

ESTRATEGIAS GEOTÉCNICAS PARA EL MANTENIMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Johanna Andrea Rodríguez Pardo
Carrera 9 No. 73-44
E.mail: jarodriguez@enlaza.red
Bogotá, D.C. – Colombia

Resumen

Con la implementación de una metodología que permita definir el riesgo geotécnico de las torres de energía, se plantea una estrategia para priorizar los activos que requieren de atención a corto, mediano y largo plazo. Una vez que el proceso de Caracterización por Riesgo Geotécnico se fundamenta en la definición de la Amenaza Geotécnica de los sitios de torre y en la Vulnerabilidad de las Estructuras, es posible plantear un plan de atención para los procesos de remoción identificados.

Introducción

Considerando la longitud y las características de la infraestructura eléctrica de las líneas de transmisión y las variaciones en las condiciones del entorno geológico-geotécnico asociado, se dificulta la elaboración de un plan de mantenimiento geotécnico de los sitios de torre.

Con base en esa dificultad, en la Gerencia de Mantenimiento de Enlaza Grupo Energía Bogotá, se planteó una metodología que busca definir los rasgos de comportamiento generales a lo largo de las líneas de transmisión e identificar las zonas en las que se debe enfocar el plan de mantenimiento quinquenal y priorizar año a año las actividades a realizar y revisar los cambios en el comportamiento de los sitios de torre.

Cabe resaltar que los riesgos geotécnicos son dinámicos y se modifican a lo largo del tiempo en función del entorno natural del sitio y de las acciones antrópicas en el área de influencia de los activos. Es por ese motivo, que la criticidad de cada torre puede cambiar de acuerdo con argumentos técnicos identificados por los

especialistas de la Gerencia de Mantenimiento y que influyen en los parámetros de entrada definidos dentro de esta metodología, para lo cual se deben dejar las evidencias de la toma de decisiones.

Técnicas y Métodos de Análisis de Riesgos

Se adoptó como estrategia de mantenimiento la centrada en confiabilidad (*Reliability Centered Maintenance RCM*, por su sigla en inglés). Sin embargo, en geotecnia es difícil definir una técnica de análisis de riesgos adecuada considerando las incertezas que se evalúan en el proceso.

Para la definición del riesgo geotécnico es necesario calcular la probabilidad de la materialización del evento mediante la cuantificación de variables fundamentales e intrínsecas a cada sitio de torre tales como la litología, la pendiente, la influencia del agua, la sismicidad de la zona, entre otros (análisis de riesgo cuantitativo), sin embargo, esta técnica tiende a estandarizar todos los sitios y por la rigidez de su aplicación no permite individualizar el resultado para cada sitio de torre.

Por otro lado, los análisis de riesgo cualitativos tienden a ser subjetivos, ya que la definición de la probabilidad de la ocurrencia está relacionada con conceptos y experiencias previas de los especialistas que realizan el análisis de riesgos geotécnicos.

Con base en lo anterior, ninguno de los abordajes descritos es adecuado para definir los riesgos geotécnicos, de forma que se pueda representar la realidad. En ese sentido, se considera que las dos técnicas, cuantitativa y cualitativa, deben ser usadas de forma simultánea para que el resultado

sea lo más cercano a la realidad y permita una toma de decisiones eficiente para la definición del plan de mantenimiento de las líneas de transmisión y la respectiva jerarquización de intervenciones a realizar.

Con base en lo anterior, se aclara que los métodos cuantitativos y cualitativos no se excluyen, sino que por el contrario se complementan desde que se reconozcan las particularidades de cada uno: (i) Los métodos cuantitativos dan un valor al riesgo vinculado a la zona de interés por medio del análisis de variables predeterminadas y (ii) los métodos cualitativos contribuyen con la comprensión de los fenómenos presentados con base en la observación y análisis de la situación por los geotecnistas de la Gerencia de Mantenimiento (Análisis de Riesgo semi-cuantitativo).

