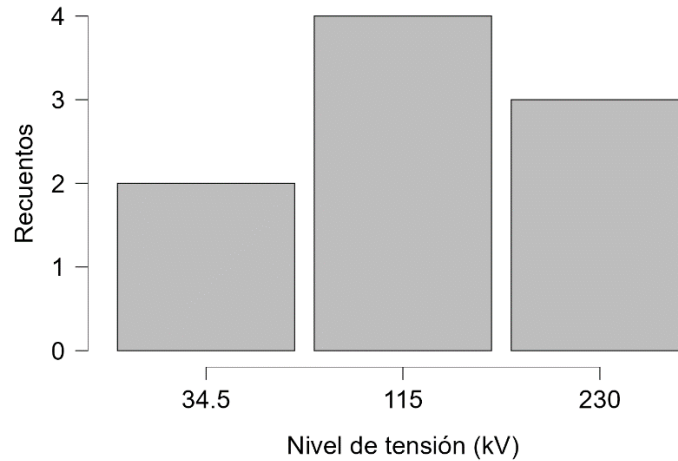
En este análisis gráfico nos centraremos principalmente en el peligro por orden público que conlleva cada categoría de acuerdo a lo que se pueda analizar gráficamente.

Gráfica de orden público con respecto a la zona: Es posible ver en la figura 5 que los problemas por orden público de las líneas de transmisión están principalmente en la zona de Valle Sur, y el único caso de Valle Norte es para la línea de transmisión del alto y bajo Tuluá.

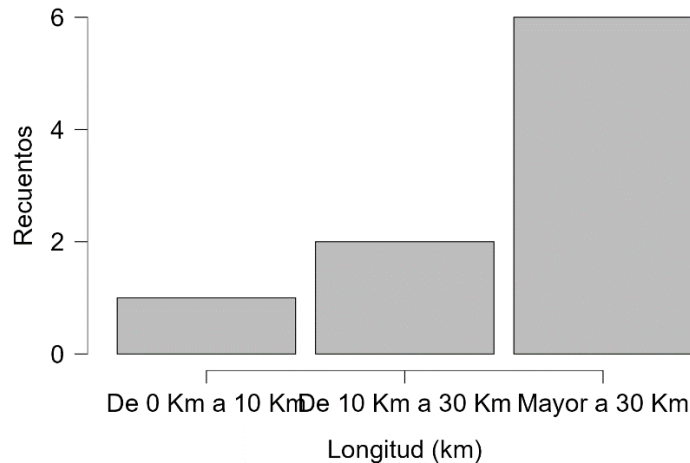
Figura 5. Riesgo de orden público en zona sur y norte del Valle del Cauca.



Gráficas de orden público con respecto a los niveles de tensión: En la figura 6 podemos observar que tenemos peligro por orden público para los 3 niveles de tensión, y que las 2 únicas líneas de tensión de 34,5 kV presentan riesgo por orden público.

Figura 6. Riesgo de orden público líneas de tensión en el Valle del Cauca.

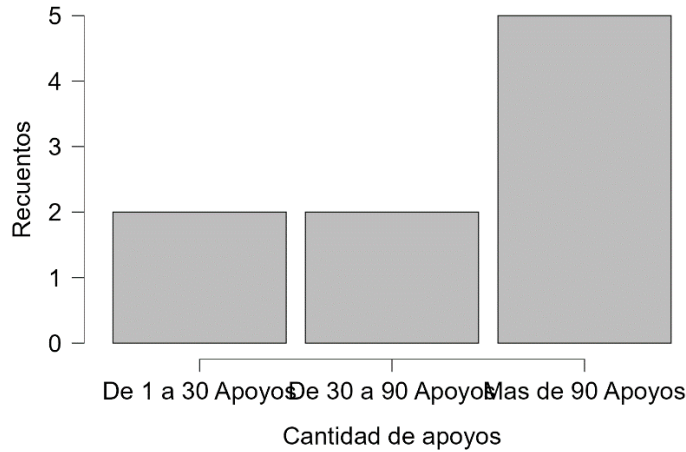
Grafica de orden público con respecto a longitud de la línea de tensión: En la figura 7 vemos que el riesgo por orden público es mayor en líneas de transmisión con longitudes más grandes, esto podría ser porque son estas líneas de transmisión las que cruzan valles y montañas y muchas veces en estas zonas existe la presencia de grupos armados.

Figura 7. Riesgo de orden público por longitud de líneas de transmisión en el Valle del Cauca.

Grafica de orden público con respecto a Cantidad de apoyos de la línea de tensión: Es posible evidenciar en la figura 8, que el riesgo por orden público aumenta en las líneas de transmisión con mayor cantidad de apoyos, esto podría ser porque las líneas de transmisión

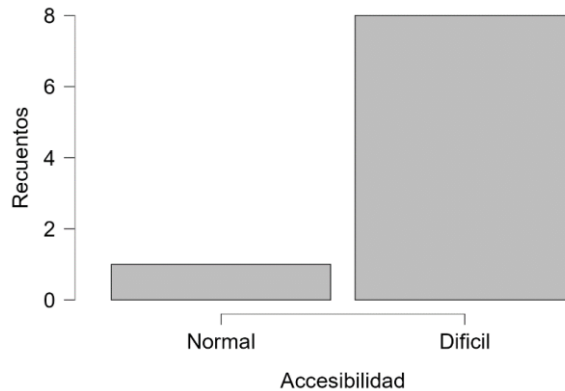
más largas necesitan muchos apoyos para cruzar montañas o zonas con geografía difícil y en estas zonas aumenta la presencia de grupos armados.

Figura 8. Riesgo de orden público por cantidad de apoyos en líneas de transmisión en el Valle del Cauca.



Grafica de orden público con respecto a la accesibilidad: En la figura 9 vemos que la difícil accesibilidad y orden público se relacionan porque son zonas donde puede haber presencia de grupos al margen de la ley. Para este caso solamente tenemos una sola línea de transmisión del alto y bajo Tuluá que, aunque no presenta problemas en cuanto accesibilidad, si tiene problemas por orden público por grupos de delincuencia común.

Figura 9. Riesgo de orden público por accesibilidad en las líneas de transmisión en el Valle del Cauca.



3.4.2 Accesibilidad

A continuación, podemos analizar gráficamente la accesibilidad de acuerdo a la Zona, Nivel de tensión, Longitud de la línea de transmisión, cantidad de apoyos y orden público.

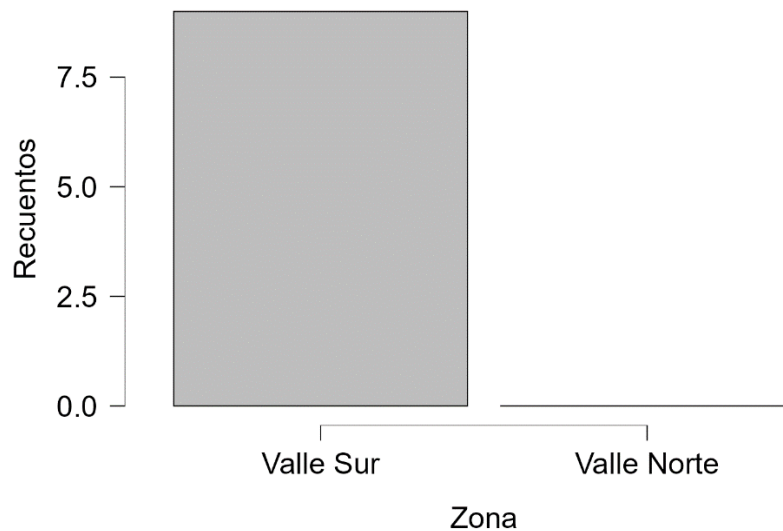
Tabla 5. Tabla de accesibilidad vs Zona, nivel de tensión, longitud, apoyos y orden público.

<i>Estadísticos Descriptivos</i>										
	Zona		Nivel de tensión (kV)		Longitud (km)		Cantidad de apoyos		Orden Publico	
	Normal	Difícil	Normal	Difícil	Normal	Difícil	Normal	Difícil	Normal	Difícil
Válido	34	9	34	9	34	9	34	9	34	9

Para el análisis grafico nos centraremos en la dificultad de la accesibilidad a las líneas de transmisión para cada categoría y analizarlo gráficamente.

