



UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Trabalho de fim do curso para a obtenção do grau de
Licenciatura em Engenharia de Minas

**PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM S.I.G PARA OPTIMIZAR O
TRAÇADO DE UMA VIA RODOVIÁRIA PARA O TRANSPORTE DA
MASSA MINERAL**

ESTUDO DE CASO: MINA DE LUELE

Elaborado por: **Márcia Patrícia do Sacramento Bernardo**
Nº 124851

LUANDA, 2025/2026



UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Trabalho de fim do curso para a obtenção do grau de
Licenciatura em Engenharia de Minas

PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM S.I.G PARA OPTIMIZAR O
TRAÇADO DE UMA VIA RODOVIÁRIA PARA O TRANSPORTE DA
MASSA MINERAL

ESTUDO DE CASO: MINA DE LUELE

Elaborado por: **Márcia Patrícia do Sacramento Bernardo**
Nº 124851

Orientador: MSC. Emmanuel Saturnino

LUANDA, 2025/2026

DEDICATÓRIA

Agradeço a Deus pelo fôlego, protecção e bênçãos que tornaram possível este trabalho. Sua luz guiou-me em cada desafio, reflectindo sua graça em cada conquista. Dedico este feito a Ti, Senhor, reconhecendo que sem a Tua presença nada seria possível. Que esta jornada seja uma celebração contínua da Tua bondade. Amém.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre guiar meus passos todos os dias de minha vida e principalmente por me dar a chance de poder viver cada momento em sua plenitude. Por me fortalecer durante todos os anos da minha vida e me presentear com a oportunidade de me licenciar em Engenharia de Minas.

Aos meus pais, Eufrásia S. Sacramento e Filipe Bernardo, e aos meus irmãos, que são um exemplo de força e resiliência, sempre me fornecendo tudo que esteve ao seu alcance, me dando o apoio necessário para conseguir chegar ao fim dessa etapa.

Ao meu orientador MSC. Emmanuel Saturnino, que Deus ilumine seu caminho e de toda a sua família. Obrigado pela enorme contribuição para meu crescimento e realização deste trabalho, sempre com muita paciência e dedicação.

Ao departamento de Minas (DEIM), através de cada um de seus professores, por me propiciar um excelente ensino técnico, onde pude adquirir conhecimentos e habilidades necessário para a profissão.

E finalmente a Ana Paula Campos António, minha amiga, minha companheira, minha irmã. Muito obrigada por estares sempre ao meu lado, me apoiando, me motivando. Amo-te muito irmã. E a todos os amigos, principalmente aos que encontrei durante esta trajectória e levo no coração, como Joaquim Castelo, Eliandro Ndala, Hermano Balão e Bruna Teixeira José, membros da “La Criminal Family”. Muito obrigada pela união, força, conselhos e todos os momentos de descontração. Vocês tornaram estes anos de licenciatura únicos. E obrigada a todos que directa ou indirectamente fizeram parte da minha vida neste período, tudo que esta licenciatura representa não seria possível sem a participação de todos.

Meu muito obrigada!!!

RESUMO

A construção e manutenção de vias em empreendimentos mineiros a céu aberto constituem actividades indispensáveis para a viabilidade operacional, uma vez que o transporte da massa mineral, estéril e insumos depende directamente da eficiência desses acessos. O correcto traçado das vias impacta não apenas a segurança das operações, mas também os custos associados ao consumo de combustível, desgaste de pneus e manutenção de equipamentos de transporte, que representam parcela significativa das despesas operacionais.

Neste trabalho, propõe-se a implementação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) como ferramenta de apoio ao planeamento e traçado de vias rodoviárias, tomando como estudo de caso a Mina de Luele. A metodologia adoptada fundamenta-se na abordagem Design Science Research (DSR), que orienta o desenvolvimento de artefactos tecnológicos aplicados à resolução de problemas reais. Para demonstrar o potencial do SIG, foi realizada a simulação de um traçado optimizado de uma via, considerando parâmetros geométricos, estruturais e de drenagem, de modo a evidenciar as vantagens do método assistido por SIG em comparação ao método tradicional.

Os resultados obtidos indicam que a utilização do SIG proporciona maior precisão no traçado, redução do tempo de planeamento, melhor integração de dados e maior confiabilidade no processo decisório. Assim, este trabalho contribui para a optimização do traçado de uma via rodoviária em exploração a céu aberto, alinhando-se aos princípios de eficiência, segurança e sustentabilidade que orientam a indústria extractiva contemporânea.

PALAVRAS-CHAVES: Projecto de estrada, Vias de acesso, Transporte da massa mineral, Sistema de informação Geográfica, Camiões fora-de-estrada.

ABSTRACT

The construction and maintenance of roads in open-pit mining operations are essential activities for operational viability, as the transportation of ore, waste, and supplies depends directly on the efficiency of these access routes. Proper road alignment impacts not only operational safety but also costs related to fuel consumption, tire wear, and maintenance of transport equipment, which represent a significant portion of operational expenses.

This study proposes the implementation of a Geographic Information System (GIS) as a support tool for the planning and alignment of haul roads, using the Luele Mine as a case study. The adopted methodology is based on the Design Science Research (DSR) approach, which guides the development of technological artifacts applied to real-world problem-solving.

To demonstrate the potential of GIS, a simulation of an optimized road alignment was carried out, considering geometric, structural, and drainage parameters, in order to highlight the advantages of the GIS-assisted method compared to the traditional approach.

The results indicate that the use of GIS provides greater accuracy in alignment, reduced planning time, improved data integration, and increased reliability in decision-making. Thus, this work contributes to the optimization of road design in open-pit mining, aligning with the principles of efficiency, safety, and sustainability that guide the contemporary extractive industry.

KEYWORDS: Haul road design, Access roads, Mineral mass transport, Geographic Information System, Off-highway trucks.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS	12
INTRODUÇÃO	13
OBJECTIVOS	14
OBJECTIVO GERAL	14
OBJECTIVOS ESPECÍFICO	14
PROBLEMA	14
CAUSAS...	14
CONSEQUÊNCIAS	14
SOLUÇÃO	14
JUSTIFICATIVA	15
METODOLOGIA	15
DELIMITAÇÃO	15
CAPÍTULO I – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
1.1 MINA À CÉU ABERTO	16
1.1.1. FASES DE UM PROJECTO DE MINA	17
1.1.2. MÉTODOS DE EXPLORAÇÃO A CÉU ABERTO	18
1.1.3. OPERAÇÕES UNITÁRIAS DA MINA	19
1.1.4. ASPECTOS AMBIENTAIS	20
1.2. TRANSPORTE DA MASSA MINERAL POR CAMIÕES	21
1.2.1. PLANO DE TRÁFEGO DE MINERAÇÃO	22
1.2.1.1. REGRAS DE PREFERÊNCIA	22
1.2.2. DIMENSIONAMENTO DO CAMIÃO	23
1.3. VIAS DE ACESSO	24
1.3.1. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	25
1.3.1.1. NÚMERO DE VIAS	25
1.3.1.2. LARGURA DO ACESSO OU RAMPA	26
1.3.1.3. INCLINAÇÃO	27
1.3.1.4. SUPERELEVAÇÃO	28
1.3.1.5. RAIO DE CURVATURA	29
1.3.1.6. DISTÂNCIAS DE VISIBILIDADE SEGURA	29
1.3.1.7. DISTÂNCIA SEGURA DE PARADA	30

1.3.1.8. BERMAS DE SEGURANÇA	32
1.3.2. PARÂMETROS DE DRENAGEM	33
1.3.3. PARÂMETROS ESTRUTURAIS	34
1.3.4. MONITORAMENTO E MANUTENÇÃO	35
1.4. SIG	36
1.4.1. TIPOS DE SIG	37
1.4.2. COMPONENTES DE UM SIG	38
1.4.3. TIPOS E FORMATOS DE DADOS GEOGRÁFICOS	39
1.4.4. MAPAS TEMÁTICOS	40
1.4.5. GEORREFERENCIAMENTO	40
1.4.6. MODELAGEM	41
CAPÍTULO II – METODOLOGIA	43
2.1. DESIGN SCIENCE RESEARCH	43
2.1.1. ETAPAS DA DSR	44
2.2. FASES DO PROJECTO	46
2.2.1. TÉCNICAS DE RECOLHA DE DADOS	47
2.2.2. ETAPAS DO DSR COM FOCO NO PROJECTO	47
CAPÍTULO III – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	49
3.1. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	49
3.2 DESENVOLVIMENTO DO SIG	51
3.2.1. MÉTODO “AS IS” VS “TO BE”	51
3.2.2. PARAMETRIZAÇÃO DO SIG	54
3.3. VALIDAÇÃO DO ARTEFACTO	60
CONCLUSÃO	69
RECOMENDAÇÃO	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXOS	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Especificações do camião fora de estrada caterpillar 777D.....	23
Tabela 1.2 Superelevação (%) de acordo com o raio de curvatura e a velocidade.	28
Tabela 1.3 Tempo de reacção de travagem em função do peso do camião.....	31
Tabela 1.4 Valores de f em função da natureza da via.	31
Tabela 3.1 As Is - Cenário Actual	52
Tabela 3.2 To be - Cenário Futuro	53
Tabela 3.3 Parametrização do SIG.....	55
Tabela 3.4 Especificações dos parâmetros estruturais para a Mina de Luele.	64
Tabela 3.5 Análise comparativa das vias propostas para o transporte da massa mineral.	65
Tabela 3.6 Comparação entre os métodos "As is" e "To be".	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Ciclo das operações unitárias de mina à céu aberto.....	19
Figura 1.2 Exemplo de um plano de tráfego	22
Figura 1.3 Interacção entre equipamentos e veículos.....	22
Figura 1.4 Caterpillar 777D.....	24
Figura 1.5 Representação esquemática de largura de estrada para um camião fora de estrada.	
.....	26
Figura 1.6 Exemplo do dimensionamento da via de circulação.....	27
Figura 1.7 Configurações geométricas indicando diferentes condições de segurança.....	29
Figura 1.8 Distância de parada (Dp).....	30
Figura 1.9 a) Berma de segurança na crista do banco. b) Berma centrais de segurança separando as vias de transporte.....	32
Figura 1.10 Inclinação de drenagem nas vias.....	33
Figura 1.11 Elementos de projecto de drenagem.....	34
Figura 1.12 Secção transversal de estradas.....	34
Figura 1.13 Curva de custos teóricos de vias de acesso de mina.....	36
Figura 1.14 Componentes de um SIG.	38
Figura 1.15 Representação do mundo real, em modelos de dados vectoriais e raster.....	39
Figura 1.16 Resolução da imagem X pixel em modelos digitais de elevação.....	41
Figura 1.17 Modelo de declividade de Saurimo, Lunda Sul, Angola.....	42
Figura 2.1 Etapas de desenvolvimento da DSR.	44
Figura 3.1 Mina de Luele, Google Satélite (Antiga divisão administrativa de Angola).	49
Figura 3.2 Modelo geológico 3D do depósito mineral de Luele.....	50
Figura 3.3 Diagrama de sequência UML - Processo “As Is”.	52
Figura 3.4 Diagrama de sequência UML - Processo “To Be”	53
Figura 3.5 MDT Saurimo, com foco em Luele.	57
Figura 3.6 Mapa de Declividade (esquerda) e Declividade classificada (direita), Luele.....	58

Figura 3.7 Mapa de Litologia da área de estudo.....	59
Figura 3.8 Mapa de Solo Saurimo, Luele.....	59
Figura 3.9 Representação esquemática de largura de estrada e número de vias, considerando especificações do Caterpillar 777D.	61
Figura 3.10 Mapa de traçado das vias - Saurimo, Luele	65
Figura 3.11 Via eficaz e eficiente	67
Figura I. Exploração por bancadas da Companhia Vale do Rio Doce, conhecida como mina de Brucutu.....	74
Figura II. Exploração em tiras localizada em Casper, Estados Unidos.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (Radiômetro Avançado de Emissão Térmica e Reflexão Espacial).

CBR – California Bearing Ratio (Índice de elasticidade).

CCTV – Closed-Circuit Television (Círculo Fechado de Televisão).

DEM/ MDE – Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevação).

DSR – Design Science Research.

DVR – Digital Video Recorder (Gravador de Vídeo Digital).

GB – Giga Byte.

GPS – Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global).

LAN – Local Area Network (Rede Local).

QGIS – Quantum Geographic Information System (Sistema de Informação Geográfica Quantum)

RAM – Random Access Memory (Memória de Acesso Aleatório).

RCC – Concreto compactado a rolo

SAE – Society of Automotive Engineers (Sociedade dos Engenheiros Americanos).

SIG/GIS – Sistema de Informação Geográfica/ Geographic Information System

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission (Missão Topográfica de Radar Embarcado)

SSD – Unidade de Estado Sólido (Solid State Drive).

UML – Unified Modeling Language (Linguagem de Modelagem Unificada)

UTM – Universal Transverse Mercator

INTRODUÇÃO

A indústria extractiva mineral desempenha um papel fundamental na economia angolana, com destaque para a exploração de diamantes, que constitui uma das principais fontes de divisas do país. A Mina de Luele, localizada na província da Lunda Sul, representa um dos empreendimentos mais estratégicos do sector, com reservas estimadas em 628 milhões de quilates e previsão de operação por aproximadamente 60 anos. Neste contexto, a eficiência do transporte de minério emerge como factor determinante para a viabilidade económica e operacional da mina, influenciando directamente os custos de produção, a produtividade da exploração e a segurança das operações.

Os traçados das vias de transporte em minas a céu aberto constituem actividades complexas que exigem a análise integrada de múltiplos factores, como topografia, geologia, tipo de solo, drenagem natural e características dos equipamentos utilizados. Tradicionalmente, essas actividades têm sido realizadas de forma empírica ou com apoio de ferramentas isoladas, resultando em vias mal dimensionadas, aumento de custos operacionais, desgaste prematuro dos equipamentos e riscos à segurança dos operadores. A ausência de dados geográficos actualizados e a falta de integração entre informações de diferentes fontes agravam esta problemática, comprometendo a qualidade do processo decisório.

Dante deste cenário, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) apresentam-se como ferramentas estratégicas para a optimização do planeamento mineiro, permitindo a integração, análise e visualização de dados espaciais de forma eficiente e automatizada. O SIG possibilita simular diferentes traçados de vias, identificar áreas críticas e apoiar a tomada de decisão com base em critérios técnicos objectivos.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um Sistema de Informação Geográfica para melhorar o traçado da via eficaz e eficiente destinada ao transporte da massa mineral por camiões, tendo como caso de estudo a Mina de Luele. A metodologia adoptada fundamenta-se na abordagem Design Science Research (DSR), que orienta o desenvolvimento de artefactos tecnológicos para resolução de problemas reais. O artefacto desenvolvido consiste num SIG funcional, parametrizado, capaz de integrar informações geoespaciais, realizar análises espaciais automatizadas e gerar mapas temáticos de apoio à decisão.

Os resultados obtidos demonstram que o SIG desenvolvido permite identificar a via mais adequada com base em critérios objectivos, reduzindo significativamente o tempo de planeamento, os custos operacionais e aumentando a precisão do traçado. O sistema opera sobre a plataforma QGIS, utilizando base de dados PostGIS, configurando-se como uma solução tecnicamente viável e economicamente vantajosa para a realidade da Mina de Luele.

O artefacto desenvolvido não se limita ao caso específico estudado, podendo ser adaptado e replicado noutros empreendimentos mineiros que enfrentem desafios similares no planeamento de infra-estruturas de transporte.

OBJECTIVOS

OBJECTIVO GERAL

O trabalho tem como objectivo geral propor a implementação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) para optimizar o traçado de uma via rodoviária para o transporte da massa mineral.

OBJECTIVOS ESPECÍFICO

- Realizar uma revisão abrangente da literatura sobre as melhores práticas de traçado de vias de acesso e transporte da massa mineral por camiões.
- Modelar o processo de traçado de uma via para o transporte da massa mineral.
- Identificar os requisitos e funcionalidades necessárias para um sistema de informação integrado.
- Desenvolver e parametrizar o sistema de informação geográfica, levando em consideração os requisitos específicos da indústria de mineração.

PROBLEMA

O problema é “**Dificuldade em optimizar o traçado de via rodoviária para o transporte da massa mineral**”.

CAUSAS

Esta dificuldade é causada pelos seguintes factores:

- Falta de dados actualizados e precisos sobre a infra-estrutura rodoviária existente;
- Falta de integração dos dados e informações de diferentes tipos e fontes.

CONSEQUÊNCIAS

- Aumento dos custos de transporte (camiões fora-de-estrada);
- Maior consumo de combustíveis e emissões de gases de efeito de estufa;
- Riscos de acidentes;
- Desgaste prematuro dos equipamentos;
- Impacto negativo na frota de camiões;
- Tempo de ciclos longos.

SOLUÇÃO

Diante da complexidade envolvida no projecto de vias de transporte da massa mineral, propõe-se o SIG como ferramenta estratégica para melhorar a eficiência e a eficácia do traçado das vias de acessos para o transporte da massa mineral, com caso de estudo a Mina de Luele.

A adopção dessa solução trará impactos expressivos, como a redução significativa do tempo de percurso entre frentes de trabalho e pontos de descarga, menor consumo de combustível, e consequentemente, redução dos custos operacionais. Além disso, contribui para reduzir os impactos ambientais causados por vias mal projectadas, promove uma movimentação mais segura dos camiões, aumenta a produtividade da operação mineira e melhora a qualidade da frota como um todo.

JUSTIFICATIVA

A escolha do problema “**Dificuldade em optimizar o traçado de via rodoviária para o transporte da massa mineral**” surgiu da observação das dificuldades enfrentadas na mina de Luele, onde a falta de dados actualizados e de integração entre diferentes informações compromete o traçado das vias de transporte. Ao vivenciar essa realidade, percebi a necessidade de uma ferramenta que reunisse e analisasse dados de forma integrada, permitindo decisões mais rápidas, precisas e seguras.

Assim, o estudo propõe o uso de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) como solução prática e sustentável para optimizar o planeamento mineiro, reduzindo custos, tempo e erros humanos. Além de contribuir para o avanço tecnológico da indústria, o trabalho representa um contributo académico relevante para a Faculdade, ao demonstrar a aplicação real dos conhecimentos adquiridos e reforçar a importância da tecnologia no desenvolvimento do sector mineiro nacional.

METODOLOGIA

Este trabalho adoptou a metodologia **Design Science Research (DSR)** como abordagem principal de investigação. A DSR é particularmente adequada para pesquisas em engenharia que visam desenvolver artefactos tecnológicos destinados a resolver problemas reais e específicos. Diferentemente das metodologias tradicionais focadas na compreensão de fenómenos existentes, a DSR orienta-se para a criação de soluções inovadoras que transformem a realidade observada.

O presente trabalho encontra-se estruturado em três capítulos principais:

- **O Capítulo I – Fundamentação Teórica** apresenta a revisão sistemática da literatura, abordando os conceitos fundamentais sobre explorações a céu aberto. Este capítulo estabelece a base teórica necessária ao desenvolvimento do artefacto, consolidando conhecimento sobre as melhores práticas.
- **O Capítulo II – Metodologia** descreve detalhadamente a abordagem Design Science Research adoptada, explicitando cada uma das suas etapas e a sua aplicação ao contexto específico do trabalho, bem como as técnicas de recolha de dados utilizadas e os critérios de validação do artefacto desenvolvido.
- **O Capítulo III – Apresentação dos Resultados** apresenta o caso de estudo da Mina de Luele. Esta estrutura permite uma progressão lógica desde a fundamentação teórica até à aplicação prática e validação dos resultados, assegurando coerência metodológica e clareza expositiva ao longo de todo o documento.

DELIMITAÇÃO

O presente trabalho delimita-se proposta de implementação de um SIG aplicado ao traçado optimizado da via rodoviária entre a frente de trabalho e a boca da mina.

CAPÍTULO I – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 MINA À CÉU ABERTO

Desde os primórdios do seu aparecimento sobre a Terra, o homem teve de se aproveitar dos minerais, quer como arma de defesa quer para os mais diversos fins. Actualmente, a indústria extractiva mineral, como qualquer outro empreendimento capitalista, tem como objectivo económico básico maximizar a sua riqueza futura. Entretanto, a indústria de mineração é caracterizada por visar ao aproveitamento económico de recursos naturais exauríveis e não renováveis, o que a diferencia das demais indústrias. Assim, a maximização da riqueza futura deve se realizar em um período definido, mais apropriadamente, que o objectivo da indústria extractiva mineral é a maximização do valor actual líquido dos benefícios monetários futuros, durante toda a vida da mina.

Mina: escavação desenvolvida para a extracção de bens minerais. A partir do momento que a jazida começa a ser explorada, ela passa a ser denominada de mina.

Entende-se por **exploração mineira a céu aberto**, aquelas em que os trabalhos de escavação realizados para o arranque da substância útil estão em contacto com o ar livre, ou aqueles em que os locais de trabalho não são constituídos por escavações cercadas em todo o seu perímetro pelos terrenos encaixantes (COUTO, 1990).

Um **projecto de mina** é o conjunto de estudos técnicos, económicos e ambientais necessários ao planeamento e à implementação das actividades de exploração mineira (CURIA, 2014). Tais estudos requerem uma ampla variedade de conhecimentos técnicos e abrangem diversas especialidades da Engenharia, que são complementares.

Os **depósitos minerais** são originados por processos geológicos resultantes de transformações que vêm acontecendo na crosta terrestre desde quando se solidificaram as primeiras rochas do planeta. (CURIA, 2014).

Segundo CURI (2017) a metodologia de exploração escolhida para o início de um empreendimento é responsável por coordenar e estruturar as diversas operações unitárias que compreendem e viabilizam o melhor aproveitamento possível para a jazida. Desta forma, a escolha pelo método de exploração está interligada aos factores responsáveis pela obtenção do maior aproveitamento económico possível, maior segurança para a mina e menores impactos ambientais.

Os **minérios** são constituídos por um ou mais minerais ou rochas que, sob condições favoráveis, podem ser trabalhados comercialmente, possibilitando a extracção de um ou mais metais (CURIA, 2014).

Rejeito ou minerais de ganga são os minerais presentes no minério que não podem ser economicamente aproveitados (CURIA, 2014). Isto é, material “sem valor económico” obtido no processo beneficiamento do minério. Normalmente, é descartada das centrais de beneficiamento na forma de polpa, mistura de sólidos e água.

Estéril: rocha que ocorre dentro do corpo de minério ou externamente ao mesmo, sem valor económico, que é extraído na operação de exploração. O conceito de estéril pode variar no tempo devido factores económicos, ou seja, o que é estéril numa época pode ser minério em outra.