Sin embargo, al definir el riesgo por medio de estas técnicas es difícil establecer la jerarquización de atención de los sitios con mayor riesgo, por tal motivo, para el desarrollo de este artículo y de la definición del plan de mantenimiento de Líneas de Transmisión, se adoptó una técnica que evalúa los Modos de Ruptura, sus efectos (*FMEA – Failure Modes and Effects Analysis*) y su criticidad (*FMECA – Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*). Cabe resaltar que estas técnicas de análisis hacen parte de las técnicas que componen el RCM. El resultado de la implementación de esta técnica es una matriz de criticidad que permite jerarquizar los activos a intervenir.

Aplicación de la Técnica de Análisis FMECA en Líneas de Transmisión

El FMECA (*Failure, Modes, Effects and criticality Analysis*), es un método de análisis usado para definir e identificar los posibles modos potenciales de falla, identificar las causas de cada modo de falla y los efectos sobre el desempeño del sistema. Este método permite organizar y clasificar los riesgos de forma que se puedan identificar la relevancia de cada uno, definir las soluciones

técnico-económicas más eficientes y prevenir problemas potenciales.

El análisis mediante esta técnica debe ser realizado en términos de la funcionalidad de cada ítem que compone el sistema y de las causas de los modos de falla, que pueden resultar en diferentes tipos de consecuencias sobre la estabilidad del sistema. Esta herramienta es iterativa y sistemática y garantiza que los modos de ruptura posibles sean analizados en función de:

- Causas potenciales
- Posibles consecuencias
- Efectos sobre el desempeño del sistema
- Formas de detección de las causas de los modos de falla
- Formas disponibles para controlar o minimizar los efectos del sistema.

Objetivos del Método

Los objetivos principales de un FMEA/FMECA son [1]:

- Asegurar que todos los modos de falla posibles, sus efectos y causas sean considerados.
- Desarrollar una lista de modos de falla, clasificadas de acuerdo con sus efectos establecer el sistema y priorizar las actividades a realizar.
- Ayudar en la selección de alternativas de las soluciones con alta confiabilidad y calidad.
- Determinar cuáles son los controles adicionales que se pueden implementar.
- Suministrar información adicional para ayudar en la planeación del plan de mantenimiento.
- Suministrar una forma de documentación abierta para recomendar las acciones para la reducción del riesgo.
- Suministrar información para ayudar en el análisis en campo, evaluando las condiciones *in-situ*, del evento cuantificable.
- Proponer y revisar los planes de monitoreo, seguimiento y actividades a desarrollar.



Definición del Índice de Criticidad

Con la finalidad de jerarquizar el impacto de los riesgos sobre el desempeño del sistema (estabilidad sitios de torre de las líneas de transmisión), el FMECA ofrece la posibilidad de determinar la criticidad del riesgo mediante la combinación de dos índices: Severidad (s) y Ocurrencia (o). La combinación de estos índices resulta en una matriz bidimensional llamada *Matriz de Criticidad*.

Para la aplicación de la metodología FMEA/FMECA para definir la criticidad de los sitios de torre de las Líneas de Transmisión, se deben responder las siguientes preguntas básicas:

1. ¿Cuál es el entorno geológico-geotécnico-hidrologico en el que se encuentra cada uno de los sitios de torre (Susceptibilidad Geotécnica – Análisis Cuantitativo)?
2. ¿Cuáles son los detonantes y contribuyentes para se materialicen los procesos de inestabilidad (Precipitaciones, sismos, actividad antrópica – Análisis Cuantitativo)?
3. ¿Cuáles son los procesos de inestabilidad que se pueden materializar y cuáles ya se materializaron (Método observacional – Análisis Cualitativo, depende de la experiencia de los geotecnistas que realizan la evaluación)?
4. ¿Cuáles son las consecuencias de que ocurra un proceso de inestabilidad (Análisis Cualitativo, depende de la experiencia de los geotecnistas que realizan la evaluación)?
5. ¿Cómo se puede detectar y prevenir la ocurrencia de un evento de remoción en masa (Resultado del análisis – Plan de Acción)?