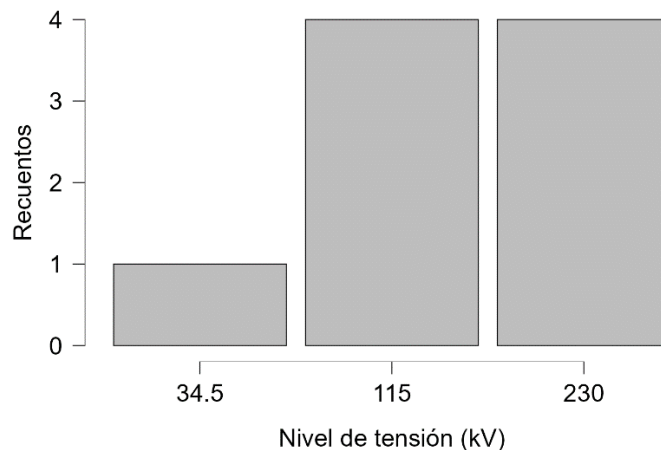
Gráfica de accesibilidad con respecto a la zona: En la figura 10 vemos que la dificultad de accesibilidad solamente está en Valle Sur, para Valle Norte no hay representa dificultad porque las líneas de transmisión se encuentran cerca de vías donde hay ingreso de vehículos.

Figura 10. Dificil accesibilidad de acuerdo a las zonas en el Valle del Cauca.



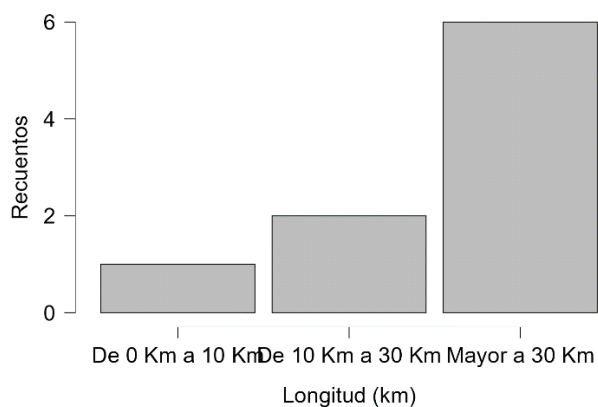
Graficas de accesibilidad con respecto a los niveles de tensión: En la figura 11 observamos que para las líneas de tensión 115 kV y 230 kV tienen más problemas de accesibilidad porque son las que transportan energía eléctrica desde los centros de generación que se encuentran en zonas montañosas.

Figura 11. Dificil accesibilidad de acuerdo a los niveles de tensión en el Valle del Cauca.



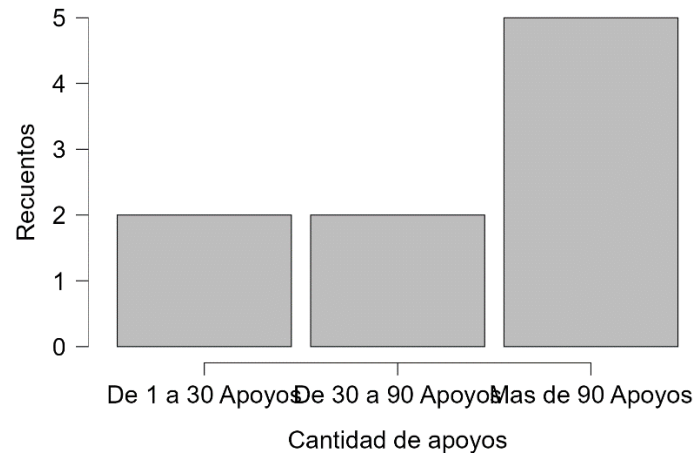
Grafica de accesibilidad con respecto a longitud de la línea de tensión: En la figura 12 vemos que la dificultad de accesibilidad se presenta sobre todo en las líneas de transmisión que tienen mayores longitudes y se necesita cruzar valles y montañas por lo que deben ser de longitudes muy largas.

Figura 12. Dificil accesibilidad de acuerdo a la longitud de las líneas de transmisión.



Grafica de accesibilidad con respecto a Cantidad de apoyos: Podemos ver en la figura 13 que la dificultad por accesibilidad está presente sobre todo en las líneas de transmisión con la mayor cantidad de torres, postes o apoyos, esto es porque las líneas de transmisión necesitan muchos apoyos para cruzar montañas o zonas con geografía difícil.

Figura 13. Dificil accesibilidad de acuerdo a número de apoyos en las líneas de transmisión.



De acuerdo a los datos recolectados es posible identificar que las líneas de transmisión del valle del cauca enfrentan factores técnicos y logísticos que varían de acuerdo a la ubicación de cada una de ellas, pero especialmente en cuanto a accesibilidad y problemas de orden público, estos dos factores van a representar retos más difíciles en cuanto a planificación de mantenimientos en las torres que componen las líneas de transmisión eléctrica y a su vez se ven reflejados en el aumento de costos operativos por todas las implicaciones que llevan estas implicaciones.

3.4.3 Análisis de fuentes documentales para para la parte técnica:

Con respecto a la identificación de aspectos técnicos y logísticos se evaluarán gráficamente las fuentes documentales de la monografía de la siguiente forma:

Tabla 6. Tabla de fuentes documentales del área técnica.

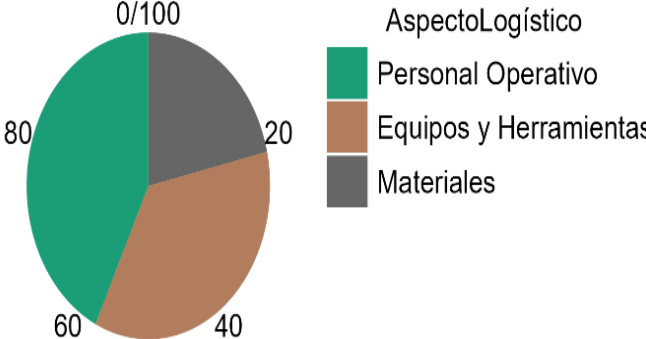
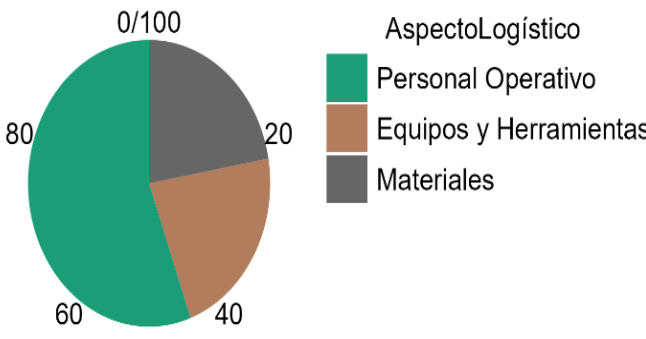
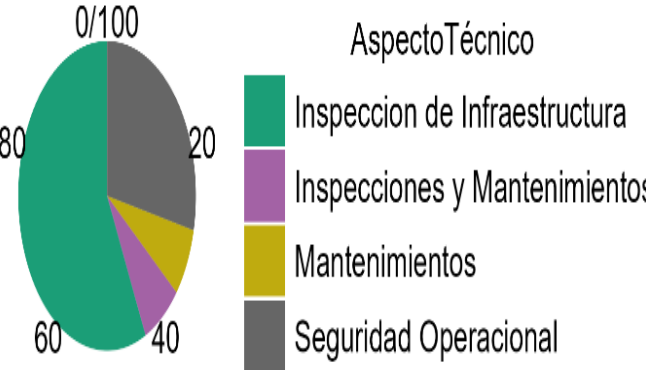
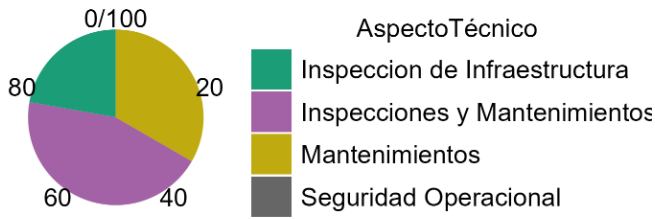
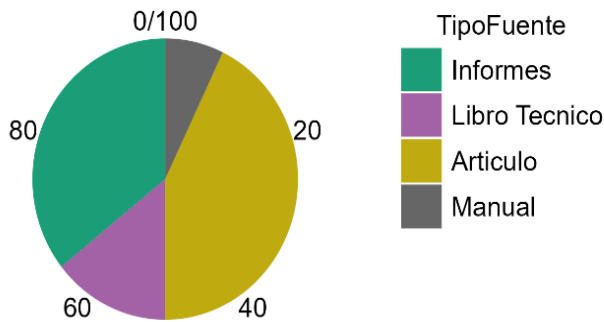
Grafica a evaluar	Análisis de la figura										
<p data-bbox="203 317 755 346">Figura 14. Fuentes del tipo preventivo - logístico</p>  <table border="1" data-bbox="284 409 925 745"> <caption>Data for Figura 14</caption> <thead> <tr> <th>Categoría</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Personal Operativo</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Equipos y Herramientas</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Materiales</td> <td>20</td> </tr> </tbody> </table>	Categoría	Porcentaje	Personal Operativo	60	Equipos y Herramientas	40	Materiales	20	<p data-bbox="950 331 1404 766">De acuerdo a las fuentes documentales consultadas podemos evidenciar que para el personal operativo y el de equipos con herramientas, se podrán encontrar en las fuentes del tipo preventivo y son relevantes para llevar a cabo tareas que requieren una planificación más amplia.</p>		
Categoría	Porcentaje										
Personal Operativo	60										
Equipos y Herramientas	40										
Materiales	20										
<p data-bbox="203 793 885 823">Figura 15. Fuentes del tipo preventivo/correctivo - Logístico</p>  <table border="1" data-bbox="284 871 925 1207"> <caption>Data for Figura 15</caption> <thead> <tr> <th>Categoría</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Personal Operativo</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Equipos y Herramientas</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Materiales</td> <td>20</td> </tr> </tbody> </table>	Categoría	Porcentaje	Personal Operativo	60	Equipos y Herramientas	40	Materiales	20	<p data-bbox="950 823 1404 1207">Para las fuentes documentales consultadas del tipo Preventivo/Correctivo encontraremos información relevante para el personal operativo cuando se llevan a cabo tareas o trabajos que requieren una planificación grande.</p>		
Categoría	Porcentaje										
Personal Operativo	60										
Equipos y Herramientas	40										
Materiales	20										
<p data-bbox="203 1249 755 1278">Figura 16. Fuentes del tipo Preventivo – Técnico</p>  <table border="1" data-bbox="284 1428 925 1795"> <caption>Data for Figura 16</caption> <thead> <tr> <th>Categoría</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Inspeccion de Infraestructura</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Seguridad Operacional</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Inspecciones y Mantenimientos</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Mantenimientos</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>	Categoría	Porcentaje	Inspeccion de Infraestructura	60	Seguridad Operacional	20	Inspecciones y Mantenimientos	10	Mantenimientos	10	<p data-bbox="950 1411 1404 1690">Podemos ver gráficamente que las fuentes documentales preventivas están principalmente enfocadas en la inspección de la infraestructura, es decir en el análisis antes de las fallas.</p>
Categoría	Porcentaje										
Inspeccion de Infraestructura	60										
Seguridad Operacional	20										
Inspecciones y Mantenimientos	10										
Mantenimientos	10										