1.1.1. FASES DE UM PROJECTO DE MINA

As operações que envolvem a mineração estão divididas em quatro fases distintas em termos de conceito, embora inter-relacionadas em termos de execução. Essas fases são denominadas: prospecção ou procura (MARZANO FILHO, 2013), exploração, desenvolvimento, extracção e fechamento de mina (CURI A. , 2014).

A **prospecção**, corresponde à fase de procura de uma jazida e visa à descoberta de ocorrências naturais de substâncias minerais úteis. São realizados trabalhos de pesquisa, tais como: mapeamento geológico, levantamentos geoquímicos e geofísicos, etc.

A **exploração**, consiste na aplicação sistemática dos trabalhos necessários ao conhecimento geológico pormenorizado de ocorrências minerais já descobertas, levando à definição da jazida. Esta fase compreende todos os trabalhos geológicos necessários para a caracterização do depósito em termos de tipos de minério, teores, geometria dos corpos mineralizados e, por fim, o volume ou reserva de minério.

O **desenvolvimento** engloba os trabalhos preparatórios para o aproveitamento da jazida mineral. Nesta fase são realizados trabalhos de desmatamento, decapamento (remoção da cobertura do minério), abertura de vias de acesso (de superfície ou subterrâneas), drenagem da mina, etc., enfim todo e qualquer trabalho que vise facilitar a operação de extracção.

Os **acessos** correspondem as vias que comunicam a jazida com a superfície para sua exploração e escoamento do minério extraído. Podem ser agrupados nos seguintes tipos:

- **A céu aberto** (trincheiras, rampas, planos inclinados), representam entradas principais, convenientemente construídas para facilitar a extracção dos diversos bancos (níveis).
- **Subterrânea** (túneis, poços verticais, poços inclinados).

A **extracção**, consiste na aplicação sistemática de trabalhos necessários ao aproveitamento económico da jazida. A extracção representa o conjunto de trabalhos que possibilitam a sempre desejável exploração económica, segura e ambientalmente sustentável do minério.

A fase de **fechamento de mina** constitui a etapa final de operação de muitas minas, compreende os processos de fechamento ou exaustão da mina, revegetação, tratamento e recuperação da qualidade da água e restauração do relevo.

1.1.2. MÉTODOS DE EXPLORAÇÃO A CÉU ABERTO

A escolha do método de exploração é um dos principais factores que influenciam a viabilidade económica e operacional de um empreendimento mineiro. Os métodos de exploração a céu aberto são empregados quando o corpo de minério se encontra próximo à superfície e sua remoção pode ser feita com escavação directa, sem necessidade de abertura de galerias subterrâneas.

Diversos autores (HARTMAN & MUTMANSKY, 2002); (CUMMINS & GIVEN, 1973) propõem classificações para os métodos de exploração a céu aberto. De forma geral, eles podem ser agrupados em duas grandes categorias:

a) Métodos Gerais ou Convencionais

Estes são os métodos mais amplamente utilizados, especialmente na mineração de rochas e minerais metálicos. A extração é feita por **desmonte em bancadas**, que podem ser:

- **Bancadas em Flanco**: aplicação mais comum em exploração de encostas ou locais com topografia acentuada.
- **Bancadas em Cava**: utilizadas em exploração em depressão, como minas de minério de ferro ou kimberlito, onde se forma um grande poço.

Estes métodos são frequentemente aplicados em minas de diamantes do tipo kimberlito, onde se extraí o corpo em forma de漏斗 (chaminé kimberlítica), criando uma cava profunda em espiral.

b) Métodos Especiais

Estes são aplicados em condições geológicas ou minerais muito específicos:

- **Exploração de Pláceres**: extração de minerais pesados (ex: ouro, cassiterita) em depósitos aluviais, geralmente em leitos de rios.
- **Exploração de Petróleo e Gás**: realizada por perfuração e bombeamento de fluidos.
- **Exploração de Sais Solúveis**: como potássio e sal-gema, geralmente por solução e bombeamento.
- **Exploração de Enxofre**: feita por fusão subterrânea.
- **Exploração Submarina**: extração no fundo oceânico.
- **Exploração "In Situ"**: dissolução e recuperação do minério directamente no local, sem escavação.

1.1.3. OPERAÇÕES UNITÁRIAS DA MINA

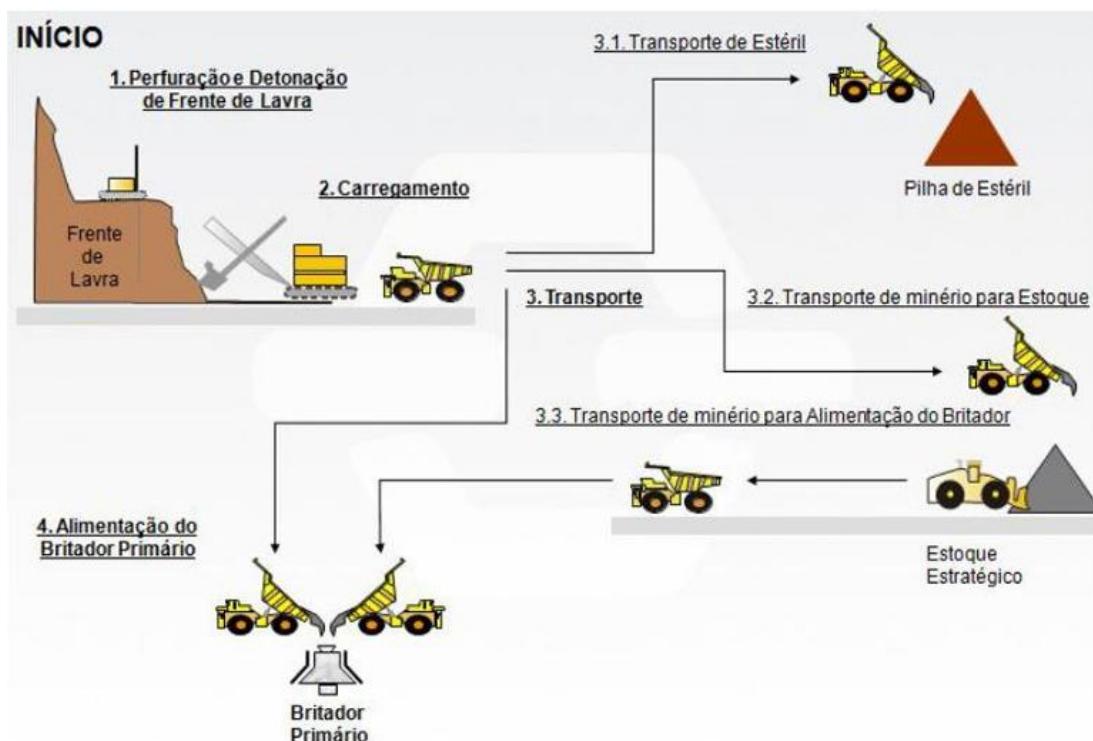
As actividades técnicas fundamentais que compõem o ciclo de exploração mineira são denominadas **operações unitárias da mina** e correspondem a retirada e transporte do material até o destino desejado. Sendo o minério destinado ao processamento ou pilhas de oportunidade e o estéril às pilhas específicas de disposição (FERREIRA, 2021).

As operações unitárias da mina são as actividades técnicas e operacionais fundamentais que compõem o ciclo de extração e movimentação do minério e do estéril dentro de uma mina. Elas são organizadas de forma sequencial e interdependente, visando garantir a produtividade, segurança e eficiência económica da operação.

No contexto da mineração a céu aberto, estas operações incluem o desmonte, o carregamento, o transporte e a descarga do minério e do estéril.

- a) **Desmonte (ou Arranque):** ocorre por perfuração e detonação controlada.
- b) **Carregamento:** utiliza-se escavadeiras, pás-carregadeiras ou carregadeiras frontais. O material fragmentado é colocado em camiões fora-de-estrada ou equipamentos de transporte contínuo.
- c) **Transporte:** o material é deslocado por camiões até os pontos de descarga.
- d) **Descarga:** o material é descarregado em: central de tratamento, pilhas de estéril (escombeiras), estoques, etc.

Figura 1.1 Ciclo das operações unitárias de mina à céu aberto.



Fonte: (FELSCH JÚNIOR, 2014).

1.1.4. ASPECTOS AMBIENTAIS

A implementação de um empreendimento mineiro tem consequências imediatas no meio ambiente, seja dentro dos limites da própria mina, seja nas áreas circunvizinhas. As áreas destinadas à exploração precisam ser desmatadas, conforme as necessidades de desenvolvimento desta, para a abertura de acessos e deposição de estéril. O equilíbrio ambiental acaba sendo afectado, em maior ou menor extensão. Assim, deve-se preceder a todas essas acções que causem impactos ambientais, prudentemente, e em conformidade com a legislação ambiental pertinente.

Os principais impactos ambientais de uma exploração a céu aberto são relacionados a poeiras, ruídos e vibrações e aumento de partículas sólidas em suspensão nos cursos de água, podendo também ocorrer, em algumas explorações, o aumento da acidez nos cursos de água, contaminação por metais pesados e contaminação por produtos químicos. O impacto na paisagem também é um factor cada vez mais considerado.

Terminada as actividades minerais, os terrenos devem servir para outros propósitos, como para actividades agrícolas, áreas de lazer, entre outros. Cumpre, pois, a mineração deixar a área extraída em plena forma para outros usos (GIRODO, 2005). No processo de recuperação de uma área minerada, costuma-se empregar algumas terminologias específicas.

- **Restauração:** Recriar as condições apropriadas para o prévio uso da área;
- **Reabilitação:** Criar, no sítio onde houve a extracção, condições para o uso do terreno substancialmente diferentes daquelas existentes antes dos estabelecimentos de mineração;
- **Recuperação:** Termo mais amplo, correspondendo tão somente à tomada de acções para o uso futuro do terreno para quaisquer propósitos.

A recuperação é um processo lento e deve ser iniciado ainda na fase de projecto mineiro e finalizado muito tempo após o encerramento da mina, quando os componentes biológicos e o ambiente atingirem o equilíbrio (GIRODO, 2005).

Além das medidas de recuperação física e biológica, é fundamental considerar o impacto ambiental já na fase de planeamento das vias de acesso. O traçado de estradas mal dimensionadas pode atravessar áreas frágeis, como encostas instáveis, zonas de drenagem natural ou áreas de vegetação nativa. Para minimizar esses riscos, é necessário um projecto cuidadoso que incorpore critérios técnicos, ambientais e operacionais desde o início das actividades.

Nesse contexto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) se apresentam como uma ferramenta estratégica. Eles permitem identificar áreas de restrição ambiental, simular trajectos alternativos e avaliar o impacto potencial de cada via projectada. Com o uso de mapas temáticos, modelos digitais de elevação e dados georreferenciados, o SIG apoia a escolha de caminhos com menor interferência ambiental, promovendo uma mineração mais responsável e alinhada às exigências legais e sustentáveis.

1.2. TRANSPORTE DA MASSA MINERAL POR CAMIÕES

O transporte da massa mineral é uma das fases mais críticas na operação de exploração a céu aberto, representando uma parcela significativa dos custos operacionais e influenciando directamente a produtividade da exploração. Para que o transporte ocorra de forma eficiente, é essencial a existência de vias de acesso bem projectadas, seguras e adaptadas ao tipo de equipamento utilizado.

Em explorações a céu aberto existem diversas formas de transporte que podem ser empregadas, dentre elas estão o transporte por camiões fora-de-estrada e correias transportadoras. A etapa de transporte é essencialmente realizada por meio de camiões basculantes, tanto rodoviários quanto fora de estrada, o que demanda a construção e manutenção de vias de acesso às frentes de trabalho para estes equipamentos. Montoya (2015) diz que a etapa de transporte dentro de uma cadeia de fornecimento corresponde a conseguir movimentar determinado material entre dois pontos geográficos.

De acordo com Lopes (2010) a operação de transporte por camiões fora-de-estrada é realizada após o fim das outras três operações unitárias: perfuração, desmonte e carregamento. Com o material já fragmentado, os camiões são então carregados pelas escavadeiras ou carregadeiras e a partir disso seguem para o destino programado, seja ele, a central de beneficiamento, escombeiras ou pilha de estoque.

Os factores considerados na escolha dos sistemas de transporte levam em conta o tipo de material, o volume a transportar e a distância de transporte com base na produção determinada. Na exploração à céu aberto, os sistemas de transporte podem ser de três tipos:

- a) **contínuo** - correias transportadoras;
- b) **cíclico** - camião fora de estrada;
- c) **combinado**: correia transportadora e camião fora de estrada, simultaneamente.

A fase de transporte tem início quando os camiões são direcionados até uma determinada frente de trabalho ou desmonte, de forma que, os equipamentos de carga que são alocados nas frentes retiram o material e posteriormente carregam os camiões. Os camiões carregados transportam o material até um determinado ponto de descarga e, em seguida, voltam para uma frente de trabalho disponível, onde repetirão as mesmas operações (QUEVEDO, 2009).

Em grandes projectos de mineração, a escolha do camião fora de estrada é o comum, devido a ser fácil a sua locomoção a várias frentes de trabalho em avanço. Além de sua capacidade de carga e de transporte ser muita alta, optimizando a exploração e custo unitário de transporte da massa mineral.

Dante da complexidade envolvida no transporte por camiões fora-de-estrada, é essencial que o traçado das vias seja feito com base em dados técnicos e geográficos precisos. A utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite simular vias, analisar o relevo, declividades e restrições ambientais, garantindo a escolha de caminhos mais seguros, curtos e economicamente viáveis. Essa abordagem contribui directamente para a redução dos custos operacionais, aumento da vida útil dos veículos e melhoria da eficiência geral do transporte da massa mineral.

1.2.1. PLANO DE TRÁFEGO DE MINERAÇÃO

Toda mina deve possuir um plano de tráfego de mineração, que tem como finalidade estabelecer critérios relacionados às regras para planeamento, construção e manutenção dos acessos, além das regras de tráfego seguro nas áreas operacionais de mina, respeitando a legislação vigente e normas internas de circulação.

Figura 1.2 Exemplo de um plano de tráfego



Fonte: (SAMARCO, 2014)

1.2.1.1. REGRAS DE PREFERÊNCIA

Os critérios para preferência na interacção entre equipamentos e veículos devem ser estabelecidos de modo que se tenham regras claras e definidas que garantam a segurança no tráfego dentro da mina. A regra de preferência deve abranger todos os equipamentos e veículos habilitados a acessar a área. Como prática, os critérios estabelecidos e a ordem de preferência são:

- Veículos de emergência com sirene e giroflex ligados simultaneamente.
- Equipamentos móveis de superfície – maior porte.
- Demais veículos rodoviários.

Figura 1.2 Interacção entre equipamentos e veículos.



Fonte: (SAMARCO, 2014)

1.2.2. DIMENSIONAMENTO DO CAMIÃO

O dimensionamento correcto dos camiões utilizados na exploração é essencial para garantir a eficiência e a segurança no transporte da massa mineral. Factores como capacidade de carga, peso bruto, altura, largura e comprimento do equipamento influenciam directamente na definição dos parâmetros geométricos das vias de acesso, como largura da estrada e raio de curvatura. No presente estudo, utiliza-se como referência o camião fora-de-estrada **Caterpillar 777D**.

O **Caterpillar 777D** é um camião rígido de grande porte com as seguintes especificações principais:

Tabela 1.1 Especificações do camião fora de estrada caterpillar 777D.

ID	Especificação	Sistema Internacional	Sistema Americano/Britânico
1	Capacidade nominal de carga útil	90,9 toneladas métricas	100 toneladas (200.000 lb)
2	Peso do veículo vazio (tara)	64.400 kg	141.900 lb
3	Peso bruto operacional	161.000 kg	355.000 lb
4	Largura total	6.105 mm	20 pés
5	Altura até o topo da cabine (vazio)	5.028 mm	16 pés 6 polegadas
6	Altura até o topo da cabine (carregado)	4.933 mm	16 pés 2 polegadas
7	Comprimento total	9.780 mm	32 pés 1 polegada
8	Tipo de pneu	27.00-R49 Radial (2 estrelas E-4)	27.00-R49 Radial (2 star E-4)
9	Velocidade máxima (carregado)	60,4 km/h	39,9 mph

Fonte: (CATERPILLAR, Cat Product Brochure – Off-Highway Truck 777, 2023).

Essas dimensões exigem vias de acesso com largura compatível (mínimo de 3 a 3,5 vezes a largura do veículo para garantir circulação segura em vias de mão dupla, incluindo bermas de segurança), curvas com raio amplo, rampas com inclinação controlada (preferencialmente até 10%) e espaço adequado para manobras. O conhecimento técnico do equipamento é indispensável para garantir que o traçado das vias seja compatível com a capacidade e as limitações do equipamento, evitando sobrecargas, acidentes e comprometimento da produtividade da operação mineira.

O uso do SIG permitirá incorporar essas dimensões no traçado das vias, assegurando que o percurso proposto atenda às exigências operacionais do camião **Caterpillar 777D**. Dessa forma, evita-se sobrecarga da via, aumenta-se a vida útil da infra-estrutura e melhora-se a segurança e a eficiência no transporte da massa mineral.

Figura 1.2 Caterpillar 777D.



Fonte: A autora, Mina de Luele, 2025.

1.3. VIAS DE ACESSO

De acordo com os princípios técnicos adoptados na engenharia de minas e alinhados com o Código Mineiro de Angola (Lei n.º 31/11), entende-se por **acesso de mina** a via inclinada que serve de passagem principal entre os diferentes níveis operacionais de uma exploração a céu aberto, possibilitando o tráfego de equipamentos e o escoamento do minério. Essas vias são essenciais para a continuidade das operações de exploração, especialmente em sistemas de transporte por camiões. A construção e manutenção de estradas internas constitui um elemento fundamental em explorações a céu aberto, visto que sua geometria, resistência e segurança influenciam directamente na produtividade, na durabilidade da frota e nos custos operacionais. Elas estão ligadas directamente a produção da mina e problemas com as mesmas e podem acarretar em impactos sobre a produtividade e/ou custos. O transporte em empreendimentos mineiros é essencialmente realizado por meio de camiões basculantes, tanto rodoviários quanto fora de estrada, o que demanda a construção e manutenção de vias de acesso às frentes de trabalho para estes equipamentos.

Estradas de mina são projectadas geralmente ainda no planeamento de exploração e os parâmetros considerados são basicamente geométricos, como largura, inclinação, raio de curvatura e drenagem interna, voltados à saúde e segurança ocupacional dos operadores dos equipamentos da mina, sendo pouco explorado o conhecimento de variáveis estruturais e de funcionalidade.

Entretanto o correcto dimensionamento das vias de acesso de mina é responsável por inúmeras contribuições para a exploração, como melhoria da disponibilidade física de equipamentos, diminuição da frequência de manutenção dos equipamentos e acessos, além de custos de transporte e de tempos de ciclo e também melhoria das condições de saúde e de segurança dos operadores.

Para se ter acessos as diversas bancadas formadas em uma exploração a céu aberto devem ser criadas rampas e vias de acesso. A largura e a inclinação da rampa dependem do tipo de equipamento utilizados no transporte.

Segundo Kaufman & Ault (1977) apesar destes factos, o design de vias de acessos até recentemente tem recebido pouca atenção. As duas funções principais dos acessos são: promover transporte eficiente e segurança.

Os acessos e rampas devem assegurar os seguintes factores:

- a) Custos mínimos com base em um valor presente líquido para o transporte de minério e estéril ao longo de toda a vida útil da mina.
- b) Um mínimo de congestionamento do tráfego e acesso seguro para as operações de extração.
- c) A evasão das áreas onde os problemas de estabilidade de taludes poderiam ocorrer.
- d) Uso de acessos permanentes em lugar de acessos temporários (isto reduz custos de construção globais e custos de operação como também reduz a demanda de materiais de construção que podem não estar disponíveis em quantidades suficientes no estéril).

Outros factores incluem a localização de plantas tratamento de minério, pátio de armazenagem, escombreiras, as restrições ambientais, etc. Todos estes factores demandam atenção directa para:

- a. Layout de vias de acessos.
- b. Geometria de vias de acessos.
- c. Materiais de construção de vias de acessos.

1.3.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

De acordo com Peroni (2015) o projecto geométrico de um acesso de mina é de suma importância, pois influencia directamente na produtividade da frota, aumentando ou diminuindo o tempo de ciclo, os custos de remoção de estéril e/ou minério e a distância média de transporte. Como também na vida útil dos componentes mecânicos dos equipamentos de transporte, na segurança dos operadores e nos custos de manutenção das estradas.

Segundo Pontes Filho (1998), o projecto geométrico é a fase do projecto de estradas que estuda as diversas características geométricas do traçado, principalmente em função das leis do movimento, características de operação dos veículos, reacção dos motoristas, segurança e eficiência das estradas e volume de tráfego. Os parâmetros geométricos baseados no estudo das diversas variáveis de projecto são relacionados às características de operação da frota no empreendimento como, porte dos equipamentos, condições de tráfego e elementos associados às legislações específicas, tendo por objectivo garantir a integridade física e a melhor utilização das estradas e vias pelo usuário. Alguns dos elementos mais relevantes para essa etapa serão destacados a seguir.

1.3.1.1 NÚMERO DE VIAS

As vias de acessos em minas são geralmente construídas com via simples, tráfego unidireccional ou duas faixas de tráfego direccional porque a densidade do tráfego não pode ser elevada ou devido a problemas de espaço. No entanto, em vias de acesso da mina para as pilhas externas, para as plantas de beneficiamento, etc., pode ser necessário mais do que uma única faixa por sentido.

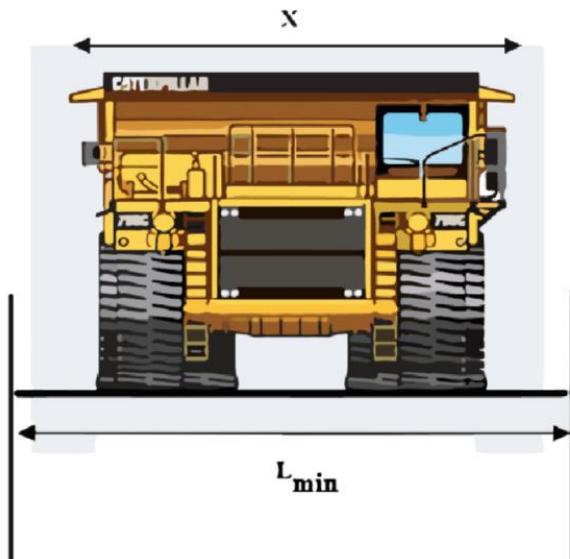
1.3.1.2. LARGURA DO ACESSO OU RAMPA

De acordo com os princípios estabelecidos pelo Código Mineiro de Angola (Lei n.º 31/11), cabe ao titular da concessão assegurar que a infra-estrutura necessária às operações da mina — incluindo as vias de acesso internas — seja construída e mantida de forma segura e eficiente. Embora a legislação angolana não especifique medidas exactas para o traçado das vias, recomenda-se que, com base em boas práticas internacionais de engenharia de minas, a largura mínima das vias de circulação em explorações a céu aberto seja dimensionada proporcionalmente ao porte dos veículos utilizados. Para vias de mão única, recomenda-se o equivalente a duas vezes a largura do maior veículo, e para vias de mão dupla, no mínimo três vezes essa largura, acrescidas das bermas de segurança, sobretudo nos acessos principais.