Al responder estas preguntas, es posible (i) reducir la posibilidad de ocurrencia de la falla, (ii) analizar los procesos de inestabilidad, (iii) analizar el costo-beneficio entre hacer mantenimiento proactivo/preventivo o correctivo; (iv) proponer

una ruta de actividades de mantenimiento cuando se identifica el riesgo y (v) definir el plan de mantenimiento junto con la respectiva jerarquización de las intervenciones, sin embargo, el plan de mantenimiento y la criticidad final de cada sitio de torre se otorga tras la revisión de los especialistas de la Gerencia de Mantenimiento.

Como información de referencia debe tenerse en cuenta la información descrita a continuación:

- Geología: Planchas y memorias geológicas del Servicio Geológico Colombiano (SGC), sin embargo, es necesario tener una geología más detallada y realizada a lo largo de las líneas de transmisión.
- Fotografías aéreas: se debe contar con fotografías aéreas históricas y recientes de las líneas de transmisión, con las cuales se pueden evidenciar procesos de remoción en masa activos, ocupación del suelo (cobertura del suelo), cercanía a drenajes naturales.
- Modelo Digital del Terreno (MDT): con el modelo digital del terreno, es posible definir el mapa de pendientes y la altura relativa de cada uno de los sitios de torre.
- Información de estudios de caracterización por riesgo geotécnico y/o criticidad anteriores, si están disponibles.
- Reporte de las comunidades, fenómenos de remoción y/o procesos en masa o erosiones incipientes o materializados.
- Información del IDEAM, con relación a la frecuencia e intensidad de las precipitaciones.
- Mapa de Sismicidad definido por el Reglamento Sismo Resistente vigente en el momento de realizar la caracterización y/o actualización de esta.
- Mapa de Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa (Servicio Geológico Colombianos).
- Otros antecedentes.

Definición de la Susceptibilidad Geotécnica

Para evaluar la susceptibilidad geotécnica, se definieron seis (6) variables determinantes que deben ser cuantificadas, por medio de información de referencia y actualizadas con información detallada que se recoge mediante estudios y/o diseños de detalle y con las observaciones de los especialistas.

Cabe resaltar que para cada una de las variables se definieron factores evaluadores que al final se sumaran, para obtener un valor que entre más alto sea se considera más crítico.

A continuación, se definen las variables definidas para la ponderación de la Susceptibilidad Geotécnica:

- Litología (Lt): define las características de resistencia y competencia mecánica de las unidades y características geológicas que se identifican en los sitios de interés, adicionalmente, se debe definir el grado de meteorización de los materiales en cada sitio de torre.
- Estructura Geológica (Eg): tiene en cuenta la influencia de las diferentes estructuras de tipo geológico en la estabilidad geotécnica del sitio de torre (fallas, rumbos, buzamientos, entre otros).
- Pendientes (Pe): evalúa las características del relieve en función del grado de ampliación que representa la topografía del área.
- Altura Relativa (Ar): cuantifica de manera resumida de las características morfológicas del área evaluada, es decir la diferencia de altura entre el sitio de torre y la parte más baja de la ladera.
- Cobertura del Suelo (Cs): identifica la facilidad con la que el agua de escorrentía puede afectar la estabilidad geotécnica.
- Agua subterránea (As): valora la presencia de aguas subterráneas y su influencia en la

disminución de la resistencia mecánica del terreno.

Procesos de inestabilidad (Pi)

Se definen los procesos de inestabilidad que pueden afectar un sitio de torre están relacionados con los procesos geodinámicos que afectan la superficie del terreno y se pueden materializar en movimientos del terreno, con grados de afectación diversos. Entre las áreas más propensas a presentar procesos de inestabilidad están las zonas montañosas y escarpadas, zonas de relieve con procesos erosivos y de meteorización intensos, laderas de valles fluviales, zonas con materiales blandos y suelos, zonas con intensidad sísmica alta y zonas de precipitación elevada.

