

Gestão de Riscos Geotécnicos dos Taludes do Mineroduto Minas-Rio: Busca de Áreas Suscetíveis Através de Geoprocessamento

Anderson Fonini

Engenheiro Geotécnico, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, fonini@fgs.eng.br

Lucas Torrent Figueiredo

Coord. de Geotecnia Corp., Anglo American, Nova Lima, Brasil, lucas.t.figueiredo@angloamerican.com

Fabiano Madrid

Geólogo, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, madrid@fgs.eng.br

Rodrigo Brum Teodorico

Engenheiro Geotécnico, Anglo American, Viçosa, Brasil, rodrigo.teodorico@angloamerican.com

Felipe Gobbi

Diretor Técnico, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, felipe@fgs.eng.br

RESUMO: O Mineroduto Minas-Rio, com extensão de 528 km e atravessando 33 cidades no Brasil, apresenta desafios significativos na identificação de áreas geotécnicas críticas. Dada a complexidade dessa tarefa, devido à grande variedade de fatores envolvidos e à extensão do mineroduto, torna-se essencial o uso de metodologias avançadas de geoprocessamento, integradas a Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Essas metodologias permitem a análise de múltiplas fontes de dados e sua correlação para identificar pontos de risco. Este estudo empregou metodologias reconhecidas no âmbito geotécnico a fim de avaliar áreas suscetíveis a diversos tipos de movimentos de massa, como deslizamentos translacionais, rupturas planares e flexurais, queda de blocos, e fluxos de detritos. Os resultados obtidos foram cruciais na identificação de áreas de suscetibilidade a tais eventos. Essas descobertas fornecem uma base sólida para a implementação de medidas preventivas e corretivas ao longo do mineroduto, contribuindo significativamente para a gestão eficaz de riscos. Além disso, esses resultados servem como guia para futuras avaliações de campo, fornecendo informações detalhadas que auxiliam na tomada de decisões in loco.

PALAVRAS-CHAVE: Movimentos de massa, Sensoriamento Remoto, Risco geotécnico.

The Minas-Rio Pipeline, spanning 528 km and traversing 33 cities in Brazil, poses significant challenges in identifying critical geotechnical areas. Given the complexity of this task, due to the multitude of factors involved and the extent of the pipeline, the use of advanced geoprocessing methodologies integrated with Geographic Information Systems (GIS) becomes essential. These methodologies enable the analysis of multiple data sources and their correlation to pinpoint areas of risk. This study employed recognized geotechnical methodologies to assess areas susceptible to various types of mass movements, such as translational slides, planar and flexural ruptures, block falls, and debris flows. The results obtained were crucial in identifying areas prone to such events. These findings provide a solid foundation for the implementation of preventive and corrective measures along the pipeline, significantly contributing to effective risk management. Additionally, these results serve as a guide for future field assessments, providing detailed information to assist in on-site decision-making.

KEYWORDS: Mass Movements, Remote Sensing, Geotechnical Risk.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O Mineroduto Minas-Rio desempenha um papel crucial no transporte do minério de ferro proveniente da Mina da Serra do Sapo, situada em Conceição do Mato Dentro - MG, até o Porto do Açu, localizado em

São João da Barra - RJ. Com uma extensão de 528,00 km, o mineroduto atravessa diversos cenários geológico-geotécnicos, morfológicos, climatológicos, de cobertura vegetal e sociais, nos quais são observadas condições que, por vezes, apresentam riscos geotécnicos significativos.

A identificação dos riscos geotécnicos é uma tarefa ampla e complexa, principalmente devido ao número de variáveis envolvidas na composição da escala de risco e de extensão do Mineroduto, tornando fundamental a utilização de metodologias de geoprocessamento calibradas em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), permitindo reunir e correlacionar diferentes fontes de informação e gerar novos dados que norteiem a identificação de pontos de maior criticidade em termos de segurança e estabilidade.