A **largura da via** de circulação é um factor que dever ser considerado com cuidado pelo projectista. Deve haver espaço suficiente para manobras a todo momento a fim de promover segurança e manter a continuidade do ciclo. Diferentemente de veículos de passeio, que tem dimensões padronizadas, os equipamentos de mina têm dimensões particulares. Devido a isso, é requerido que seja feita um dimensionamento considerando o maior equipamento que possa ser utilizado (KAUFMAN & AULT, 1977).

Acessos muito estreitos podem reduzir drasticamente a vida útil dos pneus por forçar o operador a trafegar por sobre a berma ao passar outro veículo. Isto resulta em danos as paredes laterais, uso desigual e cortes.

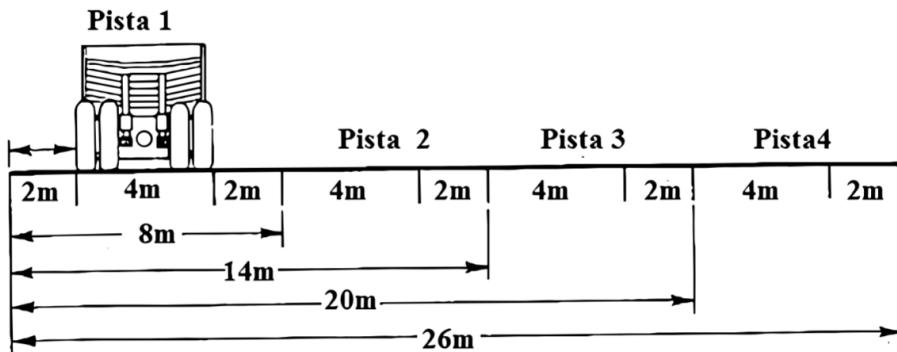
Figura 1.5 Representação esquemática de largura de estrada para um camião fora de estrada.



Fonte: Modificado de (MASETTI, 2011).

Segundo o manual de design de vias elaborado por Kaufman & Ault (1977), a largura da estrada implantada depende da quantidade de vias necessárias. A seguir segue uma figura que demonstra em hipótese como seria uma estrada de mina com até quatro vias.

Figura 1.6 Exemplo do dimensionamento da via de circulação.



Fonte: Modificado de (KAUFMAN & AULT, 1977).

Para uma via dupla por exemplo, que é o modelo mais utilizado em mineração, a largura da via de rolamento é **3,5 vezes** o maior equipamento utilizado. A utilização de mais vias depende da quantidade de equipamentos, fluxo da mina, entre outros.

Assim, para vias simples recomenda-se duas vezes a largura do maior camião e, para vias duplas, três vezes, assegurando espaço suficiente para manobras, segurança e circulação eficiente. Tannant & Regensburg (2001) propõem uma fórmula simples para a largura mínima de uma estrada de mina, definida pela equação 1:

$$L_{min} = (1,5 * V + 0,5) * X \quad (1)$$

Onde:

L_{min} = largura mínima da estrada (m);

V = número de vias;

X = largura do veículo (m).

1.3.1.3. INCLINAÇÃO

A **inclinação**, é definido como a inclinação desta da vertical com a horizontal, expresso em percentagem. A inclinação deve ser o mais regular e suave possível, evitando que mudem em intervalos curtos, pois inclinações irregulares causam esforços indevidos no equipamento, além de diminuir a velocidade do mesmo (OLIVEIRA FILHO, 2010).

A inclinação de vias está em função da segurança e economia. Na maioria dos casos, as inclinações variam entre 0 e 12% em vias longas e pode atingir até 20% em estradas curtas. Entretanto, a maioria das estradas de mina tem uma inclinação entre 6 e 10%. É usualmente melhor projectar uma via com uma inclinação menor (TANNANT & REGensburg, 2001).

De acordo com Kaufman & Ault (1977) a inclinação de uma estrada de mina geralmente é limitada em 10%, mas inclinações maiores do que 8% devem ser evitados por questões de segurança.

1.3.1.4. SUPERELEVAÇÃO

Entende-se que a **superelevação** é a inclinação transversal aplicada nas curvas das vias, com o objectivo de compensar o efeito da força centrífuga durante a circulação de veículos. Essa prática contribui para garantir maior segurança e estabilidade, especialmente em trechos curvos, permitindo que os camiões realizem manobras com mais conforto e menor risco de derrapagem.

Para Caterpillar (2010) o tráfego nas curvas pode ocasionar grandes esforços laterais nos pneus, contribuindo para a separação das lonas e elevado desgaste, e por isso a superelevação é utilizada para eliminação desses, a qual depende do raio de curvatura e da velocidade.

Masetti et. al. (2011) traz a **Tabela 1.2** como uma referência para determinar o valor da superelevação necessário para eliminar as forças laterais. Não devendo ser aplicados valores de superelevação iguais ou superiores a 0,060, como em destaque na Tabela 1.2, a menos que sejam impostos limites rigorosos de velocidade e que as condições de derrapagem sejam minimizadas.

Tabela 1.2 Superelevação (%) de acordo com o raio de curvatura e a velocidade.

Raio de curvatura (m)	Velocidade (Km/h)								
	15	20	25	30	35	40	45	50	55
50	0,040	0,060	0,080						
75	0,030	0,050	0,070	0,090					
100	0,025	0,040	0,060	0,075	0,100				
150	0,020	0,030	0,040	0,050	0,070	0,100			
200	0,020	0,020	0,030	0,035	0,050	0,070	0,090	0,110	
300	0,020	0,020	0,020	0,025	0,030	0,040	0,060	0,070	0,850
400	0,020	0,020	0,020	0,020	0,030	0,020	0,040	0,050	0,060

Fonte: Modificado de MASETTI (2011).

Os valores para a superelevação adoptados em projectos de mineração devem levar em consideração as condições climáticas (frequência de chuvas), condições topográficas do local e velocidade média do tráfego, entretanto idealmente os valores ficam em torno de 3 a 4%.

1.3.1.5. RAIO DE CURVATURA

O raio das curvas deve ser projectado de modo a serem o maior possível e suaves, evitando-se variações repentinas no raio, e com isso garantindo maior segurança e diminuição da congestão de tráfego.

Segundo MASETTI (2011) a projecção de curvas deve considerar a performance dos camiões, de forma a possibilitar velocidade constante, sem redução de marchas ao longo do trajecto, e assim garantindo a performance optimizada dos camiões, sem que aumente o tempo de ciclo, o que interfere directamente nos custos de transporte. A equação 2 estabelece o raio de curvatura mínimo R (m), de acordo com a superelevação aplicada, o coeficiente de atrito e a velocidade do veículo.

$$R_{\min} = \frac{V_0^2}{127(e_{\max} + f_{\max})} \quad (2)$$

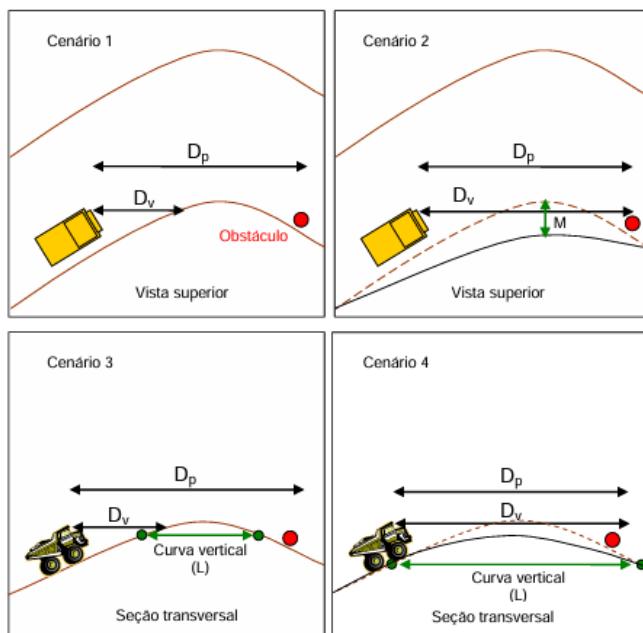
Onde: V_0 = velocidade de projecto do veículo (km/h); e_{\max} = máxima taxa de superelevação aplicada (m/m de largura de estrada); f_{\max} = máximo coeficiente de atrito entre os pneus e a superfície da estrada (adimensional).

1.3.1.6. DISTÂNCIAS DE VISIBILIDADE SEGURA

Segundo Masetti (2011), a **distância de visibilidade** é a extensão da área periférica visível ao operador, e quanto melhores as condições gerais de visibilidade, mais seguro será o acesso.

A presença de taludes ou outros obstáculos na parte inferior das curvas horizontais limitam a visibilidade, o que pode necessitar o aumento do raio de curvatura nesse trecho ou o alargamento dos taludes de corte que corresponde ao afastamento horizontal mínimo.

Figura 1.7 Configurações geométricas indicando diferentes condições de segurança.



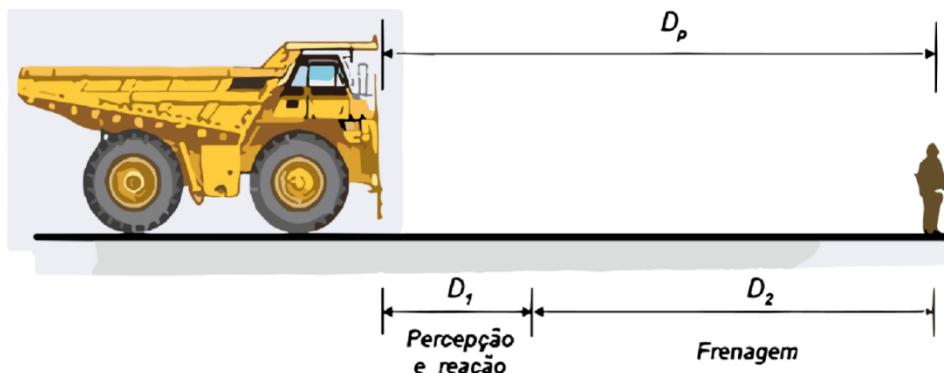
Fonte: Modificado (THOMPSON & VISSER, 2008).

De acordo com Masetti (2011), é importante que distância de visibilidade seja suficiente para que o equipamento transitando em uma dada velocidade pare antes de atingir um obstáculo. Para isso, a distância de visibilidade deve ser **igual ou maior** do que a distância de parada. As curvas verticais e horizontais devem ser planeadas segundo essa premissa e caso isso não seja possível, limites severos de velocidade máxima devem ser impostos, sabendo que a distância de visibilidade e a distância percorrida são proporcionais.

1.3.1.7. DISTÂNCIA SEGURA DE PARADA

Também denominada como distância de visibilidade de parada é a distância mínima para que o veículo consiga parar antes de colidir com um obstáculo (Figura 1.8). De acordo com Antas et. al. (2010) é importante que não haja limitações aos motoristas directamente vinculados as características geométricas da via, além das considerações feitas sobre as condições meteorológicas e as características particulares de cada veículo, quanto a travões, pneus, suspensão, etc. A distância de parada (D_p) é composta pela soma de duas parcelas: distância de percepção e reacção (D_1) + distância de travagem (D_2).

Figura 1.8 Distância de parada (D_p).



Fonte: (MASETTI, 2011).

O cálculo da distância de parada visa atender a diferentes inclinações e velocidades e foi desenvolvido por Kaufman & Ault (1977), através de uma fórmula empírica baseada nas limitações de distância de parada estudadas pela Sociedade dos Engenheiros Americanos (SAE – Society of Automotive Engineers). Sendo obtida através da Equação 3.

$$D_p = \frac{1}{2}gt^2 \sin\theta + V_0t + \left[\frac{(gts\sin\theta + V_0)^2}{2g(f - \sin\theta)} \right] \quad (3)$$

Onde:

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

t = tempo de parada (s);

θ = inclinação da rampa, positivo para baixo (graus);

f = coeficiente de atrito do pneu (contacto estrada/pneu);

V_0 = velocidade do veículo (m/s).

Tabela 1.3 Tempo de reacção de travagem em função do peso do camião.

Peso do Camião (t)	Tempo de reacção de travagem t_2 (s)
< 45	0,5
45 < t < 90	1,5
90 < t < 180	2,75
> 180	4,5

Fonte: (MASETTI, 2011).

As características particulares dos materiais que constituem os acessos, assim como a sua condição (seca ou húmida), influenciam directamente o coeficiente de atrito do pneu (**f**). A tabela a seguir estabelece valores de coeficiente de atrito de acordo com a natureza da via.

Tabela 1.4 Valores de **f** em função da natureza da via.

Natureza da via	Coeficiente de atrito do pneu/via (f) – (t/t)
Pavimento de concreto	0,90
Terra firme e seca	0,55
Terra solta	0,45
Terra firme húmida	0,45
Areia húmida	0,40
Areia seca e terra solta húmida	0,20

Fonte: (MASETTI, 2011).

1.3.1.8. BERMAS DE SEGURANÇA

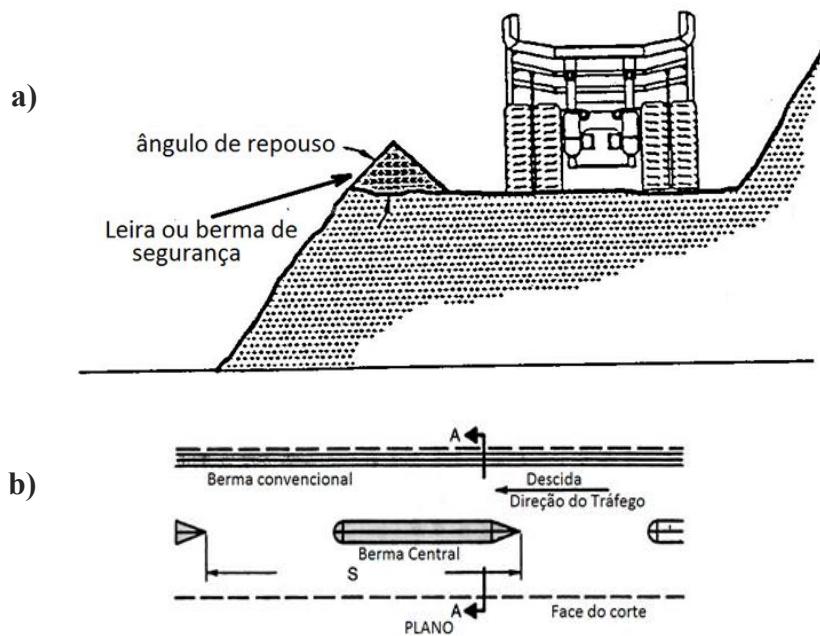
Bermas de segurança são elementos imprescindíveis na construção de estradas de mina. Elas fornecem maior segurança para camiões que trafegam na via, pois funcionam como barreira de contenção em casos de acidentes (PIMENTEL K. , 2007).

Considerando que, em vias onde há risco de queda de veículos, é fundamental adoptar barreiras de protecção como as beiras de segurança. Uma prática comum é dimensioná-las com altura mínima igual à metade do diâmetro do maior pneu do camião que circula na via. No entanto, é sabido que essa medida pode não ser suficiente em situações de emergência, como apontam alguns autores, pois em casos de veículos desgovernados, a beira pode não conter totalmente o impacto. Isso reforça a necessidade de avaliar o traçado, a velocidade operacional e os espaços de escape como parte do planeamento seguro da via.

Então, é proposto que a altura de uma beira padrão seja de **2/3 do diâmetro do pneu** do maior equipamento. As beiras de segurança são implantadas durante e após a conclusão dos acessos. Além de fornecer maior segurança, elas ainda têm a função de evitar que a água de porções superiores transborde e alague a via (MAGALHÃES, 2011). A figura 1.9 demonstra a confecção de uma beira de segurança.

As beiras centrais auxiliam no controle de camiões desgovernados. Neste caso, o cimento para escoamento da drenagem deve ser do centro para as bordas. O comprimento da beira deve ser, no mínimo, de 50 metros e quando necessário podem haver espaçamentos.

Figura 1.9 a) Berma de segurança na crista do banco. b) Berma centrais de segurança separando as vias de transporte.



Fonte: (HISTRULID & KUCHTA, 2006).

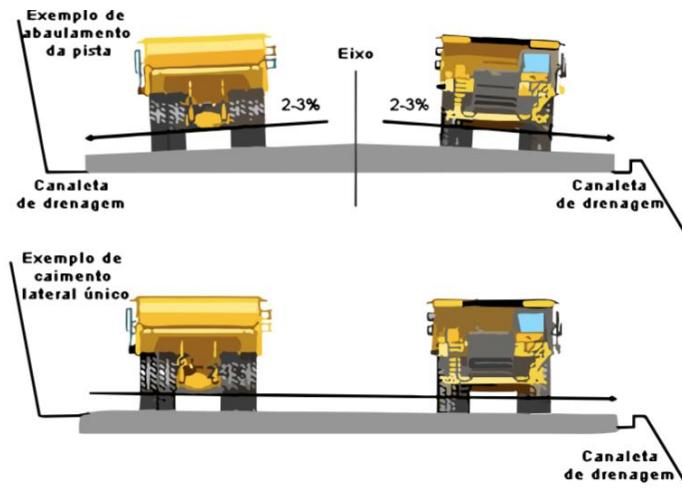
1.3.2. PARÂMETROS DE DRENAGEM

O sistema de drenagem em estradas de mina é frequentemente subestimado, apesar de sua importância crítica para a durabilidade, segurança e manutenção das vias. A drenagem bem planeada evita a saturação do solo, formação de poças, erosão da via e desestabilização dos taludes, especialmente durante o período chuvoso (PEREIRA, 2000). Esses problemas afectam directamente a eficiência do transporte e aumentam os custos operacionais com reparos constantes.

A drenagem superficial tem a função de conduzir a água da chuva para áreas seguras, afastando-a da estrutura da via. Para isso, são utilizados elementos como valetas de protecção e banquetas, que interceptam o fluxo d'água ao longo dos cortes e o redireccionam paralelamente ao eixo da estrada, minimizando os danos. Além disso, o projecto da via deve prever um cimentoamento adequado, seja com abaulamento central ou declive lateral único, para evitar o acúmulo de água sobre a plataforma (SOUZA, 2011). A correcta inclinação das bermas também faz parte da drenagem funcional integrada ao projecto geométrico.

Portanto, o planeamento das vias em áreas de mina deve considerar desde a fase inicial do projecto os elementos de drenagem, garantindo estabilidade estrutural e prolongando a vida útil da estrada. O uso do SIG pode, inclusive, contribuir para a identificação de zonas críticas de escoamento e facilitar o posicionamento ideal dos dispositivos de drenagem com base na declividade natural do terreno.

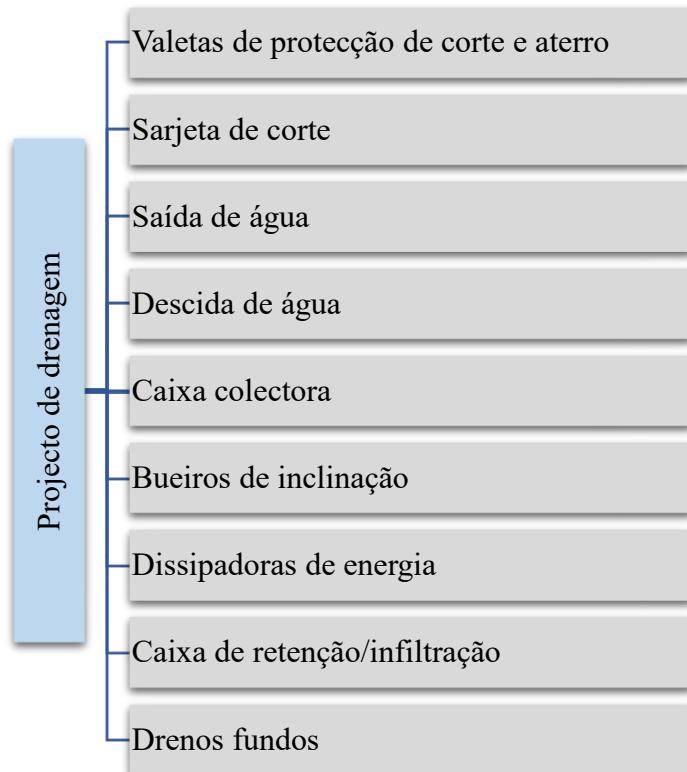
Figura 1.10 Inclinação de drenagem nas vias.



Fonte: Traduzido de THOMPSON (2008); REIS (2014).

Quando os acessos estão localizados em áreas de grande fluxo de água e têm declividade acentuada (maior que 6 %), é necessário diminuir a velocidade das águas para evitar a erosão ao longo dos acessos.

Figura 1.11 Elementos de projecto de drenagem.



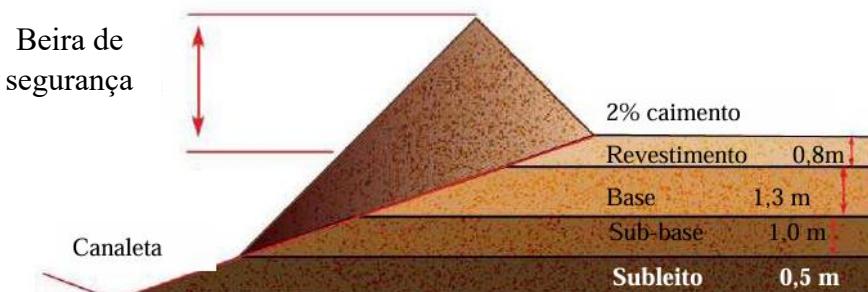
Fonte: Modificado MASETTI (2011).

1.3.3. PARÂMETROS ESTRUTURAIS

O dimensionamento de um pavimento, foco principal do projecto estrutural, consiste na definição das espessuras das camadas que o compõe. Essas camadas devem ter capacidade de suporte tal que resistam à ruptura e não apresentem deformações ou desgastes excessivos, quando submetidas a esforços de carga devidos ao tráfego dos equipamentos. Essa configuração minimiza, na medida do possível, a necessidade de manutenções excessivas (HUGO, 2005)

O pavimento de acesso de mina é constituído por quatro camadas: **revestimento, base, sub-base e subleito**.