La cuantificación de los procesos de inestabilidad debe darse en función del tipo de movimiento y la afectación que se observe en el sitio de análisis.

Índice de Severidad (s)

El índice de severidad (s), está definido por la suma de los factores obtenidos en la evaluación de la susceptibilidad geotécnica y los procesos de inestabilidad, tal y como se indica a continuación:

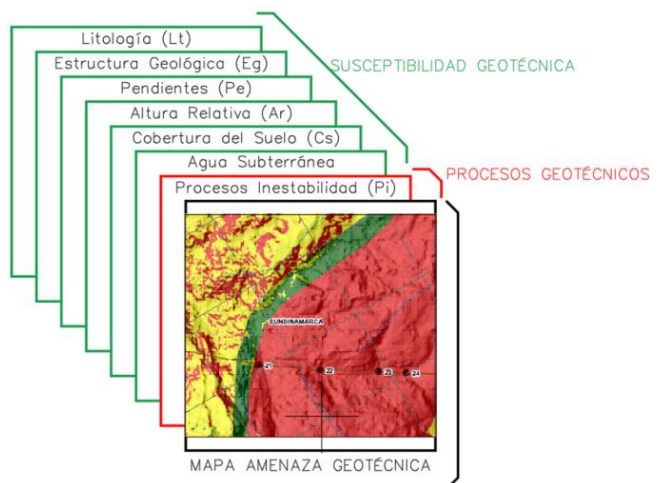


Fig. 1. Definición Índice de Severidad
Fuente: Propia, 2024

Para el índice de severidad se definen cinco (5) rangos, tal y como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1 – Clases e Índices de Severidad (s)

Clase	Descripción	Criterio
I	Ninguna / Mínima	Ningún efecto sobre el sistema
II	Muy poca / Poca	Causa pequeña afectación a la seguridad del sistema
III	Moderada / Significativa	Resulta en la falla sobre el componente no vital y que necesita reparación
IV	Grande / Extrema	Estructura fuertemente afectada, pero mantiene la funcionalidad y con criterios mínimos de seguridad
V	Catastrófica	No tiene los criterios mínimos de seguridad

Pérdida de Soporte (Ps)

Corresponde a la facilidad con la cual la torre puede perder estabilidad por desplazamiento o pérdida del material en el que se apoya. Esta vulnerabilidad depende tanto del potencial de pérdida de material como a la capacidad de soporte de la cimentación de la estructura ante la ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa y/o proceso erosivo.

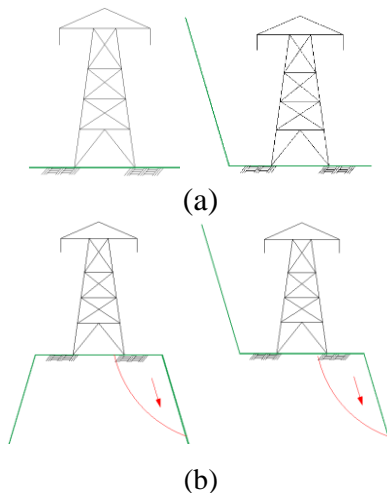


Fig. 2. Pérdida de Soporte (Ps) – (a) Zona plana, no hay probabilidad de ocurrencia de pérdida de soporte (b) Torre ubicada en una ladera, hay probabilidad de pérdida de soporte.
Fuente: Propia, 2024

Carga Lateral (Cl)

Considera la ubicación de la estructura, la capacidad que tiene la torre para soportar el impacto de material resultante de un fenómeno de remoción en masa y/o proceso erosivo que pueda ocurrir en la ladera superior o por el efecto de flujos de material y las obras de protección ante esta situación que pueda existir.