Figura 17. Fuentes del tipo Preventivo/correctivo – técnico



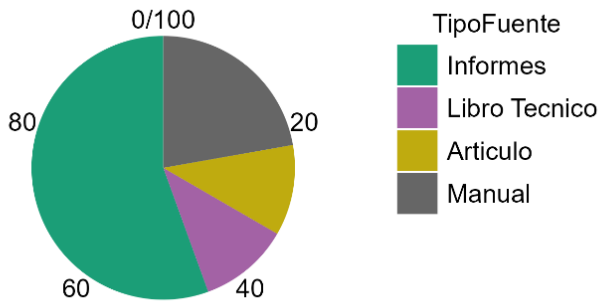
En las fuentes documentales del tipo Preventivo/correctivo encontraremos más información de la parte técnica, para los mantenimientos e inspecciones.

Figura 18. Fuentes para mantenimientos preventivos



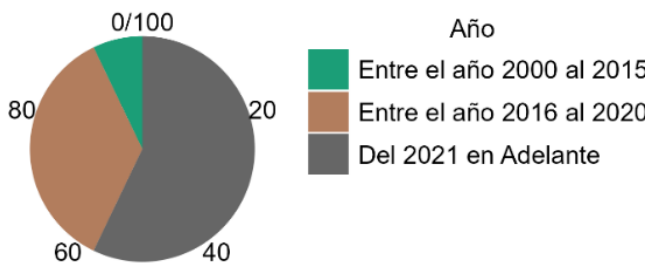
Las fuentes donde se encuentra más información en cuanto a las líneas de transmisión de alta tensión para los mantenimientos preventivos son los informes y los artículos.

Figura 19. Fuentes para mantenimientos preventivos/correctivos



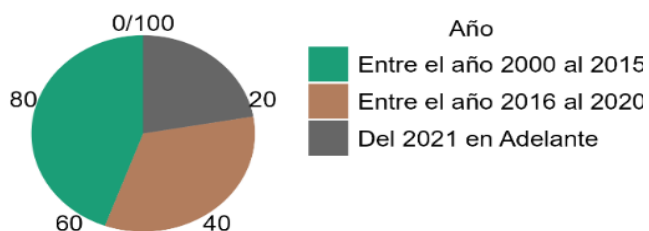
Las fuentes donde se encuentra más información para las líneas de transmisión de alta tensión de los mantenimientos preventivo/correctivos son en los informes y manuales.

Figura 20. Fuentes de mantenimiento preventivo de los años 2000 al 2025



Las fuentes bibliográficas más recientes del año 2021 en adelante, se han enfocado principalmente en el mantenimiento preventivo pues es el que evita asumir costos más grandes a diferencia de los correctivos.

Figura 21. Fuentes de mantenimiento preventivo/correctivo de los años 2000 al 2025



En cuanto a la bibliografía que se enfoca en mantenimientos preventivos y correctivos vemos que la bibliografía utilizada tiene un margen de apenas 10 años.

De acuerdo a la revisión documental que se realizó con la clasificación, es posible evidenciar que se hay una alta concentración de aspectos técnicos en cada uno de los documentos estudiados, que se enfocan principalmente en las inspecciones a la infraestructura que componen a las líneas de transmisión eléctrica, y a los mantenimientos preventivos, dando un desarrollo sistemático en términos técnicos y logísticos que se pueden llevar a cabo en el departamento del valle del Cauca, con una bibliografía actualizada especialmente enfocada en los últimos 10 años.

3.4.4 Análisis de fuentes documentales para para la parte normativa:

Para la parte normativa que fue analizada por JASP para el mantenimiento de las líneas de transmisión eléctrica de alta tensión, gráficamente encontramos lo siguiente:

Tabla 7. Tabla de fuentes normativas para el mantenimiento de líneas de transmisión.

En la figura 22 vemos que la entidad encargada del aspecto técnico es el ministerio de energía y en la figura vemos que la regulación para las líneas de transmisión es llevada a cabo por el ministerio de energía y la CREG (Comisión de regulación de energía y gas y el ministerio de energía).

Figura 22. Entidades encargadas de la parte técnica.

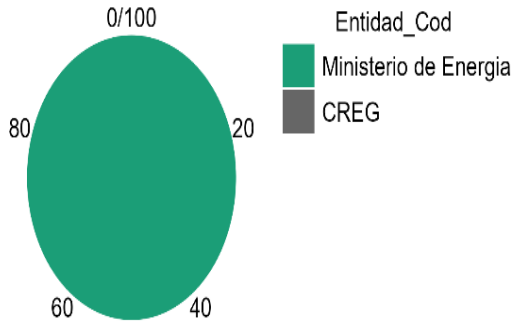
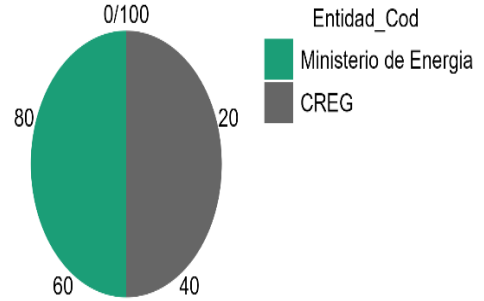


Figura 23. Entidades encargadas de la parte regulatoria.



En la figura 24 y en la figura 25 es posible evidenciar que la certificación de equipos no es aplicable al área regulatoria, y solamente es aplicable en el área técnica.

Figura 24. Normas que se aplican al área técnica

Figura 25. Normas aplicables al área regulatoria



En la figura 26 y figura 27 vemos que la aplicabilidad para la parte técnica y regulatoria es a nivel nacional o para nuestro caso que es el departamento del Valle del Cauca.

Figura 26. Aplicabilidad técnica a nivel nacional

Figura 27. Aplicabilidad regulatoria a nivel nacional



La obligatoriedad debe ser siempre, tanto para la parte técnica como para la regulatoria.

Figura 28. Obligatoriedad de normas técnicas

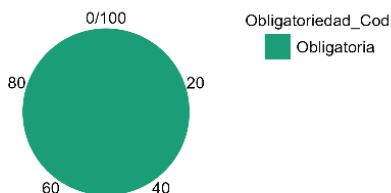
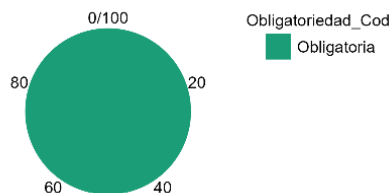


Figura 29. Obligatoriedad de normas regulatorias



Para el marco normativo de la investigación se puede identificar que la regulación que se aplica en Colombia y para las líneas de transmisión del Valle del Cauca, es muy amplia y se encuentra actualizada, todas estas normativas están condicionadas de acuerdo a la coordinación de las instituciones encargadas, y adicionalmente se podría recomendar la aplicación de estas normas puedan estar enfocadas en cuanto a la seguridad territorial y la disponibilidad para disponer de recursos al llevar a cabo la ejecución de mantenimientos cumpliendo todas las normas.