Figura 1.12 Secção transversal de estradas.



Fonte: Modificado HOLMAN (2006).

- **Subleito:** camada de fundação, constituída pelo terreno natural ou material compactado;
- **Sub-base:** camada intermediária de drenagem e distribuição de cargas;
- **Base:** camada de alta densidade que distribui as tensões para a sub-base;
- **Revestimento:** camada funcional que proporciona tracção e protege a estrutura.

O projecto, a construção e a manutenção de estradas são até hoje realizadas de forma empírica sem uma metodologia pré-definida. Porém muitos tem sido os estudos e pesquisas nos últimos anos na busca por uma padronização de procedimentos, apesar das diferenças ambientais, climáticas e frota de um empreendimento para outro, no qual todos esses parâmetros tornam particular cada situação, entretanto as diferentes experiências devem ser compartilhadas para evitar o retrabalho e permitir o avanço dos conhecimentos (OLIVEIRA FILHO, 2010). Os métodos de dimensionamento de pavimento podem ser divididos em **empíricos ou mecanístico-empíricos**, onde os primeiros são baseados em observações, tentativas e experiências prévias de campo e o segundo, também denominado **teóricos-experimentais** são fundamentados em modelos matemáticos.

A escolha do método adequado depende da disponibilidade de dados e dos recursos computacionais, sendo que o SIG facilita a integração de diferentes metodologias de cálculo através da parametrização de suas ferramentas de análise.

A sinalização e iluminação das vias, embora importantes para a segurança operacional, constituem elementos complementares que devem ser planeados após a definição do traçado geométrico óptimal, o qual é o foco central desta investigação.

1.3.4. MONITORAMENTO E MANUTENÇÃO

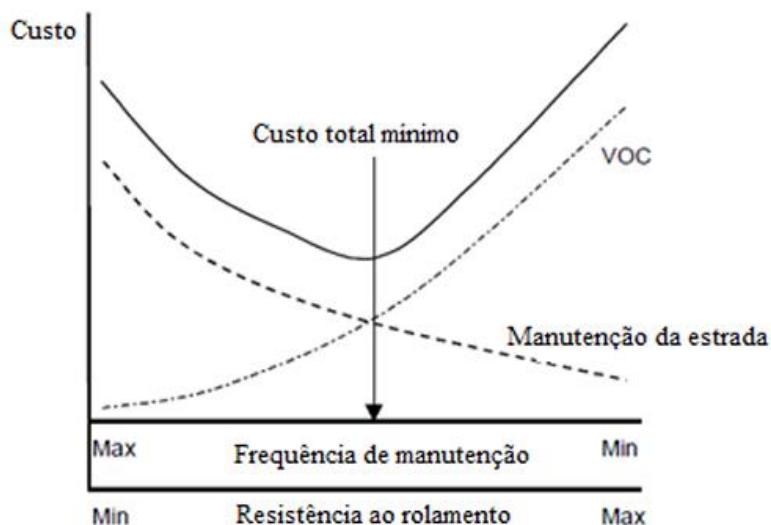
A manutenção de acessos de mina é uma actividade essencial que deve ser realizada com objectivo de proporcionar maior segurança no tráfego de camiões e menor custo com consumo de pneus e combustível. Em estudo realizado por Rodovalho (2016), foi analisada a influência do desempenho individual dos operadores no consumo de combustível, considerando diferentes habilidades. Pôde-se concluir que o factor humano não promove mudanças significantes no consumo de combustível, porém as condições de estrada da mina por onde trafegam os camiões impactam directamente na a redução do consumo de combustível.

Defeitos são alterações na superfície da estrada que influenciam negativamente nas condições de uso, reduzindo o desempenho operacional de transporte. O tráfego e a acção de intempéries aceleram o processo de degradação da superfície das estradas de acesso de mina, principalmente quando não existem técnicas de manutenção adequada. Devem-se ter equipamentos auxiliares e uma equipe capacitada de infra-estrutura para que sejam feitas manutenções rotineiras nos acessos durante as operações.

A manutenção de estradas tem como objectivos conservar a superfície de rolamento razoavelmente isenta de irregularidades, firme e livre de perda excessiva de material solto, além de manter a declividade transversal do leito da estrada apropriada para assegurar o escoamento superficial das águas. É constituída por um conjunto de actividades que são executadas para minimizar os defeitos e, consequentemente, reduzir os custos operacionais dos camiões, assim como para prolongar a vida útil das estradas (SOUZA, 2011).

A qualidade das estradas afecta directamente a eficiência das operações, uma vez que estradas bem construídas e em boas condições de conservação permitem um deslocamento mais suave e rápido dos equipamentos, aumentando a produtividade.

Figura 1.13 Curva de custos teóricos de vias de acesso de mina.



Fonte: THOMPSON & VISSER (2008).

1.4. SIG

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG), em inglês Geographic Information System (GIS), consiste em um conjunto de ferramentas computacionais para geoprocessamento no qual permite manipular e integrar dados de diversas fontes, podendo ser criado um banco de dados digital com informações georreferenciadas (CÂMARA & DAVIS, 2001).

Segundo Fitz (2008) os SIGs são sistemas computacionais que possuem programas especiais para a colecta, o armazenamento, o processamento e a análise digital de dados georreferenciados visando à produção de informação espacial.

Para Bossler (2016) os SIGs são programas de computador destinados a trabalhar matematicamente as informações geográficas e alfanuméricas para gerar informações baseadas em algoritmos pré-definidos.

Outros autores afirmam que os SIG's consistem em uma integração de hardware, software, dados geográficos e pessoas, possibilitando aos usuários capturar, armazenar, actualizar, manipular, analisar e exibir todo o tipo de informações geograficamente distribuídas.

A tecnologia dos sistemas de informação geográfica pode ser utilizada para investigações científicas, gestão de recursos, gestão de activos, arqueologia, avaliação do impacto ambiental, planificação urbana, cartografia, sociologia, geografia histórica, marketing e logística. Neste trabalho, por exemplo, o SIG será utilizado para simular e propor a optimização de um traçado de vias rodoviárias para o transporte da massa mineral com caso de estudo a Mina de Luele, considerando critérios como declividade do terreno, tipo de solo, distâncias operacionais e áreas ambientalmente sensíveis. Com isso, pretende-se demonstrar como o SIG pode contribuir de forma prática para a melhoria da redução de custos operacionais e o aumento da segurança nas operações.

A razão fundamental para se utilizar um SIG é a gestão de informação espacial. O sistema permite separar a informação em diferentes camadas temáticas e as armazena independentemente, permitindo trabalhar com elas de maneira rápida e simples, facilitando ao profissional a possibilidade de relacionar a informação existente através da topologia dos objectos, com a finalidade de gerar outra informação que não poderíamos obter de outra forma.

As principais questões que podem resolver um sistema de informação geográfica, ordenadas da menor a maior complexidade, são:

- a. **Localização:** perguntar pelas características de um lugar concreto;
- b. **Condição:** o cumprimento ou não de condições impostas ao sistema;
- c. **Tendência:** comparação entre situações temporais ou espaciais distintas de alguma característica;
- d. **Percorso:** cálculo de percursos óptimas entre dois ou mais pontos;
- e. **Directrizes:** detecção de directrizes espaciais;
- f. **Modelos:** geração de modelos a partir de fenómenos ou actuações simuladas.

1.4.1. TIPOS DE SIG

Segundo Cosme (2012), os SIGs podem ser classificados de acordo com os seus objectivos, abrangência e área de aplicação. Essa distinção permite entender como cada tipo de SIG contribui para a análise, planeamento e tomada de decisão em diferentes contextos — desde projectos específicos até à gestão corporativa de grande escala.

Um **SIG de projecto** é tipicamente um conjunto único de actividades que se desenvolvem num dado intervalo temporal com um conjunto de objectivos específicos e critérios de aceitação definidos. A estrutura do SIG de projecto é geralmente direccional, priorizando a integração dos dados necessários à execução do estudo, com foco em gerar resultados precisos e úteis para a tomada de decisão técnica. É frequentemente associado a problemas de planeamento e gestão, podendo ser equiparado a um SIG para suporte a decisão.

O **SIG de empresa ou corporativo** implica uma visão mais ampla e integrada, destinada à gestão contínua e à resolução de problemas rotineiros. Estes sistemas são destinados à resolução de problemas bem definidos que ocorrem com carácter repetitivo. Caracterizam-se por suportar diversos tipos de funcionalidades para organização e armazenamento de dados e para obtenção de dados pré-definidos. Diferente do SIG de projecto, o SIG corporativo lida com processos recorrentes e do dia-a-dia fornecendo ferramentas para actualização, monitoramento e controle das operações. Além disso, é estruturado para manter consistência e integridade dos dados espaciais ao longo do tempo, permitindo que diferentes departamentos trabalhem sobre a mesma base informacional.

Nos sistemas mais integrados, o SIG assume um papel estratégico como núcleo de recolha, validação e harmonização de dados espaciais, garantindo que toda a informação seja coerente, actualizada e independente das aplicações sectoriais.

Essa integração é particularmente crucial em contextos mineiros, onde os dados geológicos, topográficos, ambientais e operacionais são dinâmicos e interdependentes. A padronização das relações espaciais e semânticas dentro do SIG assegura maior consistência analítica e uma visão abrangente do território, permitindo optimizar o planeamento, reduzir incertezas e elevar a eficiência operacional.

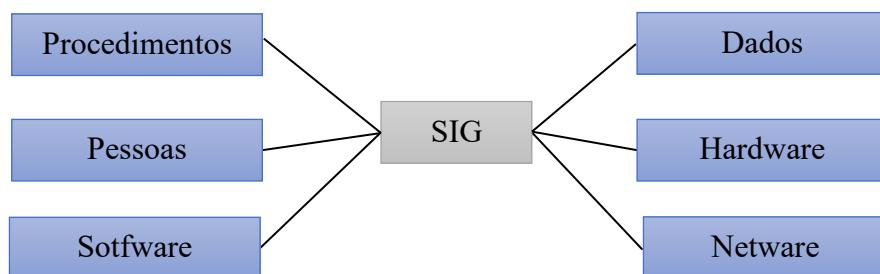
A escolha adequada do tipo de SIG a ser aplicado em um projecto ou estudo é um factor determinante para o sucesso das actividades. Cada tipo de SIG, apresenta capacidades e finalidades distintas que influenciam directamente a qualidade das análises e das decisões. Seleccionar o sistema apropriado significa alinhar a tecnologia aos objectivos do trabalho, garantindo que os dados sejam tratados na escala, detalhe e periodicidade correctos.

Em projectos mineiros, por exemplo, um SIG mal dimensionado pode comprometer a precisão dos resultados e aumentar custos operacionais, enquanto um SIG bem estruturado transforma dados complexos em informação estratégica, orientando decisões técnicas e de gestão com maior segurança e agilidade.

1.4.2. COMPONENTES DE UM SIG

Embora o SIG seja pensado como apenas um “software”, ele é composto por uma variedade de componentes distintos e inter-relacionados (EASTMAN, 1998).

Figura 1.14 Componentes de um SIG.



Fonte: (BARROS, 2025).

Os **dados** são registros de fenómenos com referência espacial.

O componente **hardware** consiste em elementos físicos que dão suporte ao funcionamento do sistema, como processador, memória, dispositivos de armazenamento, scanners, impressoras, estação total, equipamentos GPS, dentre outros.

As **pessoas** são compostas de desenvolvedores, operadores e administradores do sistema, aplicam as diversas funções do SIG na resolução de problemas do mundo real, desenvolvem novas ferramentas e o conhecimento científico a ser utilizado no SIG. As pessoas precisam adquirir o conhecimento técnico para operar esse tipo de sistema.

Os **procedimentos** consistem no conjunto de metodologias que cada usuário constrói em um SIG, visando atingir um objectivo.

Software são programas de computador destinados a trabalhar matematicamente as informações geográficas e alfanuméricas e que fornecem o conjunto de programas dedicados à execução de operações sobre os dados.

Netware é a rede de comunicação, isto é, uma infra-estrutura de rede e internet que permite aceder a mapas e informações geográficas que estão guardadas em servidores remotos e compartilhar esses dados com outras pessoas e instituições em tempo real.

1.4.3. TIPOS E FORMATOS DE DADOS GEOGRÁFICOS

A informação do mundo real é codificada e representada através de modelos de dados com localização espacial, georreferenciação e um conjunto de descritores quantitativos e qualitativos. Esta representação dos elementos geográficos pode ter um formato vectorial (vector) ou matricial (raster).

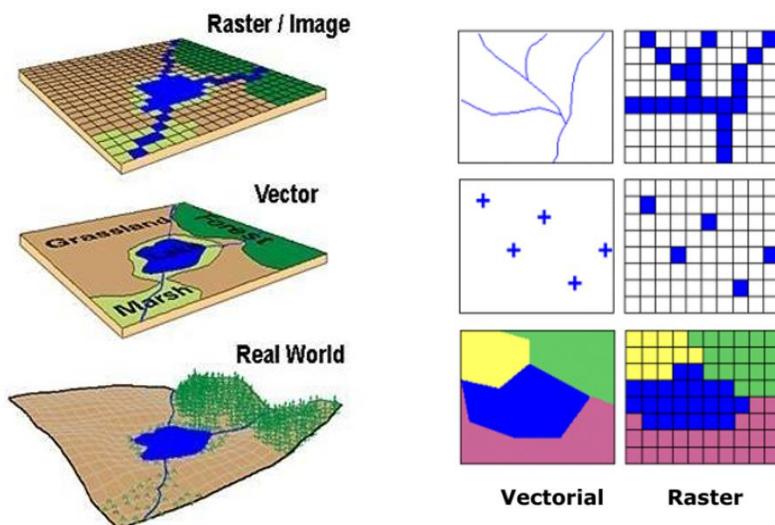
No modelo de **dados vectorial** o espaço é ocupado por uma série de entidades (pontos, linhas e polígonos), descritas pelas suas propriedades e cartografadas segundo um sistema de coordenadas geométricas. Neste tipo de modelo existe uma estreita relação com os conceitos associados à cartografia tradicional impressa, à qual é associada uma base de dados. Num modelo vectorial os objectos são estáticos e têm fronteiras bem definidas, sendo possível a utilização de objectos compostos e associação de tipologia.

Num modelo de **dados matricial ou raster**, o espaço é composto por células ou pixels, às quais está associado um valor, representando uma superfície contínua de variação de um dado atributo de interesse. As dimensões da célula, medidas no terreno, correspondem à resolução espacial, com que o tema está representado. Os sistemas raster são o resultado dos desenvolvimentos tecnológicos das últimas décadas, e surgem como um prolongamento da aquisição de informação através de imagem. Neste tipo de modelos as células são dispostas de uma forma regular e a sua posição é identificável através do índice de linha e coluna, em conjunto com a coordenada da primeira célula e com a dimensão da mesma, pelo que a topologia está implícita.

Os formatos vectoriais são mais indicados para representações de entidades com distribuição espacial exacta (localização de pontos de captação de água, estradas, usos do solo, etc.), têm uma estrutura de dados compacta e a topologia pode ser descrita explicitamente (aconselhável, por exemplo, em análises de redes).

Os formatos matriciais ou raster são indicados para representações de grandezas com distribuição espacial contínua (pressão atmosférica, temperatura, etc.), têm uma estrutura de dados simples, permitem a incorporação immediata de dados de sensores remotos e são adequados à análise espacial, face à facilidade de implementação dos algoritmos computacionais necessários a este tipo de análise.

Figura 1.15 Representação do mundo real, em modelos de dados vectoriais e raster.



Fonte: (CAVALCANTE, 2015).

1.4.4. MAPAS TEMÁTICOS

Estes mapas contêm somente informações de determinado assunto. Normalmente concebidos sobre uma base topográfica simplificada para facilitar a orientação e o entendimento dos usuários. Os mapas temáticos, ditos ambientais, são aqueles cujo conteúdo descreve um fenômeno geográfico específico (Ex: declividade, erosão, uso do solo, etc.). Pode-se dizer que a informação ambiental apresenta uma natureza dupla: um dado geográfico possui uma localização geográfica e um atributo descritivo. A complexidade de um mapa temático está na(s) relação(ões) entre os dados gráficos e seus atributos (dados alfanuméricos).

1.4.5. GEORREFERENCIAMENTO

Assim como as pessoas se utilizam de pontos de referência para se localizar, foi criado um sistema de pontos de referência para localizar qualquer lugar da Terra em um globo ou mapa, que são os sistemas de coordenadas. Todos os arquivos de dados em um SIG são georreferenciados. Georreferenciamento refere-se à localização de uma camada no espaço pelo sistema de coordenadas.

O registro de uma imagem, compreende uma transformação geométrica que relaciona coordenadas de imagem (linha e coluna) com coordenadas de um sistema de referência. Outros termos comuns para a designação do procedimento de registro são geocodificação e georreferenciamento.

Os sistemas de coordenadas são gerados a partir dos sistemas de referência, e estes a partir da figura de um elipsóide. As coordenadas permitem a localização precisa de pontos sobre a superfície da Terra. O geoprocessamento, a partir do uso dos SIGs permite a utilização de diversos sistemas de coordenadas. Em Angola, os dois sistemas de coordenadas mais utilizados são o **sistema geográfico**, baseado em coordenadas geodésicas (latitude e longitude), e o **sistema Universal Transverse Mercator – UTM**, baseado em coordenadas plano – rectangulares.

As coordenadas UTM são amplamente utilizadas em trabalhos de geoprocessamento, devido às suas características de adoptar paralelos e meridianos rectos e equidistantes. A representação das coordenadas em valores métricos é outro aspecto que facilita a interpretação das informações, e seu uso.

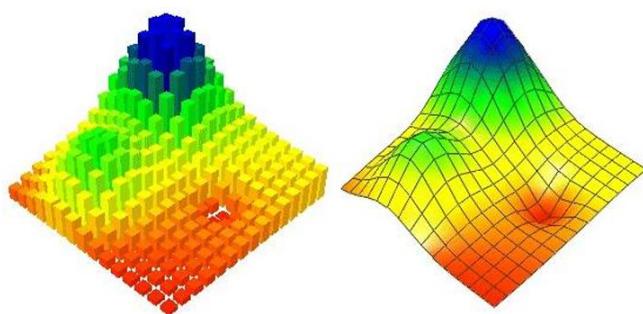
De maneira geral geoprocessamento pode ser considerado como sendo um conjunto de ciências, técnicas e tecnologias utilizadas para aquisição, processamento, armazenamento e publicação de dados e informações espacialmente explícitas.

1.4.6. MODELAGEM

As ferramentas computacionais para geoprocessamento (SIG) permitem realizar análises complexas ao integrar dados de diversas fontes dando origem a bancos de dados georreferenciados. O processo de **modelagem** é a forma que se dispõe para traduzir o mundo real em outros domínios. A modelagem do mundo real é uma actividade complexa porque envolve a discretização do espaço geográfico para a sua devida representação.

Os processos de modelagem de dados geográficos que buscam interpretar modelos numéricos altimétricos, utilizam malha de pontos regulares e irregulares que são representações matriciais onde cada elemento da matriz está associado a um valor numérico, dada por uma matriz de pixels com coordenadas planimétricas X e Y, e altimétrica Z que corresponde à elevação. O Modelo Digital de Elevação (Digital Elevation Model - DEM), por exemplo, é um dado para análise geoespacial altimétrica. Missão Topográfica de Radar Embarcado (SRTM – Shuttle Radar Topography Mission) e Radiômetro Avançado de Emissão Térmica e Reflexão Espacial (ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) são exemplos de produtos obtidos através de diferentes técnicas de Sensoriamento Remoto.

Figura 1.16 Resolução da imagem X pixel em modelos digitais de elevação.



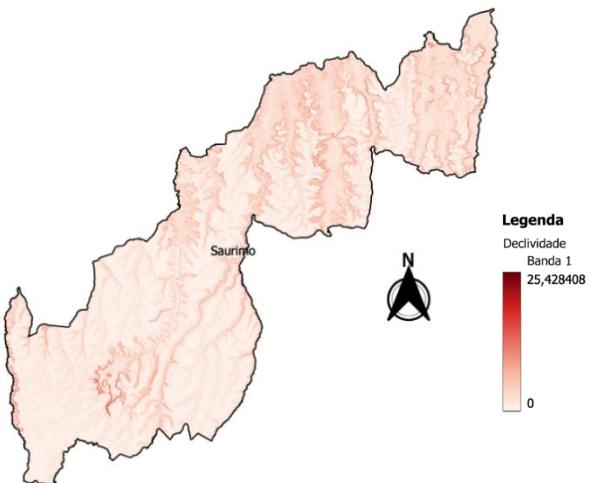
Fonte: (CAVALCANTE, 2015).

De acordo com PETRIE e KENNIE (1990), o Modelo Digital de Elevação – MDE contém informações de altura e elevação de todos os objectos presentes sobre a superfície terrestre (vegetação, construções, linhas de transmissão de energia, etc.).

VALERIANO (2008) define MDE como arquivos que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas. Esses registros altimétricos devem ser valores de altitude do relevo, idealmente, para que o MDE seja uma representação da topografia, sendo que as curvas de nível constituem importante fonte de dados para sua construção.

Compreendo que os usos de modelos digitais facilitam significativamente a análise de áreas complexas sem a necessidade de intervenção directa no local. Essa abordagem permite realizar simulações com base em dados altimétricos, contribuindo para a tomada de decisões mais seguras em projectos de engenharia. No contexto da mineração, considero que o acesso a dados de MDT é especialmente útil para o planeamento de vias de transporte, pois permite avaliar declividades, traçar percursos e identificar áreas críticas com agilidade e precisão, apoiando o projecto desde a fase inicial.

Figura 1.17 Modelo de declividade de Saurimo, Lunda Sul, Angola.



Fonte: O autor. Software QGIS.

CAPÍTULO II – METODOLOGIA

A investigação pode ser definida como um procedimento sistemático e racional que tem como princípio de prover a resposta para problemas pré-estabelecidos. A pesquisa é realizada por meio de um processo constituído por diversas etapas que ocorre desde a formulação de uma pergunta até a sua apresentação e discussão dos resultados obtidos. Uma pesquisa só irá existir se tiver uma pergunta ou dúvida a ser respondida. Pesquisar é realizar a procura ou busca por alguma resposta (MANZINI, 2011).