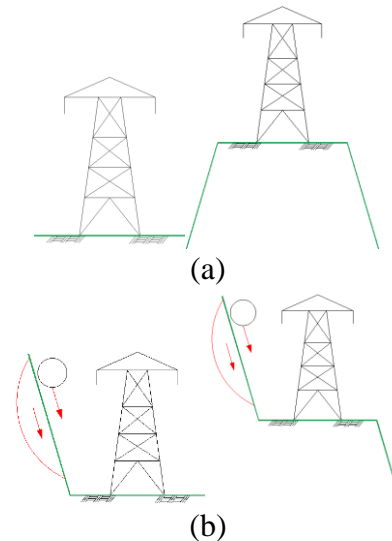


Fig. 3. Carga Lateral (Cl) – (a) No hay ladera superior y no hay probabilidad de carga lateral (b) Torre ubicada en una zona baja, hay probabilidad de carga lateral.

Fuente: Propia, 2024

Causas / Detonantes

Los detonantes se relacionan con los mecanismos que pueden activar los procesos de inestabilidad, tales como las precipitaciones, actividad sísmica y acción antrópica. En general, los factores que propician los procesos de inestabilidad son de carácter físico (naturales) y por acción antrópica.

Índice de Ocurrencia (o)

El índice de ocurrencia (o), está definido por la suma de los factores obtenidos en la evaluación de los detonantes lluvia y sismo, así como la vulnerabilidad de la estructura definida por la probabilidad de pérdida de soporte y de tener carga

lateral sobre la estructura, tal y como se muestra a continuación:

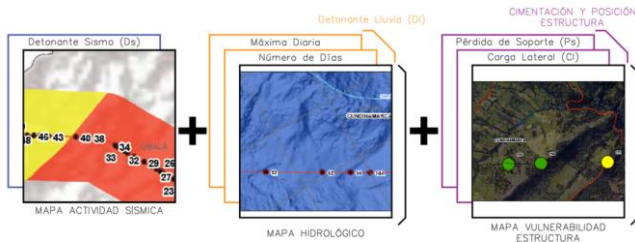


Fig. 4. Definición Índice de Ocurrencia
 Fuente: Propia, 2024

Para el índice de ocurrencia se definieron cinco (5) rango, tal y como se indica en Tabla 2.

Tabla 2 – Clases e Índices de Ocurrencia (o)

Clase	Descripción	Criterio
A	Casi nunca / Mínima	Falla improbable, ninguna ocurrencia histórica
B	Fallas ocurren raramente / Baja	Muy pocas fallas pueden ocurrir
C	Fallas ocasionales / Moderada	Algunas fallas pueden ocurrir
D	Fallas ocurren con frecuencia / Alta	Alto número de fallas / ocurre con frecuencia
E	Casi siempre / Muy alta	Fallas históricamente casi ciertas

Jerarquización de los Riesgos

La jerarquización de los riesgos geotécnicos es entendida como el producto del índice de severidad (s) y el índice de ocurrencia (o), para lo cual se empleará la siguiente matriz de criticidad, presentada en la Fig. 5.

La priorización de las torres a incluir e intervenir dentro del plan de mantenimiento se definirá en función de la matriz de criticidad.

Definición del Plan de Mantenimiento

El plan de mantenimiento se basa en la jerarquización de los riesgos (Matriz de criticidad), en la Fig. 6 se presentan las posibles

acciones a realizar y sobre las cuales se elabora el plan de mantenimiento.