3.5 Análisis de Resultados

3.5.1 Orden público y accesibilidad en las líneas de transmisión en el Valle del Cauca:

En la investigación se caracterizó las líneas de transmisión de alta tensión en el departamento del Valle del Cauca, esto fue de acuerdo a la ubicación de las líneas de

transmisión, la longitud de las líneas, el número de apoyos, y la tensión nominal, después se analizaron de acuerdo al riesgo por orden público y la accesibilidad de cada línea de transmisión. Para esto, se hizo una tabla documental con información de archivos técnicos, estudios del sector energético y transporte eléctrico. Esta información fue clasificada en categorías cualitativas y después se codificó para analizarla en el software JASP, lo que permitió aplicar técnicas estadísticas descriptivas a las variables.

- **Interpretación de resultados:** De acuerdo a los resultados vemos que en la zona sur del Valle del Cauca se tiene la mayor cantidad de líneas de transmisión, esto estaría alineado con la ubicación de centros poblados como son Cali, Palmira y Yumbo, siendo zonas con una alta demanda energética. La zona norte del Valle del Cauca cuenta con una menor densidad de líneas de transmisión, y seguramente es porque tiene una geografía que es más dispersa poblacionalmente, con centros menos poblados que en Valle Sur. Con respecto al riesgo por orden público y accesibilidad, se observó que las líneas de transmisión de alta tensión que representan un mayor riesgo público, están en la zona Sur del Valle del Cauca y solamente 1 en el Norte del Valle del Cauca, este resultado nos indica la complejidad sociopolítica en esta área del Valle del Cauca, donde han existido conflictos sociales o presencia de grupos armados que pueden comprometer la seguridad de las operaciones de mantenimiento. Podemos analizar que en la longitud y el número de apoyos de las líneas son muy importantes porque vemos que en cuanto a longitudes y apoyos mayores se van a traducir en una mayor complejidad de accesibilidad y recorridos extensos, lo que va a generar que se requieran mayores recursos para llevar a cabo mantenimientos para el personal operativo y para los equipos con herramientas necesarios.

- **Relevancia de los hallazgos:** Los hallazgos presentados son importante, porque fue posible entender la infraestructura de las líneas de transmisión de alta tensión en el Valle del Cauca de acuerdo a factores técnicos y de ubicación, que son importantes para los mantenimientos. Y es importante que están destacadas de acuerdo a las fuentes documentales consultadas y estudiadas.

3.5.2 Aspectos técnicos y logísticos de las líneas de transmisión en el Valle del Cauca:

Para poder lograr el segundo objetivo, se buscaron y analizaron 24 documentos técnicos y académicos que se aplicaban al mantenimiento de líneas de alta tensión. Después se realizó un análisis cualitativo codificado para entender los tipos de mantenimientos que predominaban, con sus aspectos técnicos y priorizando también los recursos logísticos requeridos para el departamento del Valle del Cauca.

Interpretación de los resultados

- **Tipos de mantenimiento abordados:** En los resultados podemos ver que hay un equilibrio en los documentos que abordan únicamente los mantenimientos preventivos (13) y los documentos que hablan tanto del mantenimiento preventivo como el correctivo (10), y finalmente solo 1 de estos documentos nos habla acerca del mantenimiento correctivo.
- **Interpretación:** El análisis para el Valle del Cauca nos sirve para poder confirmar lo que ya se encuentra establecido en los documentos de ingeniería, y es que el mantenimiento preventivo es la mejor estrategia para realizar la mejor gestión de líneas de transmisión de alta tensión, esto se da porque se van a reducir fallos, se reducirán costos operativos y se logra extender la vida útil de la infraestructura que componen las líneas de transmisión. Todo lo contrario, el mantenimiento

correctivo es más costoso por lo que se utiliza solo ante fallas inesperadas o de emergencia.

- **Aspectos técnicos más destacados:** La inspección de la infraestructura eléctrica de las líneas de transmisión de alta tensión es el aspecto técnico más frecuente con 11 documentos, y sigue el de actividades combinadas entre inspección y mantenimiento con 5 documentos, finalmente para mantenimiento y seguridad operacional se tienen 4 documentos útiles para el contexto de las líneas de transmisión en el Valle del Cauca.
- **Interpretación:** Con estos resultados es posible reforzar lo que nos dice Gorur (2017) y Rokhforoz et al. (2020), donde destacan que las inspecciones periódicas será lo mejor para aplicar a los mantenimientos preventivo, y sobre todo en los sistemas de alta tensión, donde cualquier falla tendría consecuencias muy graves.
- **Aspectos logísticos predominantes:** De acuerdo a las 3 categorías claves en los aspectos logísticos, tenemos 11 documentos en cuanto a la logística del personal operativo, 8 documentos para los equipos y herramientas especializados, y 5 documentos para lo concerniente a la infraestructura eléctrica de las líneas de transmisión.
- **Interpretación:** Es posible analizar que el personal operativo capacitado es el recurso logístico más importante para llevar a cabo los mantenimientos de las líneas de transmisión de alta tensión, por lo que estos datos descriptivos nos indican que el factor humano es el más importante en la ejecución de esta labor. Con lo anterior confirmamos que una formación técnica que sea continua junto con protocolos de seguridad y planificación de cuadrillas es fundamental para trabajar en entornos donde existe mucho riesgo. En cuanto a herramientas y

equipos como drones, sensores, herramientas en línea viva, también son muy importantes porque permitirán optimizar y reducir riesgos.

- **Tipo de fuente y año de publicación:** Los informes y artículos fueron el tipo de documento más utilizados, especialmente los que están entre los años 2021 al 2025.
- **Interpretación:** Esto nos indica que existe una actualización constante del conocimiento técnico en el sector eléctrico aplicable al departamento del Valle y en general a nivel global. Con esto empresas como Celsia S.A están a la vanguardia de todo lo relacionado a sostenibilidad, a la eficiencia energética y modernización de redes siguiendo estándares actualizados.
- **Relevancia de los hallazgos:** Los resultados que se obtuvieron son importantes porque se puede confirmar la importancia de la planificación preventiva como la estrategia perfecta en los mantenimientos de líneas de alta tensión. También se confirma la importancia de los recursos técnicos y logísticos, y especialmente el recurso humano junto con el de infraestructura. Con esto se aporta información sistematizada con los documentos actuales, y que puedan ser útiles para poder diseñar metodologías aplicables en el contexto geográfico y operativo del Valle del Cauca.

3.5.3 Aspectos normativos de las líneas de transmisión en el Valle del Cauca:

En este objetivo se analizaron 15 documentos normativos y regulatorios del mantenimiento de líneas de alta tensión que son aplicables para Colombia y por lo tanto serán aplicables para el Valle del Cauca, en ellos se incluyeron normas técnicas y manuales, que

estuvieran relacionados con la regulación del mantenimiento de estos sistemas eléctricos. Con este análisis se identificaron los tipos de normas y los enfoques que se podrían aplicar.

Interpretación de los resultados

1. Diversidad y tipos de normas: Se incluyeron normas técnicas, leyes, resoluciones, guías y decretos, que se apliquen para el marco regulatorio del sector eléctrico en Colombia y por consiguiente para el Valle del Cauca.

- **Interpretación:** Se incorporaron los documentos normativos que permitan realizar una regulación, abarcando el marco jurídico general como también aspectos más técnicos y específicos de tal forma que se garanticen las actividades de mantenimiento que se puedan ejecutar, de acuerdo a los estándares más reconocidos y que a su vez estén respaldados legalmente.

2. Entidades reguladoras predominantes: Las principales entidades emisoras identificadas para el mantenimiento de líneas de alta tensión son: el instituto colombiano de normas técnicas con la CREG (comisión de regulación de energía y gas), y el Ministerio de Minas y Energía con la unidad de planeación minera energética.

- **Interpretación:** De acuerdo a estos documentos podemos evidenciar que existe un trabajo que se coordina entre los organismos técnicos, reguladores y legislativos, teniendo sus roles muy claros en cuanto a quien establece estándares técnicos, quien es el que regula los aspectos de calidad, y después se aseguren mediante un respaldo legal para los mantenimientos de líneas de alta tensión.

3. Enfoques normativos prioritarios: Y para el aspecto regulado se analizaron tres enfoques, La seguridad eléctrica con las normas que la regulan en cuanto a su operación y mantenimiento cumpliendo la protección de operarios técnicos y usuarios. Los procedimientos

técnicos y operativos en mantenimientos preventivo y correctivo, teniendo en cuenta la frecuencia de cuando se realizan. Y la calidad y continuidad del servicio con las regulaciones que garantizan el suministro eléctrico estable y confiable.

- **Interpretación:** La prioridad en cuanto a la seguridad que se tienen en las normas por el riesgo del trabajo en líneas de alta tensión es en cuanto a los procedimientos que ya están estandarizados y que fortalecen la eficacia del mantenimiento y con eso se responde a las demandas sociales y regulatorias.

