

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Desenvolvimento e Previsão das Condições Geológicas e Estruturais de Maciços  
Rochosos Utilizando Interpolação Estatística e Método de Monte Carlo**

**BRUNA CATARINO XAVIER**

Orientador: Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva

**TESE DE DOUTORADO**

Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica

São Paulo

2022

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Desenvolvimento e Previsão das Condições Geológicas e Estruturais de Maciços  
Rochosos Utilizando Interpolação Estatística e Método de Monte Carlo**

**BRUNA CATARINO XAVIER**

Tese apresentada ao programa de  
Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica,  
para obtenção do título de Doutora em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva

**TESE DE DOUTORADO**

Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)  
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:  
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

CATARINO XAVIER, BRUNA

Desenvolvimento e Previsão das Condições  
Geológicas e Estruturais de Maciços Rochosos  
Utilizando Interpolação Estatística e Método de Monte  
Carlo / BRUNA CATARINO XAVIER; orientador Marcos  
Egydio da Silva . -- São Paulo, 2022.  
187 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em  
Geoquímica e Geotectônica) -- Instituto de  
Geociências, Universidade de São Paulo, 2022.

1. Geologia Estrutural. 2. Modelos Geológicos-  
Geotecnicos. 3. Simulação de Monte Carlo. I. Egydio  
da Silva , Marcos , orient. II. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**"Desenvolvimento e Previsão das Condições Geológicas e Estruturais  
de Maciços Rochosos Utilizando Interpolação Estatística e Método de  
Monte Carlo"**

**BRUNA CATARINO XAVIER**

Orientador:  
Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva

Tese de Doutorado

**Nº 660**

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Marcos Egydio da Silva

Dr. Wilson Shoji Iyomasa

Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho

Dra. Tatiana Barreto dos Santos

Dra. Camila Duellis Viana

SÃO PAULO  
2023

## **Agradecimentos**

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo financiamento proporcionado ao longo da pesquisa, ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pelo apoio acadêmico em todo o processo e ao Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo, em especial ao Centro Estatística Aplicada.

Gostaria de agradecer ao meu orientador e amigo Professor Dr. Marcos Egydio por aceitar e apoiar as ideias pouco convencionais, um agradecimento especial ao Professor Dr. Georg Robert Sadowski pela imensa ajuda com o fornecimento de dados e ideias para desenvolvimento dos métodos e aplicação.

Agradeço ao Professor Dr. Anatoly Yambartsev pelo importante auxílio no desenvolvimento da aplicação do método estatístico e simulação de Monte Carlo, junto ao Bruno de Assis Silva e ao Victor Takara. O desenvolvimento do trabalho de interpolação geoestatística não seria possível sem a importante colaboração do Professor Dr. Jorge Kazuo Yamamoto.

Um agradecimento especial a todos os amigos que fizeram parte dessa trajetória, Fernanda Costa Gonçalves Rodrigues, Angélica Santana, Mariane Borba Lemos, Mariane Vivan e em especial ao Danilo Lomonaco Vettorello por todos os momentos de motivação e conversas produtivas, obrigada aos pós-graduandos da sala ao lado da minha “Mocó” que me faziam rir em momento de desânimo.

Agradeço a minha mãe Fátima, sem o apoio dela jamais teria conquistado essa importante etapa na minha vida. “Mãe, muito obrigada pelo apoio incondicional e por toda a paciência comigo e com a Laura”.

“Minha filha Laura, você é e sempre será minha principal motivação, tanto para meu progresso como profissional, como pessoal, obrigada por fazer parte da minha vida”. Um muito obrigada para minha irmã Carla e meu cunhado Fábio por ter trazido a Mirela para nossas vidas e por sempre estarem por perto.

Gostaria de dedicar um trecho especial dos meus agradecimentos ao meu pai, que se foi durante esse importante período da minha vida. “Pai, sinto sua falta! Obrigada por toda a admiração que tinha por mim, admiração que me motivava a sempre continuar, obrigada por todos os cafés quentinhos, não existe café igual ao seu, ainda vamos nos encontrar. Te amo”.

## Resumo

Xavier, B. C., 2022, Desenvolvimento e Previsão das Condições Geológicas e Estruturais de Maciços Rochosos Utilizando Interpolação Estatística e Método de Monte Carlo [Tese de Doutorado], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo 183 p.

O presente trabalho tem como meta discutir e apresentar uma otimização dos métodos utilizados na previsão das condições geológicas e geológico-estruturais em maciços rochosos. Para isso utilizou-se do levantamento geológico dos elementos secundários, como análises das informações provenientes de mapeamentos geológicos e das pesquisas disponíveis de trabalhos prévios de uma área de exemplo, incluindo materiais obtidos em mapeamento local e sondagens executadas. Após o levantamento e compilação dos dados, inicialmente houve o preparo das informações geológicas-estruturais, para a aplicação do Método de Monte Carlo em medidas de estruturas geológicas (*dip – dipdirection*), as quais foram transformadas em bases vetoriais e assim aplicado a simulação de Monte Carlo. O resultado dessa análise se mostrou satisfatório para simulação em medidas de foliação e fraturas em uma unidade geológica homogênea, ou seja, dados medidos em superfície podem ser simulados em profundidade para uma mesma unidade geológica. A interpolação geoestatística foi aplicada nas informações obtidas de sondagens para a construção do modelo geológico e geomecânico do maciço rochoso. Os parâmetros utilizados para a realização da interpolação geoestatística foram obtidos a partir da classificação geotécnica das sondagens realizadas na área do projeto. Os modelos resultantes foram satisfatórios, facilitando a visualização das condições geológicas e geomecânicas de camadas mais profundas, propiciando a obtenção de quatro modelos: um modelo litológico, outro de fraturamento, um padrão para os parâmetros de RDQ; e para a classificação RMR. Em uma etapa complementar, utilizando os conhecimentos fornecidos pelos modelos criados e as disposições das descontinuidades levantadas, procedeu-se as análises de estabilidade das paredes dos túneis considerando, inicialmente, apenas o arranjo das descontinuidades e em seguida as tensões tectônicas atuantes no sistema geológico estrutural. Como resultado dessa simulação foi possível observar que o sistema de tensões compressivas favorece a estabilidade das cunhas formadas e o sistema de tensões distensivas se constitui em uma organização desfavorável a estabilidade das paredes dos túneis.

Palavras-chave: Geologia Estrutural, Modelos Geológicos-Geotecnicos, Simulação de Monte Carlo.

## **Abstract**

Xavier, B. C., 2022, Development and Prediction of Geological Conditions Using Statistical Interpolation and Monte Carlo Method [Tese de Doutorado], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo 183 p.

The thesis aims to discuss and present an optimization of the methods used in the prediction of geological and geological-structural conditions in rocky massifs. Available data from previous work, including information obtained from local mapping and drills performed in an area. Data were collected, compiled and prepared for the application of the Monte Carlo method where the measurements of geological structures (dip - dip direction) were transformed into vector data (director cosines) to be applied. The result of this analysis proved to be satisfactory for simulation in measurements of foliation and fractures in a homogeneous geological unit, this meaning that surface-measured data can be simulated in depth for the same geological unit. Geostatistical interpolation was applied using probing data aimed at the construction of the geological and geomechanical models for the rocky massif. The parameters used to perform the geostatistical interpolation were obtained from the geotechnical classification of the soundings carried out in the project area. The results were satisfactory, facilitating the visualization of the geological and geomechanical conditions of deeper layers. As results, four models were obtained: (i) a lithological pattern, (ii) a fracturing model, (iii) a standard for RDQ parameters, and (iv) an example for RMR classification. In a complementary step, using the information provided by the models created and the arrangement of the discontinuities, we simulated the stability analyzes of the tunnel walls, initially considering only the disposition of the discontinuities and, then tectonic stresses acting on the structural geological system. The results indicated that the compressive stress system favors the stability of the formed wedges and the distensive stress system is unfavorable to the stability of the tunnel walls.

Key-words: Structural Geology, Geological-Geotechnics Model, Monte Carlo Simulation.

## Sumário

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VI</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO À TESE .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introdução ao Tema.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Justificativas .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Materiais e Métodos.....</b>	<b>3</b>
1.4.1 Levantamento Bibliográfico .....	3
1.4.2. Compilação de dados.....	5
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Contextualização Geológica .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2 Contextualização Geológica - Estrutural.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Aspectos Geomorfológicos .....</b>	<b>15</b>
<b>2.4 Análise de Imagem de Satélite .....</b>	<b>17</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 3 – MÉTODOS APLICADOS E DESENVOLVIDOS.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Interpolação Geoestatística na construção do Modelo Geológico-Geotécnico.....</b>	<b>23</b>
<b>3.2 Incertezas Geotécnicas.....</b>	<b>27</b>
<b>3.3 Confiabilidade e Probabilidade de Erro .....</b>	<b>28</b>
<b>3.4 Métodos Probabilísticos e a Simulação de Monte Carlo .....</b>	<b>31</b>
3.4.1 Método de Monte Carlo.....	31
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>35</b>
<b>CAPÍTULO 4 - TRIDIMENSIONAL GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL MODEL CONSTRUCTED BY GEOSTATISTICAL INTERPOLATION .....</b>	<b>39</b>
<b>CAPÍTULO 5 - CONSTRUCTION OF STRUCUTURAL GEOLOGICAL MODEL USIN THE MONTE CARLO SIMULATION .....</b>	<b>41</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>41</b>
<b>CAPÍTULO 6 – THE TECTONIC STRESS INFLUENCE ON WEDGE STABILITY IN TUNNELS .....</b>	<b>43</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>43</b>



<b>CAPÍTULO 7 - INTEGRAÇÃO DOS ARTIGOS .....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>47</b>

## Lista de Figuras

### Capítulo 1

Figura 1.1: Mapa de localização do Complexo Hidroelétrico Capim Branco a) limite regional brasileiro com destaque em laranja ao contorno do Estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil b) limite regional do Estado de Minas Gerais com destaque em vermelho a localidade próxima ao município de Uberlândia c) Imagem de satélite mostrando o posicionamento das duas Usinas Hidroelétrica (UHE-CBI e UHE-CBII) no rio Araguari que está entre os municípios de Uberlândia e Araguari. .... 5

### Capítulo 2

Figura 2.1: Compartimentação do mapa geológico esquemático do Estado de Minas Gerais mostrando as grandes unidades geológicas, o círculo vermelho é indicativo da localização da área usada no projeto, as regiões delimitadas em amarelo indicadas com o número 1 referem-se às bacias sedimentares fanerozóicas, em verde (número 2) temos as unidades que compõe a Faixa Brasília, em rosa escura (número 3) rochas que une as unidades da Faixa Ribeira, em marrom (número 4) temos as formações do Quadrilátero Ferrífero, em azul (número 5) as rochas do Craton São Francisco e a região representada pela cor rosa (número 6) compõe as rochas do Orógeno Araçuaí. (Alkmin, 2020). .... 10

Figura 2.2: Mapa geológico simplificado, destacando a área de compilação de dados I e II. Mostrando as principais unidades que afloram no curso do rio Araguari (Grupo Araxá e Complexo Maratá) (Modificado de Pimentel, et al 2017). .... 11

Figura 2.3: Mapa de isoatenuações do primeiro evento distensivo (440 Ma). Localização de estruturas do embasamento da Bacia do Paraná, com destaque para Flexura de Goiânia no Triângulo Mineiro (Modificado de Quintas, 1997). .... 14

Figura 2.4: Diagrama com as direções principais das estruturas mapeadas em superfície. Figura a) direção principal das foliações do embasamento *dip dipdirection* 48/277; figura b) direção das duas principais famílias de fraturas encontradas, uma paralela a direção da foliação J1 (54/277) e J2 (88/215). .... 15

Figura 2.5: Folha topográfica e imagens de satélite mostrando a disposição do rio Araguari (NW-SE) entre os municípios de Araguari e Uberlândia, na Figura A está a base cartográfica da Folha Uberlândia (IBGE 1976); em B Imagem de satélite Landsat 8; em C está a imagem de satélite Landsat 8 (oito) com destaque para localização do Complexo Hidroelétrico Capim Branco..... 16

Figura 2.6: Mapa hidrográfico, com destaque para o rio Araguari e a localização das duas obras do Complexo Capim Branco e o modelo digital de terreno, mostrando a topografia da área ao longo do rio Araguari e aos arredores (Fonte: CPRM 2006). .....	17
Figura 2.7: Localização esquemática das imagens de satélite utilizadas no projeto (Google Earth 2021). .....	18
Figura 2.8: Imagem de Satélite processada com realce de solo e vegetação, respectivamente. ....	18
Figura 2.9: Imagem de Satélite processada com realce de solo e vegetação, respectivamente, com a indicação da correspondência entre as foliações e fraturas, com a posição do rio principal, meandros e afluentes. ....	19

### *Capítulo 3*

Figura 3.1: Variograma típico e suas propriedades (Yamamoto et al 2001).....	26
Figura 3.2: Esquema ilustrando o processo de estimativa geoestatística e interpolação de variáveis regionalizadas (em destaque ao processo utilizado nesse trabalho). ....	26
Figura 3.3: Sobreposição das curvas de capacidade e demanda com os respectivos valores de confiança sobre postos (probabilidade de erro). ....	30
Figura 3.4: Método Monte Carlo, mostrando a função de integração com o exemplo de arremesso de dardos (Maia 2003). ....	33
Figura 3.5: Demonstração das coordenadas utilizadas para o cálculo dos cossenos diretores calculados para análise de Monte Carlo (desenho retirado de Fisher, 1993).	

## **Lista de Tabelas**

### *Capítulo 3*

Tabela 3.1: Subdivisão das variáveis aleatórias aplicados a parâmetros geológicos (Yamamoto & Landim 2013) .....	244
--	-----

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO À TESE

No presente capítulo estão descritos a introdução ao tema abordado na tese, objetivos principais da pesquisa, os materiais e métodos e a estruturação do desenvolvimento da pesquisa.

### 1.1 Introdução ao Tema

O entendimento da interação da atividade humana com o ambiente geológico, visando prognósticos positivos ou negativos e as suas necessárias eventuais prevenções é, afinal, o foco principal de grande parte da Geologia Aplicada à Engenharia seja ela de construção civil, mineira, de petróleo ou de impacto ambiental (Hasui & Mioto 1992, Pastore *et al* 1998, entre outros).