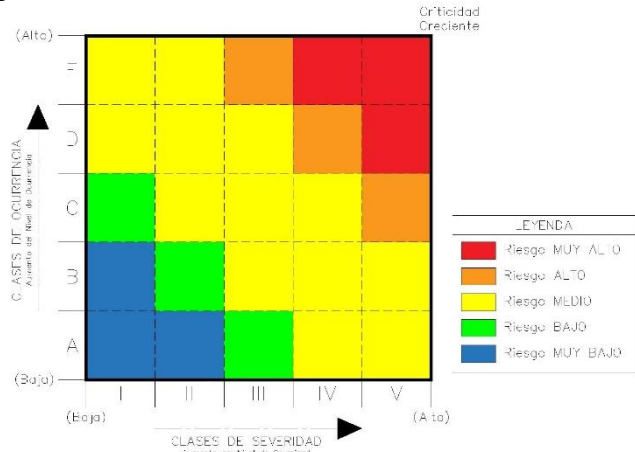


Fig. 5. Matriz de criticidad
 Fuente: Propia, 2024

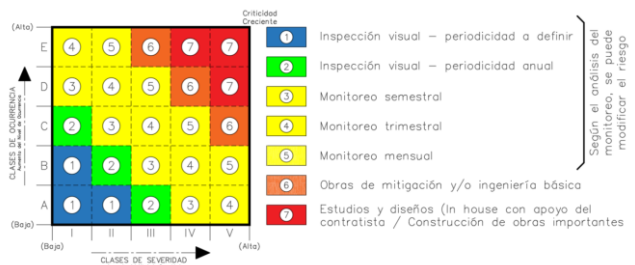


Fig. 6. Ruta de acción – Plan de Mantenimiento
 Fuente: Propia, 2024

Caso de Estudio

Para el caso de estudio, se tomó una zona crítica de una de las líneas de transmisión en la que, en 2010, cuatro torres fueron afectadas por un flujo de lodos y detritos desde la parte alta de la ladera (ver Fig. 7) y en la que se generaron cauces difusos que aun a la fecha continúan afectando los sitios de torre. En el momento de la ocurrencia del evento se realizaron las obras que se describen a continuación:

- Torre A: se construyó una línea de gaviones para proteger las patas de la torre (ver línea amarilla - Fig. 8).
- Torre B: se reubicó la torre y se construyeron cimentaciones profundas protegidas con gaviones (ver Fig. 9).

- Torre C: se construyeron pedestales en las patas de la torre y, posteriormente, se construyó un gavión en forma de L, con el propósito de mitigar el impacto de posibles eventos (ver Fig. 10).
- Torre D: El primer cuerpo de la torre quedó soterrado, no se realizaron obras en el sitio ya que la torre permaneció estable, sin embargo, con el cauce difuso que se encuentra en el sitio, se destapó un lado de las patas generando cargas asimétricas en la torre (ver Fig. 11).

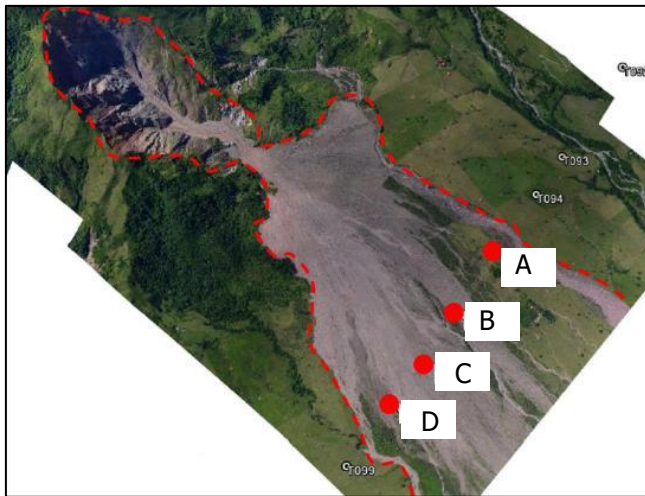


Fig. 7. Zona de estudio
Fuente: Propia, 2024



Fig. 8. Torre A – Línea de gaviones
Fuente: Propia, 2024



Fig. 9. Torre B – Reubicación
Fuente: Propia, 2024



Fig. 10. Torre C – Construcción de pedestales y protección con pedestales en “L”
Fuente: Propia, 2024



Fig. 11. Torre D – No se realizaron obras adicionales
Fuente: Propia, 2024

Al aplicar la metodología FMECA, se obtuvo la matriz de criticidad indicada en la Fig. 12. Tal y como se puede observar, las torres A, B y C se encuentran en criticidad media y deben ser monitoreadas periódicamente. Sin embargo, la



torre D, se encuentra en criticidad alta y se deben realizar obras de mitigación. Esta matriz de criticidad representa la realidad, ya que con las obras y acciones realizadas en las torres A a C, la criticidad de los sitios de torre bajo, sin embargo, en la torre D no se realizaron obras y al destaparse las patas, se aumento la criticidad del sitio de torre.