A metodologia de investigação científica é o conjunto de técnicas e procedimentos utilizados para conduzir um estudo sistemático com o objectivo de adquirir conhecimento ou resolver um problema. Existem diversos métodos e abordagens, dependendo do tipo de pesquisa e do campo de estudo.

As investigações científicas podem ser classificadas de acordo com diferentes critérios: quanto à natureza ou finalidade da pesquisa; quanto à forma de abordagem da pesquisa; quanto aos objectivos da pesquisa; quanto aos procedimentos técnicos da pesquisa. Segundo Lakatos e Marconi (2007), os métodos dividem-se em dois grandes grupos de acordo com sua inspiração filosófica, seu grau de abstracção, à sua finalidade mais ou menos explicativa, à sua acção nas etapas mais ou menos concretas da investigação: métodos de abordagem e de procedimentos.

A classificação também pode ser feita com base em seus objectivos gerais. Assim, é possível classificar as pesquisas em três grandes grupos: exploratórias, descriptivas e explicativas (GIL, 2008).

Embora todas essas metodologias tenham sua relevância e aplicação em diferentes tipos de estudo, este trabalho optará por uma abordagem distinta e altamente eficaz para problemas de engenharia e inovação: o **Design Science Research (DSR)**. O Design se diferencia das metodologias tradicionais por focar na criação e avaliação de artefactos, como modelos, métodos e ferramentas. Essa metodologia é ideal para pesquisas que envolvem engenharia e desenvolvimento tecnológico, pois permite uma integração dinâmica entre teoria e prática.

2.1. DESIGN SCIENCE RESEARCH

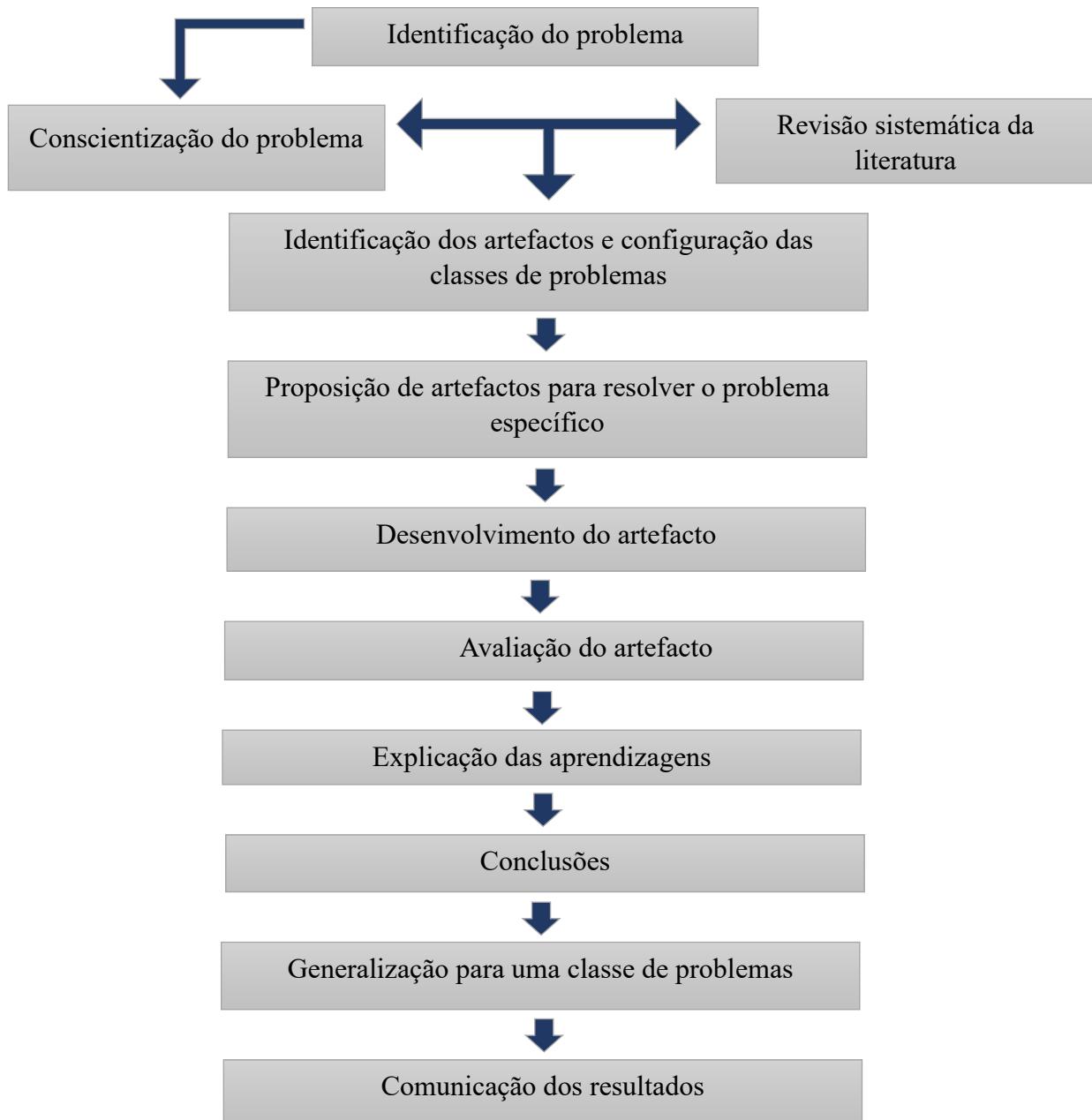
A pesquisa científica em design (DSR – Design Science Research) como método deriva das práticas relativas ao conceito de design que quer dizer “desenhar ou projectar”. O design vem propor alterações em um determinado sistema buscando melhoria. Essas alterações visam o desenvolvimento de produtos ou artefactos não existentes utilizando o conhecimento como fundamento dessa construção. Dessa forma, a DSR envolve a pesquisa na resolução de problemas em que as ciências tradicionais não sejam suficientes para sustentar o processo de pesquisa, uma vez que se centram normalmente, em discussões de âmbito mais teórico-conceitual.

A abordagem de ciência de design prevê a produção de um artefacto para solução de um problema real. A definição de artefacto inclui modelos, arcabouços, arquitecturas e métodos, isto é, qualquer coisa artificial desenvolvida que cumpre um propósito de solucionar um problema estabelecido Pimentel et al. (2019).

2.1.1. ETAPAS DA DSR

As etapas propostas por DRESCH et al. (2015) para condução da DSR, são:

Figura 2.1 Etapas de desenvolvimento da DSR.



Fonte: DRESCH et al. (2015).

A figura acima evidencia os passos necessários para desenvolvimento da pesquisa por meio da DSR.

Identificação do problema: a construção de um artefacto surge da necessidade de solucionar um problema ou com o propósito de agregar valor ao ambiente. Assim, sua origem é marcada por um problema real. Segundo DRESCH et al. (2015) o problema a ser investigado por meio da DSR surge da motivação do investigador em estudar e encontrar solução para alguma questão importante, pela busca de nova informação ou pela busca de uma solução a um problema prático.

Conscientização do problema: segundo DRESCH et al. (2015) nesta etapa cabe ao investigador buscar o máximo de informações possíveis a fim de assegurar a completa compreensão das facetas, causas e contexto, além de estudar as funcionalidades do artefacto e performance esperada.

Revisão sistemática da literatura: a técnica de revisão sistemática da literatura consiste em uma metodologia de pesquisa que visa o levantamento, análise crítica e identificação das literaturas mais relevantes. A sistematização e transparência evita distorções nos resultados da pesquisa e promove uma visão ampla do tema estudado. Por isso, o levantamento de trabalhos científicos para suporte teórico a esta investigação fundamentou-se em uma rigorosa, crítica e sistematizada revisão de literatura.

Identificação dos artefactos e configuração das classes de problemas: Esta é uma etapa importante para apoiar o investigador no processo de identificar artefactos relacionados ao problema que se busca resolver. Caso existam artefactos e classes de problemas relacionados ao problema que o investigador está tentando resolver, ele deverá observar se o(s) artefacto(s) encontrado(s) solucionam os problemas. Em caso positivo, ele continuará a investigação na hipótese de ainda haver alguma oportunidade de melhoria em relação ao(s) existente(s). Identificar artefactos existentes contribui para maior assertividade do investigador.

Proposição de artefactos para resolução do problema: de acordo com DRESCH et al. (2015), esta etapa tem o objectivo de visualizar artefactos que apresentem soluções para o problema em questão. Assim o investigador irá propor artefactos com base da realidade, no contexto de actuação, viabilidade e etc. Nesta etapa o investigador também analisa a situação actual do problema e as alternativas de soluções satisfatórias para o problema.

Projecto do artefacto: após a pesquisa por outros artefactos com o mesmo objectivo, o investigador tende a estar mais capacitado a propor um artefacto para com condições do problema identificado. As etapas de conceituação são importantes para garantir que o artefacto seja relevante para a classe de problemas. Dresch et al. (2015) comenta que os componentes, as relações internas de funcionamento, limites e relações com o ambiente externo também precisam ser consideradas. Ainda nesta etapa, o desempenho esperado do artefacto deve ser explicitado a fim de garantir uma solução satisfatória para o problema. O projecto deve conter também a descrição os procedimentos de construção e avaliação do artefacto.

Desenvolvimento do artefacto: na etapa de desenvolvimento do artefacto o objectivo é a sua materialização considerando as características internas e o contexto que ele estará inserido. Após o desenvolvimento espera-se duas saídas principais. A primeira é o artefacto em condições necessárias para uso que será avaliado em momento oportuno. A segunda saída é a heurística de construção do artefacto, formalizada por meio do desenvolvimento do artefacto. Na construção do artefacto, diversas abordagens podem ser utilizadas tais como maquetes, representações gráficas, protótipos e etc.

Avaliação do artefacto: segundo Dresch et al. (2015), os artefactos desenvolvidos a partir de uma DSR é a prova de que ele é válido. Isto por que a avaliação da utilidade e qualidade do artefacto é requisito de uma pesquisa baseada na DSR. As pesquisas em DSR devem não somente estar voltada ao desenvolvimento do artefacto, mas demonstrar evidências de que ele é válido. A avaliação é um componente fundamental no processo de pesquisa. A utilidade, qualidade e eficácia do artefacto devem ser avaliados e demonstrados de forma rigorosa por meio de métodos científicos.

Explicitação das aprendizagens e conclusão: tendo o artefacto alcançado os resultados esperados após a etapa de avaliação é muito importante que o investigador faça a explicitação das aprendizagens obtidas durante o processo da pesquisa evidenciando os pontos de sucesso e insucesso. O objectivo é garantir que a pesquisa gere conhecimento prático e teórico e possa servir de referência. Logo em seguida, deve-se formalizar a conclusão apresentando os resultados alcançados. Recomenda-se que o investigador apresente quais foram as limitações da pesquisa que podem inspirar outras pesquisas, inclusive do mesmo investigador, pois neste momento podem surgir novas ideias de problemas.

2.2. FASES DO PROJECTO

A metodologia de **Design Science Research (DSR)** foi adoptada neste projecto por sua ênfase na criação de artefactos tecnológicos que resolvam problemas reais e relevantes em contextos específicos. O DSR é apropriado quando se pretende desenvolver soluções na área da Engenharia, pois fornece etapas funcionais, que são rigorosamente avaliadas.

Além disso, o DSR exige que a construção do artefacto esteja fundamentada em conhecimento científico prévio, ao mesmo tempo em que contribui para esse conhecimento por meio da validação prática da solução. O SIG utilizado na pesquisa é construído sobre bases teóricas consolidadas, sendo validado por meio de sua aplicação na realidade geográfica da Mina de Luele.

O DSR se mostra eficiente para pesquisas onde a interacção entre teoria e prática é essencial para a solução de problemas complexos, como ocorre em projectos de engenharia aplicados à mineração. A proposta de gerar mapas georreferenciados como instrumento de apoio à decisão evidencia a pertinência da abordagem DSR neste estudo, ao unir rigor metodológico com relevância prática.

2.2.1. TÉCNICAS DE RECOLHA DE DADOS

As técnicas de recolha de dados iniciaram-se com a **pesquisa bibliográfica**, que permitiu levantar informações de trabalhos científicos, artigos, livros e documentos técnicos relacionados ao tema. Essa etapa forneceu a base conceitual e metodológica para compreender melhor os factores que influenciam o planeamento e traçado de vias e a aplicação de ferramentas SIG.

Em seguida, procedeu-se à **recolha de dados em campo e de gabinete**, incluindo mapas topográficos, cartas geológicas, dados altimétricos. Essa fase foi essencial para reunir dados geoespaciais, necessários para a construção da base de dados e para a parametrização do sistema.

Por fim, os dados recolhidos foram organizados e preparados para posterior integração no SIG. Esse processo garantiu que a modelação reflectisse de forma precisa as condições reais da área de estudo, permitindo análises consistentes e alinhadas com os objectivos da investigação.

2.2.2. ETAPAS DO DSR COM FOCO NO PROJECTO

Identificação do problema: O transporte da massa mineral na Mina de Luele enfrenta limitações operacionais significativas, resultantes do planeamento inadequado das vias de transporte interno. Grande parte dos traçados é definida de forma empírica, sem considerar de forma integrada factores como declividade, tipo de solo, litologia e drenagem, o que provoca aumento do consumo de combustível, desgaste prematuro dos equipamentos, riscos de acidentes e baixa eficiência no escoamento do minério.

Esses desafios são agravados pela falta de dados geográficos actualizados e organizados, e pela ausência de um sistema de apoio à decisão que integre e analise informações espaciais de forma automatizada. Diante desse cenário, torna-se necessária a implementação de um sistema que permita analisar e modelar o terreno, optimizando o planeamento e o traçado das vias com base em critérios técnicos e ambientais, promovendo maior eficiência, segurança e sustentabilidade nas operações mineiras.

Conscientização do problema: O projecto das vias de transporte em minas a céu aberto é frequentemente realizado de forma pouco estruturada, o que tem causado prejuízos operacionais, ambientais e logísticos significativos, mas ainda é tratada de forma pouco estruturada. A escolha dos percursos é muitas vezes feita sem apoio técnico detalhado, o que resulta em vias mal dimensionadas, aumento de custos, desgaste dos veículos e riscos à segurança. Diante disso, reconhece-se a necessidade de utilizar ferramentas como o SIG, que permitem analisar o relevo, o solo e outros factores críticos com base em dados geográficos actualizados, apoiando decisões mais precisas e eficientes no traçado das vias.

Revisão sistemática da literatura: A revisão sistemática da literatura nesta pesquisa foi conduzida com base em um protocolo definido, descrito no **Capítulo I – Fundamentação Teórica**, com o objectivo de garantir rigor, transparência e reduzir possíveis distorções. Esse processo permitiu identificar, analisar e seleccionar as publicações mais relevantes sobre o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e sobre a aplicação da metodologia Design Science Research (DSR) em projectos tecnológicos. A abordagem sistemática adoptada proporcionou uma visão crítica e abrangente do tema, servindo de base sólida para o desenvolvimento do artefacto proposto nesta investigação.

Identificação dos artefactos e configuração das classes de problemas: O artefacto central desenvolvido neste trabalho consiste na parametrização do SIG empresarial. O artefacto, portanto, funciona como uma ferramenta de apoio ao planeamento mineiro, promovendo maior eficiência, precisão e sustentabilidade no processo decisório.

Proposição de artefactos para resolução do problema: O artefacto proposto consiste num Sistema de Informação Geográfica funcional, desenvolvido sobre a plataforma QGIS integrada com base de dados PostGIS, parametrizado especificamente para o planeamento de vias de transporte da massa mineral na Mina de Luele. O artefacto permite visualizar claramente os actores envolvidos, os recursos necessários e as interacções entre os diferentes módulos do sistema, apoiando a tomada de decisão e facilitando a comunicação entre equipas multidisciplinares.

Projecto e desenvolvimento do artefacto: O artefacto foi projectado através da parametrização do SIG empresa, especificou-se a infra-estrutura tecnológica necessária, o modelo de dados, especificando as camadas vectoriais e raster, os atributos alfanuméricos, as relações topológicas e os metas dados necessários. O modelo foi construído considerando os requisitos funcionais identificados (recolha de dados, integração, análise espacial, geração de mapas) e os actores do sistema (utilizadores técnicos e tomadores de decisão).

Avaliação do artefacto: verificou-se que o sistema executa correctamente todas as funcionalidades previstas (importação de dados, análises espaciais, simulação de traçados, geração de mapas e relatórios). confirmou-se que o sistema é operável por técnicos com formação básica em SIG, que a interface é intuitiva e que a documentação é adequada. Os resultados da avaliação demonstram que o artefacto desenvolvido é tecnicamente válido, funcionalmente completo e operacionalmente eficaz.

Explicitação das aprendizagens e conclusão: O desenvolvimento do SIG proporcionou aprendizagens significativas em múltiplos domínios.

- **Do ponto de vista metodológico**, confirmou-se que a abordagem DSR é particularmente adequada para investigações aplicadas em engenharia, permitindo equilibrar rigor científico e relevância prática.
- **Do ponto de vista técnico**, constatou-se que plataformas de código aberto como QGIS e PostGIS oferecem funcionalidades robustas e adequadas ao contexto mineiro, representando alternativas viáveis a soluções comerciais de elevado custo.
- **Do ponto de vista operacional**, verificou-se que a integração de dados espaciais num único ambiente proporciona ganhos substanciais em eficiência, precisão e capacidade de análise.
- **Do ponto de vista prático**, identificaram-se desafios relacionados com a qualidade dos dados disponíveis, que podem ser superados em implementações futuras através de levantamentos topográficos de maior detalhe. O artefacto proposto provou ser uma solução replicável, podendo ser adaptado para outras minas ou mesmo para outros contextos de planeamento de infra-estrutura mineira, contribuindo assim tanto para o avanço académico quanto para a prática profissional na indústria extractiva.

CAPÍTULO III – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

A província da Lunda Sul, localizada no nordeste de Angola, é reconhecida como um dos principais polos de exploração diamantífera do país. Com sede em Saurimo, cidade de grande relevância económica e histórica, a província tem forte ligação com a actividade mineira, sendo a extracção de diamantes o principal motor da sua economia. A região apresenta um relevo suavemente ondulado, coberto por savanas e florestas abertas, além de uma rede hidrográfica densa, destacando-se os rios Chicapa, Luachimo, Luó, Lunhinga, Carambala, Cula e Camanguge, que exercem influência directa sobre o equilíbrio ambiental da zona de concessão.

É nesse contexto que se insere a Mina de Luele, localizada na bacia do rio Luele, a cerca de 35 km da cidade de Saurimo. Trata-se de um dos empreendimentos mais recentes e estratégicos do sector mineiro nacional, instalado em uma região de geologia rica em formações kimberlícticas e lateríticas, ideais para a extracção de diamantes. O clima predominante é subtropical húmido, com temperaturas que variam entre 22°C e 34°C, e índices elevados de precipitação pluviométrica, o que exige cuidados específicos no planeamento das vias de acesso, sobretudo no que diz respeito à drenagem superficial e estabilidade do solo.

O terreno onde se localiza a Mina de Luele apresenta declividade moderada, com altitudes entre 950 e 1.100 metros. O relevo suavemente ondulado facilita a mineração e o deslocamento de equipamentos pesados. O solo predominante é laterítico, com presença de áreas argilosas que exigem atenção em épocas de chuva, especialmente para manter a estabilidade das vias. A região também possui presença significativa de corpos d'água e áreas alagáveis, exigindo a integração de estudos de drenagem no planeamento das vias.

Figura 3.1 Mina de Luele, Google Satélite (Antiga divisão administrativa de Angola).



Fonte: Autora, QGIS – Google satélite, 2024.

Foi descoberta em Novembro de 2013, como resultado das pesquisas geológicas realizadas pela Sociedade Mineira de Catoca, a fim de fortalecer e aumentar a sua base de recursos minerais. No âmbito da determinação do potencial geológico-mineiro de Luele, concluídas as etapas iniciais do programa de prospecção geológica, definiu-se uma fase pré-operacional da mina que teve início em Janeiro de 2017 e prossegue até a data presente. Esta fase permitiu a preparação da mina para uma amostragem de grande volume o que possibilitou que se determinassem os principais técnicos-económicos do projecto.

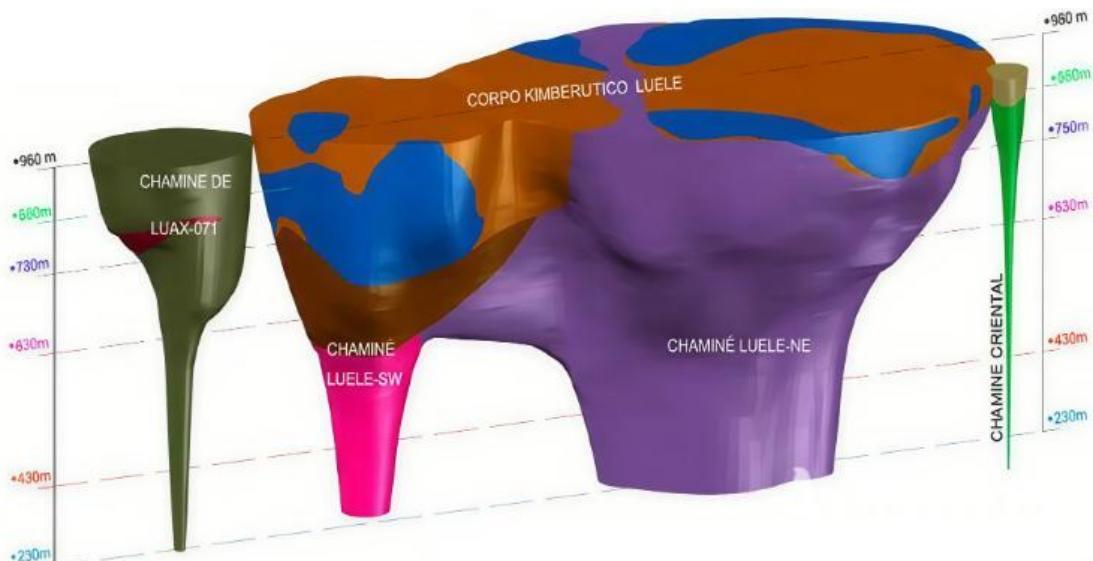
Dos resultados de prospecção obtidos até a data, se obteve os seguintes indicadores, um tempo estimado de exploração de aproximadamente 60 anos (2023 - 2083), com uma área total do corpo kimberlítico de 105 hectares. Estudos preliminares estimam uma reserva de minério de 647 milhões de toneladas e reservas de diamantes de 628 milhões de quilates.

Ao longo da sua operação até final 2024, já foram removidos 47,7 milhões de metros cúbicos de estéril, extração de minério 8,1 milhões de toneladas, e recuperação de 11,7 milhões de quilates.