O aumento da demanda pelas obras de infraestrutura, associado ao crescimento econômico e populacional mundial, tem tornado a Geologia com linguajar estreitamente ligado a outras profissões interativas, como as diferentes engenharias, de destaque para o estabelecimento de um conhecimento geológico comum prévio do meio físico, associado aos grandes empreendimentos. Destacam-se aqueles vinculados à construção grandes, tais como: barragens, túneis, estradas etc., onde a expertise geológica devidamente dirigida influência e propicia a criação de metodologias alternativas para os estudos do substrato, obrigatoriamente realizados em diferentes fases de projeto.

A correta previsão da geologia estrutural ou da arquitetura do arcabouço geológico envolvendo as disposições espaciais de contatos entre litologias e de suas respectivas descontinuidades, além de suas propriedades geomecânicas, são comumente as principais determinantes geológicas da futura estabilidade de grandes fundações e escavações, sejam estas a céu aberto ou subterrâneas.

Todas as análises de estabilidade realizadas nas obras de engenharia estão submetidas a incertezas gerando assim riscos geológicos. Esses riscos podem fazer com que a execução da obra não atenda aos requisitos pré-estabelecidos, causando prejuízos financeiros e riscos à vida humana, bem como graves problemas ambientais.

A correta previsão das condições geológicas em locais de difícil visualização e acesso tem como finalidade minimizar os riscos inerentes a erros na previsibilidade das condições do maciço em profundidade, que tem como meta a segurança dos trabalhadores durante a obra, o controle dos gastos previstos para o empreendimento, bem como a sua durabilidade depois de construída, promovendo segurança social, financeira e ambiental.

Comumente análises de previsibilidade geológica são realizadas, em sua maior parte, por meio de estudos determinísticos de parâmetros para a classificação do maciço rochoso.

Assim como o mapeamento da disposição de estruturas geológicas, essas metodologias são carregadas de incertezas, que vão desde a coleta dos dados (ou informações) em campo, com as incertezas obtidas nas instrumentações, como no tratamento final dos dados nas classificações geomecânicas e geológicas.

Os métodos de análise determinística não levam em consideração, na maioria das vezes, a aleatoriedade e a variabilidade das variáveis envolvidas no projeto, de maneira que o seu valor não demonstra exatamente a verdadeira segurança e previsibilidade das condições subterrâneas da obra (Ge et al., 2011). Montoya & Assis (2011b) ressaltam que nos últimos anos, houve um grande interesse em incorporar metodologias que permitam estimar, de maneira racional, a incerteza associada a estudos geotécnicos, como é o caso da aplicação dos métodos probabilísticos.

## **1.2 Objetivos**

O principal objetivo do trabalho é a otimização de técnicas para construção de modelos geológico-geotécnicos, visando minimizar incertezas durante a previsão das condições geológico-estruturais no decorrer da interação entre a atividade humana e o meio geológico, e assim diminuir riscos inerentes a acidentes, como instabilidade de taludes, colapso de túneis, etc. A proposta geral está na utilização de ferramentas estatísticas para a construção dos modelos geológico-geotécnicos o mais próximo possível da realidade, estabelecendo conexões entre os dados geológicos-estruturais coletados em superfície com aqueles obtidos em profundidade. Para que essa meta seja alcançada o projeto está dividido em três etapas principais:

A primeira delas é a construção do modelo geológico-geotécnico em três dimensões, baseado na utilização da interpolação geoestatística de parâmetros obtidos por meio da descrição e classificação de furos de sondagem. A partir dessa análise comparou-se o resultado obtido com o modelo construído por meio de método determinístico, ou seja, elaboração de perfil em duas dimensões, realizado por meio de representações gráficas, com o modelo em três dimensões criados por meio da interpolação estatística, verificando a eficácia do uso da interpolação geoestatística em dados geológicos e geotécnicos.

A segunda etapa, consiste na elaboração de um modelo geológico-estrutural simulado a partir de análises probabilísticas em dados de estruturas geológicas, ou seja, são produzidos novos dados simulados, a partir dos dados reais. Essa etapa tem como finalidade conhecer as inexatidões do modelo simulado, podendo então inferir um cenário possível, entendendo sobre a incerteza do modelo criado e assim otimizando a previsibilidade das condições em

profundidade do maciço rochoso. A simulação foi realizada com base no método de Simulação de Monte Carlo, que vem sendo aplicado em simulações geotécnicas, como por exemplo em cálculo de fatores de segurança para estabilidade de taludes.

A terceira etapa tem como finalidade a discussão baseada em dados modelados sobre a influência da magnitude das tensões regionais no comportamento das estruturas durante uma obra de infraestrutura, com aplicação na análise de estabilidade em túneis.

### **1.3 Justificativas**

Com a crescente demanda por obras de infraestrutura nos últimos anos e com o aumento de casos de acidentes provocados por equívocos na previsibilidade das condições geológicas em profundidade, ou seja, enganos na construção do modelo geológico e/ou no modelo geotécnico. Existe a necessidade de obtenção de novas ferramentas, que sejam acessíveis e práticas para utilização e otimização da previsão das condições geológicas dos maciços rochosos em profundidade e/ou em locais de difícil visualização.

A finalidade de propor esse tipo de metodologia está na criação de uma ferramenta que consiga estimar as condições geológicas estruturais do maciço rochoso em profundidade contribuindo com a diminuição da imprevisibilidade e a minimização dos erros.

### **1.4 Materiais e Métodos**

Neste item estão descritos quais foram as etapas para levantamento de informações da área de estudo e sua caracterização com trabalhos prévios e a apresentação dos métodos usados no desenvolvimento do projeto.

#### **1.4.1 Levantamento Bibliográfico**

O levantamento bibliográfico foi realizado para caracterização geológica da área e para a descrição dos métodos utilizados.

##### *1.4.1.1 Caracterização Geológica da Área de Estudo*

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizados dados da obra de uma barragem já finalizada, que está localizada entre os municípios de Araguari e Uberlândia na região oeste do Estado de Minas Gerais. Foram usados dados de mapeamento de taludes e do túnel de adução, bem como dados e informações extraídas de testemunhos de sondagens.

Com a finalidade de complementar as informações que caracterizam a geologia da área, efetuou-se pesquisas sobre a contextualização geológica e geotectônica em artigos científicos e fazendo o uso de sites que permitiram acesso a teses e dissertações de diversas universidades, livros didáticos e relatórios técnicos. Procedeu-se a análises de imagens de

satélite para complementar as informações sobre a região estudada, utilizando o *software* ENVI, e as imagens provenientes do satélite *LandSat 8*.

#### 1.4.1.2 Caracterização dos Métodos Aplicados

A interpolação estatística foi o primeiro método empregado no projeto, o qual tem sido uma ferramenta bastante utilizada na área da mineração para identificação da dimensão do corpo de minério (Yamamoto & Landim, 2012). No caso deste trabalho o método foi aplicado aos parâmetros geotécnicos obtidos por meio da descrição e classificação dos furos de sondagem disponíveis, com a finalidade de delimitar áreas de possíveis instabilidades ao longo de todo o maciço rochoso, visto que os parâmetros são correlacionáveis espacialmente entre si, possibilitando criar uma conexão entre eles a partir das coordenadas geográficas de cada furo de sondagem, construindo assim um modelo geotécnico tridimensional para cada parâmetro.

Os parâmetros selecionados para a aplicação do método foram: a litologia, o grau de fraturamento, o índice de qualidade da rocha, com a sigla em inglês RQD (*Rock Quality Designation*) (Deere, 1988), e a classificação de maciços rochosos baseada no trabalho de Bieniawski (1989) nomeada de RMR (*Rock Mass Rating*).

O segundo método estatístico foi criado com base na simulação de Monte Carlo, onde são gerados números aleatórios a partir da média dos dados coletados. Para esse projeto a simulação foi aplicada em dados de descontinuidades coletados em superfície e em profundidade (medidas de foliação e fraturas com orientação e mergulho na notação *dip-dipdirection*). Para que fosse possível a simulação, os dados foram transformados em cossenos diretores (Fisher, 1993) e então analisadas suas médias e desvios para simulação. O desenvolvimento desse método foi pensado devido à dificuldade de se obter medidas de dados geológico-estruturais em profundidade, portanto a simulação de novos dados possíveis traz a possibilidade de se estabelecer uma correlação entre a superfície e a profundidade.

Para concluir a proposta de otimização na previsão das condições geológico-estruturais em maciços rochosos, foi realizada uma avaliação fundamentada na relação entre gênese das estruturas geológicas, tanto em regimes rúpteis quanto dúcteis, com a estabilidade das estruturas durante uma obra de infraestrutura. Para a obtenção dessa análise foram utilizados *software* de análises de estabilidade de estruturas geológicas, como o *DIPS v.7*, que proporciona a verificação da direção e mergulho das possíveis cunhas instáveis a partir das projeções estereográficas. Posteriormente, é realizado a análise de estabilidade de cunhas em túneis com o *software Unwedge* que verifica a influência dos estados de tensões atuais e das paleotensões no cálculo dos fatores de segurança (FS) e então é possível discutir e entender a influência da tectônica na análise de estabilidade de tuneis.



### 1.4.2. Compilação de dados

Grande parte dos dados utilizados no trabalho faz parte de um acervo do projeto de construção do Complexo Hidroelétrico de Capim Branco. A obra está localizada no oeste do Estado de Minas Gerais (região do Triângulo Mineiro), na bacia hidrográfica do Rio Araguari, entre os municípios de Araguari e Uberlândia (Fig.1.1).

Esse projeto engloba duas usinas hidroelétricas construídas no rio Araguari, Usina Hidroelétrica de Capim Branco I (UHE-CB I) e Usina Hidroelétrica de Capim Branco II (UHE-CB II), com uma distância de aproximadamente 33 km entre elas. Foram compilados dados de mapeamento de taludes e mapeamento de um túnel de adução, junto a um total de vinte e oito furos de sondagem do tipo mista e rotativa, sendo dezessete furos em UHE-CB I e onze furos em UHE-CB II (Material suplementar I).

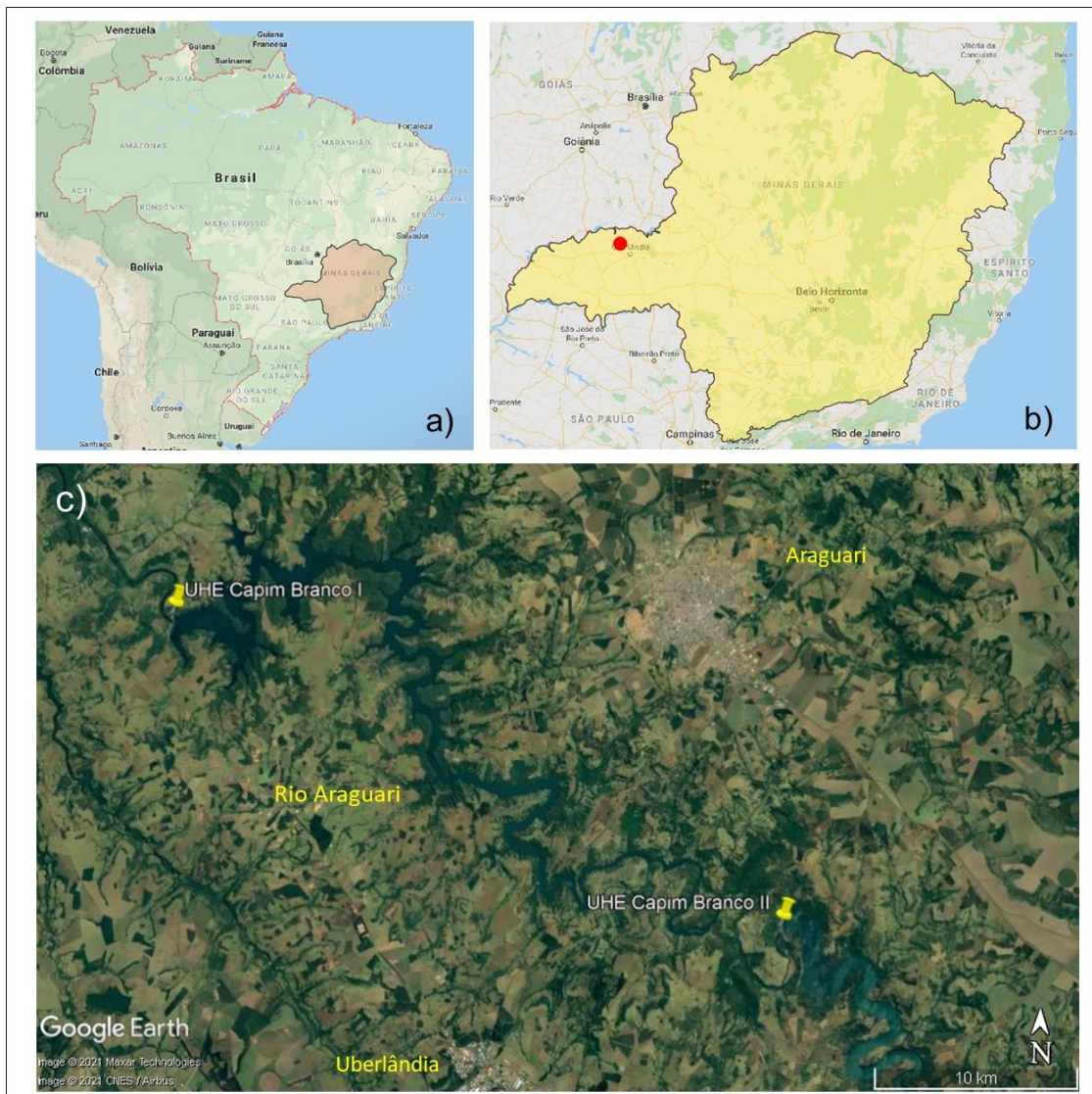


Figura 1.1: Mapa de localização do Complexo Hidroelétrico Capim Branco a) limite regional brasileiro com destaque em laranja ao contorno do Estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil b) limite regional do Estado

de Minas Gerais com destaque em vermelho a localidade próxima ao município de Uberlândia c) Imagem de satélite mostrando o posicionamento das duas Usinas Hidroelétrica (UHE-CBI e UHE-CBII) no rio Araguari que está entre os municípios de Uberlândia e Araguari.

## 1.5 Estrutura da tese

A presente tese está dividida em sete (7) capítulos, os primeiros três (3) deles compõem a introdução do trabalho realizado e conceitos iniciais, os capítulos 4, 5 e 6 referem-se ao desenvolvimento da pesquisa e compõem o corpo principal da tese e, no capítulo 7 constam as integrações dos dados e conclusões.