Os mapas de suscetibilidade a ocorrências geotécnicas são resultados de uma combinação de técnicas de geoprocessamento em um ambiente SIG, utilizando como base o modelo digital do terreno (MDT) e dados disponibilizados por instituições técnicas de referência. Este estudo foi conduzido seguindo premissas propostas pelo Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa (CPRM, 2018), ao qual foram adotadas ferramentas e metodologias específicas e reconhecidas no meio técnico, visando contribuindo no enriquecimento dos produtos de identificação de áreas suscetíveis a movimentos de massa.

As etapas deste estudo incluem: i) compilação do banco de dados em um ambiente SIG, ii) pré-processamento dos dados e geração dos mapas base necessários e iii) aplicação de técnicas adaptadas do Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Riscos em Desastres Naturais – GIDES (CPRM, 2018) com objetivo de produzir os mapas temáticos de suscetibilidade a ocorrências geotécnicas, abrangendo mecanismos como deslizamentos translacionais, rupturas planares e flexurais, queda de blocos e fluxo de detritos, com potencial de afetar a estrutura do mineroduto ao longo de toda sua extensão. Esse processo direciona a gestão de riscos ao identificar as áreas mais suscetíveis ao longo do trajeto do mineroduto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As técnicas de geoprocessamento foram adaptadas com base nas diretrizes estabelecidas pela CPRM (2018), como parte do programa de Gestão de Risco de Desastres e Programa de Respostas, em colaboração com o governo japonês, através do acordo de Cooperação Técnica Internacional (CTI), resultando no Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Riscos em Desastres Naturais - GIDES.

O Modelo Digital de Terreno (MDT) utilizado como referência é o ALOS PALSAR RTC, originalmente com resolução de 30 m, recalculado pela *Alaska Satellite Facility* (ASF) para 12,5 m. A área de estudo englobou um buffer de 2 km ao redor do eixo ao longo de toda a extensão do mineroduto. Esses dados remontam ao final de 2010 e início de 2011, anteriores à implantação do Mineroduto. Devido a essa temporalidade e à limitação da resolução espacial, não foi possível identificar pequenas características ou instabilidades ocorridas após a sua implementação. No entanto, os resultados obtidos foram consideráveis, pois, a maioria dos mecanismos de movimento de massa avaliados têm suas zonas-fonte localizadas além das áreas afetadas pelas obras de construção do Mineroduto. As metodologias utilizadas para a produção dos mapas dos mecanismos de instabilidade são descritas detalhadamente a seguir.

2.1 Pré-processamentos e mapas base

Como parte do processo de aplicação das diversas técnicas de rastreamento da probabilidade de ocorrência de movimentos de massa, foram conduzidos pré-processamentos de dados utilizando o MDT. Simultaneamente, informações relevantes ao longo da extensão do Mineroduto foram compiladas. Os subprodutos resultantes incluem:

2.1.1 Orientação de vertentes (ou direção de fluxo)

A orientação de vertentes refere-se à variação do ângulo azimutal associado à inclinação mais acentuada do terreno, indicando a direção para a qual a face do talude está voltada em relação ao norte.

2.1.2 Declividade

A declividade representa o ângulo de inclinação do terreno em relação à horizontal, expresso em graus. Essa medida é obtida diretamente do MDT por meio do algoritmo proposto por Horn (1981).

2.1.3 Geologia

As informações geológicas e estruturais dos maciços ao longo da faixa do mineroduto foram obtidas por meio de consulta a mapeamentos de base gratuita disponibilizados pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG) e pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB). Esses dados foram reclassificados em mapas litológicos, assumindo a principal litologia de cada unidade, também foi considerada a direção preferencial de mergulho de suas estruturas predominantes.

Também correlacionado ao tipo litológico foram atribuídos os dados de coesão, ângulo de atrito e densidade com base em dados coletados em campo.

2.1.4 Espessura de solo

O método de geoprocessamento adotado, conforme proposto por Azevedo et al. (2015), fundamenta-se na análise da distribuição do solo em diversas inclinações do terreno. Esta abordagem considera que áreas planas tendem a acumular mais sedimentos, enquanto encostas íngremes tendem a apresentar camadas de solo mais superficiais, podendo expor a rocha subjacente.