Relevancia de los hallazgos: Es posible confirmar que el mantenimiento de líneas de alta tensión en Colombia y para el Valle del Cauca está amparado por un marco regulatorio que es robusto y actualizado, teniendo aspectos técnicos, legales y de seguridad. Estos contienen la diversidad de normativas que permiten tener una metodología de mantenimiento para el Valle del Cauca apoyada de documentos aplicables para este sector. Estos hallazgos aportan protocolos que se pueden adaptar a la realidad de esta investigación, cumpliendo los estándares nacionales y asegurando la protección de los recursos humanos como también materiales.

Con el análisis de resultados de los tres objetivos es posible confirmar que los factores en cuanto accesibilidad y orden público son determinantes para poder llevar a cabo los mantenimientos en las líneas de transmisión en el Valle del Cauca. Por esto se recomienda a las empresas contratistas de las electrificadoras se adopten estrategias que permitan diferenciar las zonas en cuanto a accesibilidad y orden público, para que se puedan integrar planes logísticos, de seguridad y de respuesta rápida.

Con la a revisión documental técnica y logística para las líneas de transmisión en el Valle del Cauca se evidencia que existe una alta concentración que incluyen estos aspectos, pero sin tanto desarrollo en cuanto a cómo gestionar los riesgos que se representan en la ubicación de las líneas de transmisión, es por eso que se recomienda la implementación de programas de mantenimientos e inspecciones más integrales donde se combine la tecnología mencionada en los documentos como drones, sensores remotos, monitoreo en tiempo real con la seguridad operativa que sea necesaria de acuerdo a cada zona donde se presente.

Para la normativa colombiana que es suficiente en un contexto normal, vemos que su eficacia depende para ciertas zonas de la capacidad para aplicarla en condiciones adversas. Se podría recomendar realizar diseños de protocolos que tengan flexibilidad cuando se vayan aplicar estas normas, de tal forma que se consideren factores de orden público y accesibilidad para que se pueda ejecutar las ordenes operativas, sin perder el cumplimiento legal.

3.5.4 Validación de datos con experto del sector eléctrico:

La validación que se realizó con el experto de mantenimiento del sector eléctrico con respecto a los hallazgos obtenidos del análisis documental fue:

Para los factores de accesibilidad y orden público que se describieron en la tabla 1, se identificó que las líneas de transmisión que presentan mayor riesgo de orden público y accesibilidad son las que tienen su origen en centrales de generación eléctricas como Salvajina en el norte del Cauca, y Alto y Bajo Anchicaya en proximidades a la zona costera del Valle del Cauca. De acuerdo a lo anterior se pudo validar que, por ejemplo, en salvajina ubicada en Suarez (Cauca) donde inicia una de las líneas de transmisión que llega hasta Pance, ha presentado problemas de orden público por causa de grupos armados desde hace muchos años, y que en esta zona especialmente la dificultad viene a raíz de estos. En cuanto a la

relación documental que se encontró como tal en los documentos con respecto a accesibilidad, longitud de la línea de transmisión, cantidad de apoyos y nivel de tensión fue posible aclarar con el experto que además del orden público hay problemas de accesibilidad, porque la zona desde donde se ubican las centrales eléctricas está en zonas montañosas y con escasa población que a su vez se traduce en la no existencia de rutas o caminos de ingreso. Por lo anterior vemos que para llevar la energía eléctrica desde estas zonas montañosas hasta las grandes ciudades se deben utilizar rutas muy extensas que se traduce en líneas de transmisión más largas, con una gran cantidad de apoyos o torres, y niveles altos de tensión desde las centrales eléctricas, que al revisarlo con los datos de resultados obtenidos en JASP, vemos la relación que había para orden público, accesibilidad con longitud, apoyos, nivel de tensión y la zona. De acuerdo a esta explicación y de acuerdo al experto vemos que sucederá lo mismo para las líneas de transmisión del Alto y Bajo Anchicaya.

En cuanto a los aspectos técnicos y logísticos que se identificaron en la tabla 2 se han encontrado que en ellos se reflejan las actuales prácticas que se emplean para los mantenimientos preventivos y correctivos de líneas de transmisión de alta tensión en el Valle del Cauca, destacando la importancia de contar con personal capacitado para llevar a cabo el mantenimiento de líneas de alta tensión en el Valle del Cauca y las implicaciones logísticas que tiene estos. De acuerdo al objetivo 2 y como aporte del experto. Las fuentes documentales recopiladas, aportarían el conocimiento técnico y logístico necesario para llevar a cabo mantenimientos de forma normal, pero en la práctica y para líneas de transmisión con problemas de orden público, se deben utilizar estrategias logísticas que se alineen bajo las circunstancias del lugar donde se encuentran, es decir para llevar a cabo estas labores en algunos casos, hay que invertir entre dos y tres meses únicamente en gestiones previas, como la verificación de accesos, la socialización con las comunidades locales, hospedajes alimentación, para poder evitar posibles conflictos. También que, por la falta de infraestructura

vial, el transporte del material debe realizarse a lomo de caballo o burro. Teniendo desafíos relacionados con la presencia de diversas facciones comunitarias, incluyendo grupos armados, lo que hace que haya un mayor nivel de complejidad y riesgo a la operación, que incluso, después de todo esto exista pérdida de material que ya se había ingresado a zonas difíciles y por cualquier circunstancia externa la actividad puede no llegar a ejecutarse. En si las fuentes documentales técnicas y logísticas se aplican para las líneas de transmisión del valle del cauca en un contexto normal, pero adicionalmente las circunstancias pueden exigir adaptaciones inmediatas a situaciones no contempladas en los documentos manuales, como ausencia de vías, conflictos sociales o presencia de actores armados.

Para la normatividad y de acuerdo a la tabla 3 se encuentra que actualmente está vigente y son de obligatorio cumplimiento, por lo que la guía es adecuada para poder guiar las actividades de mantenimiento en el Valle del Cauca.

3.6 Consideraciones Éticas

La investigación aplica las normas que regulan la recolección de información para proteger y respetar los derechos de los autores considerando los siguientes principios éticos.

Respeto de la autonomía y confidencialidad de datos: La información obtenida de los documentos, informes y normativas será únicamente con fines académicos, respetando los derechos de autor de las fuentes consultadas, con su respectiva citación y referencia en formato APA séptima edición.

Transparencia del análisis de información: Se garantiza que la información recolectada no presente distorsiones o sesgos que favorezcan el resultado de la monografía.

Responsabilidad social: La investigación asegura que los resultados no sean utilizados con fines perjudiciales al tratarse de un tema de ingeniería en cuanto a mantenimientos de líneas de alta tensión.

Uso responsable de la información: No se hará uso indebido de la información que se recopile, para proteger información sensible o confidencial.

Con estas consideraciones éticas la investigación garantiza que la información recolectada y sus análisis se harán con responsabilidad, integridad y transparencia.

4. CONEXIÓN DE RESULTADOS PARA LA METODOLOGÍA

4.1.1. Resultados

En la investigación se presentaron de manera sistemática los hallazgos acerca del mantenimiento de líneas de transmisión eléctrica de alta tensión para escenarios críticos en cuanto al desarrollo regional, enfrentando e identificando retos como son los logísticos, técnicos, sociales, y normativos que inciden directamente en la operación y mantenimiento para el Valle del Cauca. Lo anterior es importante porque al tener la región zonas de difícil acceso y problemas de orden público se hace indispensable contar con diagnósticos sistematizados y así se puedan socializar los resultados con agentes que están involucrados en el sector eléctrico, y que además del valor académico, también brinde un espacio para la práctica, gestión y regulación del sector.

Con la recopilación de datos (Tabla 1) evidenciamos la ubicación y condiciones de accesibilidad de las líneas de transmisión tienen desafíos críticos, con algunas de ellas presentando limitaciones logísticas y de seguridad, por lo cual consecuentemente se incrementará la complejidad al momento de realizar las actividades de mantenimiento.

Para los aspectos técnicos y logísticos del mantenimiento, a partir de las fuentes documentales (Tabla 2) se puede identificar los mantenimientos preventivo y correctivo y lo que exige una planificación donde se considere disponibilidad de materiales, tiempos de intervención y capacitación del personal técnico.

Para la normatividad analizada y aplicable a nivel Nacional y por lo tanto para el Valle del Cauca (Tabla 3) se identifican normas técnicas y resoluciones vigentes que deben cumplirse estrictamente. Con estas normas es posible orientar las prácticas de mantenimiento, y garantizar la seguridad de los trabajadores, así como también la confiabilidad del sistema interconectado nacional.

Con la validación experta de los hallazgos fueron por el ingeniero Miguel Fajardo, especialista en sistemas eléctricos, se coincide en que los retos del mantenimiento en la región están asociados a la accesibilidad, el orden público recursos técnicos con logísticos y aplicar la normatividad técnica, para confirmar la pertinencia y confiabilidad de los resultados.