Além da sua importância económica, a Mina do Luele terá um impacto social expressivo, gerando aproximadamente 2,4 mil postos de trabalho e impulsionando o desenvolvimento socioeconómico da região.

A chaminé kimberlítica do Luele é explorada a céu aberto, preconiza três etapas sequenciais de trabalho, designadamente: o desmonte, o carregamento e o transporte de massa mineira (minério e estéril). A actividade de exploração mineira em Luele decorre com base nos planos de longo, médio e curto prazo estabelecidos, respeitando as melhores práticas e regras da exploração mineira.

Figura 3.11 Modelo geológico 3D do depósito mineral de Luele.



Fonte: (LUELE)

O processo de carregamento e transporte da massa mineira na mina de Luele é cíclico e resulta da acção combinada da frota de equipamentos de carga (escavadoras e pás carregadeiras) conjuntamente com a frota de equipamentos de transporte, constituída por camiões rígidos de 100 toneladas.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO SIG

A via proposta tem como objectivo principal viabilizar o transporte da massa mineral extraída da frente de trabalho até a boca da mina. A definição do percurso optimizado será construída a partir de dados geoespaciais e parâmetros técnicos previamente analisados, garantindo que a via cumpra plenamente sua função dentro das condicionantes físicas e operacionais da Mina de Luele.

Iremos precisar de alguns mapas para obtermos informações necessárias para o traçado da via. Esses elementos serão fundamentais para identificar as regiões mais apropriadas para a passagem da via, minimizando o impacto ambiental, os custos de movimentação de terra e garantindo um traçado tecnicamente viável.

Para alcançar esse objectivo, torna-se necessário estruturar uma base de dados geográfica que centralize e organize a informação em diferentes formatos:

- Dados raster;
- Dados vectoriais;
- Dados alfanuméricos;

Essa base servirá como núcleo do SIG, permitindo a execução de análises espaciais, a parametrização dos critérios geométricos e a geração dos mapas temáticos de apoio à decisão. A modelação da base de dados será representada através de diagramas conceituais (como UML), que descrevem as relações entre as camadas e os atributos associados.

Assim, a implementação do SIG contempla duas etapas centrais:

- a) Preparação e organização dos dados geoespaciais;
- b) Modelação e parametrização da base de dados, de forma a suportar as análises necessárias para o traçado da via.

3.2.1. MÉTODO “AS IS” VS “TO BE”

A modelação “As Is – cenário actual” e “To Be – cenário futuro” é uma prática comum em processos de concepção e implementação de sistemas de informação, permitindo identificar limitações do modelo actual e projectar melhorias para o modelo futuro. Segundo Oliveira (2015), o modelo “As Is” representa o retracto do funcionamento real de uma organização ou sistema, incluindo as fragilidades e inconsistências que dificultam a tomada de decisão. Já o modelo “To Be” corresponde à visão desejada, na qual os processos são optimizados e sustentados por estruturas de dados mais consistentes e eficazes.

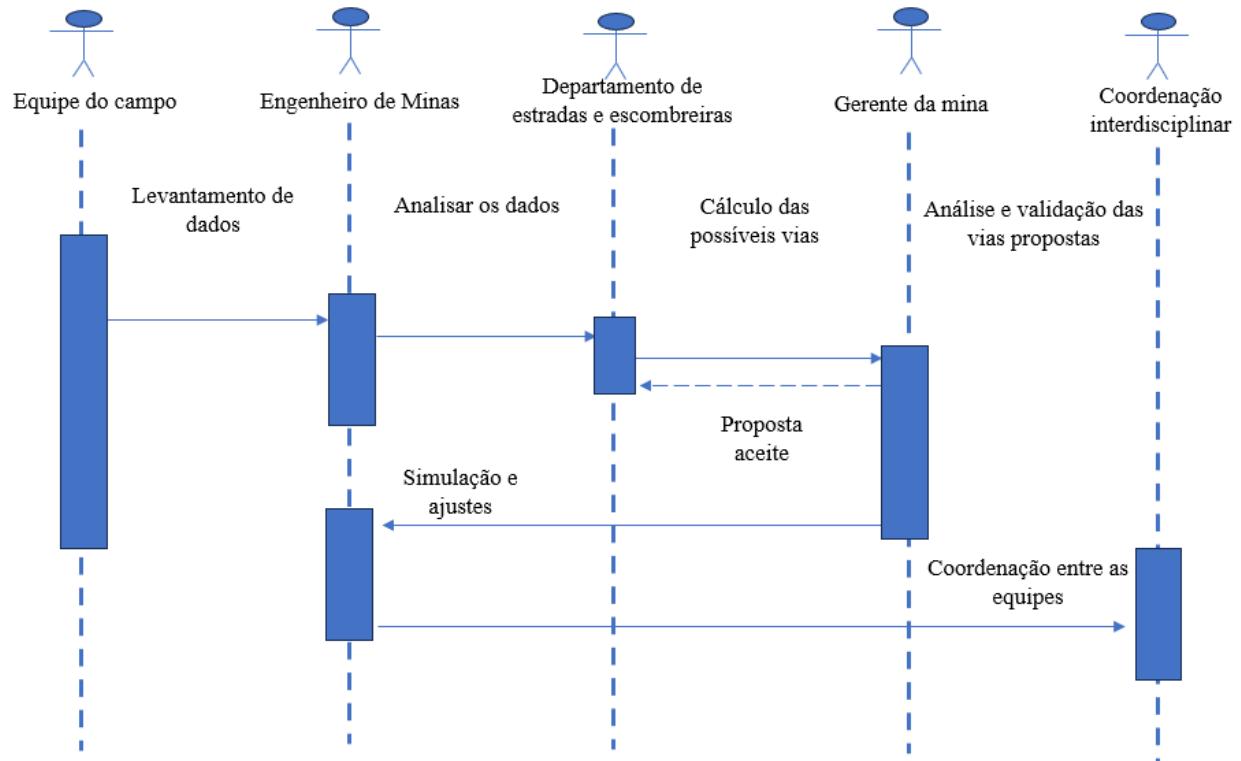
No presente trabalho, o modelo “As Is” descreve o planeamento e traçado de vias de forma manual e fragmentada. Esse método, embora viável, apresenta falhas significativas, como a dificuldade de actualização e maior susceptibilidade a erros humanos.

Tabela 3.1 As Is - Cenário Actual.

ID	ACTIVIDADE	ACTOR	RECURSO	DURAÇÃO	CUSTO (USD)
01	Levantamento de dados	Equipe de campo	Planilhas	5 semanas	35.000
02	Análise dos dados	Engenheiro de Minas	Mapas, calculadoras e planilhas	2 semanas	20.000
03	Cálculo das possíveis vias	Departamento de estradas e escombeiras	Mapas e calculadoras	1 semana	8.000
04	Análise e validação das vias propostas	Gerente da mina	Mapas e calculadoras	4 semanas	15.000
05	Simulação e ajustes	Engenheiro de Minas	Mapas e calculadoras	2 semanas	
06	Coordenação entre as equipes	Coordenação interdisciplinar	Relatórios e Mapas	2 semanas	10.000

Fonte: Autora (2025).

Figura 3.3 Diagrama de sequência UML - Processo “As Is”.



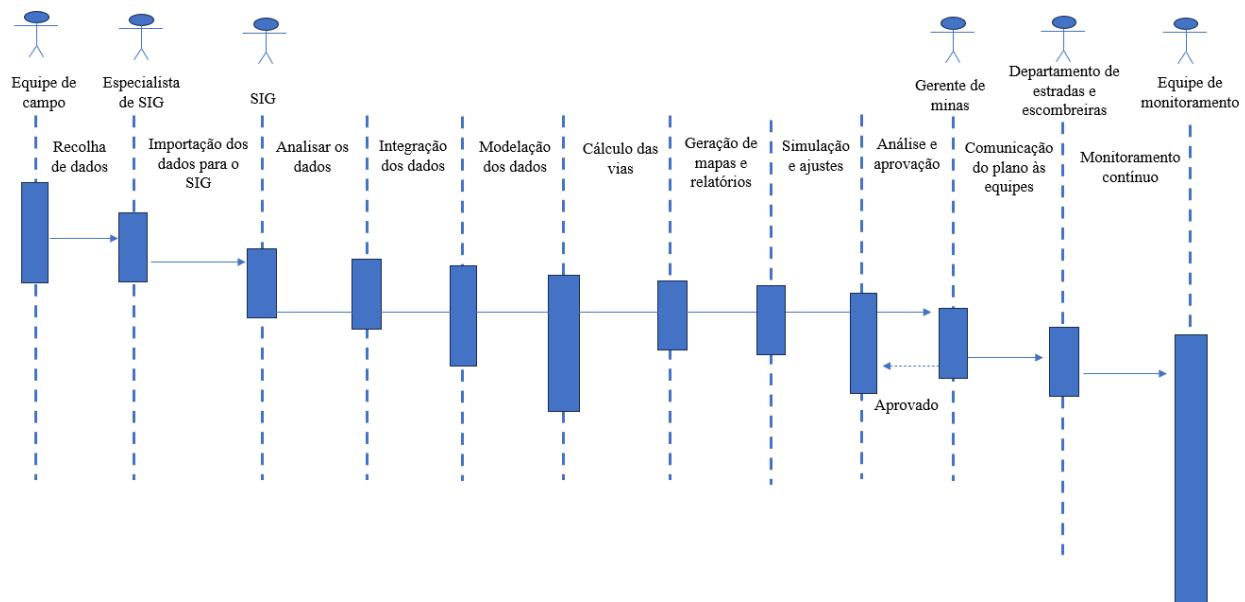
Fonte: Autora (2025).

Tabela 3.2 To be - Cenário Futuro.

ID	ACTIVIDADES	ACTOR	RECURSOS	DURAÇÃO	CUSTO (USD)
01	Recolha de dados	Equipe de campo	GPS	2 dias	1.000
02	Importação dos dados para o SIG	Especialista de SIG	PC e software	1 dia	500
03	Analizar os dados	SIG	PC, software e especialista de SIG	1 dia	500
04	Integração dos dados	SIG	PC, software e especialista de SIG	2 dias	1.000
05	Modelação dos dados	SIG	PC, software e especialista de SIG	3 dias	1.500
06	Cálculo das vias	SIG	PC, software e especialista de SIG	1 dia	500
07	Geração de mapas e relatórios	SIG	PC, software e especialista de SIG	1 dia	500
08	Simulação e ajustes	SIG	PC, software e especialista de SIG	2 dias	500
09	Análise e aprovação	Gerente da mina	PC, Modelação	1 dia	500
10	Comunicação do plano às equipes	Departamento de estradas e escombeiras	-----	1 dia	250
11	Monitoramento contínuo	Equipe de monitoramento	GPS, Sistemas de comunicação	contínuo	8.000/ano

Fonte: Autora (2025).

Figura 3.4 Diagrama de sequência UML - Processo “To Be”.



Fonte: Autora (2025).

Por sua vez, o modelo “To Be”, alcançado com a implementação do SIG, permite integrar dados espaciais e não espaciais em um único ambiente, gerar mapas temáticos e análises mais precisas, e optimizar a tomada de decisão no planeamento de vias. As tabelas acima demonstram essa diferença, representando como os processos deixam de ser manuais e isolados para se tornarem integrados, estruturados e automatizados. Como reforçam Laudon & Laudon (2016) sistemas de informação bem concebidos não apenas armazenam dados, mas ampliam a capacidade analítica e estratégica das organizações.

Como se observa na **Tabela 3.1**, o modelo “As Is” evidencia um processo caracterizado por maior tempo de execução, custos elevados e maior probabilidade de atrasos nas etapas de planeamento e manutenção das vias internas. A falta de integração entre os dados conduz à repetição de tarefas e reduz a precisão das análises. Em contrapartida, o modelo “To Be”, suportado pela implementação do SIG, torna o processo mais dinâmico e automatizado, permitindo actualizar, simular e monitorar continuamente o traçado e as condições das vias. Essa capacidade de análise em tempo real reduz custos operacionais, optimiza o tempo de ciclo dos camiões e proporciona uma resposta mais rápida às mudanças nas condições de extração — factores essenciais para garantir a produtividade e a sustentabilidade operacional da Mina de Luele.

3.2.2. PARAMETRIZAÇÃO DO SIG

A parametrização do SIG envolve a definição dos seus principais componentes — hardware, software, pessoas e dados —, que, de forma integrada, garantem a operacionalização do sistema. Essa etapa define como o SIG será configurado, quais ferramentas serão utilizadas e como os diferentes tipos de dados serão processados e analisados para apoiar o traçado optimizado da via.

Com base nas leituras e na análise desenvolvida, considero que a parametrização do Sistema de Informação Geográfica constitui uma etapa determinante para o sucesso da sua implementação no planeamento das vias de transporte da Mina de Luele. Esta fase define como o sistema será estruturado e adaptado à realidade operacional da mina, garantindo que os dados espaciais, as ferramentas e os utilizadores actuem de forma integrada e eficiente.

A definição adequada dos componentes de um SIG permite que o mesmo seja configurado de modo a responder às necessidades específicas do planeamento mineiro. Quando bem estruturada, ela transforma o sistema num verdadeiro instrumento de apoio à gestão operacional, promovendo eficiência, segurança e sustentabilidade no transporte da massa mineral.

A implementação de um SIG para optimizar o planeamento das vias de acesso para o de transporte da massa mineral requer o uso de diversas ferramentas e tecnologias especializadas, garantindo maior precisão e eficiência na tomada de decisões. Dentre as principais ferramentas utilizadas, destacam-se:

Tabela 3.3 Parametrização do SIG.

ID	Características		Função	Qtd.
1	Hardware	Computador portátil Dell Latitude (Intel Core i5, 8GB de memória RAM e SSD de 256GB)	Processamento de dados geoespaciais, execução do QGIS	1
2		GPS Garmin GPSMAP 66s	Colectar pontos georreferenciados no campo	1
3		Câmaras e ecrã de monitorização CCTV (Kit 4 Câmeras HD + DVR + monitor)	Monitorizar o tráfego e segurança nas vias simuladas	1
4	Dados	MDT (SRTM)	Modelo digital do terreno para análise de declividade	1
5		Base de dados PostGIS	Armazenar, organizar e relacionar os dados geográficos e alfanuméricos	1
6	Pessoas	Software QGis	Criação e análise de mapas geoespaciais	1
7		Engenheiro de Minas	Responsável técnico pelo projecto das vias e validação	1
8		Técnico de SIG/GIS	Operação e análise no QGIS, geração de mapas e simulações	1
9		Topógrafo	Colecta de dados com GPS, apoio ao levantamento de pontos	1
10		Supervisor de operação / transporte	Apoio na verificação dos trajectos existentes e validação dos resultados	1
11	Netware	Rede LAN	Permitir troca de dados entre utilizadores	1
	Procedi.	Plano de trabalho	colecta de dados, inserção no SIG, análise espacial, validação e geração de mapas	—

Fonte: Autora (2025).

A parametrização apresentada resume os principais componentes necessários à implementação do Sistema de Informação Geográfica proposto. A escolha de cada elemento justifica-se pela sua contribuição directa para o funcionamento e eficácia do sistema.

As **pessoas** envolvidas representam o elemento humano indispensável à operacionalização do sistema. A escolha dos intervenientes justifica-se pela necessidade de integrar competências distintas no processo. Essa composição assegura que o sistema represente a realidade operacional da mina.

Os **procedimentos** definem o plano de trabalho adoptado, assegurando que o SIG opere de acordo com os princípios técnicos e legais estabelecidos pelo Código Mineiro de Angola.

O componente **netware**, representado pela rede LAN, permitirá a partilha de dados entre os utilizadores e a actualização centralizada das informações, reforçando a segurança e a integridade do sistema.

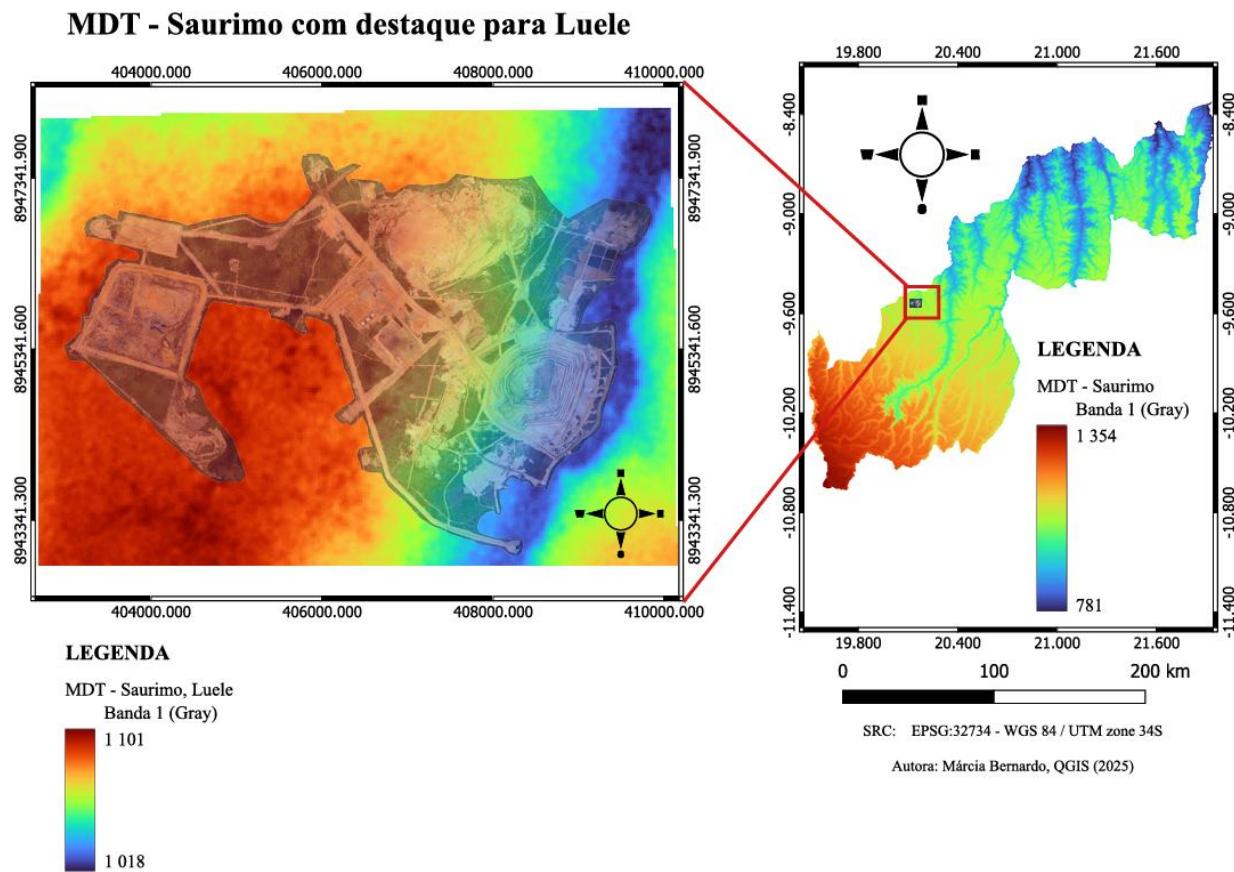
O **hardware** é responsável por suportar o processamento dos dados e a execução das análises espaciais. Esses equipamentos fornecem a infra-estrutura necessária para suportar as operações do SIG fornecendo equilíbrio entre desempenho, portabilidade e custo, atendendo às exigências técnicas do projecto sem exceder os recursos disponíveis.

O **software** seleccionado é o **QGIS**, uma plataforma open source (código aberto) amplamente utilizada em projectos de mineração. O QGIS permite a integração, análise e visualização de dados espaciais em diferentes formatos (raster e vectorial), além de oferecer ferramentas para análise de declividade, cálculo de distâncias e geração de vias optimizadas. A escolha do QGIS deve-se à sua compatibilidade com o banco de dados PostGIS, ao seu custo nulo de licenciamento e à ampla comunidade técnica que garante suporte e actualizações contínuas.

A escolha da **base de dados PostGIS** justifica-se pela sua capacidade de integrar e gerir eficientemente grandes volumes de dados espaciais e alfanuméricos de forma estruturada. Por ser uma extensão espacial do PostgreSQL, o PostGIS permite armazenar, consultar e cruzar informações geográficas com alto desempenho, mantendo a integridade e consistência dos dados. Além disso, é compatível com o QGIS, o que possibilita uma comunicação directa entre o software de análise e a base de dados, sem necessidade de conversões manuais.

Para dar suporte à análise espacial, foram considerados diversos mapas temáticos. Cada mapa contribui com uma perspectiva distinta sobre o terreno, permitindo ao SIG integrar e sobrepor as informações para identificar o traçado mais adequado. Essa integração elimina o isolamento entre os dados e transforma o processo de planeamento de vias numa abordagem dinâmica, precisa e orientada por critérios técnicos. A seguir, apresentam-se os mapas utilizados.