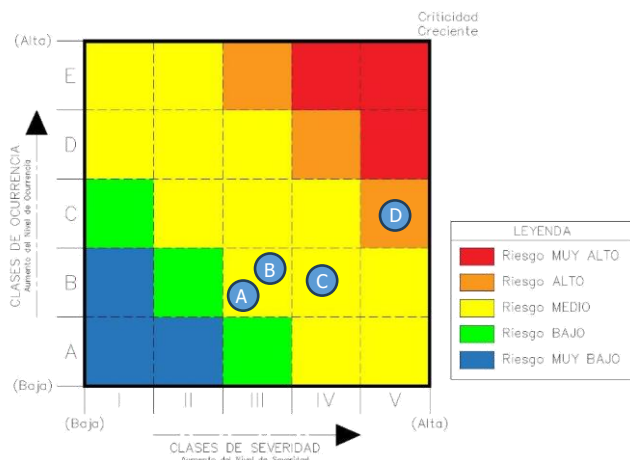


Fig. 12. Matriz de Criticidad – Zona de estudio Fuente: Propia, 2024

Consideraciones finales

El entorno geológico-geotécnico es un medio dinámico, por lo que la definición del riesgo geotécnico no es una característica propia del sitio de análisis, sino que corresponde a la conjugación de muchas variables que se pueden modificar con el tiempo. En ese sentido, la caracterización por riesgo geotécnico debe adaptarse a los cambios del entorno y ajustarse a la realidad, de forma que se puedan tomar decisiones apropiadas teniendo en cuenta la experiencia de los profesionales de la Gerencia de Mantenimiento.

La implementación de esta metodología, basada en el análisis del entorno geológico-geotécnico, permite modificar el riesgo geotécnico en función de los hallazgos por condición, de los monitoreos que se realicen en los sitios de interés y las observaciones de los especialistas, de forma que las condiciones del sitio se puedan representar

dentro del plan de mantenimiento lo más cercano a la realidad.

Con la implementación de esta metodología los análisis geotécnicos se hacen por los especialistas de la Gerencia de Mantenimiento lo que facilita la toma de decisiones y jerarquización de los riesgos y la implementación de obras de mitigación y/o adecuadas para los sitios de torre.

Bibliografía

- [1] RODRIGUEZ, J., Metodologia para Análise e Gestão de Riscos em Projetos de Pavimentos Ferroviários. Tesis de Maestria.
- [2] ANDERSOS D.R.; SWEENWY, D.J.; WILLIAMS, T.A.; Introduction to Management Science: Quantitative Approaches to Decision Making. 10th Ed. Mason: South-Western Thomson Learning, 2003.
- [3] CALDEIRA, L., Metodologias de Análise de Risco: Aplicações em Geotecnia. 2ª Jornada Luso-Espanhola de Geotecnia: Modelação e Segurança em Geotecnia, 2005.

Johanna Andrea Rodríguez Pardo: Ingeniera Civil y MSc en Geotecnia de la Universidade Federal de Ouro Preto (Minas Gerais, Brasil). Tesis de maestría sobre Análisis y gestión de riesgos. 19 años de experiencia tanto en Brasil como en Colombia en el diseño y modelamiento de obras geotécnicas, diagnóstico de procesos de remoción en masa en obras de ingeniería, Monitoreo de procesos de remoción en masa. Actualmente, asesor de la Gerencia de Mantenimiento de Enlaza Grupo Energía Bogotá para el mantenimiento preventivo y predictivo de las líneas de transmisión eléctrica en operación.
Cel: 313 592 8259
e-mail: jarodriguez@enlaza.red