4.1.2. Metodología propuesta para el mantenimiento

La investigación esta desarrollada con un enfoque descriptivo, para evaluar una metodología de mantenimiento de las líneas de transmisión eléctrica de alta tensión en el Valle del Cauca, donde se consideran las variables geográficas, técnicas, logísticas y normativas que inciden en su operación.

La monografía es del tipo cualitativo en base documental donde al inicio se realizó una revisión exhaustiva de fuentes como normas técnicas, resoluciones regulatorias, manuales de mantenimiento, informes de empresas del sector y de literatura académica especializada. Después se realizó un análisis comparativo de la información para identificar patrones comunes aplicables para las líneas de transmisión del Valle del Cauca. Y con los resultados obtenidos se

validaron mediante entrevista personal con un experto en las líneas de transmisión del Valle del Cauca.

De acuerdo con el objetivo general, se establecieron las siguientes variables de análisis: Accesibilidad y orden público de acuerdo a la ubicación de las líneas de transmisión y las zonas de operación. Técnicas y logísticas que se aplican a las prácticas de mantenimiento preventivo y correctivo, pruebas, calibraciones de equipos, disponibilidad y capacitación de recursos humanos, materiales y tiempos de intervención. Y con las normativas del marco regulatorio aplicable, como el RETIE, resoluciones de la CREG y normas de seguridad y mantenimiento.

4.1.3. Propuesta metodológica para el mantenimiento de líneas de transmisión eléctrica de alta tensión en el Valle del Cauca.

Se propone una metodología que pueda orientar y garantizar una operación eficiente, segura y continua para el Valle del Cauca de acuerdo al objetivo general de la investigación, donde se articularan factores geográficos, técnicos, logísticos y normativos. Se estructura con las siguientes etapas de tal forma que se puedan complementar.

Etapa 1 de diagnóstico de accesibilidad y orden público, donde se identifican las características de la línea de transmisión, con su ubicación en el departamento, las condiciones para de accesibilidad y orden público, y con esta información clasificar las zonas de riesgo para establecer los recursos en cuanto a ingreso y seguridad del personal de mantenimiento. Esto permitirá anticipar restricciones y planificar las intervenciones de manera eficiente.

Etapa 2 de revisión técnica y logística, donde se verificará el estado de los componentes eléctricos y mecánicos de la línea. Que con las fuentes clasificadas se pueden ofrecer herramientas como inspecciones visuales mediante drones, termografía infrarroja y mediciones

de resistencia de aislamiento. Así se podrá identificar fallas y priorizar las acciones correctivas o preventivas.

Etapa 3 de Cumplimiento normativo y planeación para caracterizar los aspectos técnicos y logísticos, de acuerdo al marco regulatorio aplicable (RETIE, resoluciones CREG, NTC y normas de seguridad eléctrica). Y con esta información se podrá elaborar un plan de trabajo que incluirá permisos, protocolos de seguridad y criterios de calidad, que garantice que todos los mantenimientos se realicen dentro del marco legal vigente.

Etapa 4 de la ejecución de mantenimiento. Aquí ya se ejecutarían los trabajos en campo de acuerdo a la planificación previa. Donde se podrían incluir acciones correctivas por fallas críticas, o mantenimientos preventivos y programados como limpieza de aisladores reemplazo de herrajería, control de vegetación entre otros teniendo en cuenta las primeras 3 etapas.

Etapa 5 para validación y retroalimentación, donde se deberían consolidar las intervenciones en informes técnicos, documentando las actividades ejecutadas y recomendaciones a tener en cuenta a futuro. Este informe debería ser revisado debe ser revisado por personal experto, para que se convierta en un documento que permita poder mejorar de manera continua la metodología y seguir fortaleciendo los procesos de mantenimiento.

De acuerdo a esta propuesta, la investigación ofrece una herramienta que sería útil para las empresas operadoras de líneas de transmisión en el Valle del Cauca. Porque se relacionan variables geográficas, técnicas, logísticas y normativas, para asegurar eficiencia del mantenimiento en el mediano y largo plazo.

4.1.4. Discusión de resultados

Los hallazgos de la investigación de integrar variables geográficas, técnicas, logísticas y normativas para el mantenimiento, permite evidenciar que el enfoque preventivo es el más practicado, lo que coincide con lo planteado por Sosa Gómez (2023), quien destaca el menor costo operativo en comparación con el mantenimiento correctivo, aunque este requiere una planificación que se basa en diagnósticos precisos. Esto se reflejaría en una clasificación y priorización de las líneas de transmisión según accesibilidad, nivel de tensión y condiciones de orden público, para poder realizar los cronogramas de mantenimiento.

La guía técnica CIGRÉ 657 (2016) recomienda que los mantenimientos se realicen con una periodicidad de acuerdo al ciclo de vida de la infraestructura, donde se deben realizar inspecciones periódicas y tener monitoreo constante. Pero para el Valle del Cauca, vemos que esto no se cumple totalmente por las restricciones logísticas y de seguridad en diversas zonas. Por lo que se deben realizar estrategias considerando particularidades como el nivel de riesgo.

Para el contexto geográfico y social, Chowdhury y Koval (2022) nos dicen que factores como la geografía compleja, el vandalismo y los desastres naturales van a impactar los sistemas eléctricos en países en desarrollo. Para el Valle del Cauca, estos factores se aplican en las líneas de transmisión que atraviesan zonas montañosas, donde existen problemas de orden público y debido a la dificultad de acceso se va a incrementar el riesgo de interrupciones y habrá mayores costos operacionales.

Escenarios hipotéticos

Si no se tienen en cuenta factores como la accesibilidad o el orden público en una planeación de mantenimiento, los riesgos de ejecución se van a incrementar de forma exponencial, tal como lo indica Chowdhury y Koval (2022).

Si se implementaran tecnologías CBM y drones, de acuerdo con lo planteado por Mahdavi et al. (2020) y Navarro y Tavares (2021), se mejorarán las capacidades de diagnóstico y monitoreo en zonas remotas como las líneas de difícil acceso en el Valle del Cauca, y de esta forma se reduciría la probabilidad de fallas críticas.

Así estos resultados, tendrían coherencia con los enfoques planteados, y ponen la necesidad de aplicar una metodología, adaptativa y con soportes para responder a las condiciones particulares del Valle del Cauca.

5. LIMITACIONES Y PROYECCIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Esta investigación tiene limitaciones que se deben tener en cuenta en el momento que se vayan a interpretar los resultados, porque se basó principalmente en fuentes bibliográficas como documentos técnicos, normativos, académicos, bases de datos documentos del sector eléctrico colombiano entre otros, Lo anterior implica una limitación porque no se realizaron visitas de campo u observaciones directamente desde las líneas de transmisión eléctrica de alta tensión en los terrenos donde se encuentran. Esto podría restringir la identificación de las condiciones reales de operación para cada línea de transmisión para el Valle del Cauca.

Al depender de informes y documentos oficiales, la investigación tiene un sesgo documental, donde no se van a reflejar las perspectivas de comunidades, trabajadores operativos o el de instituciones reguladores que estén directamente relacionadas en el entorno del mantenimiento de las líneas de alta tensión.

Aunque la validación de los hallazgos de la investigación se llevó a cabo mediante una entrevista con un experto en el sector, esta carece de tener más perspectivas, lo que generar un sesgo de la interpretación de los resultados. También se debe tener en cuenta que la

disponibilidad y vigencia de algunos documentos consultados puede variar con el tiempo, por lo que se puede ver limitada la aplicabilidad en escenarios futuros para el mantenimiento de líneas de transmisión en el Valle del Cauca.

Teniendo en cuenta las limitaciones de la investigación, esta monografía abre la posibilidad para realizar futuras investigaciones donde se pueda incorporar el trabajo en campo, para las zonas que presentan criticidad de difícil acceso y valoración del orden público. También se podrían integrar encuestas y entrevistas al personal técnico que trabaja en las líneas de transmisión y a las comunidades cercanas a las líneas de transmisión eléctrica. Investigaciones donde se puedan desarrollar modelos de priorización que se basen de acuerdo al riesgo y costo – beneficio. Finalmente se podrían explorar investigaciones en cuanto a la aplicación de las tecnologías emergentes como sensores, drones, y herramientas digitales en el mantenimiento de líneas de alta tensión.

En cuanto a mí, esta investigación me permitió comprender lo complejo del mantenimiento de líneas de transmisión eléctrica, por los diferentes factores que se han mencionado como geográficos, logísticos, técnicos, normativos, y a través de la integración de distintas fuentes bibliográfica se pueda construir una propuesta coherente y fundamentada.