Devido à diversidade morfológica e litológica, o mineroduto foi dividido em 6 faixas, para as quais foram estabelecidos os parâmetros de entrada do método. Os dados apresentados na Tabela 1 correspondem às informações utilizadas para cada trecho. Ressalta-se que os valores adotados foram determinados com base em diversas retroanálises, que empregaram afloramentos rochosos visíveis por imagens de satélite como pontos de referência e informações provenientes de sondagens disponíveis.

Tabela 2-1. Parâmetros de entrada adotados na Equação 1.

Faixa de Domínio	Esp. Solo Máx.	Esp. Solo Min.	Ângulo limite
1	30 m	5 m	20°
2	15 m	2 m	25°
3	30 m	2 m	30°
4	15 m	2 m	35°
5	15 m	2 m	35°
6	25 m	5 m	30°

2.1.5 Área de captação (ou acumulação de fluxo)

O método de cálculo da acumulação de fluxo consiste na soma do peso de todas as células que contribuem para cada célula a jusante no raster de saída, utilizando como base a direção de fluxo (ou orientação de vertentes), ou seja, indica quantas células contribuem com fluxo para cada célula específica. Quando nenhum raster de peso é fornecido, é atribuído um peso de 1 a cada célula. Células com um valor de acumulação de fluxo igual a zero geralmente correspondem ao padrão de cristas. A aplicação deste algoritmo segue a metodologia proposta por Jenson & Domingue (1988).

2.1.6 Filtro de taludes potenciais (zonas de influência)

Com o objetivo de aprimorar a análise e excluir taludes que não representem ameaça ao mineroduto, foram identificados como potenciais aqueles com a face voltada para o eixo, dentro de uma variação de +30° a -30°. Essa seleção levou também em consideração a distância em relação ao mineroduto, sendo categorizados em três faixas: < 1 m, de 1 m a 15 m e de 15 m a 30 m, respectivamente, alta, média e baixa probabilidade de impacto direto no mineroduto.

2.2 Deslizamento translacional

O mecanismo, também descrito como deslizamento planar em solo por CPRM (2018), foi analisado utilizando a metodologia Shallow Landsliding Stability Model (SHALSTAB), desenvolvida por Montgomery e Dietrich (1994). Este modelo é amplamente utilizado na avaliação de locais propensos a deslizamentos de taludes de modelo infinito. Fundamentado em análise determinística, o SHALSTAB minimiza a subjetividade e possibilita a avaliação de riscos em termos absolutos.

Para a aplicação do modelo, são necessários dados como declividade, área de captação, peso específico do solo, condutividade hidráulica, profundidade do escorregamento (espessura do solo), ângulo de atrito e coesão. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento e os índices físicos foram obtidos através da compilação dos resultados disponíveis de várias investigações e projetos geotécnicos realizados ao longo do mineroduto. As informações geométricas fundamentais foram obtidas a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT), enquanto para a condutividade hidráulica foram utilizadas referências bibliográficas como apoio.

2.3 Ruptura planar e flexural em rocha

Nos maciços rochosos, os escorregamentos são influenciados pelo fraturamento, orientação e distribuição das descontinuidades em relação ao talude, além dos parâmetros de resistência do material. Em maciços resistentes, os planos de ruptura, como estratificações e falhas, determinam a movimentação.

Para rupturas planares a condição básica é que as descontinuidades dos maciços possuam direção de mergulho em favor a face do talude, assim o ângulo de mergulho do talude será maior que o da descontinuidade e este maior que o ângulo de atrito. Já para rupturas flexurais (ou tombamento), é a descontinuidade do corpo que está oposta ao ângulo de face do talude, implicando em um movimento de rotação dos blocos.