Capítulos introdutórios: (**Capítulo 1 – Apresentação da tese**) descreve a introdução ao tema desenvolvido, os objetivos, bem como a estrutura organizacional de todo o desenvolvimento da tese. O segundo capítulo (**Capítulo 2 – Caracterização da área de estudo**) refere-se ao levantamento bibliográfico de trabalhos anteriores sobre os aspectos geomorfológicos, geológicos e estruturais da área usada de exemplo para a análise proposta, bem como análise de imagens de satélite e mapeamentos geológicos. O terceiro capítulo (**Capítulo 3 – Materiais e Métodos**) descreve os métodos utilizados nas análises estatísticas, ou seja, toda a fundamentação teórica utilizada no desenvolvimento dos artigos.

Os capítulos que compõem o corpo da tese incorporam os artigos submetidos a periódicos internacionais.

**Capítulo 4** – O artigo “*Optimization of the predict of geological conditions using geostatistical interpolation analyses for 3D model construction*” esse artigo descreve a os resultados da aplicação da interpolação estatística em dados geotécnicos, obtidos por meio da descrição de furos de sondagem, com o objetivo de construir um modelo geológico-geotécnico em 3D, artigo submetido e aceito para publicação na revista *Soils and Rocks*.

**Capítulo 5** – “*Construction of Structural Geological Model using Monte Carlo Simulation*” o artigo relata o desenvolvimento do método usado para simulação de dados estruturais com a finalidade de correlacionar dados de superfície com profundidade, artigo publicado: Xavier, B. C., Egydio-Silva, M., Sadowski, G. R., de Assis Silva, B., & Takara, V. J. (2022). Construction of Structural Geological Model Using Monte Carlo Simulation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(3), 1345-1361.

**Capítulo 6** – “*The tectonic stress influence on wedge stability in tunnels*” esse artigo expõe o desenvolvimento das questões relacionadas a estabilidade de estruturas geológicas em túneis e a direção das tensões tectônicas regionais.

Por fim, no **Capítulo 7** apresenta a integração dos dados com uma abordagem crítica perante a análise dos artigos apresentados e as principais conclusões obtidas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bieniawski, Z. T. 1989, Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.
- Deere, D. 1988, The rock quality designation (RQD) index in practice. In *Rock classification systems for engineering purposes*. ASTM International.
- Fisher N. I., Lewis T., Embleton, B. J. J. 1993, Statistical analysis of spherical data. Cambridge University Press, New York, USA, 320 p.
- Ge, H., Tu, J., Qin, F. 2011, Analysis of Slope Stability with First Order Second Moment Method. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 5(12): 445-451.
- Hasui, Y., Mito J.A., 1992, *Geologia Estrutural Aplicada*, São Paulo, ABGE Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e S.A. Indústrias Votorantim, 459 p.
- Montoya, C.A.H., Assis, A.P., 2011b, Tools for reliability analysis in geotechnical engineering: application (in Spanish). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18): 79-86.
- Pastore, E. L., Fontes, R. M., Oliveira, A. M. S., & Brito, S. N. A., 1998, *Geologia de Engenharia. Caracterização e Classificação de Solos*, capítulo 12, 197-210.
- Yamamoto, J. K., Landim, P. M. B., 2013, *Geoestatística: conceitos e aplicações*. Oficina de textos, 215 p.



## CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo aborda a descrição e caracterização dos aspectos geológicos e estruturais dos maciços rochosos, bem como particularidades geomorfológicas relacionada à área utilizada de base para a aplicação das técnicas propostas. Todas as informações explanadas a seguir foram obtidas por meio do levantamento bibliográfico e pela compilação de dados descrito no capítulo 1.

### 2.1 Contextualização Geológica

A região de estudo está situada no oeste do Estado de Minas Gerais, no denominado Triângulo Mineiro, que é predominantemente coberto por rochas sedimentares da Bacia do Paraná, como mostra em amarelo no mapa esquemático de compartimentação tectônica do Estado (Figura ). A área indicada pelo círculo vermelho, compreende a área de enfoque do trabalho, que embora tenha o destaque de rochas sedimentares, a presença de afloramentos expõe, localmente, as rochas do embasamento cristalino, as quais se constituem no principal objeto do estudo proposto.

O projeto teve como base a folha topográfica e geológica de Uberlândia (SE 22-Z-B-IV) obtida pela CODEMIG (2017) da qual podemos constatar a presença de unidades litológicas compostas por uma sucessão de rochas neoproterozoicas associadas ao Complexo Maratá, constituída por granitos e gnaisses, e sequencias metassedimentares do Grupo Araxá. Estas duas unidades fazem parte da Faixa Brasília, um orógeno central brasileiro que foi desenvolvido entre os cratons Amazônico, São Francisco-Congo e Paranapanema, durante a amalgamação do Gondwana no Neoproterozóico (Alkimin, 2020).

Esse orógeno é constituído, na borda oeste do cráton São Francisco, por uma sucessão estratigráfica composta de várias camadas que foram deformadas e metamorfozadas durante o ciclo Brasileiro (Pimentel, *et al.*, 2011).

O orógeno Brasília compreende um cinturão de dobramentos de idade neoproterozóica que cobre parte dos estados de Tocantins, Goiás e Minas Gerais. Possui uma evolução complexa e diacrônica. O setor meridional é o resultado da interação entre crátons do São Francisco e Paranapanema, enquanto em sua porção setentrional registra a interação entre os crátons do São Francisco e Amazônico. Neste processo orogênico, houve ainda o envolvimento de outras unidades tectônicas, como o maciço de Goiás, arcos magmáticos neoproterozóicos e sequências sedimentares meso-neoproterozoicas (Uhlein, *et al.* 2012).

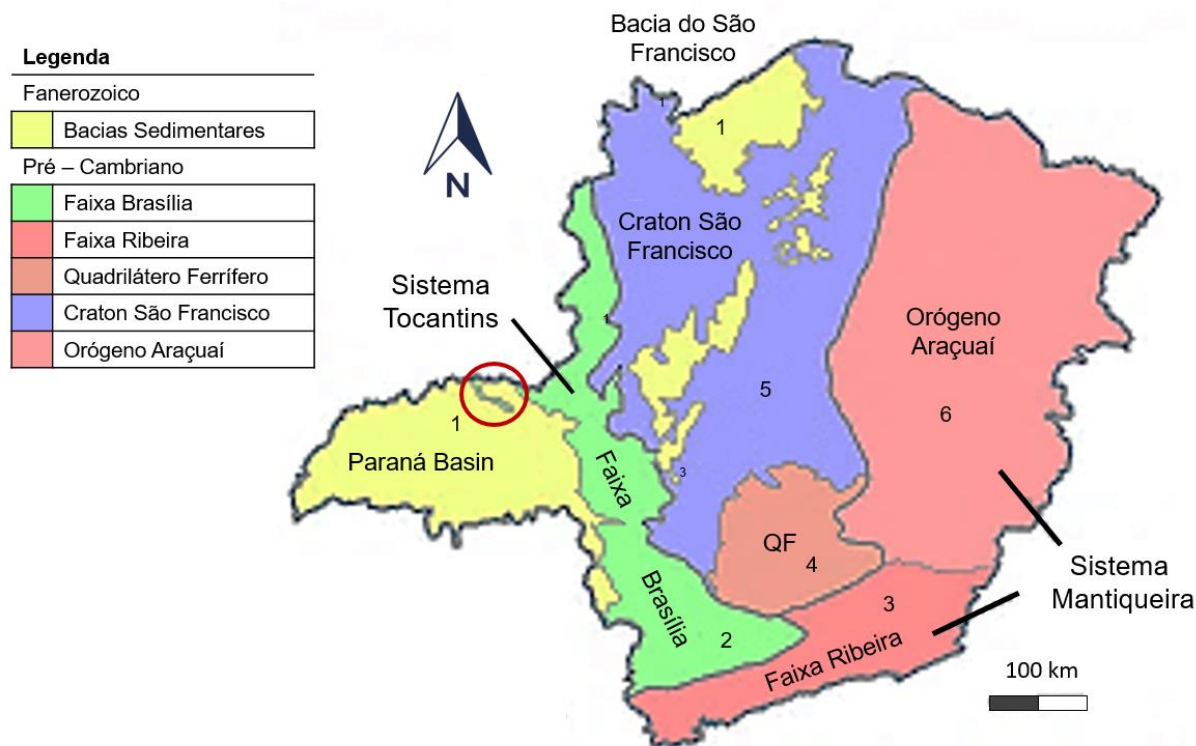


Figura 2.1: Compartimentação do mapa geológico esquemático do Estado de Minas Gerais mostrando as grandes unidades geológicas. O círculo vermelho é indicativo da localização da área usada no projeto, as regiões delimitadas em amarelo indicadas com o número 1 referem-se às bacias sedimentares fanerozoicas, em verde (número 2) temos as unidades que compõe a Faixa Brasília, em rosa escura (número 3) rochas que une as unidades da Faixa Ribeira, em marrom (número 4) temos as formações do Quadrilátero Ferrífero, em azul (número 5) as rochas do Craton São Francisco e a região representada pela cor rosa (número 6) compõe as rochas do Orógeno Araçuaí. (Alkmin, 2020).

A área do projeto, localizada ao leste de Minas Gerais, entre os municípios de Uberlândia e Araguari, é composta por unidades geológicas do Grupo Araxá, Grupo Maratá e Grupo São Bento, como ilustrado na Figura 2.2.



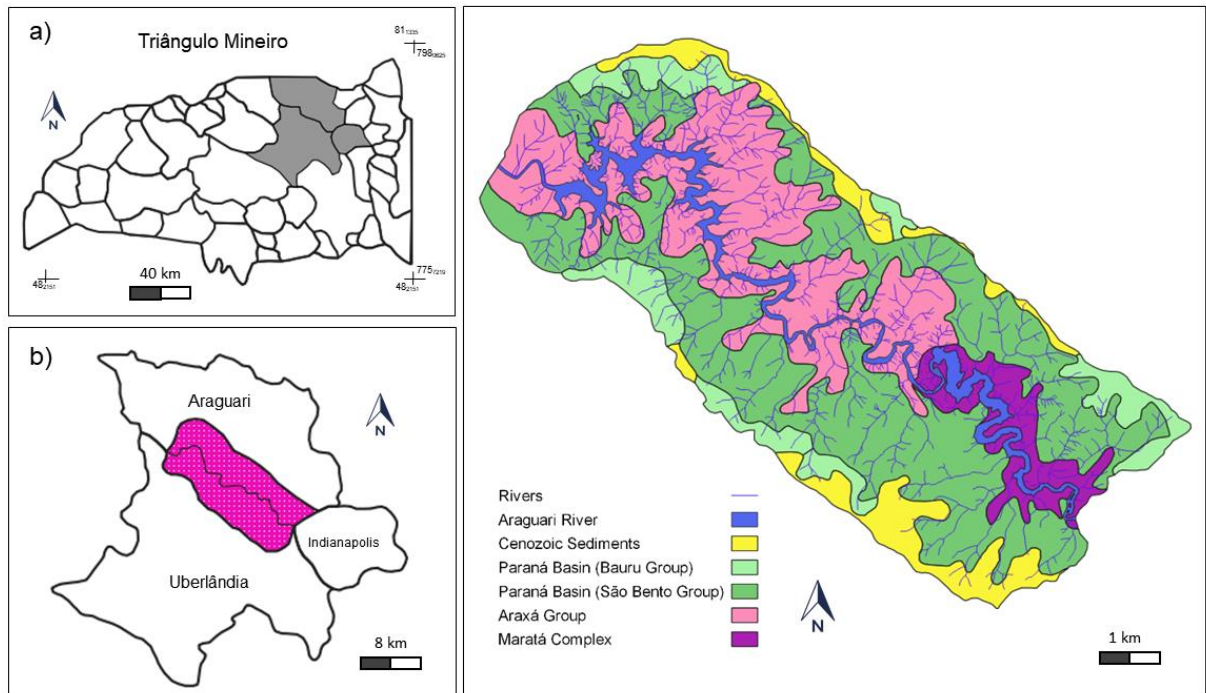


Figura 2.2: Mapa geológico simplificado, destacando a área de compilação de dados I e II. Mostrando as principais unidades que afloram no curso do rio Araguari (Grupo Araxá e Complexo Maratá) (Modificado de Pimentel, et al 2017).

O Grupo Araxá é composto por uma variedade de quartzo-mica xistos, predominantemente muscovita-biotita-quartzo xisto, frequentemente granatíferos e por vezes feldspáticos (xistos grauvaquianos). Apresentam cor cinza clara e regularmente avermelhada, quando intemperizados. São predominantemente quartzosos com granulometria média a grossa, e presença de venulações de quartzo. Apresentam aspecto anastomosado, com dobras intrafoliais, sigmoides de foliação, lineação mineral e pelo menos três gerações de foliações metamórficas. Fases deformacionais e associações metamórficas distintas estão relacionadas ao desenvolvimento das faixas Brasília e Ribeira, durante a Orogênese Brasileira. Em menor abundância ocorrem quartzitos e quartzitos micáceos, de coloração bege, ocasionalmente intercalados com quartzo-mica-xisto (Pimentel, 2016; Pacheco *et al.*, 2017, Seer *et al.*, 2001; Valeriano, 1993).

O Complexo Maratá é formado por *augen*-gnaisse e meta-granito porfírico composto por quartzo, feldspato potássico, em sua maioria oclares, biotita, muscovita e tendo como principais acessórios clinozoisita e titanita. O meta-granito apresenta composição sienogranítica a granodiorítica. Foliação com textura milonítica é frequente em locais específicos (Pacheco *et al.*, 2017).

O Grupo São Bento, sobreposto ao embasamento, é composto por rochas da Formação Serra Geral, onde predominam largamente derrames basálticos que usualmente se assentam sobre os arenitos da Formação Botucatu. Além das vulcânicas, a Formação Serra Geral abriga rochas plutônicas, na forma de soleiras, em vários níveis estratigráficos das rochas sedimentares, além de incontáveis números de diques de espessuras variáveis, os quais formam uma complexa e emaranhada malha (Hasui & Cordani, 1968; Petri & Fúlfaro 1983).