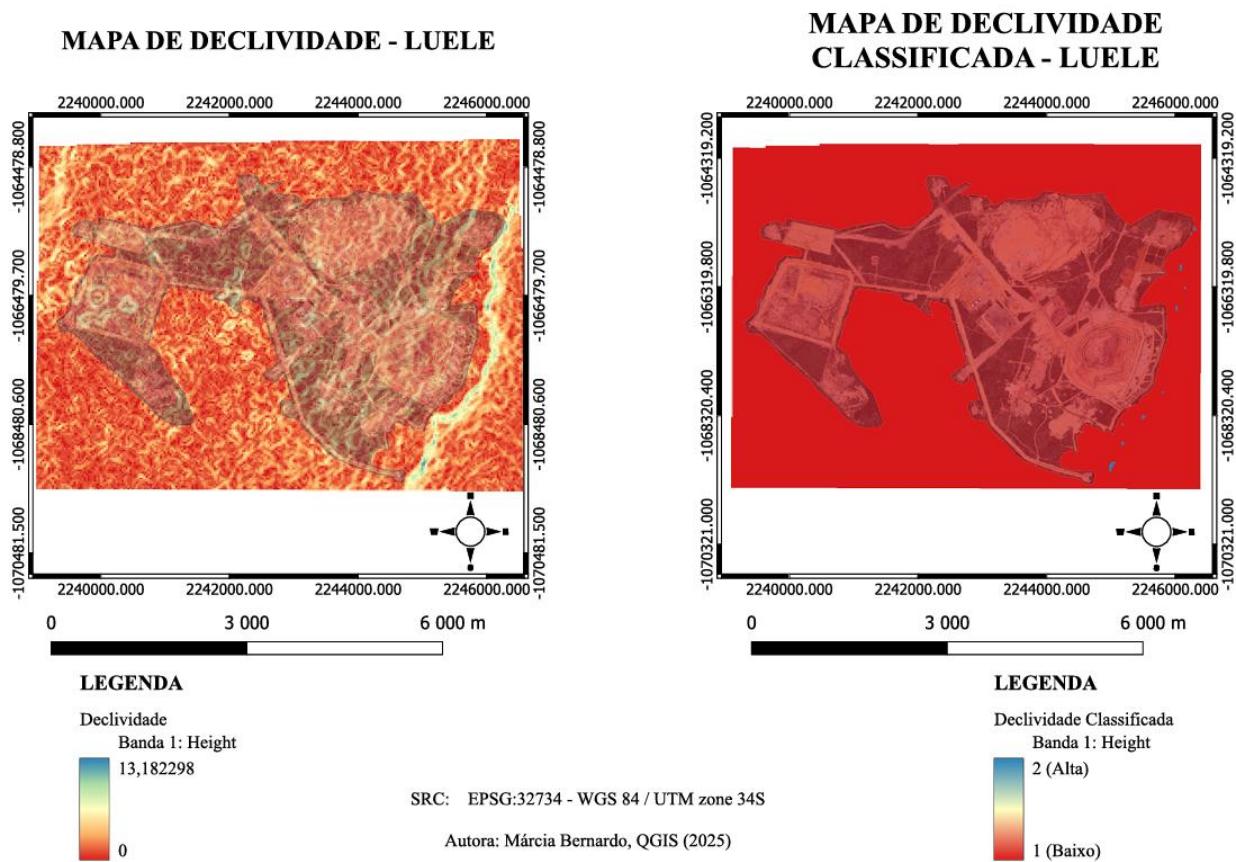
Figura 3.5 MDT Saurimo, com foco em Luele.



Fonte: Autora, QGIS (2025).

O MDT mostra com maior detalhe a morfologia de Luele evidenciando as variações altimétricas que influenciam directamente o planeamento das vias da mina. Essa característica topográfica da Luele é favorável para o traçado de vias de transporte, pois reduz a necessidade de movimentação excessiva de material e minimiza o risco de instabilidade nas encostas.

Figura 3.6 Mapa de Declividade (esquerda) e Declividade classificada (direita), Luele.

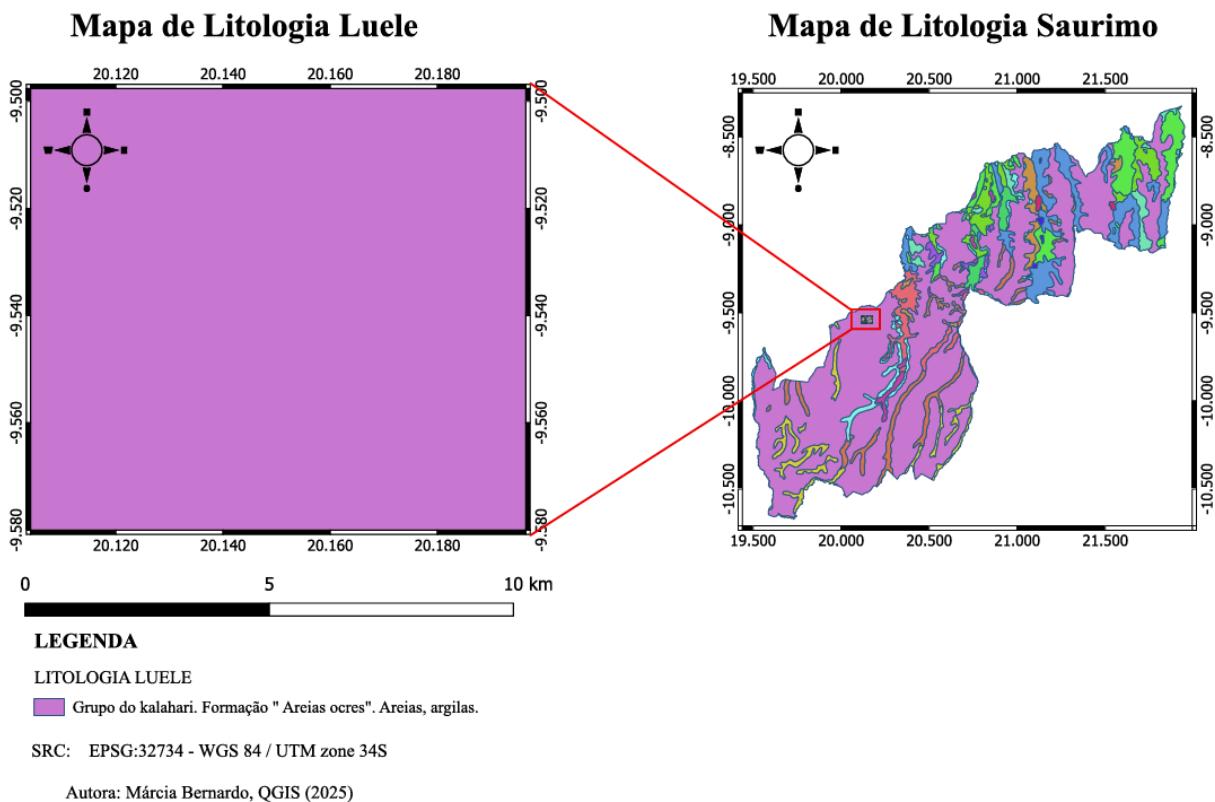


Fonte: Autora, QGIS (2025).

O mapa de declividade, derivado do MDT, mostra com precisão a variação do relevo na área da Mina de Luele, onde os valores de inclinação oscilam entre **0°** e **13,18°**. Essa variação relativamente baixa indica um terreno predominantemente plano a suavemente ondulado, o que favorece a circulação e manutenção das vias de transporte. O mapa classificado, apresenta duas faixas, o que confirma a estabilidade topográfica da região. As áreas de baixa declividade (<5°) foram identificadas como ideais para o traçado das vias principais, enquanto as de declividade moderada (5°–13°) requerem apenas pequenas correções de nivelamento. Essa informação é crucial para o planeamento geométrico, reduzindo custos de terraplenagem e assegurando maior eficiência operacional no transporte da massa mineral.

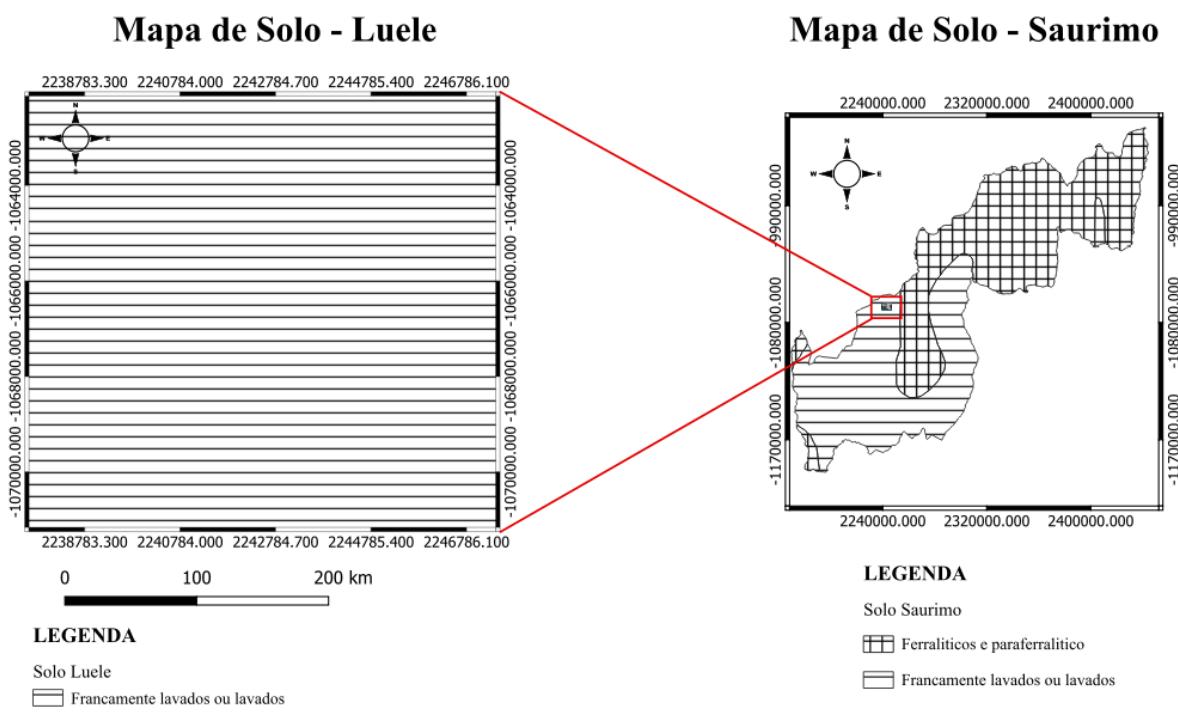
Já o mapa de litologia mostra que a área pertence ao Grupo do Kalahari, com formações de areias ocres, areias e argilas, materiais de baixa resistência mecânica e elevada desintegração. Essa litologia indica necessidade de controle geotécnico rigoroso no planeamento das vias, especialmente nas zonas de tráfego intenso, a fim de evitar deformações e garantir a durabilidade das infra-estruturas.

Figura 3.7 Mapa de Litologia da área de estudo.



Fonte: Autora, QGIS (2025).

Figura 3.8 Mapa de Solo Saurimo, Luele.



Fonte: Autora, QGIS (2025).

O mapa de solos da Mina de Luele evidenciou o predomínio de solos francamente lavados, caracterizados por baixo teor de argila e alta permeabilidade, o que os torna pouco coesos e susceptíveis à erosão em períodos de chuva. Essa condição exige reforço na compactação e drenagem das vias para garantir estabilidade estrutural.

3.3. VALIDAÇÃO DO ARTEFACTO

De acordo com a metodologia **Design Science Research (DSR)** adoptada neste trabalho, após a concepção e parametrização do artefacto — neste caso, o Sistema de Informação Geográfica (SIG) — torna-se necessário proceder à sua **validação prática**. Esta etapa tem como objectivo verificar se o sistema desenvolvido é capaz de responder ao problema identificado, ou seja, auxiliar de forma eficiente no traçado da via para o transporte da massa mineral.

Antes da fase de validação, é necessário definir e calcular os parâmetros técnicos que servirão de base para o funcionamento do artefacto. Os parâmetros geométricos, estruturais e de drenagem influenciam directamente o traçado. Após a sua definição e inserção no SIG, procede-se à fase de validação, onde o artefacto é testado através da análise comparativa das três vias propostas. A seguir, apresentam-se os parâmetros:

a. Parâmetros geométricos

Estes parâmetros são fundamentais para garantir a segurança, eficiência e durabilidade do trajecto destinado ao transporte da massa mineral, especialmente considerando as dimensões e capacidades operacionais dos camiões **Caterpillar 777D** utilizados na mina de Luele. Assim, nesta etapa, procede-se à definição e análise dos principais parâmetros geométricos com base nas normas de projecto de vias mineiras e nas condições topográficas obtidas pelos mapas do SIG. Essa abordagem permite ajustar o traçado optimizado às exigências técnicas de circulação dos veículos, assegurando um planeamento mais realista e funcional.

Após a análise das alternativas técnicas para o traçado da via de acesso — como vias separadas para camiões carregados e vazios, percursos distintos por sentido, ou via dupla com percurso compartilhado — foi adoptado o uso de uma via de mão dupla com percurso compartilhado, a largura da via deve permitir a circulação simultânea de veículos nos dois sentidos, com margem de segurança lateral adequada. Para vias deste tipo, a prática operacional em mineração a céu aberto recomenda que a largura mínima da estrada seja de, no mínimo, **três vezes a largura do maior equipamento em operação**.

Complementarmente, será utilizado neste estudo o método de cálculo proposto por Tannant & Regensburg (2001), que estabelece a seguinte fórmula para a estimativa da largura mínima da via:

$$L_{min} = (1,5 * V + 0,5) * X$$

Onde:

Lmin= largura mínima da estrada (m);

V = número de vias = 2

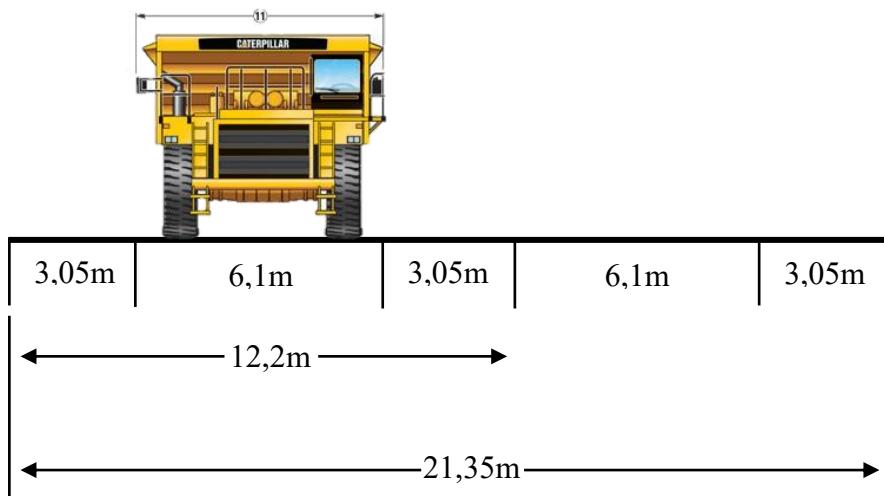
X = largura do veículo (m) = 20 ft → 6,1 m

$$L_{min} = (1,5 * 2 + 0,5) * 6,1 \text{ m}$$

$$L_{min} = 3,5 * 6,1$$

$$L_{min} = 21,35 \text{ m}$$

Figura 3.9 Representação esquemática de largura de estrada e número de vias, considerando especificações do Caterpillar 777D.



Fonte: Autora (2025).

A **inclinação** adoptada para o traçado das vias internas foi de 6%, valor definido com base na literatura técnica e nas características operacionais do camião Caterpillar 777D. De acordo com Kaufman & Ault (1977), a inclinação máxima recomendada para estradas de mina é de 10%, sendo que valores superiores a 8% devem ser evitados por comprometerem a segurança e o desempenho do equipamento. Assim, a escolha de 6% representa uma solução optimizada, pois favorece a durabilidade da via, reduzindo o desgaste prematuro da superfície e o consumo de combustível em trechos ascendentes.

Considerando que a velocidade máxima do camião Caterpillar 777D e que o clima da Mina de Luele é subtropical húmido, com alta frequência de chuvas e solos de baixa drenagem natural, adoptou-se uma **superelevação** de 4%. Esse valor está dentro do intervalo recomendado (3–4%) para estradas mineiras, conforme a literatura técnica. A escolha de 4% justifica-se pela necessidade de reduzir o risco de derrapagem em curvas, melhorar a estabilidade lateral dos camiões e minimizar o desgaste tanto dos pneus quanto da superfície da via.

Para efeito de dimensionamento geométrico e análise de segurança do traçado, adoptou-se uma velocidade de projecto de 35 km/h para os camiões Caterpillar 777D, com superelevação máxima de 4% (0,04 m/m). Em ausência de ensaios locais de atrito, considerou-se uma faixa conservadora de coeficiente de atrito ($f_{max} = 0,25–0,35$) para análise de sensibilidade. Aplicando a expressão:

$$R_{min} = \frac{V_0^2}{127(e_{max} + f_{max})}$$

$$R_{min} = \frac{(35)^2}{127(0,04 + 0,35)} \times m$$

$$R_{min} = 24,73 \text{ m} \approx 25 \text{ m}$$

O valor obtido para o raio mínimo de curvatura foi de aproximadamente 25 metros. Esse resultado representa o menor raio possível que pode ser adoptado no traçado da via sem comprometer a estabilidade e a segurança dos camiões Caterpillar 777D durante o transporte da massa mineral.

Um raio de curvatura igual a 25 metros indica que as curvas projectadas com valores inferiores a este podem gerar esforços laterais excessivos, aumentando o risco de derrapagem, capotamento ou desgaste prematuro dos pneus, principalmente sob condições de chuva e piso escorregadio.

A **distância segura de parada** é um dos parâmetros geométricos essenciais no planeamento de vias de transporte em mina, pois garante que os camiões tenham espaço suficiente para imobilizar-se totalmente em situações de emergência, evitando colisões e acidentes durante as operações. Esse parâmetro depende directamente da velocidade operacional adoptada, das condições da rampa (declividade), do tipo de solo e do coeficiente de atrito entre os pneus e a superfície

da

via.

Assim, foi realizado o cálculo da distância segura de parada:

Dados

$$V_o = 35 \text{ Km/h} = 9,72 \text{ m/s}$$

$$t = 2,75 \text{ s} \text{ (Tabela 1.3)}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$f = 0,35$$

$$\theta = 6\% = 0,06$$

Fórmula

$$D_P = \frac{1}{2}gt^2\sin\theta + V_o t + \left[\frac{(gtsin\theta + V_o)^2}{2g(f - \sin\theta)} \right]$$

$$D_P = \frac{1}{2}9,8 \times (2,75)^2 \sin(\tan^{-1} 0,06) + 9,72 \times 2,75 + \left[\frac{(9,8 \times 2,75 \times \sin(\tan^{-1}(0,06)) + 9,72)^2}{2 \times 9,8(0,35 - \sin(\tan^{-1}(0,06)))} \right]$$

$$D_P = (2,22 + 26,73 + 22,60) \text{m}$$

$$\mathbf{D_P = 51,55 \text{ m} \approx 52 \text{ m}}$$

O cálculo resultou numa distância segura de parada de aproximadamente 52 metros, o que indica o espaço mínimo necessário para que o camião Caterpillar 777D, em deslocamento a 35 km/h numa rampa de 6%, consiga parar completamente sem risco de derrapagem. A adopção dessa distância assegura que, mesmo em condições adversas de chuva ou carga parcial, o veículo mantenha uma margem adequada de segurança. Além disso, demonstra que o planeamento da via proposto contempla parâmetros compatíveis com as boas práticas de engenharia mineira, priorizando a estabilidade operacional e a integridade dos operadores e equipamentos.

De acordo com a literatura técnica, em vias de transporte mineiro, a distância de visibilidade deve permitir que o operador consiga deter completamente o camião antes de qualquer obstáculo visível à frente. Por isso, a distância de visibilidade e a distância de parada são, em muitos casos, consideradas equivalentes, especialmente em trechos rectos e com boas condições de aderência. Assim, o traçado proposto neste projecto adopta o princípio de que a distância de visibilidade mínima é igual à distância de parada calculada, garantindo que, em qualquer condição operacional, o veículo possa parar em segurança dentro do campo de visão disponível.

O dimensionamento das bermas deve respeitar a relação empírica de **2/3 do diâmetro do pneu** do veículo mais largo que circula na via. Considerando que o **Caterpillar 777D** possui pneus com diâmetro de **49 polegadas (1,24 m)**, a altura da berma é de aproximadamente **0,83 m**. Esse valor assegura que, mesmo em situações de travagem brusca ou perda de controlo, a berma ofereça resistência suficiente para evitar a transposição do bordo da via. Além da altura, a largura da berma será de **1,5m**. Considerando a composição geológica da mina de Luele, propõe-se o aproveitamento de resíduos, para a construção das bermas de segurança ao longo da via. Esses materiais, quando devidamente compactados, oferecem contenção lateral eficaz e contribuem para a sustentabilidade do projecto.

b. Parâmetros de drenagem

Diante da predominância de solos francamente lavados ou lavados na mina de Luele, com baixo teor de argila e alta permeabilidade, optou-se pela adopção de elementos de drenagem que melhor se adequam às condições locais: as valetas de protecção de corte e aterro e as dissipadoras de energia. As valetas serão posicionadas ao longo dos trechos escavados e de aterro para conduzir o escoamento superficial, evitando que a água da chuva provoque erosão nas margens da via. Já as dissipadoras de energia serão aplicadas em zonas de maior declividade, onde há maior velocidade de descida da água, reduzindo seu impacto erosivo sobre o solo pouco coeso. A escolha desses elementos foi orientada por critérios de funcionalidade, simplicidade construtiva e compatibilidade com os materiais disponíveis no local, reforçando a segurança da via e a durabilidade da infra-estrutura.

c. Parâmetros estruturais

Para garantir a durabilidade e segurança da via proposta para o transporte da massa mineral na mina de Luele, foi definida uma estrutura em camadas compatível com o tipo de solo local e com o tráfego de camiões pesados. A composição considera materiais disponíveis na região e práticas recomendadas para vias não pavimentadas em ambiente mineiro.

Tabela 3.4 Especificações dos parâmetros estruturais para a Mina de Luele.

Camada	Descrição	Espessura (m)	Justificativa
Revestimento	Brita graduada (mistura de brita de diferentes granulometrias, bem compactada)	0,20	Proporciona resistência superficial ao tráfego intenso e reduz erosão.
Base	Mistura de brita com solo arenoso estabilizado	0,40	Distribui as cargas dos camiões e melhora a capacidade de suporte.
Sub – base	Solo arenoso local compactado com adição de cascalho	0,30	Favorece a drenagem interna e reduz a deformação da estrutura
Subleito	Solo natural da Formação Kalahari, previamente estabilizado e compactado	0,30	Aproveita o solo existente

Fonte: Autora (2025).