Com base nestas premissas a classificação destes mecanismos se deu pelo cruzamento das orientações das vertentes (taludes) com as direções estruturais admitindo as seguintes premissas:

- Rupturas planares: Identificação de estruturas com azimute concordante a orientação da face dos taludes (desconfinado) e com mergulho entre 45° e 55° em áreas de afloramentos rochosos;
- Rupturas flexurais: Identificação de estruturas com azimute contrário a face dos taludes (confinado) e mergulho entre 50° e 70° em áreas de afloramentos rochosos.

2.4 Queda de blocos

A queda de blocos é um movimento de massa em que blocos desconexos do maciço rochoso caem ao longo de um declive por queda livre, saltação ou rolamento. As causas são diversas e não necessariamente ligadas à chuva, dificultando a previsão. O modo de movimento depende da geometria do bloco e da encosta.

O estudo segue as premissas propostas por CPRM (2018), onde zonas primárias são encostas de maciços rochosos com inclinação média $\geq 50^\circ$ e amplitude mínima de 5 m. A queda é subdividida em três grupos (Figura 1), baseados na inclinação do maciço e na presença de rampa, que influencia na trajetória do bloco (CPRM, 2018).

- Grupo I: com presença de rampa na base;
- Grupo II: sem rampa e inclinação entre 50° e 70° ;
- Grupo III: sem rampa e inclinação maior que 70° ;

O estudo das áreas de queda de blocos usou dados de afloramentos rochosos, filtrando apenas áreas com declividade igual ou superior a 50° . Para determinar a presença de rampa, optou-se por utilizar um buffer de 20 metros a partir do limite externo das áreas de afloramento com declividade máxima de 20° .

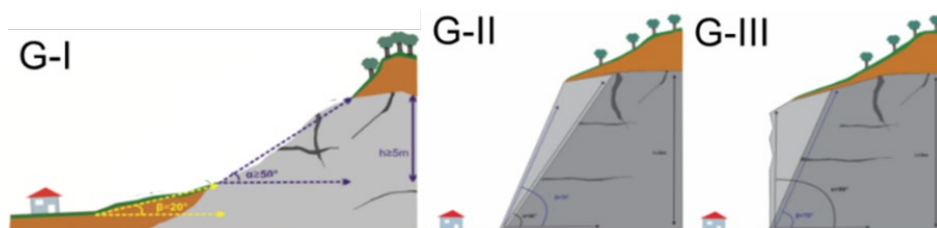


Figura 1: Grupos de classificação de queda de blocos (CPRM, 2018).

2.5 Fluxo de detritos

Os fluxos de detritos são deslocamentos rápidos de massas fluidas altamente viscosas, compostas principalmente por solo, rochas, vegetação, detritos humanos e água. Esse processo geralmente se inicia em áreas montanhosas durante chuvas intensas e, à medida que atinge terrenos mais planos, a velocidade diminui e o material é depositado em forma de leques aluviais (CPRM, 2018). Um exemplo deste mecanismo em trecho do mineroduto está ilustrado na Figura 2 através da simulação de velocidade de fluxo de detritos.

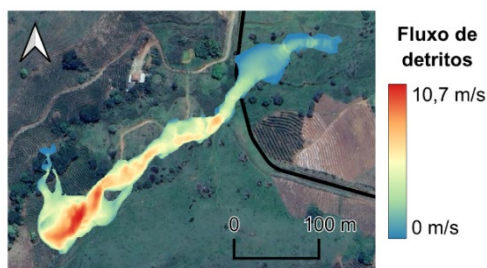


Figura 2: Simulação de fluxo de detritos, velocidade de escorregamento.

Para identificar bacias hidrográficas com potencial para fluxo de detritos e avaliar o impacto em estruturas, utilizou-se uma metodologia adaptada de CPRM (2018). Foram selecionadas bacias com área superior a 1 hectare, que interseccionam o eixo do mineroduto e classificadas quanto à sua morfologia interna.