## 2.2 Contextualização Geológica - Estrutural

O contexto tectônico do qual a área do projeto faz parte está contido entre as bordas das bacias do Paraná e Sanfranciscana, local de rochas pré-cambrianas, intensamente deformadas e metamorfozadas em fácies xisto verde e anfibolito. Estas estruturas pré-cambrianas (neoproterozóicas) estão alinhadas NW-SE, concordantes com a direção da Faixa Brasília (Hasui *et al* 1976; Seer *et al* 2001; Uhlein *et al* 2012).

O comportamento dessa região, no período Mesozoico, foi estudado por Brajnikov (1953), que admitiu a existência de um *horst* (Serra dos Cristais) e um *graben* chamado de *Trench* de Goiânia. Por meio da observação das figuras de sucessão dos estratos e analisando as isolinhas dos Grupos Paraná, Tubarão e Passa Dois, mostrou que existem evidências de uma estrutura flexural controlado por *trends* estruturais pré-cambrianos. Esse arranjo foi designado de Flexura de Goiânia (Hasui *et al* 1976), resultado de um evento pertencente ao final do período Jurássico e Cretáceo, período no qual os processos magmáticos e sedimentares foram relacionados à reativação da Plataforma Sul-Americana.

As Formações Botucatu e Serra Geral fazem parte do Grupo São Bento. A primeira formação cobre rochas pré-cambrianas e suas unidades apresentam espessuras de decímetros a metros. A Formação Serra Geral, cujas datações através do método K/Ar, revelam idades Neojurássica (~140 Ma) e Eocretácea (~130 Ma), período no qual o limite da bacia foi controlada pela Flexura de Goiânia no sudoeste de Goiás, com limite orientado NW-SE (Figura 2.3). No oeste de MG, a borda da bacia mudou sua orientação para uma direção geral NNE-SSW. Lá, a flexura estava substituindo o movimento dos blocos de falha e se observa uma diminuição da espessura das camadas das diferentes unidades. Esses movimentos ocorreram devido à reativação que ocasionou o deslocamento de falhas do embasamento (Hasui *et al* 1976).

Quintas (1995) identificou no embasamento, com o uso da geofísica, três grandes zonas definidas em função do padrão da assinatura gravimétrica:

- Faixa Brasília – Arco Magmático de Goiás (Oeste)



- Maciço de Goiás – Bloco Paranapanema (Central)
- Cinturão Ribeira (Leste)

Milani (2007) sustenta que uma área com desenvolvimento de subsidência e sedimentação não é estável, razão pela qual ele introduziu o termo tectônico Faixa Móvel do Rio Paraná. Seguindo o conceito de herança tectônica de Hasui (1980), diversos autores propõem a reativação de antigas estruturas do embasamento por meio de movimentos transcorrentes, que condicionaram a implantação de arcos, flexuras marginais, alinhamentos estruturais e faixas de maior subsidência. O arcabouço estrutural é dominado por elementos tectônicos lineares (NW-SE; NE-SW) que representam falhas ou zonas de falhas que se interceptam reproduzindo o arcabouço de blocos do embasamento.

Esforços atuantes em alto ângulo podem desenvolver mais de um mecanismo de deformação. Resultados clássicos são dobras forçadas geradas em camadas sedimentares sobrepostas a blocos rígidos do embasamento pela movimentação de falhas preexistentes – dobra monoclinal até ruptura, formada durante o final do Jurássico e Cretáceo onde processos magmáticos e sedimentares relatados na reativação da plataforma Sul Americana, as Formações Serra Geral e Botucatu pertencem a essa fase (Milani, 2004).

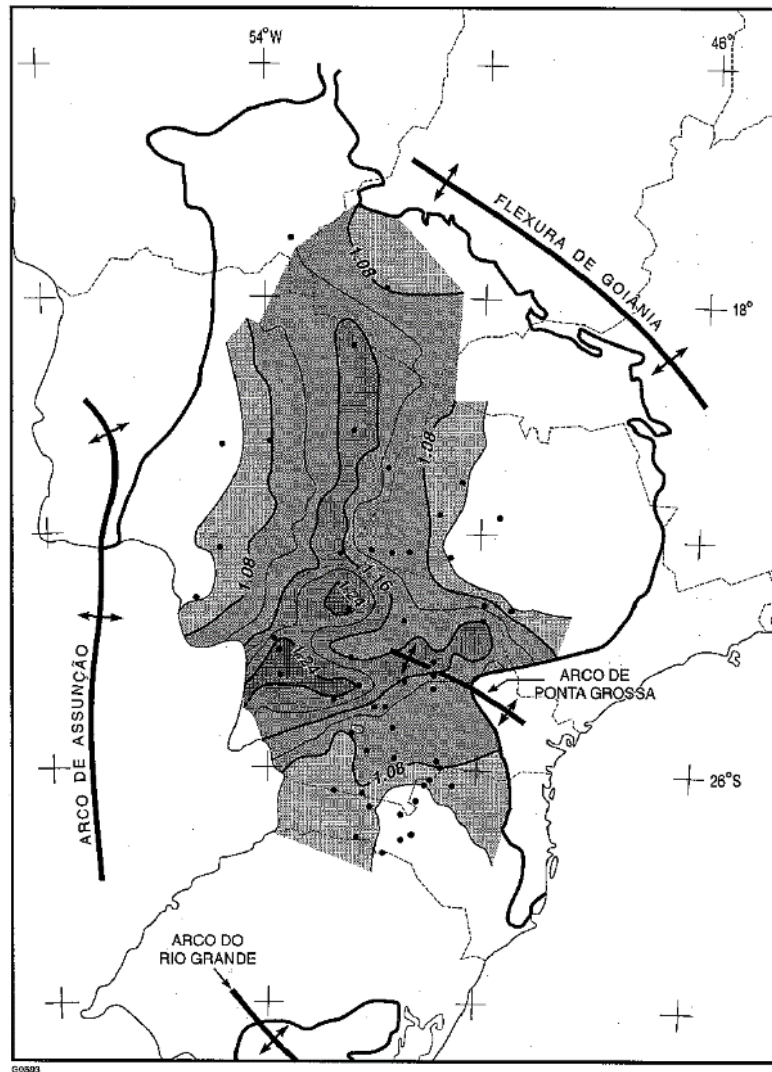


Figura 2.3: Mapa de isotenuações do primeiro evento distensivo (440 Ma). Localização de estruturas do embasamento da Bacia do Paraná, com destaque para Flexura de Goiânia no Triângulo Mineiro (Modificado de Quintas, 1997).

O mapa geológico da folha de Uberlândia, realizado pela CODEMIG (2017), destaca algumas estruturas predominantes na área de estudo, tais como a presença de intensa foliação nas rochas do embasamento, com direção de aproximadamente NS e com um mergulho médio de 48° para oeste (Fig.2.4a). As fraturas mapeadas, na região de estudo, realçam a concentração de duas famílias de discontinuidades, uma delas paralela à direção da foliação e outra paralela à direção da flexura de Goiânia NW-SE (Fig. 2.4.b).

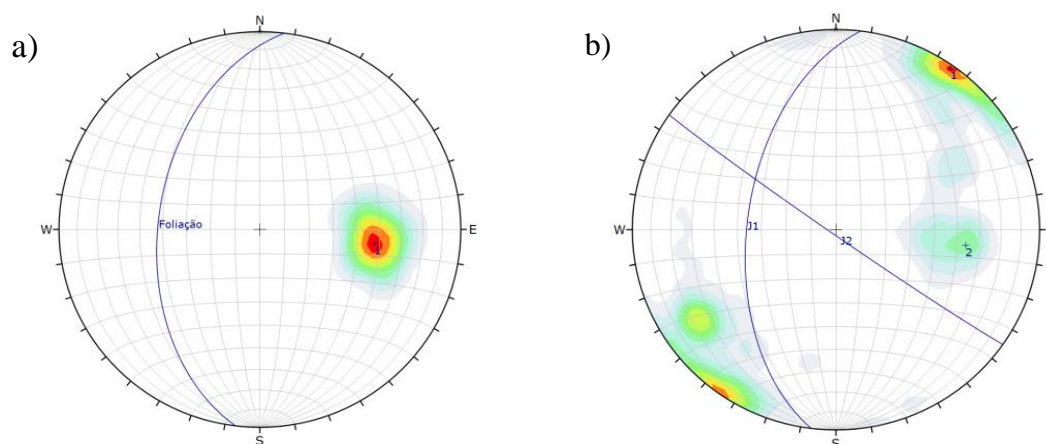


Figura 2.4: Diagrama com as direções principais das estruturas mapeadas em superfície. Figura a) direção principal das foliações do embasamento *dip dipdirection* 48/277, com 163 medidas. Figura b) direção das duas principais famílias de fraturas encontradas, uma paralela a direção da foliação J1 (54/277) e J2 (88/215) com 233 medidas.

### 2.3 Aspectos Geomorfológicos

Feições e características geomorfológicas são de extrema importância para entender e avaliar as condições geológicas da área, visto que a formação de relevo está relacionada a estruturas geológicas e características de competência e rigidez de camadas de diferentes tipos de rochas.

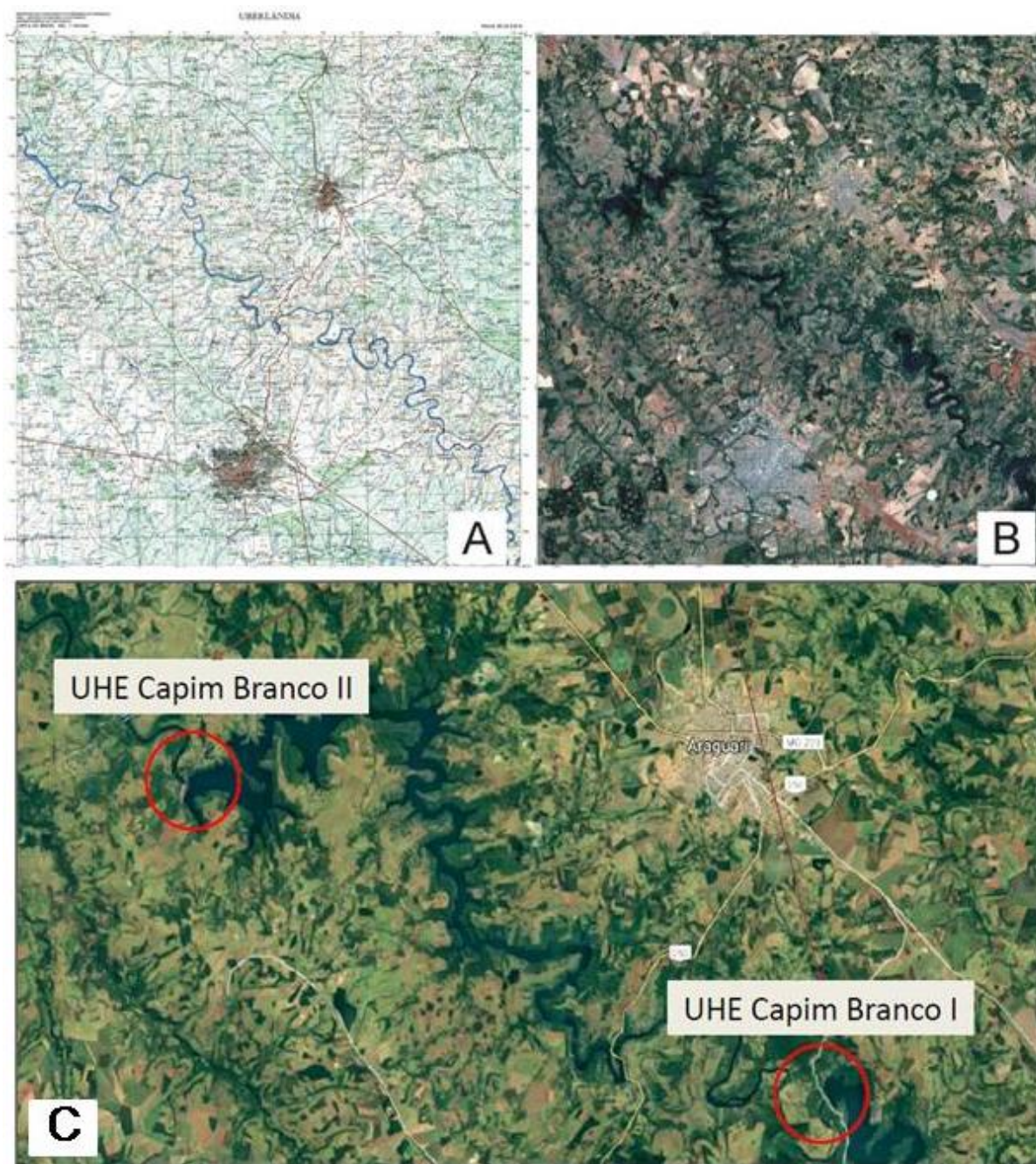


Figura 2.5: Folha topográfica e imagens de satélite mostrando a disposição do rio Araguari (NW-SE) entre os municípios de Araguari e Uberlândia, na Figura A está a base cartográfica da Folha Uberlândia (IBGE 1976); em B Imagem de satélite Landsat 8; em C está a imagem de satélite Landsat 8 com destaque para localização do Complexo Hidroelétrico Capim Branco.

A localização dos dados trabalhados encontra-se em uma área de planície, onde o rio Araguari corre de sudeste para noroeste, entre os municípios de Araguari e Uberlândia. O Rio Araguari faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, afluente do Rio Paraná, onde os principais cursos d'água que drenam a região são os rios Araguari, Uberabinha e das Pedras.



As drenagens exibem padrão dendrítico e alguns dos rios principais apresentam uma orientação NW-SE (Fig.2.5).