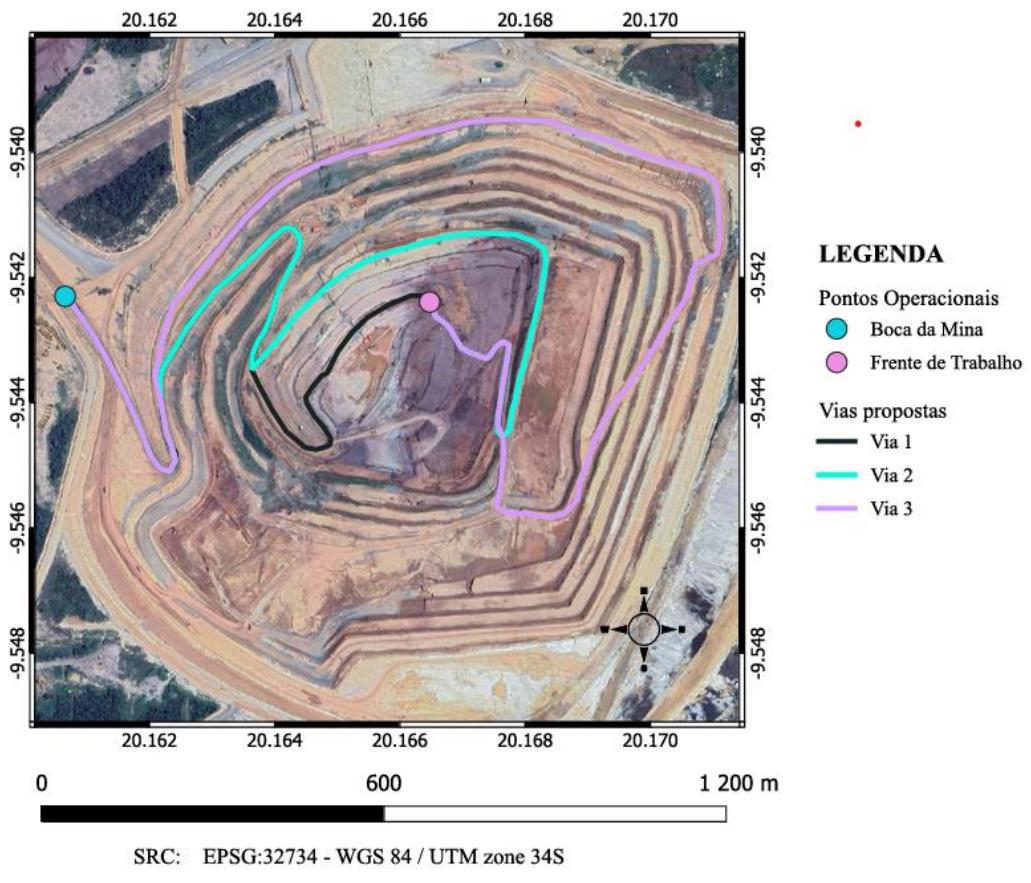
Com base nos parâmetros geométricos calculados, procedeu-se ao traçado de três vias alternativas no QGIS. O processo envolveu a importação dos mapas temáticos (MDT, declividade, litologia e solos), a digitalização manual dos trajectos respeitando os parâmetros técnicos estabelecidos: largura mínima de 21,35 m (verificada através de buffer), raio mínimo de curvatura de 25 m (controlado durante digitalização), Inclinação máxima de 6% (verificada por sobreposição com mapa de declividade). Todas as vias propostas cumprem os requisitos geométricos calculados, conforme se pode observar na Figura 3.10. A validação da conformidade foi efectuada através das ferramentas analíticas do QGIS, confirmando a viabilidade técnica das três alternativas para a circulação de camiões fora-de-estrada.

Essas vias foram geradas e analisadas com base nos critérios definidos no SIG, considerando parâmetros como declividade, distância e acessibilidade. A comparação entre as vias propostas permitirá avaliar o desempenho do sistema, demonstrando na prática a sua aplicabilidade e a sua contribuição para a eficiência e segurança das operações mineiras. Cada via foi avaliada de forma a permitir identificar aquela que apresenta o melhor equilíbrio.

Esta análise justifica-se porque, embora tecnicamente viáveis, as vias apresentam características distintas que influenciam directamente os custos de construção, manutenção e operação ao longo de toda a vida útil da mina. A capacidade do SIG de integrar e comparar esses múltiplos factores constitui uma das suas principais vantagens sobre os métodos tradicionais de planeamento.

Figura 3.10 Mapa de traçado das vias - Saurimo, Luele.

Mapa de traçado das vias - Saurimo, Luele



Fonte: Autora, QGIS (2025).

O objectivo deste mapa é visualizar e comparar possíveis percursos para o transporte da massa mineral, considerando os parâmetros técnicos geométricos e topográficos da Mina de Luele. Cada traçado representa uma simulação preliminar, permitindo observar o comportamento das vias em relação ao relevo e às características do terreno.

Tabela 3.5 Análise comparativa das vias propostas para o transporte da massa mineral.

Critérios	V ₁	V ₂	V ₃	Via Optimizada
Comprimento (m)	1790,241	2494,761	3051,566	V ₁
Sinuosidade	2,800	3,902	4,77	V ₁
Declividade média (°)	2,469	2,055	2,143	V ₂
Desvio padrão (°)	0,993	1,061	1,095	V ₁

Fonte: Autora, QGIS (2025).

O comprimento da via impacta directamente:

- **Custos de construção:** quanto maior o comprimento, maiores os volumes de terraplenagem, materiais de pavimentação e elementos de drenagem (valetas, dissipadores).
- **Custos operacionais:** maior distância implica maior consumo de combustível, maior desgaste de pneus e maior tempo de ciclo dos camiões.
- **Custos de manutenção:** vias mais longas exigem maior frequência de intervenções e maior quantidade de materiais para reparos.

A sinuosidade mede o grau de tortuosidade do traçado (razão entre comprimento da via e distância em linha recta). Valores mais baixos indicam traçados mais directos. Impactos:

- **Segurança:** traçados sinuosos aumentam o risco de acidentes, especialmente em condições de baixa visibilidade ou piso molhado.
- **Desgaste de equipamentos:** curvas excessivas causam maior desgaste lateral dos pneus e maior consumo de combustível devido a frenagens e acelerações frequentes.
- **Velocidade média:** sinuosidade elevada reduz a velocidade operacional, aumentando o tempo de ciclo.

A declividade média influencia:

- **Consumo de combustível:** trechos ascendentes aumentam significativamente o consumo;
- **Velocidade operacional:** declives acentuados reduzem a velocidade dos camiões carregados subindo a rampa.
- **Vida útil de componentes mecânicos:** maiores exigências de torque e travagem aceleram o desgaste de transmissão e freios.

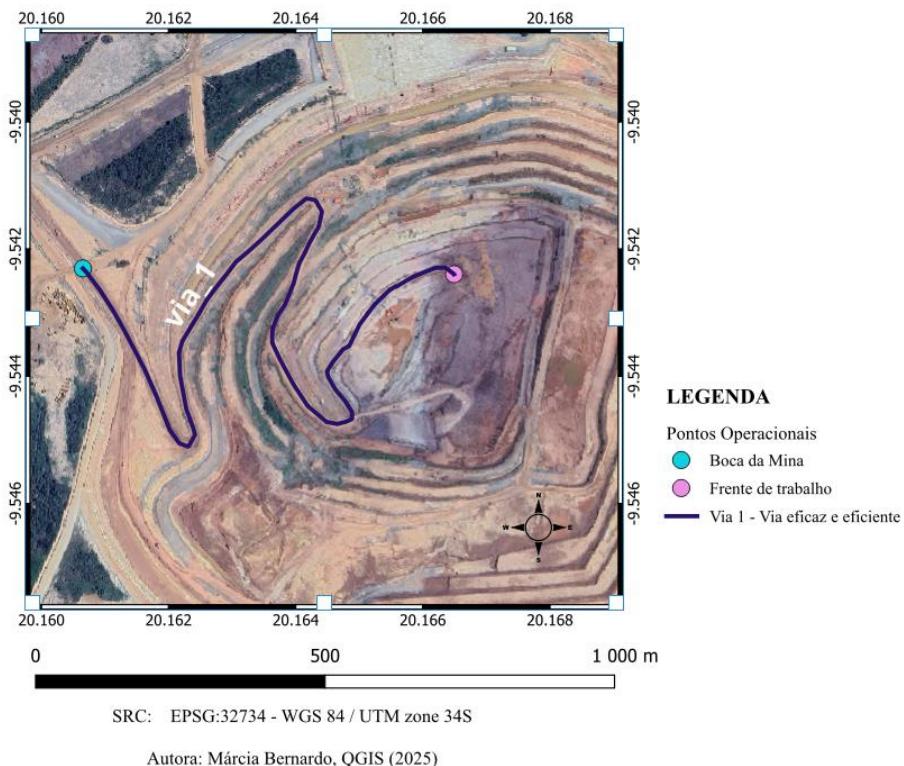
O desvio padrão mede a variabilidade das inclinações ao longo da via. Valores baixos indicam perfil mais uniforme. Impactos:

- **Previsibilidade operacional:** perfil uniforme permite aos operadores manterem velocidade mais constante, optimizando consumo de combustível.
- **Conforto e segurança:** mudanças bruscas de inclinação aumentam o risco de instabilidade da carga e fadiga do operador.
- **Manutenção:** trechos com grande variação de declividade são mais susceptíveis a problemas de drenagem e erosão.

Com base nos resultados obtidos, a **Via 1** revelou-se a mais eficiente para as operações de transporte. Este trajecto apresenta menor comprimento, maior traçado recto, declividade média reduzida e menor variação altimétrica, configurando-se, assim, como a via para a circulação dos camiões de transporte da massa mineral entre a frente de trabalho e a boca da mina de Luele. Com base nos resultados obtidos pelo QGIS, torna-se essencial detalhar os parâmetros que sustentam a escolha da via, assegurando compatibilidade com as condições do terreno e os requisitos operacionais.

Figura 3.11 Via eficaz e eficiente.

Mapa de traçado das vias - Saurimo, Luele



Fonte: Autora, QGIS (2025).

A definição da via optimizada apresentada, teve como principal finalidade demonstrar, de forma prática, o potencial do Sistema de Informação Geográfica (SIG) como ferramenta de apoio ao traçado de vias em ambiente mineiro. A proposta de traçado foi construída com base em critérios técnicos e operacionais, integrando parâmetros geométricos, estruturais e de drenagem, sempre considerando as condições da mina de Luele e permitiu evidenciar as vantagens do SIG em termos de precisão, eficiência e integração de informações.

Assim, a proposta de implementação do SIG não apenas identifica qual via é tecnicamente viável, mas fornece a base analítica para determinar qual via é operacionalmente mais eficiente e economicamente mais vantajosa, transformando o processo de planejamento de vias de uma actividade predominantemente empírica em uma prática baseada em evidências quantitativas.

No entanto, para avaliar de forma completa o valor do artefacto desenvolvido, torna-se necessário não apenas demonstrar que ele funciona (validação técnica), mas também evidenciar que ele representa uma melhoria significativa em relação ao processo anteriormente utilizado. A tabela abaixo sintetiza esta comparação, evidenciando as diferenças fundamentais entre os dois paradigmas de trabalho.

Tabela 3.6 Comparação entre os métodos "As is" e "To be".

Critérios	Método “AS IS”	Método “TO BE”
Ferramentas usadas	Equipamentos manuais e softwares isolados	Softwares integrados (QGIS)
Precisão/Confiabilidade	Baixa. Dados e informações de vários tipos e fontes.	Alta. Dados e informações integradas e de fácil actualização.
Custo total	88.000 USD	14.750 USD
Tempo total de execução	16 Semanas	2 Semanas
Capacidade de simulação/Visualização	Limitada	Ampla. Visualização 3D e tempo real

Fonte: Autora (2025).

A transição do método tradicional para o método baseado em SIG demonstra redução expressiva de custos e prazos, além de uma melhoria significativa na confiabilidade dos resultados. Enquanto o método **As is** depende fortemente de medições manuais, interpretações subjectivas e comunicação “fragmentada” entre sectores, o método **To be** centraliza todo o processo num ambiente integrado de geoinformação, com dados precisos e facilmente actualizáveis.

O método **To be** representa, portanto, uma abordagem aprimorada do processo de planeamento de vias mineiras, alinhando-se aos princípios de eficiência operacional, segurança e sustentabilidade — essenciais para a gestão optimizada de minas a céu aberto como Luele.

Importa salientar que o SIG proposto neste estudo enquadra-se na categoria de **SIG empresa**, ou seja, trata-se de um sistema concebido para ser permanente e integrado à estrutura organizacional da mina, permanecendo em funcionamento durante todo o ciclo de vida operacional da empresa. Este tipo de SIG difere do **SIG de projecto**, que é geralmente implementado de forma temporária e restrita à duração de um estudo ou empreendimento específico.

CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu demonstrar como a integração de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode optimizar o projecto e o traçado da via para o transporte da massa mineral de na mina de Luele. Através da revisão da literatura, foram identificadas as melhores práticas aplicadas em projectos mineiros, reforçando a importância da análise espacial e da modelação digital na tomada de decisões estratégicas.

A modelação do processo de monitorização dos camiões evidenciou as limitações do método tradicional — caracterizado por procedimentos manuais, custos elevados e maior probabilidade de erro — em contraste com o modelo proposto, que se apoia em tecnologias geoespaciais e análise automatizada de dados.

Foram igualmente identificados os requisitos funcionais e técnicos necessários à implementação de um sistema de informação integrado, contemplando componentes de hardware, software, base de dados, dados geoespaciais e recursos humanos especializados. Esse levantamento serviu de base para o **desenvolvimento do protótipo do SIG Empresa**, concebido para operar de forma contínua durante todo o ciclo de vida da mina e apoiar o processo de decisão em tempo real.

O artefacto desenvolvido atende plenamente aos requisitos identificados na fase de conscientização do problema, oferecendo uma solução integrada, automatizada e baseada em critérios técnicos objectivos.

Conclui-se, portanto, que a adopção de um SIG Empresa não apenas melhora a precisão e a eficiência do traçado de vias, como também promove uma gestão mais sustentável e económica da operação mineira, assegurando maior segurança, rastreabilidade e capacidade de adaptação tecnológica ao longo do tempo.

RECOMENDAÇÃO

Para a empresa em estudo e, por extensão, para outras empresas mineiras, recomenda-se a implementação do Sistema de Informação Geográfica (SIG) proposto, por este permitir maior precisão no traçado das vias de transporte, optimização de recursos e melhoria na tomada de decisão. A adopção do SIG possibilitará integrar dados topográficos, operacionais e ambientais num único ambiente, facilitando o controlo das condições das vias, reduzindo custos operacionais e aumentando a eficiência e segurança das operações mineiras.

Para futuros estudantes, recomenda-se a continuidade deste estudo através da inclusão de aspectos não abordados na presente investigação, como o dimensionamento da frota, a análise de custos operacionais e a avaliação geotécnica das vias propostas. A inclusão dessas variáveis possibilitará compreender melhor o impacto financeiro e estrutural das vias, contribuindo para uma gestão mais eficiente e sustentável das operações de transporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTAS et. al., P. M. (2010). *Estradas: projeto geométrico e de terraplenagem*. Rio de Janeiro: Interciênciа.
- BARROS, J. (Editado: 01 de Janeiro de 2025). *O que são os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e quais suas aplicações*. Obtido de Geo Aplicada:<https://www.youtube.com/watch?v=KWGrPNqz4uc&list=RDYqJ09Flxt1M&index=27>
- BOSSLER, R. (2016). *QGIS do ABC ao XYZ*. Íthala.
- CÂMARA, G., & DAVIS, C. (2001). *Conceitos básicos em ciência da geoinformação*. São Paulo: In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds e orgs). *Introdução à ciência da geoinformação*. INPE.
- CATERPILLAR. (2010). Peoria, Illinois, U.S.A: Performance handbook. Caterpillar Inc. Edition 40.
- CATERPILLAR. (2023). *Cat Product Brochure – Off-Highway Truck 777*. Obtido de <http://www.cat.com/>
- CAVALCANTE, R. (2015). *Apostila de Introdução ao SIG*. Minas Gerais: Pró-Reitoria de Planejamento e Desenvolvimento I UFMG .
- COSME, A. (2012). *Projeto em Sistemas de Informação Geográfica*. LIDEL. Lisboa: Edições Técnicas.
- COUNCIL, C. C. (20 de Julho de 2013). “*Strip Mining*” (*Lavra em Tiras*). Obtido de CITIZENS COAL COUNCIL : <http://www.citizenscoalcouncil.org/>
- COUTO, R. T. (1990). *Lavras a céu aberto e equipamentos principais* . instituto nacional de investigação científica - Faculdade de engenharia da universidade do porto.
- CUMMINS, A., & GIVEN, I. (1973). *Mining Engineers'Handbook. Society of Mining Engineers - SME* (Vol. Vols. 1 e 2). New York.
- CURI, A. (2014). *Minas a céu aberto: planejamento de lavras*. Brasil: Oficina de textos.
- CURI, A. (2017). *Lavra de Minas*. São Paulo: Oficina Textos.
- DRESCH, A., LACERDA, D. P., & JUNIOR, J. A. (2015). *Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. Bookman Editora.
- EASTMAN, J. R. (1998). *IDRISI for Windows: manual do usuário. Introdução e exercícios resolvidos*. Editores da versão em português, Heinrich Hasenack e Eliseu Weber. Porto Alegre: UFGS Centro de Recursos Idrisi.
- FELSCH JÚNIOR, W. S. (2014). *ANÁLISE DO DESEMPENHOS DOS OPERADORES DE EQUIPAMENTOS DE MINA E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS DE LAVRA*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto - Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.
- FERREIRA, D. L. (2021). *Dimensionamento de Frota Utilizando Indicadores Operacionais*. Axará: Monografia (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

- FITZ, P. R. (2008). *Cartografia básica*. São Paulo: Ed. Oficina de Textos.
- GIL, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. São Paulo: Atlas, 6 ed.
- GIRODO, A. C. (2005). *Mineração: Projeto Apa Sul RMBH – Estudos do Meio Físico* (Vol. vol. 2). Belo Horizonte.
- HARTMAN, H. L., & MUTMANSKY, J. M. (2002). *Introductory mining engineering*. New York: John Wiley and Sons, Inc. 570p.
- HOLMAN, P. (2006). *Caterpillar Haul Road Design and Management*. University - Big Iron .
- HUGO, D. (2005). *Haul Road defect identification and condition assessment using measured truck response*. Pretoria: Dissertation (Master of Engineering in the Department of Mechanical and Aeronautical Engineering) – University of Pretoria.
- HUSTRULID, W., & KUCHTA, M. (2006). *Open Pit Mine Planing & Desing (2^a ed., Vol. I)*. Taylor & Francis. : Rotterdam, Brookfield.
- KAUFMAN, W., & AULT, J. C. (1977). *Design of surface mine haulage roads – A Manual. Information Circular 8758*. Washington: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 68 p.
- LAKATOS, E. M., & MARCONI, M. d. (2007). *Fundamentos de metodologia científica*. São Paulo: Atlas, 6. ed. 5. reimpr.
- LAUDON, K. C., & LAUDON, J. P. (2016). *Sistemas de Informação Gerenciais*. Pearson.
- LOPES, J. R. (2010). *Viabilização Técnica e Econômica da Lavra Contínua de Minério de Minério de Ferro Com Uso de Sistema de Britagem Móvel "In Pit" Auto Propelido*. Ouro Preto: Dissertação (Mestrado). Programa de Pós.Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto.
- LUELE. (s.d.). *Chaminé Kimberlítica*. Obtido de Luele: <https://www.luele.co.ao/chamine-kimberlitica/>
- MAGALHÃES, H. (2011). *Atividades de Infraestrutura. Gerência de Terraplanagem e Infraestrutura de Mina (GATIM)*. São Paulo.
- MAGAZINIE, T. (20 de Julho de 2013). *TIME MAGAZINIE*. Obtido de TIME MAGAZINIE: <http://www.time.com/time/photogallery/>
- MANZINI, E. J. (2011). *Tipo de conhecimento sobre inclusão produzido pelas pesquisas*. Rev. bras. educ. espec. vol.17 no.1 Marília Jan./Apr.
- MARZANO FILHO, L. (2013). O velho teimoso: um sonho... o éden III. Em L. MARZANO FILHO, *O velho teimoso: um sonho... o éden III*. (p. 120 p.). Conselheiro Lafaiete: Central Gráfica.
- MASETTI, L. C. (2011). *Manual de Estradas de Mina*. Belo Horizonte: Departamento de Planeamento e Desenvolvimento de Ferrosos - Vale - 117 p.
- MONTOYA, R. E. (2015). *Transporte verde: eficiencia y reducción de CO2 integrando gestión tecnologías de información y comunicaciones (TIC) y um metaheurístico* (Vol. vol.10). Caldas: Revista Producción + Limpia.

- OLIVEIRA FILHO, W. L. (2010). *Relatório de Inventário de Estradas de Relatório interno. Relatório interno*. Ouro Preto: Convênio Vale UFOP.
- OLIVEIRA, J. (2015). *Modelagem de Processos de Negócio: Notação e Aplicações*. Atlas: São Paulo.
- PEREIRA, A. P. (2000). *Subsídios para o Gerenciamento Ambiental na Implantação e Operação de Ferrovias*. Rio de Janeiro: Dissertação IME.
- PERONI, R. (2015). *Projeto de Estradas de Mineração, Gerenciamento da Construção e Manutenção*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- PETRIE, G., & KENNIE, T. J. (1990). *Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering*. 1 ed. New York: McGraw-Hill.
- PIMENTEL, K. (2007). *Estradas não pavimentadas e ferrovias reforçadas com geossintéticos*. Brasília: Tese (Doutorado em Geotecnica) – Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia.
- PIMENTEL, M., FILIPPO, D., & SANTORO, F. M. (2019). *Design science research: fazendo pesquisas científicas rigorosas atreladas ao desenvolvimento de artefatos computacionais projetados para a educação*. Porto Alegre: SBC: Metodologia de Pesquisa em Informática na Educação: Concepção da Pesquisa.
- PONTES FILHO, G. (1998). *Estradas de Rodagem Projeto Geométrico*. São Carlos: 432 p.
- QUEVEDO, J. M. (2009). *Modelo de Simulação para o Sistema de Carregamento e Transporte em Mina a Céu Aberto*. Rio de Janeiro.
- REIS, M. S. (2014). *Classificação e Diagnóstico das Estradas de Mina de Lavra a Céu Aberto de Minério de Ferro Dentro do Quadrilátero Ferrífero*. Ouro Preto: Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, 132 p.
- RODOVALHO, E., LIMA, H., & TOMI, G. (2016). *New approach for reduction of diesel consumption by comparing different mining haulage configurations*. Journal of Environmental Management. 177-185.
- SAMARCO, M. (2014). *Plano de tráfego da mineração*. MAGALHÃES A.M.
- SOUZA, L. M. (2011). *Estudos de Dimensionamento Estrutural de Estradas de Mina a Céu Aberto*. Ouro Preto: Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto.
- TANNANT, D. D., & REGENSBURG, B. (2001). *Guidelines for mine haul road design*. Canada: University of Alberta: School of Mining and Petroleum Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, 108 p.
- THOMPSON, R. J., & VISSER, A. T. (2008). *Mine haul design, construction and maintenance management*. Belo Horizonte: In: short course offered on 13 and 14 November 2008.
- VALERIANO, M. M. (2008). *Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais*. São José dos Campos: SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-15318-RPE/818). 72p.

ANEXOS

Figura I. Exploração por bancadas da Companhia Vale do Rio Doce, conhecida como mina de Brucutu.



Fonte: (MAGAZINIE, 2013).

Figura II. Exploração em tiras localizada em Casper, Estados Unidos.



Fonte: (COUNCIL, 2013)