Conforme ilustrado na Figura 3, a metodologia da CPRM (2018) para classificação morfológica e avaliação da suscetibilidade a eventos de fluxo, inclui a verificação da condição de confinamento utilizando linhas transversais espaçadas ao longo dos talwegues. Dessa forma, foram identificadas as bacias suscetíveis e os trechos de confinamento, considerando a relação entre a largura e o comprimento do talwegue, bem como as áreas de espraiamento. A inclinação média do trecho confinado foi também extraída, selecionando-se apenas as bacias com inclinação média superior a 10° no eixo do talwegue, o que é considerado um indicativo de zona de fluxo de massa, conforme CPRM (2018). As drenagens sem confinamento foram desconsideradas, exceto se houvesse registros de fluxo de detritos.

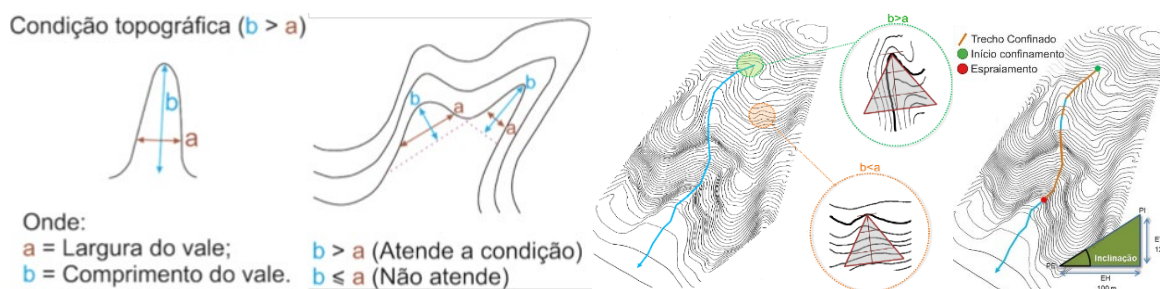


Figura 3: Critério de classificação de confinamento de talwegue (CPRM, 2018).

Para a avaliação da possibilidade de um evento afetar o mineroduto, adotou-se a seguinte classificação a partir do ponto inicial do espraiamento até o eixo do mineroduto: a) Alta possibilidade de ocorrência para distâncias menores que 100 metros, b) Média possibilidade para distâncias entre 100 e 400 metros, c) Baixa possibilidade para distâncias maiores que 400 metros.

3 RESULTADOS

3.1 Pré-processamentos e mapas base

No mosaico da Figura 4 destacam-se os resultados do pré-processamento referentes à orientação das vertentes, declividade, geologia, espessura do solo, acumulação de fluxo e classificação de taludes potenciais respectivamente nos municípios mineiros de Nova Era (km 145 a km 147), Tombos (km 357 a km 361), Passabém (km 72 a km 74), Abre Campo (km 265 a km 267), Nova Era (km 126 a km 127) e também Nova Era (km 146).