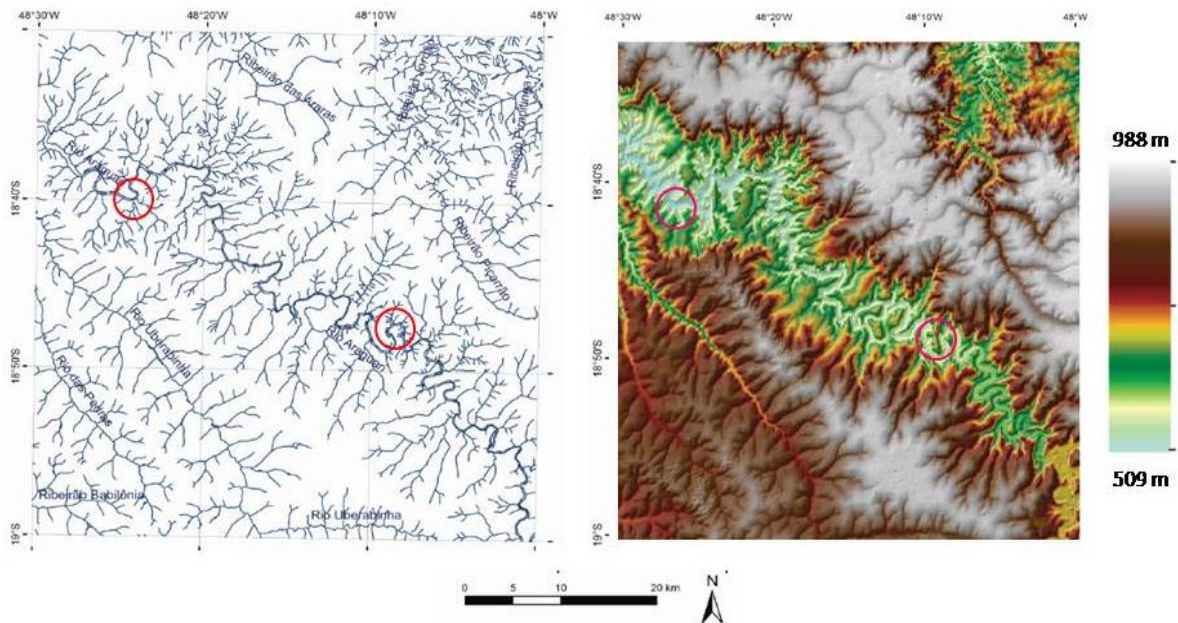


Figura 2.6: Mapa hidrográfico, com destaque para o rio Araguari e a localização das duas obras do Complexo Capim Branco (imagem a esquerda) e o modelo digital de terreno, mostrando a topografia da área ao longo do rio Araguari e aos arredores (imagem a esquerda) (Fonte: CPRM 2006).

O relevo principal é o de planalto, com cotas variando de 800 a 988 metros. Nestas regiões ocorrem predominantemente coberturas sedimentares, com escassez ou ausência de afloramentos. As drenagens ocorrem em vales encaixados, com encostas íngremes, que podem se desenvolver para áreas mais aplainadas, com cota mínima de 509 metros e se desenvolvem sobre as rochas do Grupo Araxá e Complexo Maratá, com presença de quedas d'água de alturas superiores a 30 metros, como mostra o modelo digital de terreno na Figura 2.6. No modelo é possível observar que existe uma área em verde concordante com a orientação do rio Araguari (NW-SE) – CPRM 2006.

#### 2.4 Análise de Imagem de Satélite

Na figura 2.7 está a identificação do local onde as imagens do satélite *LandSat 8* foram coletadas. Com o auxílio do *software* de processamento de imagens ENVI, foi possível obter a visualização a área de interesse, entre os municípios de Araguari e Uberlândia – Estado de MG.

A utilização do recurso de imagens de satélite, teve como objetivo complementar a visualização macroscópica da área de estudo, foram realizados os realces das bandas de cores RGB (*Red, Green e Blue*), como descrito no parágrafo a seguir.



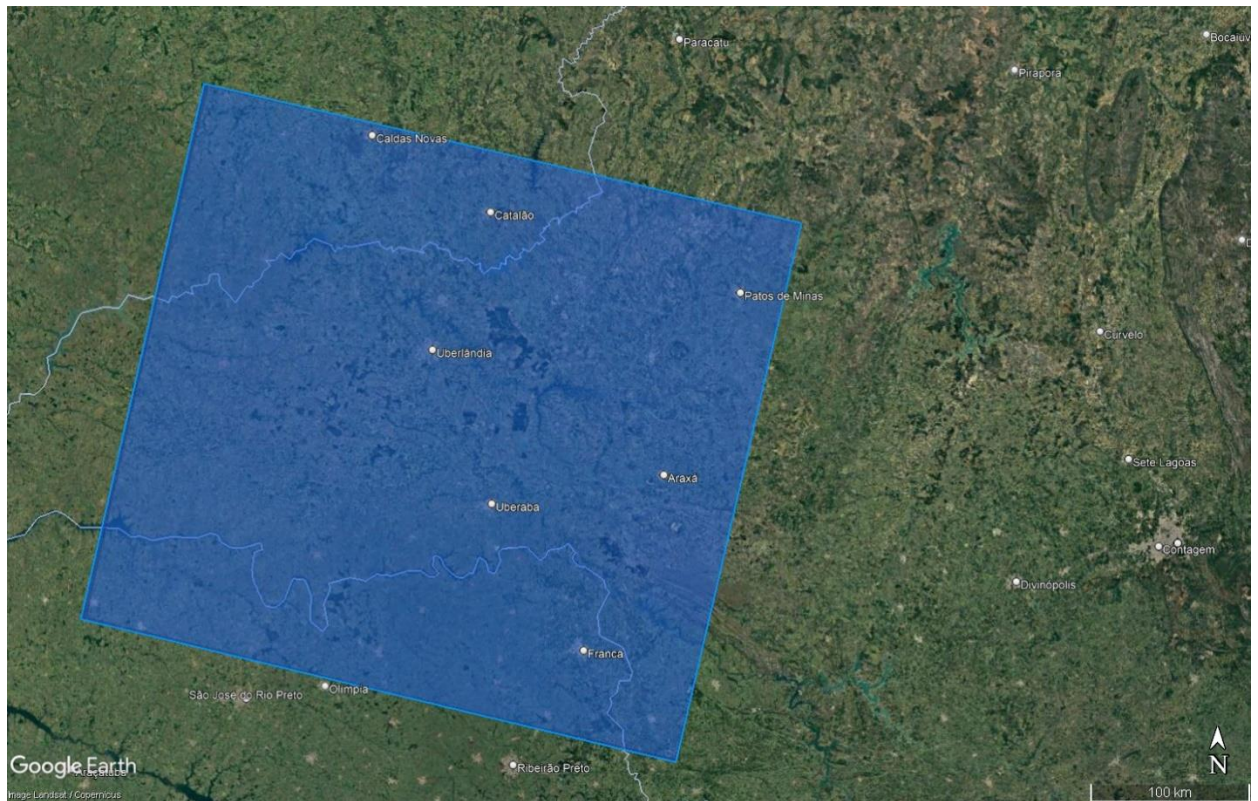


Figura 2.7: Localização esquemática das imagens de satélite utilizadas no projeto (Google Earth 2021).

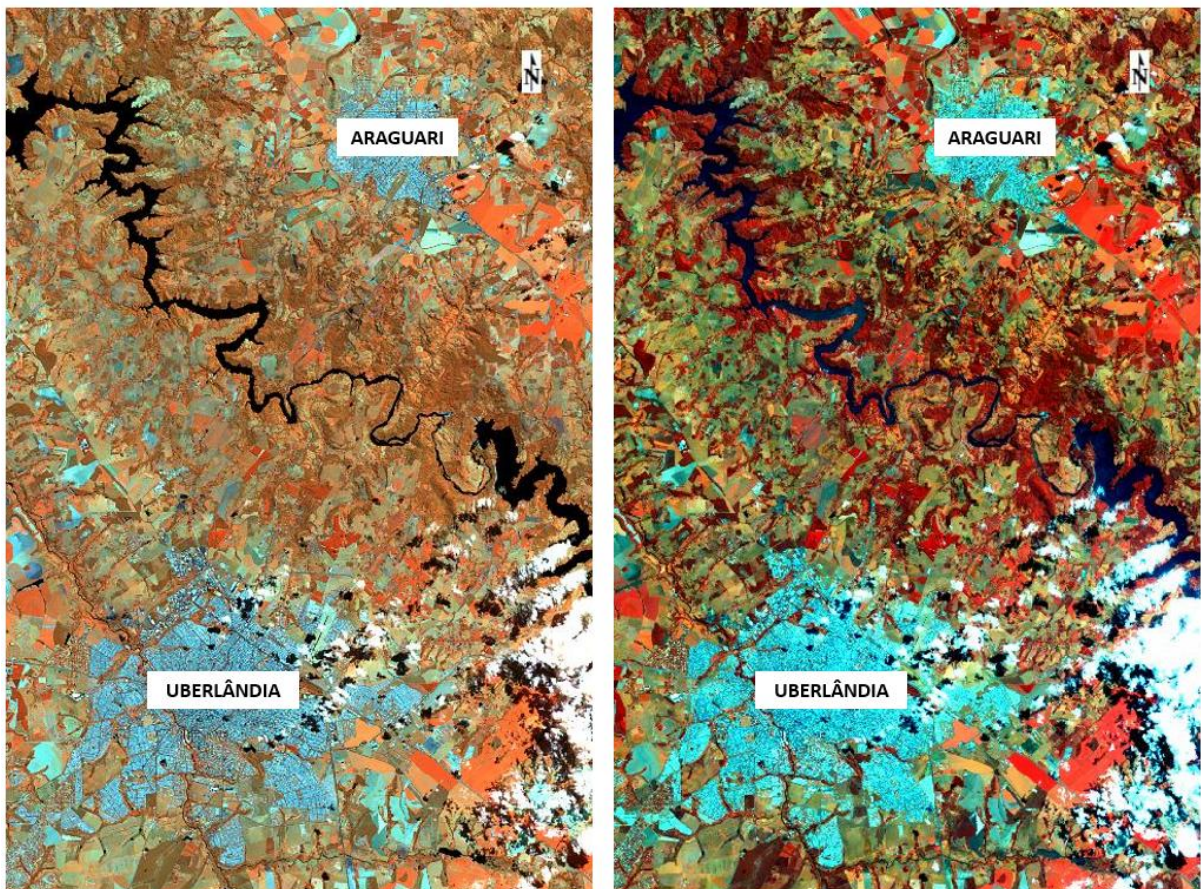


Figura 2.8: Imagem de Satélite Landsat 8.



Nas figuras 2.8 e 2.9 estão representados os resultados das análises de imagem de satélite obtida de base do *LandSat 8*. Nessa resultante é possível visualizar o traçado do rio com facilidade, quando o solo está em destaque, observando que o percurso do rio principal está na direção preferencial NW-SE, correspondente a direção das foliações e pequenos meandros e afluentes na direção perpendicular a foliação, correspondendo a orientação das fraturas. Na imagem processada a direita há o destaque para a vegetação em verde, portanto as porções escuras, marrom avermelhadas, indicam as áreas de afloramentos solo-rocha, onde não há interferência antrópica e de vegetação na visualização.

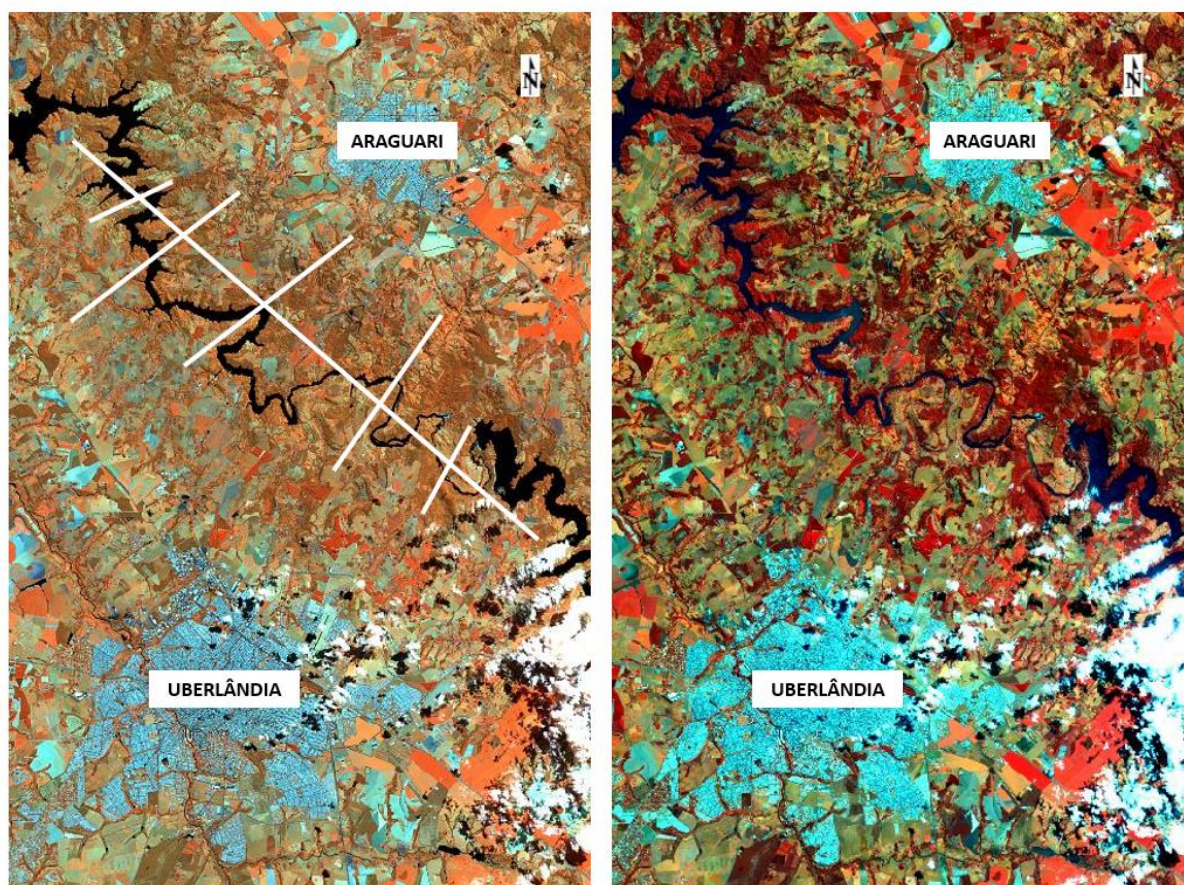


Figura 2.9: Imagem de Satélite processada com realce de solo e vegetação, respectivamente, com a indicação da correspondência entre as foliações e fraturas, com a posição do rio principal, meandros e afluentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkimin F. F. 2018, Recursos Minerais de Minas Gerais – História Geológica de Minas Gerais, livro online: [HistoriaGeologicadeMG.pdf \(codemge.com.br\)](http://HistoriaGeologicadeMG.pdf(codemge.com.br)) (Acesso em julho de 2020).
- CODEMIG 2017, Compilação dos dados de campo. Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais de Minas Gerais.
- Hasui, Y., Sadowski, G. R. 1976, Evolução geológica do Pré-Cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 6, n. 3, p. 182-200.
- Hasui, Y., Tassinari, C. C. G., Siga Júnior, O., Teixeira, W., Almeida, F. F. M. D., & Kawashita, K., 1980, Datações Rb-Sr e K-Ar do centro-norte do Brasil e seu significado geológico-geotectônico. *Anais*.
- Milani, E. J., Rangel, H. D., Bueno, G. V., Stica, J. M., Winter, W. R., Caixeta, J. M., & Neto, O. P. 2007, Bacias sedimentares brasileiras: cartas estratigráficas. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 15(2), 183-205.
- Milani, E. J. 2004, Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. *Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, CDR*, 265-291.
- Pacheco, F.E.R.C., Serrano, M.S., Caxito, F.A., Moura, C.D., Quintão, D.A. 2017, Programa Mapeamento Geológico do Estado de Minas Gerais – Projeto Triângulo Mineiro: Folha de Uberlândia. Instituto de Geociências UFMG.
- Petri, S., Fúlfaro, J.V., 1983, Geologia do Brasil. São Paulo. T.A. Queiroz – USP. 631p.
- Pimentel, M. M. 2016, The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. *Brazilian Journal of Geology*, 46 (Suppl 1): 67-82.
- Pimentel, M. M.; Rodrigues, J.B.; DellaGiustina, M. E. S.; Junges, S.; Matteini, M.; Armstrong R. 2011, The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U–Pb sedimentary provenance data: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, vol, 31 (4) pages 345-357.
- Quintas, M. C. L., 1995, O embasamento da Bacia do Paraná: reconstrução geofísica de seu arcabouço. [Tese de doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.