Considero que un desafío grande que tuve durante la investigación fue el de la recopilación y sistematización de la información, e interpretar los lineamientos que se establecían para el contexto del Valle del Cauca. Para mí este proyecto a significado tener un desarrollo académico y profesional, que fortaleció mis competencias en investigación aplicada, análisis crítico y gestión documental. También aumento mi interés para buscar soluciones que aporten al sector energético, y mejorar la confiabilidad del servicio eléctrico y la seguridad de las comunidades.

6. CONCLUSIONES

Con la investigación fue posible evaluar una metodología para el mantenimiento de las líneas de transmisión de alta tensión en el Valle del Cauca, considerando factores geográficos de accesibilidad, orden público, técnicos, logísticos y normativos. Con los hallazgos es posible evidenciar que, aunque se tenga unos marcos regulatorios bastante completos y sólidos que están compuestos en base a normas nacionales e internacionales como el RETIE, la CREG y estándares técnicos, Para su aplicación en el campo de trabajo se van a tener limitaciones asociadas a la accesibilidad de las zonas, la seguridad pública y la disponibilidad de recursos logísticos.

De acuerdo a la pregunta de investigación, se concluye que se puede realizar una metodología integrando las variables de una forma coordinada con un proceso sistemático, iniciando con la caracterización geográfica de accesibilidad y orden público, para después evaluar la parte técnica de los activos con la planeación logística, y se complementaría con la verificación del cumplimiento normativo. Con este enfoque se garantizaría la operación eficiente y segura de la infraestructura eléctrica de las líneas de transmisión en el Valle del Cauca, para responder al objetivo general que se había planteado.

Con los resultados evidenciamos que la triangulación entre fuentes documentales y la validación realizada con el experto del sector, permite que se afiance la propuesta metodológica, aun cuando exista ausencia de trabajo de campo como una limitación. Pero con este diagnóstico tenemos un aporte valioso para formular estrategias empresariales de mantenimiento de líneas de alta tensión en el Valle del Cauca, porque está orientado a la priorización de recursos de acuerdo a las condiciones reales del entorno operativo.

Para términos prácticos, la metodología que se propone aporta una referencia que se puede adaptar y ser utilizada para las empresas que operen en la transmisión eléctrica en el Valle del Cauca y replicado en otras zonas del país. Teóricamente se contribuye al fortalecimiento de la literatura nacional sobre mantenimiento de líneas de transmisión. En la metodología se plantea un modelo para integrar la normativa con los factores de riesgo y procedimientos técnicos, que podría ser perfeccionado con mayor profundidad en futuras investigaciones con datos levantados en campo.

Finalmente, de acuerdo a estos hallazgos se resalta la necesidad de tener una cultura preventiva para el mantenimiento de la infraestructura eléctrica, donde las decisiones dependan de una planificación que anticipe riesgos para optimizar la continuidad del servicio. Así se contribuye a la seguridad operativa, y a la confiabilidad de la energía, que es fundamental para el desarrollo social y económico del Valle del Cauca.

Referencias

- Athari, M. H., & Wang, Z. (2017). Interdependence of transmission branch parameters on voltage levels. arXiv.
- Celsia Colombia S.A. E.S.P. (2021). Reporte integrado 2021: salud y seguridad en el trabajo. Recuperado de <https://reporteintegrado2021.celsia.com/>
- Celsia Colombia S.A. E.S.P. (2022). Reporte integrado 2022: nuestra gestión. Recuperado de <https://reporteintegrado2022.celsia.com/>
- Celsia S.A. E.S.P. (2023). Informe técnico de mantenimiento de infraestructura eléctrica. <https://www.celsia.com>
- CHEC S.A. E.S.P. (2016). Manual de mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo de subestaciones MA-DI-08-001-001. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/356721189>
- CHEC S.A. E.S.P. (2020). Informe técnico de transmisión y distribución CHEC 2020. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/580677568>
- Chowdhury, A. R., & Koval, D. O. (2022). Grid resilience: A strategic maintenance framework for developing countries. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 10, 1–15.
- CIGRÉ (International Council on Large Electric Systems). (2010). *Transmission Asset Risk Management* (Technical Brochure no. C1.16). París, Francia.
- CIGRE e-session (2024). Restrepo, N., Puello, C., & Peña, J. (2024). Incorporation of new technologies (drones) in the maintenance and monitoring of high-voltage transmission lines in ISA-INTERCOLOMBIA. CIGRE.

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (1995). Resolución 025 de 1995: Reglas de operación del sistema de transmisión nacional.

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2000). Resolución 098 de 2000: Por la cual se modifica la Resolución 025 de 1995.

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2012). Resolución 020 de 2012: Regulación sobre medición y calibración en sistemas de transmisión eléctrica.

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2023). *Resolución CREG 101-009 de 2023: Por la cual se modifican algunos artículos de la Resolución CREG 015 de 2018*.

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. (2022). Supervisión de obras: mantenimiento preventivo y correctivo de redes eléctricas en Cundinamarca. Repositorio Institucional. Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.co/>

CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas). (2018). Resolución CREG 015 de 2018 – Disposiciones relacionadas con la gestión del mantenimiento en el Sistema Interconectado Nacional.

Defensoría del Pueblo. (2023). Alertas tempranas y situación humanitaria en el Valle del Cauca. <https://www.defensoria.gov.co>

Díaz-Concepción, A., Villar-Ledo, L., Cabrera-Gómez, J., Alfonso-Álvarez, A., Guillén, J., & Palomino-Marín, E. (2021). Análisis de una estrategia de mantenimiento a implementar en empresas de transmisión eléctrica. *Ingeniería Mecánica*, 24(3).

EPRI (2010). General guidelines for HVDC electrode design. Electric Power Research Institute.

Flick, U. (2015). *An Introduction to Qualitative Research* (5th ed.). Sage Publications.

- Gorur, R. (2017). Live line working and insulators: technology and safety standards. Technical Manual.
- Grigsby, L. L. (Ed.). (2007). The electric power engineering handbook (2^a ed.). CRC Press.
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Recolección y análisis de datos en la ruta cualitativa y cuantitativa. En Metodología de la investigación: las tres rutas (pp. 310–521). McGraw-Hill.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6^{ta} ed.). McGraw-Hill.
- ICONTEC. (2003). NTC 3949: Estaciones de regulación y transporte de gas combustible – Requisitos. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- ICONTEC. (2020). NTC 2050: Código Eléctrico Colombiano (6.^a ed.). Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- ICONTEC. (2022). Norma Técnica Colombiana NTC 2050: Código Eléctrico Colombiano para Instalaciones Eléctricas.
- IEEE Xplore (2013). Maintenance practices for transmission overhead lines. En IET Conference Publications. Recuperado de IEEE Xplore
- IGAC – Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2024). Visor geográfico SIGOT.
<https://sigot.igac.gov.co>
- InterNational Electrical Testing Association. (2019). ANSI/NETA MTS-2019: Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems.

- International Electrotechnical Commission (IEC). (2021). IEC 60364-6: Verification and Maintenance of Electrical Installations. IEC.
- ISA (Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P.). (2022). Manual técnico de mantenimiento de líneas de transmisión. Medellín, Colombia.
- ISA Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. (2020). Informe técnico: proyecto de mantenimiento en línea viva de 230 kV en el Valle del Cauca. Recuperado de <https://isa.co/>
- JASP Team. (2024). JASP (Version 0.18) [Computer software]. <https://jasp-stats.org/>
- Khuntia, S. R., Zghal, F., Bhuyan, R., Schenkel, E., Duvivier, P., Blancke, O., & Krasny, W. (2023). Use of survival analysis and simulation to improve maintenance planning of high voltage instrument transformers in the Dutch transmission system.
- Li, J., Zhang, Y., Guo, S., Liu, B., & Sun, J. (2021). Risk analysis using failure modes, effects, and criticality analysis for transmission network assets. *Energies*, 14(4), 977.
- Liu, S., Wang, B., Zhao, Y., Zhang, L. L., & Jiang, L. (2023). A comprehensive review of fault diagnosis and prognosis techniques in high and medium voltage power lines. *Energies*, 16(21), 7317.
- Mahdavi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rahimi, M. (2020). A comprehensive review on maintenance planning and scheduling in power transmission systems. *Sustainability*, 13(15), 8208.
- Mahin, A. U., Islam, S. N., Ahmed, F., & Hossain, M. F. (2022). Measurement and monitoring of overhead transmission line sag in smart grid: A review. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 16(1), 1–18.

- Martínez, L., & Rivera, S. (2018). Transmisión de energía eléctrica: aspectos técnicos y económicos. Universidad Tecnológica Nacional.
- MDPI Sustainability (2018). Maintenance of a High-Voltage Overhead Transmission Line: Sustainability and noise impact assessment. *Sustainability*, 10(2), 491.
- Ministerio de Defensa Nacional. (2024). Boletín de seguridad y orden público 2024.
<https://www.mindefensa.gov.co>
- Ministerio de Minas y Energía. (2005). Resolución 180498 de 2005: Requisitos técnicos para instalaciones eléctricas en Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía. (2008). Resolución 181294 de 2008: Capacitación y certificación de personal técnico eléctrico.
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). Resolución 90708 de 2013: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).
- Ministerio de Minas y Energía. (2024). Resolución 40117 de 2024: Por la cual se modifica el RETIE.
- Ministerio de Trabajo. (2019). Resolución 5018 de 2019: Por la cual se adopta el reglamento técnico de salud y seguridad en el trabajo para labores de mantenimiento en redes eléctricas.
- National Fire Protection Association. (2019). NFPA 70B: Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance (2019 ed.).
- National Fire Protection Association. (2020). NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace (2021 ed.).