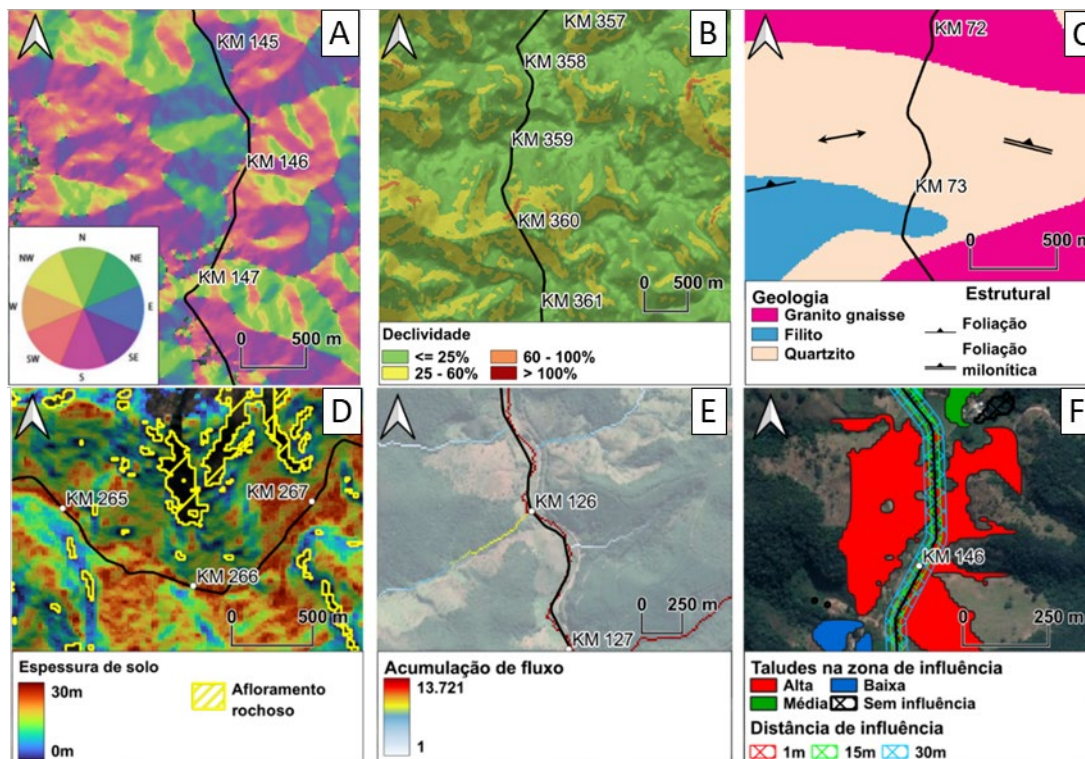


Figura 4: Mapa de orientação de vertentes em “A”, declividade em “B”, geologia em “C”, espessura de solo em “D”, acumulação de Fluxo em “E” e classificação de taludes potencias em “F”

Esses dados possibilitaram a caracterização geomorfológica e composicional das áreas, fornecendo informações valiosas que, combinadas por meio das técnicas descritas, permitiram identificar os locais suscetíveis à ocorrência de eventos geotécnicos com potencial de dano ao mineroduto.

3.2 Deslizamento translacional

As áreas processadas pelo método SHALSTAB como suscetíveis a deslizamento translacional foram filtradas com base nas condições dos taludes voltados ao mineroduto, neste o resultado do método indica o acumulado de chuvas necessárias para deflagar uma movimentação ou áreas incondicionalmente estáveis.

As áreas mapeadas foram filtradas desconsiderando áreas mais próximas que 15 metros do eixo que provavelmente foram alteradas geometricamente em função da implantação do Mineroduto. Também foram eliminadas áreas que estavam mais distantes que 50m pois não são esperados eventos com tal extensão e áreas potencialmente instáveis com dimensões maiores que 400m² (equivalente a aproximadamente 3 pixels contínuos do MDT utilizado) totalizando em 33 regiões com risco associado a deslizamentos translacionais, tendo sua primeira ocorrência no km 82 e a último nas cercanias do km 337.

A Figura 5A apresenta um recorte para do trecho entre o km 118 e km 119 no município de Nova Era, como exemplo dos resultados obtidos para deslizamento translacional.

3.3 Ruptura planar e flexural

Foram encontrados 108 pontos com rocha exposta em taludes ao longo do mineroduto, abrangendo 18 tipos diferentes de litologias. Essas áreas foram filtradas com base na distância e área de abrangência, utilizando o mesmo embasamento técnico dos deslizamentos translacionais.

Ao analisar os taludes com potencial influência no mineroduto, juntamente com afloramentos rochosos, orientação das faces e direção estrutural predominante dos maciços rochosos, foram identificadas 27 zonas suscetíveis a movimentos de ruptura planar, tendo a primeira área próxima ao km 86 e a último no km 342. Nenhuma zona de ruptura flexural foi detectada nas condições de contorno adotadas.

A Figura 5B ilustra um recorte para o trecho no km 107 no município de Santa Maria de Itabira como exemplo dos resultados obtidos para ruptura planar.