- Quintas, M.C.L., Mantovani, M.S.M., Zalán, P.V., 1997, Contribuição para o estudo da evolução mecânica da bacia do Paraná. *Boletim de Geociências*. PETROBRAS, Rio de Janeiro, 11 (1/2): 48-73, jan./dez.
- Seer, H. J., Brod, J. A., Fuck, R. A., Pimentel, M. M., Boaventura, G. R., & Dardenne, M. A. 2001, Grupo Araxá em sua área tipo: um fragmento de crosta oceânica neoproterozóica na Faixa de Dobramentos Brasília. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(3), 385-396.
- Uhlein, A., Fonseca, M. A., Seer, H. J., & Dardenne, M. A. 2012, Tectônica da Faixa de Dobramentos Brasília – Setores Setentrional e Meridional. *Geonomos*.
- Valeriano, C. D. M. 1993, Evolução tectônica da extremidade meridional da Faixa Brasília, região da Represa de Furnas, Sudoeste de Minas Gerais. *Brazilian Journal of Geology*, 23(3), 335-338.



## CAPÍTULO 3 – MÉTODOS APLICADOS E DESENVOLVIDOS

Neste capítulo estão descritas e apresentadas as técnicas utilizadas na construção do modelo geológico-estrutural e as metodologias propostas para otimização da previsibilidade dos modelos baseados em análises probabilísticas. Comumente os processos de avaliação das condições geológicas nas obras de infraestrutura são baseados em análises determinísticas, como por exemplo, a construção de um modelo litológico usando as classificações de sondagens e a construção de perfis geológicos baseados na expertise do profissional, juntamente com a contextualização geológica prévia presente na literatura. Esse método tem uma porcentagem de erro alta quando chegamos a uma determinada profundidade, devido à dificuldade de acesso aos dados e informações de visualização, por isso a necessidade de discutir a aplicação de novas ferramentas.

### 3.1 Interpolação Geoestatística na construção do Modelo Geológico-Geotécnico

Para a avaliação das condições geológico-estruturais, principalmente durante a análise de viabilidade do projeto de obras de infraestrutura, são realizados mapeamentos de superfície e levantamentos de estudos prévios. Em grande parte dos projetos são realizadas campanhas de sondagens para o levantamento geológico preliminar.

Segundo Yamamoto e Landim (2013) a obtenção de dados, como é o caso de sondagens, quando são realizadas baseadas em coordenadas geográficas aleatórias, sem um planejamento sistemático de amostragem, apresenta maior incerteza na interpolação ou estimativa de um ponto não amostrado para a construção do modelo geológico. Isso acontece pois nem sempre é possível a realização de um levantamento sistemático, pois ele depende de uma série de fatores, tais como: acesso, acidentes geográficos (rios, lagos, topografia), vegetação, etc.

As informações obtidas nas sondagens são concatenáveis entre si, pois existe uma correlação espacial entre elas. Com isso pode-se definir uma *variável regionalizada* com uma distribuição e variação espacial. A *variável regionalizada* é o conjunto de valores reais que é constituído por uma função aleatória  $Z(x)$  com um conjunto de variáveis aleatórias, com seus valores médios  $m$ , variância  $S^2$  e uma função de distribuição acumulada. As variáveis regionalizadas podem ser subdivididas em contínuas e discretas. No caso de parâmetros geotécnicos, tais como, grau de fraturamento, classe definida para o índice de qualidade da rocha (RQD – *Rock Quality Designation*), grau de consistência, etc., são dados classificados de

acordo com um intervalo de referência e por isso são variáveis discretas tratadas de acordo com sua categoria dentro dos intervalos, portanto são variáveis categóricas (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Subdivisão das variáveis aleatórias aplicados a parâmetros geológicos (Yamamoto, Landim 2013)

Variáveis Aleatórias	Discretas	Litologia
		Grau de Alteração
		Grau de Fraturamento
		Persistência
	Contínuas	Teores
		Espessuras
		Densidades
		Temperatura

A relação entre valores da mesma variável, obtidos em pontos separados por uma distância  $h$ , como é o caso da avaliação de parâmetros obtidos em sondagens, é chamada de covariância e pode ser calculada da equação 3.1:

$$C(h) = E\{[Z(x + h) - m][Z(x) - m]\} \quad (3.1)$$

em que  $h$  representa um vetor entre dois pontos  $x_1$  e  $x_2$  no espaço tridimensional, com

$$m = E[Z(x)] \quad (3.2)$$

Para a realização de análise espacial em 3 dimensões, calcula-se a covariância para as direções vertical, horizontal e inclinada, conforme a estrutura geológica do corpo em profundidade (Yamamoto, Landim, 2013).

A covariância para distâncias nulas é igual a variância da variável regionalizada  $Z(x)$ . Alguns fenômenos físicos, ou seja, algumas variáveis regionalizadas, com capacidade infinita de dispersão, nas quais não se pode definir inicialmente sua covariância ou variância, consegue-se determinar um variograma (Journel, Huijbregts 1978).

A função semivariograma é utilizada pela geoestatística para descrever a variabilidade espacial em determinada direção e representa a hipótese intrínseca e o variograma expressa a variabilidade natural e permite quantificar a incerteza associada e avaliações precisas (Landim,

2003). O variograma é a ferramenta utilizada para descrever a correlação espacial entre pontos amostrados, sendo definido como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (3.3)$$

Onde:

$\gamma(h)$  é a variância espacial;

$Z(x_i)$  é o valor da variável regionalizada no ponto  $x_i$ ;

$Z(x_i + h)$  é o valor da variável regionalizada no ponto  $(x_i + h)$ ;

$n$  é o número de pares de pontos separados por  $h$ ;

$h$  é a distância que separa o ponto  $Z(x_i)$  de  $Z(x_i + h)$ .

Portanto o variograma é função do incremento da distância  $h$ , quanto mais afastadas forem as amostras, mais diferentes serão seus valores em média. A representação gráfica de um variograma é obtida pela dispersão no eixo das abcissas, dos valores de  $h$  e, no eixo das ordenadas os valores de  $\gamma(h)$ .

Segundo Yamamoto *et al* 2001, o comportamento espacial das variáveis regionalizadas pode ser descrito pelas seguintes propriedades (Fig. 3.1):

- Amplitude: é a distância máxima em que as amostras apresentam correlação espacial, a partir dessa distância, os dados se tornam espacialmente independentes dividindo assim o campo chamado estruturado do campo aleatório. A amplitude pode também ser chamada de alcance ou *range*.
- Patamar: é o valor máximo da variância espacial, onde os pontos do variograma tendem a se estabilizar e se tornar invariante com o aumento da distância, sendo obtido quando se atinge a amplitude (variância espacial + efeito pepita =  $C+C_0$ ).
- Efeito Pepita ( $C_0$ ): também chamado de variância aleatória, corresponde ao valor da variância espacial próximo à origem do variograma.
- Variância espacial ( $C$ ): diferença entre o patamar e o efeito pepita, é a região onde a variância é função da distância, ainda dentro do campo estruturado do variograma.

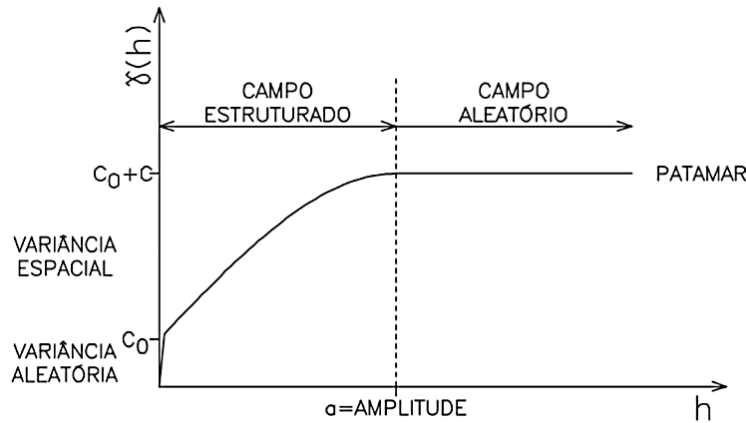


Figura 3.1: Variograma típico e suas propriedades (Yamamoto et al 2001).

A construção dos modelos geológicos tridimensionais foi baseada nos furos de sondagem para as duas obras usadas de exemplo nesse trabalho. Os parâmetros obtidos nas descrições dos furos são considerados variáveis regionalizadas discretas (Fig.3.2).

Para produzir modelos baseados em variáveis categóricas é necessário interpolar valores para locais não amostrados em pontos de coleta. Mesmo quando codificamos dados categóricos como números, variando de 1 ao número de categorias ou tipos, não podemos usar essa informação para interpolar um valor para locais sem amostragem. Este problema requer codificação disponível, informações como funções indicadoras que podem ser interpoladas e transformadas para os tipos originais de variáveis categóricas (Koike e Matsuda, 2005; Teng e Koike, 2007; Leuangthong *et al*, 2008). Para esse tipo de variável, há a necessidade da criação de uma codificação binária e a interpolação é feita usando equações multiquadráticas como demonstra o esquema de Yamamoto *et al* (2012)

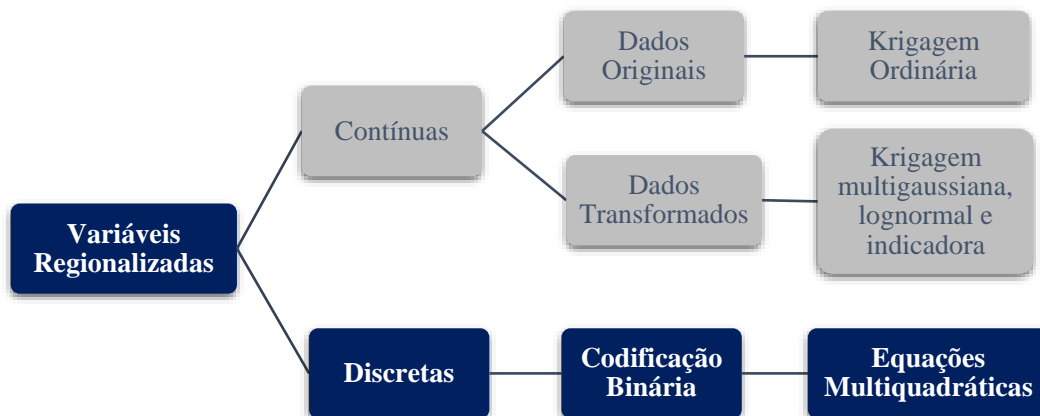


Figura 3.2: Esquema ilustrando o processo de estimativa geostatística e interpolação de variáveis regionalizadas (em destaque ao processo utilizado nesse trabalho).

As variáveis categóricas podem ser medidas em escala nominal ou ordinal (Stevens, 1946). Qualquer que seja a escala, há um número discreto de tipos. Seja  $k$  o número de tipos, a codificação binária é feita por meio da seguinte relação (Journel, 1983):

$$I(x, k) = \begin{cases} 0, & \text{se } Z(x) \neq \text{tipo } k \\ 1, & \text{se } Z(x) = \text{tipo } k \end{cases} \quad (3.4)$$

A média da codificação pode ser calculada:

$$E[I(x, k)] = \frac{f_k}{N} = P_k \quad (3.5)$$

Onde,  $P_k$  é a proporção do tipo de  $k$  e é  $N = \sum_k f_k$  a total ocorrência dentro do domínio e a variância pode ser calculada por:

$$Var[I(x, k)] = E[I^2(x, k)] - (E[I(x, k)])^2 = P_k - P_k^2 = P_k(1 - P_k) \quad (3.6)$$

Quando temos tipos  $k$  dentro da variável de categoria, então temos variações de indicadores  $k$  que seguem a distribuição de categórica, uma generalização da distribuição de Bernoulli. Variáveis são totalmente excludentes e exaustivas  $\sum_k I(x, k) = 1$  (Leuangthong et al., 2008) a distribuição de categorias é especial caso de distribuição multilinear (Yamamoto et al 2012).

### 3.2 Incertezas Geotécnicas

As incertezas encontram-se inseridas em todas as fases de uma obra geotécnica, partindo desde a caracterização do local, continuando presente pelas fases de análise e projeto e se estendendo até a tomada de decisões e construção, afirmando, ainda, que este fato é indissociável à profissão segundo Costa (2005). Deste modo, Ang & Tang (2007) destacam a importância de distinguir a maioria das fontes de incertezas existentes em projetos de engenharia por parte dos profissionais envolvidos.

Tratando-se de uma primeira abordagem, as fontes de incertezas geotécnicas podem ser classificadas em incertezas de dados ou de modelos (Einstein, 2003). Verifica-se que inúmeras fontes de incertezas podem ser reconhecidas, as quais variam desde os parâmetros dos materiais envolvidos na amostragem até as técnicas empregadas nos ensaios (Griffiths et al., 2002). Há uma dispersão nas propriedades mecânicas das rochas, as quais são observadas

por intermédio de investigações geotécnicas detalhadas, essa dispersão provém tanto da variabilidade espacial, intrínseca a estas características, quanto de erros relativos à obtenção dos dados.