- Olivares, J., & Patiño, D. (2019). Mantenimiento predictivo y fiabilidad en líneas de transmisión en zonas de los Andes. *Revista Ingeniería y Territorio*, 18(3), 45–62.
- Pansini, A. J. (2000). *Substation and transmission line maintenance*. McGraw-Hill.
- Pernebaveva, D., Bagheri, M., & James, A. P. (2017). High voltage insulator surface evaluation using image processing.
- Portal Eléctricos. (2024). Capítulo 5 del RETIE: Líneas aéreas de transmisión de alta tensión.
- Power Grid Corporation of India (Powergrid). (2023). *Transmission asset management and maintenance practices*. Powergrid India.
- Ren, Y. (2021). Fault analysis and maintenance of high voltage transmission line. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 781, 042066.
- Rodríguez Aranday, F. (2018). *Formulación y evaluación de proyectos de inversión*. McGraw-Hill Interamericana.
- Rodríguez, M., & Cáceres, J. (2019). Evaluación de riesgos en la operación de líneas de transmisión eléctrica en Colombia. *Ingeniería y Territorio*, 25(1), 45–63.
- Rokhforoz, P., Gjorgiev, B., Sansavini, G., & Fink, O. (2020). Multi-agent maintenance scheduling based on coordination between central operator and decentralized producers in an electricity market. *arXiv*.
- Rosa, J., & Silva, J. A. (2021). Sustainability in energy infrastructure: Key challenges and strategies for power transmission projects. *Energy Policy*, 149, 112010.
- Short, T. A. (2015). *Electric power distribution handbook* (2ª ed.). CRC Press.

Sosa Gómez, R. E. (2023). Manual de ingeniería económica (ed. Alfaomega).

Tang, Y., & Huang, Y. (2022). Research on construction technology of deep foundation pit of high voltage transmission line in plateau area. *Academic Journal of Science and Technology*, 4(2), 112–115.

Terna (2022). An extra-high voltage test system for transmission expansion planning studies considering single contingency conditions. *Electronics*, 13(19), 3937.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2021). Diagnóstico y plan de mantenimiento según RETIE aplicado en laboratorio de alta tensión. Repositorio Institucional. Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.co/>

UPME – Unidad de Planeación Minero Energética. (2023). Planes de expansión del sistema de transmisión nacional. <https://www1.upme.gov.co>

Upme (Unidad de Planeación Minero Energética). (2020). Plan de expansión de referencia generación-transmisión 2020-2034. Bogotá, Colombia.

Upme (Unidad de Planeación Minero Energética). (2022). Plan de expansión de transmisión 2022-2036. Bogotá, Colombia.

UPME. (2023). Informe sobre logística de mantenimiento de redes en zonas rurales y de difícil acceso. Recuperado de <https://www1.upme.gov.co/>

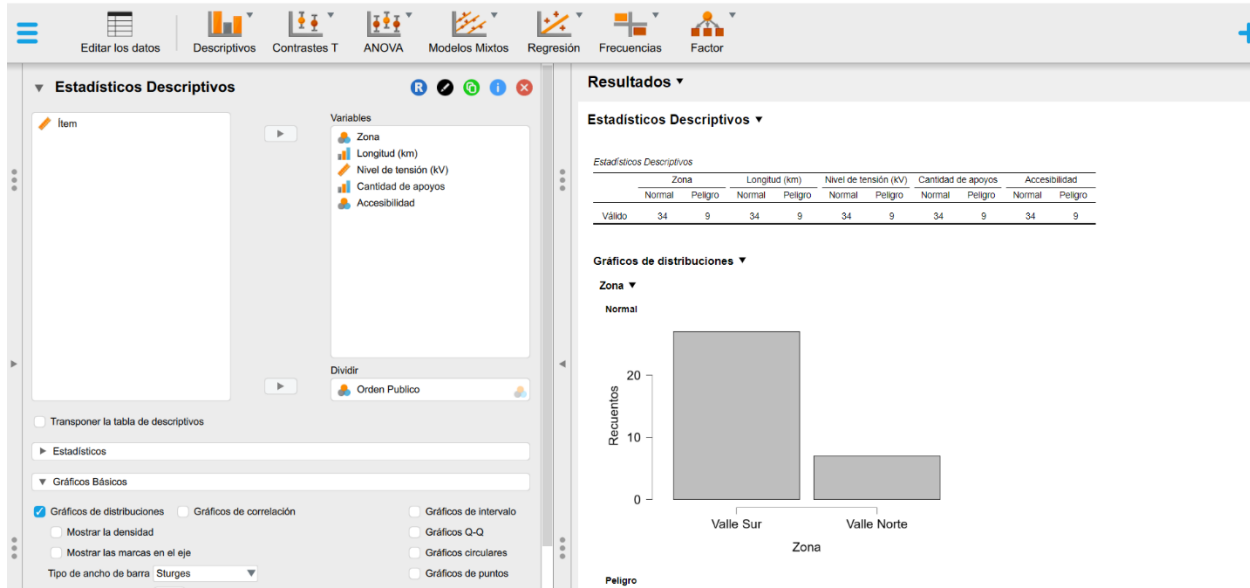
Wang, H., Han, J., Zhang, K., Wang, F., & Fan, S. (2019). Study on operation and maintenance management mode of high-voltage transmission lines. En V. Sugumaran, Z. Xu, P. S., & H. Zhou (Eds.), *Application of Intelligent Systems in Multi-modal Information Analytics* (vol. 929, pp. X–Y). Springer.

XM S.A. E.S.P. (2024). Sistema de información eléctrica colombiana (SIEL).

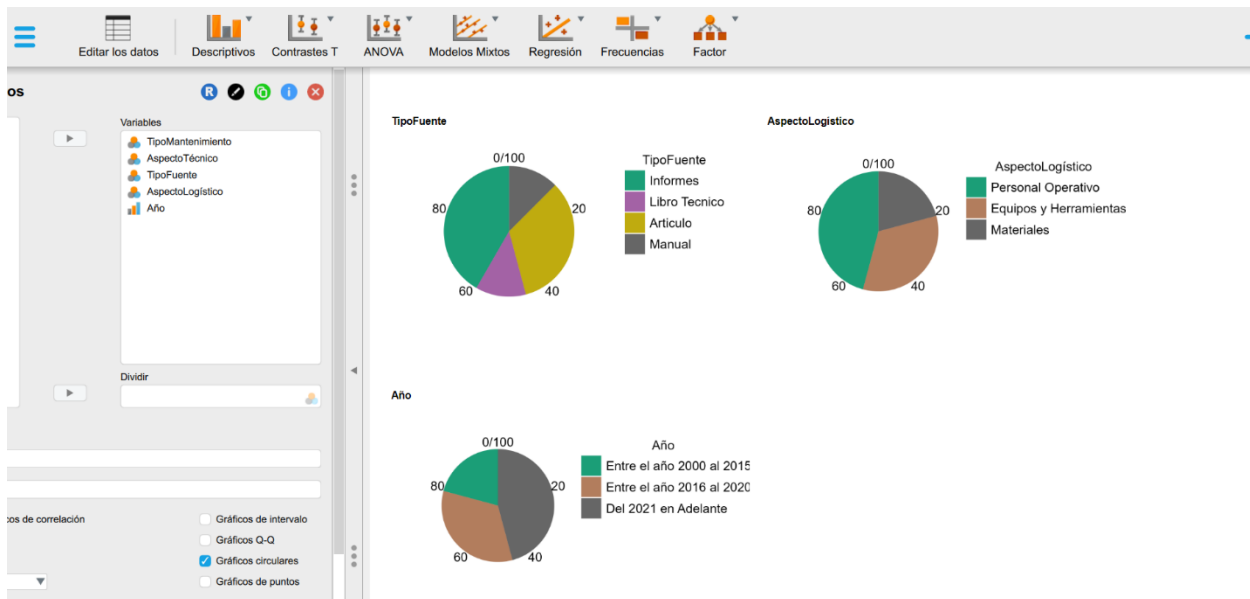
<https://www.xm.com.co>

Anexos

Anexo 1. Correlación de graficas para accesibilidad y orden público, utilizando JASP.



Anexo 2. Correlación de graficas para aspectos técnicos y logísticos, utilizando JASP.



Anexo 3. Correlación de graficas para normativas de mantenimiento de LAT, utilizando JASP.