3.4 Queda de blocos

A classificação de áreas de queda de blocos indicou 5 locais com áreas suscetíveis ao longo de todo o mineroduto, tendo sua primeira ocorrência no km 107 e a última no km 360. Na Figura 5C estão representadas a classificação quanto ao Grupo I em azul e Grupo II, em vermelho para um trecho próximo à divisa entre Minas Gerais e o Rio de Janeiro, tal local já apresentava histórico de quedas, onde já existem estudos aprofundados quanto à trajetória e energia de possíveis eventos.

O Grupo III não obteve nenhum resultado ao longo de todo o eixo.

3.5 Fluxo de detritos

Com base na aplicação da metodologia proposta foi possível identificar 28 bacias com potencial de ocorrência de fluxos de massa com capacidade de interferência ao mineroduto entre o km 84, onde ocorre a primeira suscetível e à última no km 355. Dentro destas bacias indicadas, aplicou-se uma classificação em relação a possibilidade de interferência do evento ao mineroduto. Para isso, adotou-se como referência o ponto inicial de espreadimento e, a partir da distância, definiu-se como:

- Suscetibilidade alta: distâncias menores que 100 metros
- Suscetibilidade média: entre 100 e 400 metros
- Suscetibilidade baixa: acima de 400 metros

Feito isso, foram identificados 5 trechos internos às bacias com alta suscetibilidade, 23 trechos com média e 8 de baixa suscetibilidade.

A Figura 5D, apresenta o intervalo entre o km 125 e km 127 (em Nova Era), onde as bacias de fluxo apresentam trechos confinados de alta (vermelho), média (verde) e de baixa (azul) suscetibilidade de ocorrência de fluxo de detritos.

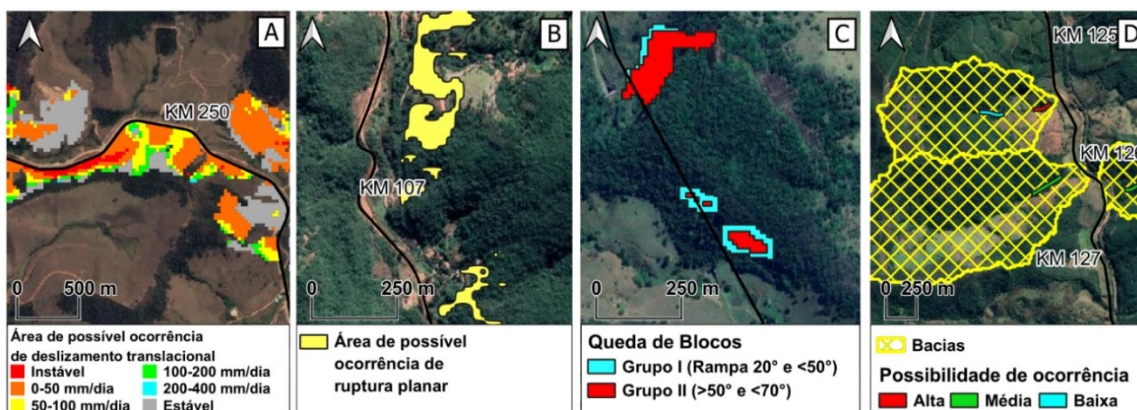


Figura 5: Recortes dos resultados das áreas suscetíveis à eventos geotécnicos com potencial dano a estrutura do mineroduto, deslizamento translacional em “A”, ruptura planar em “B”, queda de blocos em “C” e fluxo de detritos em “D”.

A análise da distribuição dos pontos com suscetibilidade à ocorrência de eventos geotécnicos, devidamente classificados por mecanismo e com potencial impacto no mineroduto, encontra-se ilustrada no perfil esquemático do mineroduto apresentado na Figura 6.

Este perfil uma representação visual clara e abrangente dos 93 locais identificados como potencialmente vulneráveis, ao longo dos 538 km do mineroduto, permitindo uma compreensão mais aprofundada das áreas de risco ao longo do trajeto do mineroduto.