Conforme Rilho (2011) fica evidente as inúmeras possibilidades de ocorrências de incertezas capazes de atuar em um projeto geotécnico. Lacasse & Nadim (1996) as distinguiram em incertezas inerentes (ou naturais) e aquelas decorrentes da carência de conhecimento. Já para Baecher & Christian (2003), variabilidade natural, incertezas nos modelos de decisão e no conhecimento são consideradas como as três principais categorias de incertezas presentes na engenharia geotécnica.

A aleatoriedade proveniente dos eventos naturais encontra-se atrelada a variabilidade natural, apresentando-se como variabilidade no espaço, para ocorrências processadas em distintos locais em um mesmo instante (caracterizando, portanto, a variação espacial) ou aquela processada no tempo, no caso de fenômenos desenvolvidos em um mesmo local, chamando-se de variação temporal (Azevedo, 2015).

Para analisar a variabilidade natural é necessário o uso de modelos matemáticos simplificados ou modelos físicos capazes de fornecer somente uma aproximação do evento natural que está sendo estudado. Quando não há informação sobre os processos e eventos, ou a modelagem do fenômeno é restringida pelo não entendimento das leis físicas que o governam, ou ainda, pela carência de um conjunto pertinente de dados, está-se diante das incertezas no conhecimento, as quais também podem ser denominadas de epistêmicas e subjetivas (Azevedo 2015).

A incerteza epistêmica, a qual decorre exclusivamente pelo fato da informação estar incompleta, corresponde à causa principal de imprecisão na maior parcela dos problemas práticos Hachich (1998), que também classifica as incertezas em intrínsecas, de parâmetros e de modelo. De maneira semelhante, Morgenstern (1995) também se valeu de três grupos para catalogar as incertezas geotécnicas, estabelecidos em incertezas nos parâmetros, nos modelos e humana. Para Flores (2008), os erros que podem ser quantificados são representados pelas incertezas nos parâmetros, ao passo que as incertezas de modelos e humanas são usualmente desconsideradas, uma vez que são de difícil mensuração.

### **3.3 Confiabilidade e Probabilidade de Erro**

Os cálculos de confiabilidade fornecem um meio para avaliar os efeitos combinados das incertezas, e um meio para distinguir as condições em que as incertezas são particularmente altas ou baixas (Restrepo 2011). Segundo Duncan (2000) a teoria de confiabilidade não tem



sido utilizada na Geotecnia, apesar de ter um valor potencial, por duas razões: (i) a teoria da confiabilidade implica em termos e conceitos pouco usados pelos profissionais da área geotécnica, (ii) a segunda está relacionada ao uso da teoria da confiabilidade que popularmente se acredita que seja necessário o uso de mais dados, tempo e esforço do que são disponíveis na realidade. Whitman (1984) cita alguns requisitos para qualquer tratamento formal de confiabilidade:

1. *Delineação clara dos critérios para sucesso ou fracasso.*

2. *Seleção de um modelo determinístico relacionando as variáveis básicas aos critérios para sucesso ou fracasso.*

3. *Identificação das incertezas relativas às variáveis básicas.*

4. *Avaliação das funções de distribuição ou momentos da base variáveis.*

Basicamente a análise de confiabilidade calcula a probabilidade de erro ( $Pe$ ), de um sistema caracterizado por um vetor  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  de variáveis relevantes em  $X$ . Para explicar o cálculo da confiabilidade será utilizado o exemplo de uso para estabilidade de taludes, onde a resistência  $R$  do sistema pode ser expressa como  $R = G_r(x)$  e a solicitação,  $S$ , como  $S = G_s(x)$ . A probabilidade de erro  $Pe$  é a probabilidade  $P$  de que  $R \leq S$ . Na equação 7 é chamada “função limite” e  $f(x)$  é a função de densidade de probabilidade das variáveis relevantes (Shweiger & Peschl, 2005). *Bibliografia disponível trata apenas de exemplos para taludes, por isso o uso de solicitação e resistência e não se aplica diretamente em dados estruturais.*

$$P_e = p(g(x) \leq 0) = \int_{g(x) \leq 0} f(x) dx \quad (3.7)$$

A resistência  $R$  e a solicitação  $S$  estão implícitas no vetor  $X$ . Segundo Whitman (1984) a resistência, também chamada “função de capacidade” e a solicitação, chamada “função da demanda” são comparadas para definir os critérios da confiabilidade em termos do tamanho da área comum no gráfico e da relação da capacidade com valor limite aceitável (Figura 3.3).

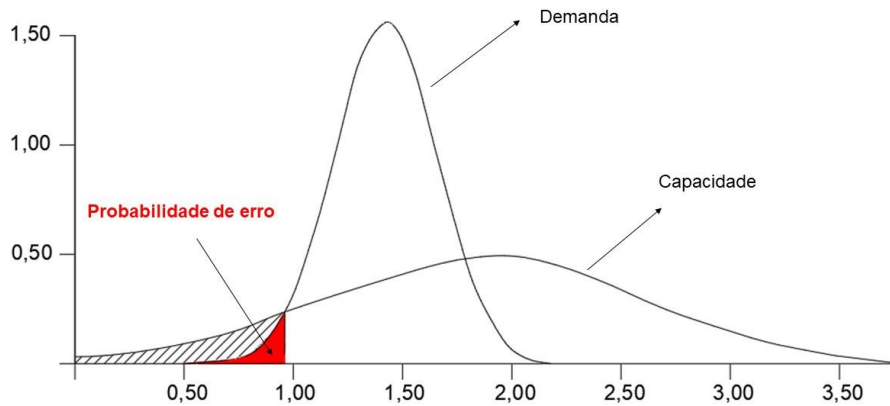


Figura 3.3: Sobreposição das curvas de capacidade e demanda com os respectivos valores de confiança sobrepostos (probabilidade de erro).

Quando a distribuição é normal, a confiabilidade ( $\beta$ ) e a probabilidade de ruptura ( $PR$ ) podem ser calculadas como é mostrado nas seguintes equações:

$$\beta = \frac{E(FS) - 1}{\sigma(FS)} \quad (3.8)$$

$$PR = 1 - \phi(\beta) \quad (3.9)$$

Onde  $E(FS)$  é a média do Fator de Segurança ( $FS$ ),  $\sigma(FS)$  é o desvio padrão do  $FS$ ,  $PR$  é a probabilidade de ruptura e  $\phi(\beta)$  é a área sob a curva de densidade de probabilidade à direita do valor de  $FS=1$ . Assis (2002) destaca que são necessárias algumas etapas para determinação da probabilidade de erro, tais como:

- Definição de indicador de desempenho e de sua função de engenharia, bem como de seu valor crítico (critério para erro).
- Definição das distribuições estatísticas (ou das estatísticas) das variáveis de entrada (propriedades dos materiais, coesão, atrito, etc.) que afetam o cálculo do indicador de desempenho.
- Escolha do método probabilístico mais adequado quanto possível para o cálculo da probabilidade de erro.
- Interpretação dos resultados da análise probabilística em prol da avaliação da probabilidade de erro.

Montoya & Assis (2011b) destacam também que, na análise de confiabilidade, a utilização de técnicas com esta natureza estatística proporciona o tratamento da incerteza de uma maneira mais rigorosa nos procedimentos e processos de projeto geotécnico. O emprego

metódico e rigoroso dos métodos de confiabilidade, apesar de não garantir totalmente que não ocorram rupturas, proporciona ao geotécnico a certeza de que os elementos conhecidos e que se tenha controle, não influirão substancialmente nestas rupturas (Whitman, 1984).

### 3.4 Métodos Probabilísticos e a Simulação de Monte Carlo

Os métodos probabilísticos podem ser considerados como aqueles que possibilitam a avaliação da distribuição de probabilidade de uma variável considerada como dependente, em função do conhecimento das distribuições estatísticas das variáveis independentes que determinam a primeira variável (Assis *et al.*, 2002).

Segundo Gitirana (2005) os modelos baseados em abordagens probabilísticas podem ser muito adequados quando são requeridos modelos complexos para determinar o desempenho das variáveis. A combinação de um eficiente método probabilístico e análises do ciclo de decisão provém métodos mais adequados e úteis para avaliação de riscos.

Métodos probabilísticos têm sido usado em avaliação de ameaça por movimentos de massa e estabilidade de taludes por autores como Costa (2005), Flores (2008), Luzi *et al.* (2000), Refice & Capolongo (2002), Assis *et al.* (2018), Restrepo (2011), Montoya (2013) dentre outros.

Os três dos principais métodos probabilísticos utilizados são: Método de Monte Carlo, Método FOSM e Método das Estimativas Pontuais. Utilizamos, no desenvolvimento da tese, o Monte Carlo devido a possibilidade de uso em dados vetoriais.

#### 3.4.1 Método de Monte Carlo

O método Monte Carlo consiste na geração aleatória de determinado número ( $n$ ) de valores para variáveis aleatórias independentes. Com estes valores são realizadas ( $n$ ) análises determinísticas com base numa determinada função de desempenho  $f(x)$  dependente. O conjunto dos valores obtidos por meio da função  $f(x)$  é tratado como amostra de uma população, e desta forma, os valores de média e variância da função de desempenho são obtidos respectivamente a partir das seguintes equações:

$$f(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x)_i \quad (3.10)$$

$$\text{Var} [f(x)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f(x)_i - f(\bar{x})]^2 \quad (3.11)$$

A geração dos valores das variáveis independentes pode ser obtida por meio de *softwares* e possui, como dados, os seus valores médios, os seus desvios padrões e a sua forma de distribuição.

A simulação de Monte Carlo é uma técnica de amostragem e, por essa razão, seus resultados estão sujeitos a erros. À medida que o número de elementos de amostra de  $f(x)$  aumenta, os erros vão diminuindo e a solução se torna exata quando este número tende a infinito (Montoya, 2013). Por isto, esta técnica em geral requer um número grande de análises determinísticas para se chegar a uma solução adequada (Ribeiro, 2008).

Maia (2003) utilizou o exemplo de arremessos de dardos aleatoriamente numa área retangular para exemplificar o método de Monte Carlo, com isso ele expõe a integral relacionada a uma função limitada por  $0 \leq f(x) \leq c$ ,  $a \leq x \leq b$ , conforme indicado pela expressão abaixo:

$$I = \int_a^b f(x)dx \quad (3.12)$$

Com o objetivo de realizar o cálculo do valor numérico por meio da Eq. 3.12, considera-se o retângulo de área  $(b - a)c$ , como mostra a Figura 3.4, plotando dentro dos limites da integral  $f(x)$ . O valor da integral seria a área hachurada limitada pela curva de  $f(x)$  dentro do intervalo  $(a, b)$ . Seguindo o exemplo dos dardos, pode-se dizer que  $N_H$  são os acertos sobre a região hachurada e  $N_M$  são os erros. Com a hipótese de uniformidade e um amplo estoque de dardos, a integral pode ser estimada por:

$$I \approx c(b - a)P \quad (3.13)$$

Onde:

$N_H$  = Dardos que atingiram a região hachurada;

$N_M$  = Dardos que não atingiram a região hachurada;

$N = N_H + N_M$ ;

$P = N_H/N$ , é a probabilidade dos acertos.

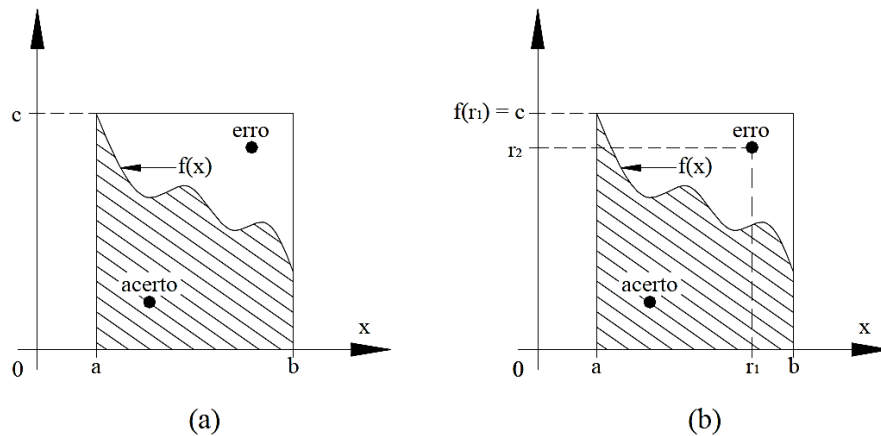


Figura 3.4: Método Monte Carlo, mostrando a função de integração com o exemplo de arremesso de dardos (Maia 2003) em (a) indicando a área de possibilidade de erro e em (b) marcação da equação da possibilidade de erro.

A razão  $N_H/(N_H+N_M)$  pode ser considerada como a probabilidade de acertos. Na analogia, pode-se substituir os dardos por números aleatórios uniformemente distribuídos  $r_1$  e  $r_2$ , sendo que  $a \leq r_1 \leq b$  e  $0 \leq r_2 \leq c$ . Na Figura 3.4 (b), a área fora do alvo é representada quando  $r_2 > f(r_1)$ , enquanto a condição  $r_2 < f(r_1)$  define a região do alvo (área limitada pela curva  $f(x)$ ). A Eq. 3.12 fornece a integral quando o processo acima é repetido para uma extensa quantidade de pares de números aleatórios, sendo esta metodologia denominada de Monte Carlo do “acerto ou erro”.

O método de Monte Carlo também é muito conhecido como uma ferramenta de criação de variáveis aleatórias uniformes, que são obtidas por meio de análises determinísticas, seguindo a equação de recorrência:

$$X_N = A \cdot x_{N-1} \cdot (\text{mod} M) \quad (3.14)$$

Onde  $M$  e  $A$  são números inteiros positivos. A notação  $x = y \pmod{M}$  significa que  $x$  é o resto da divisão do número  $y$  por  $M$ . É fixado um valor inicial  $x_0$  (geralmente um valor desconhecido) o qual é, então, multiplicado por  $A$  e operado pelo  $\text{mod} M$ , resultando no novo termo  $x_1$ .