Os pontos ocorrem entre os km 82 e 355, estes refletem as regiões com maiores variações topográficas, regiões de serras mineiras. Onde o terreno é mais plano, adentrando na área de influência das planícies costeiras fluminenses não se observam áreas risco apontadas pelas metodologias aplicadas.

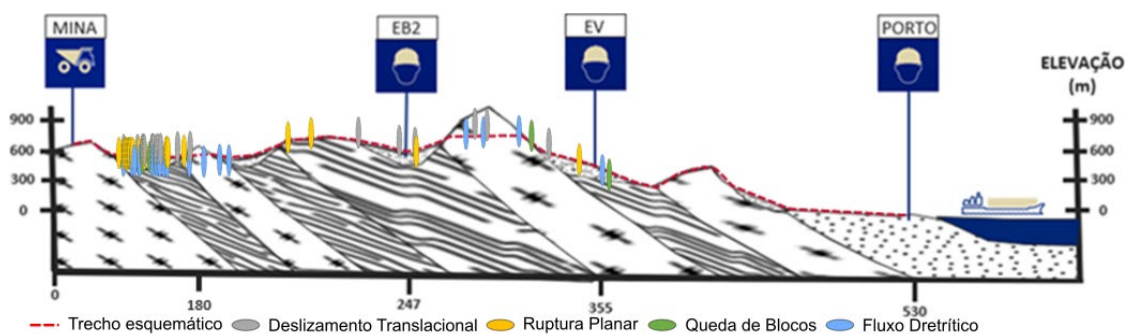


Figura 6: Áreas suscetíveis à movimentos de massa resultante do geoprocessamento.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo trouxe uma abordagem combinada de diversas técnicas de busca de áreas de risco geotécnico ao longo do mineroduto. Utilizando o MDT de base gratuita combinadas a informações de mapeamentos geológicos fornecidos por instituições técnicas de referência, foram realizadas análises morfológicas e composicionais dos terrenos a fim de identificar áreas suscetíveis a instabilidades geotécnicas como deslizamentos translacionais, rupturas planares e flexurais, quedas de blocos e fluxos de detritos.

Baseados nas técnicas apresentadas por CPRM (2018), adaptadas para o contexto da investigação ao longo dos 538 km do mineroduto Minas-Rio, foi possível identificar 93 áreas com ao menos um mecanismo de instabilidade investigado com orientação, dimensão e proximidade com potencial de causar danos ao funcionamento da estrutura.

Como avanço técnico, indica-se a comparação dos resultados, com mapeamentos de campo, adicionando também novos pontos identificados como mapeamentos de todas as estruturas de contenção/estabilização implantadas e a realização de ensaios laboratoriais para o refinamento dos parâmetros geotécnicos.

Além disso, existem espaços para novas revisões e aprimoramento das bases de dados que em atualizações futuras tornem esse produto ainda mais acurado tecnicamente, como por exemplo a obtenção de dados pluviométricos mais representativos as condições locais ao longo de toda a extensão do Mineroduto.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Anglo American pela permissão e estímulo à publicação deste estudo, assim como pela valiosa contribuição teórica e técnica fornecida durante todo o processo de desenvolvimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASF DAAC (2015), ALOS *PALSAR Radiometric Terrain Corrected high_res*; Includes Material © JAXA/METI 2007. DOI: <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>
- Azevedo, G et al. (2015). *Estimativa da profundidade do solo pelo uso de técnicas de geoprocessamento, estudo de caso: Setor Pajarito, Colômbia*. XVII Brazilian Symposium on Remote Sensing.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2018). *Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais (GIDES)*. Coord.: Pimentel, Jorge e Santos, Thiago Dutra dos. Rio de Janeiro.
- Horn, B. (1981). *Hill shading and the reflectance map*. *Proceedings of the IEEE*. 69. 14 - 47. 10.1109/PROC.1981.11918.
- Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54 (11):1593–1600.
- Montgomery, D.R., Dietrich, W.E. (1994) *A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding*. *Water Resour Res* 30:1153–1171