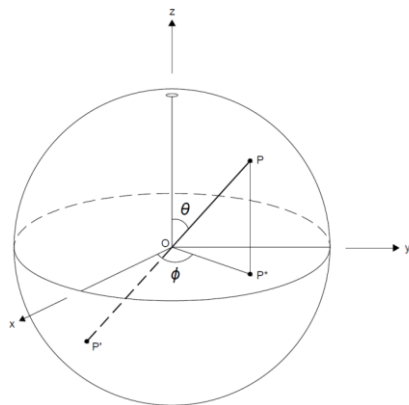
Conforme Silva (2006), a maior precisão, quanto aos resultados gerados pelo método de Monte Carlo, está ligada a um número maior de repetições envolvidas, requerendo-se, portanto, muitas iterações para a avaliação da estabilidade de taludes por este artifício, por exemplo.

A Simulação de Monte Carlo é utilizada na avaliação de fenômenos que podem se caracterizar por um comportamento probabilístico. Por meio da geração de números aleatórios,

permitindo resolver uma grande quantidade de problemas com a simulação de cenários e o posterior cálculo de um valor esperado. Esse método admite a implantação de hipóteses adicionais nas previsões.

Essa metodologia permite determinar a função de distribuição de frequência de variáveis dependentes analisadas mediante a geração de números aleatórios uniformes que representam as variáveis independentes. Esse método considera a variável dependente como a função da variável independente  $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ . São atribuídos valores de frequência dentro das variáveis  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  e se avalia a função  $y$  para os valores. O processo se repete quantas vezes for necessário para conseguir a convergência da distribuição de probabilidade.

Para que a simulação seja aplicada em dados de estruturas geológicas, existe a necessidade do tratamento dos dados geológicos estruturais, ou seja, é preciso realizar a transformação das medidas *dip dip-direction* (mergulho e rumo do mergulho da estrutura geológica) em cossenos diretores  $D_x, D_y$  e  $D_z$ , utilizando a metodologia de Fisher *et al* (1993), onde o valor de *dip* é transformado em  $\theta$  pela equação 3.15 e o valor de *dip-direction* em  $\varphi$  pela equação 3.16:



$$\theta = 90^\circ - dip \quad (3.15)$$

$$\varphi = 360^\circ - (dipdirection - 90^\circ) \quad (3.16)$$

Figura 3.5: Demonstração das coordenadas  $\theta$  e  $\varphi$  utilizadas para o cálculo dos cossenos diretores utilizados na análise de Monte Carlo (Fisher, 1993).

Já os cossenos diretores são obtidos pelas seguintes equações:

$$\sin\theta \cdot \cos\varphi = Dx \quad (3.17)$$

$$\sin\theta \cdot \sin\varphi = Dy \quad (3.18)$$

$$\cos\theta = Dz \quad (3.19)$$

Depois de transformados os valores em cossenos diretores, para a realização da simulação de Monte Carlo é necessário conhecer a distribuição amostral do dado, por isso, são criados histogramas a fim de se obter uma distribuição conhecida. A partir disso, a primeira etapa da simulação é a criação de dados aleatórios dentro de uma distribuição conhecida.

Caso o dado não tenha uma distribuição normal (distribuição Gaussiana), ou uma distribuição que seja conhecida, é necessária a conversão dos dados numa curva conhecida, mais comumente a distribuição normal. Existem várias técnicas de geração de números aleatórios, a mais comum se baseia na distribuição da função acumulada para qualquer variável contínua de distribuição. No caso de dados são circulares as distribuições são elipsoidais para esse tipo de dados para que a simulação possa ser realizada.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Ang, A.H.S. & Tang, W. 2007, Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering. John Wiley & Sons, New York, USA, 420 p.
- Assis, A.P., Espósito, T.J., Gardoni, M.G., Silva, P.D.E.A., Maia, J.A. 2012, Métodos estatísticos e probabilísticos em geotecnia. Apostila Publicação G. AP-002/2012, UnB, Brasília, Distrito Federal, 278 p.
- Azevedo, G.F. 2015, Sistema de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais. Tese de Doutorado, Publicação G.TD - 107/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 254 p.
- Baecher, G.B., Christian, J.T., 2003, Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley, Chichester, UK, 618 p.
- Costa, E.A. 2005, Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 160 p.
- Duncan, J.M. 2000, Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(4): 307-316.
- Einstein, H. 2003, Uncertainty in Rock Mechanics and Rock Engineering - Then and Now. 10th ISRM Congress, ISRM, Sandton, South Africa, 1: 281-293.

- Fisher N. I., Lewis T., Embleton, B. J. J. (1993) Statistical analysis of spherical data. Cambridge University Press, New York, USA, 320 p.
- Flores, E.A.F. 2008, Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo. Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, RJ, 178 p.
- Gitirana, J. F. N. 2005, Weather-Related Geo-Hazard Assessment Model For Railway Embankment Stability. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 411 p.
- Griffiths, D.V., Fenton, G.A. & Tveten, D.E., 2002, Probabilistic geotechnical analysis: How difficult does it need to be? Proceedings of the International Conference on Probabilistics in Geotechnics: Technical and Economic Risk Estimation, R. Pottler, H. Klapperich & H. Schweiger (eds.), United Engineering Foundation, New York, USA, pp. 3-20.
- Hachich, W., Falconi F.F., Saes, J.L., Frota, R.G.Q., Carvalho, C.S., Niyama, S. (eds.), 1998, Segurança das fundações e escavações. Fundações: Teoria e prática, Pini, São Paulo, SP, pp. 197-208.
- Journel, A. G., 1983, Non-parametric estimation of spacial distribution. Math Geology, volume 15, p.445-468.
- Journel, A. G., Huijbregts and C. J., 1978, Mining geostatistics. Vol. 600. London: Academic press.
- Koike, K., Matsuda S., 2005, "Spatial modeling of discontinuous geologic attributes with geotechnical applications." Engineering Geology 78.1-2: 143-161.
- Lacasse, S., Nadim, F., 1996, Uncertainties in Characterizing Soil Properties. Uncertainty in the Geologic Environment: from theory to practice, C.D. Shackleford, P.P. Nelson & M.J.S. Roth (eds.), ASCE, New York, USA, pp. 49-75. Landim, P. M. B., 2003, Análise estatística de dados geológicos. Unesp. 260 p.
- Landim, 2003
- Leuangthong, O., Deutsch, C. V., 2008, Geostatistics banff. Vol. 14. Springer Science & Business Media.



- Luzi, L., Pergalani, F., Terlien, M. T. J., 2000, Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. *Engineering Geology*, 58: 313-336.
- Maia, J.A.C. 2003, Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rochas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 228 p.
- Montoya, C.A.H., 2013, Incertezas, vulnerabilidade e avaliação de risco devido a deslizamento em estradas. [Tese de Doutorado], Universidade de Brasília, Brasília, DF, 273 p.
- Montoya, C.A.H. & Assis, A.P., 2011b, Tools for reliability analysis in geotechnical engineering: application (in Spanish). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18): 79-86.
- Morgenstern, N.R., 1995, Managing Risk in Geotechnical Engineering. Proc. 10th Panamerican Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, SMMS, Guadalajara, México, 4: 2-126.
- Refice, A., Capolongo, D., 2002, Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment. *Computer & Geosciences*, 28: 735-749.
- Restrepo, P.A.I., 2011, Avaliação do Risco Aceitável por Escorregamentos de Encostas em Regiões Tropicais Montanhosas: Caso de Aplicação, Medellín-Colômbia. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 204 p.
- Ribeiro, R. C. H., 2008, Aplicações de probabilidade e estatística em análises geotécnicas. Tese de doutorado em Engenharia Civil Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008, pp 30-112.
- Rilho, A.S., 2011, Aplicação de métodos probabilísticos e análise da decisão em projetos de fundações profundas. Trabalho de diplomação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 76 p.
- Stevens, S.S. 1946, On the theory of scales of measurements. *Science* volume 103 n° 2684 p. 677-680.
- Schweiger, H. F., & Peschl, G. M., 2005, Reliability analysis in geotechnics with the random set finite element method. *Computers and Geotechnics*, 32(6), 422-435.

- Silva, E.M., 2006, Análise de Estabilidade de Taludes em Solos de Alteração de Rochas Metamórficas do Quadrilátero Ferrífero. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 143 p
- Teng, Y., Koike T., 2007, Three-dimensional imaging of a geothermal system using temperature and geological models derived from a well-log dataset. *Geothermics* 36.6: 518-538.
- Whitman, R.V., 1984, Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *Journal of Geot. Eng.*, 110(2): 143-188.
- Yamamoto, J. K., 2001, Avaliação e classificação de reservas minerais. Vol. 38. Edusp. 240 p.
- Yamamoto, J. K., Landim, P. M. B. 2013, *Geoestatística: conceitos e aplicações*. Oficina de textos, 215 p.
- Yamamoto, J. K., Mao, X. M., Koike, K., Crósta, A. P., Landim, P. M. B., Hu, H. Z., Yao, L. Q. 2012, Mapping an uncertainty zone between interpolated types of a categorical variable. *Computers & Geosciences* 40: 146-152.

**CAPÍTULO 4 - TRIDIMENSIONAL GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL MODEL  
CONSTRUCTED BY GEOSTATISTICAL INTERPOLATION**

Bruna Catarino Xavier

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.

E-mail address: [brunacatarino@gmail.com](mailto:brunacatarino@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-8303-9151

Marcos Egydio-Silva

Professor, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.

E-mail address: [megydios@usp.br](mailto:megydios@usp.br)

ORCID: 0000-0002-8758-2175

Georg Robert Sadowski

Professor, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.

E-mail address: [sadowski@usp.br](mailto:sadowski@usp.br)

ORCID: 0000-0001-7094-6482

Jorge Kazuo Yamamoto

Professor, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.

E-mail address: [jkyamamo@usp.br](mailto:jkyamamo@usp.br)

ORCID: 0000-0001-8303-9151

---

# Corresponding author. E-mail address: [brunacatarino@gmail.com](mailto:brunacatarino@gmail.com).

Abstract: This paper proposes to construct 3D geological-geotechnical models using the geostatistical interpolation from geotechnical parameters of rocks as lithology, RDQ, fracturing and RMR classification. Generally, the geostatistical interpolation is used to analyze the mining, but this project aims to optimize the prediction of the geological conditions during the initial assessment for infrastructure projects. In this way, the correct predictions of the geological conditions in-depth, allow us to minimize the inherent risks of failures in the predictability of the structural and geometric patterns of the rocky mass in depth. The proposed procedure goals the safety of the workers during a complex enterprise. The control of the expenses, as well as, the enterprise's durability after construction, promotes social, financial, and environmental security. This methodology has been applied using data from the construction of two builds in different places, located in Minas Gerais state (Brazil). We used 43 drill data, 28 from local I and 15 from local II. During the analysis, we carried out all the parameters geomechanical of rocks and the results showed that it is possible to predict the geological conditions using this methodology; it is possible to affirm that geostatistical interpolation has been effective in the evaluation of geomechanical parameters.

Keywords: geotechnical application, geostatistics, 3D modeling, rock characterization.

## **CAPÍTULO 5 - CONSTRUCTION OF STRUCTURAL GEOLOGICAL MODEL USING THE MONTE CARLO SIMULATION**

Bruna Catarino Xavier<sup>1</sup>, Marcos Egydio-Silva<sup>1</sup>, Georg Robert Sadowski<sup>1</sup>, Bruno de Assis Silva<sup>2</sup>, Victor Junji Takara<sup>2</sup>

Corresponding author: [brunacatarino@gmail.com](mailto:brunacatarino@gmail.com) ORCID ID 0000-0001-8303-9151

<sup>1</sup> Institute of Geoscience - University of São Paulo, São Paulo, Brazil

<sup>2</sup> Institute of Mathematics and Statistics - University of São Paulo, São Paulo, Brazil

### **Abstract**

To optimize the prediction of structural geological conditions in the underground as of data collected at the surface, due to the usual great uncertainties involved, we discuss new perspectives for the construction of structural geological models, bearing in mind the common doubts involved and their implications in the safety of infrastructure works, mining, etc. This paper presents a statistical simulation applied to structural geological measures (*dip-dip direction*) obtained from schists during the design and construction of civil works through a correlation between surface data with different depth levels. Angular structural geological measures of joints and foliations converted in direction cosines were subjected to the PERMANOVA test to verify the amplitude of differences at different depth levels. The asymptotic results allowed to determine regions of confidence built around centroids through statistical simulation, allowable consistency was considered in regions where the differences in the simulated values were small enough from a practical point of view, considering that the difference between joint structures and foliation structures is smaller in the former. The foliation is a characteristic structure of rock deformation.

**Keywords:** Structural Geology, Applied Geology, Monte Carlo Simulation Method, Geotechnics



---

## CAPÍTULO 6 – THE TECTONIC STRESS INFLUENCE ON WEDGE STABILITY IN TUNNELS

Bruna Catarino Xavier, Marcos Egydio-Silva, Georg Robert Sadowski

Corresponding author: *brunacatarino@gmail.com* ORCID ID 0000-0001-8303-9151

*Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo*

### **Abstract**

This paper describes the importance of tectonic action during the kinematic analysis of the discontinuities present in massive rock. Firstly, the stereographic projection was used to identify the intersections of discontinuities plans, which can form wedge (as critical as safe wedges). From the wedge formed, the simulation stability was elaborated jointly with the position of tunnel, enabling to estimate safety factors in different conditions of stress. The measurements used in the application were obtained during the structural mapping of than adduction tunnel, where 314 discontinuities measurements were collected. It was used the *DIPs* software to identify the intersections of discontinuities plans, that showed an average of 37% of critical wedges along the tunnel. *Unwedge* software simulated the critical wedge-formation in several positions in the tunnel direction. The main result shows that the critical wedge was formed in the roof with the safety factor (SF) zero, indicating impending landslide since for the non-occurrence of catastrophic disasters, an FS of at least 1.5 is required. Considering the stress influence (compression and distention system) it is possible to indicate that the distention system contributed to higher instability in the critical wedge, while the compressive system increases the wedge stability, acting the opposite way.

**Keywords:** Geotechnical analyses, tunnel stability, tension tectonics, discontinuities analysis, tunnel modeling.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Institute of Geoscience, University of São Paulo, R. do Lago 562, São Paulo SP, Brazil





## CAPÍTULO 7 - INTEGRAÇÃO DOS ARTIGOS

A principal meta da tese é a otimização dos métodos utilizados na avaliação de maciços rochosos perante sua estabilidade geológica e geotécnica. Os capítulos 4, 5 e 6 mostram os artigos resultantes de cada método apresentado e discutido.

Os dados utilizados como base para a aplicação das análises proporcionaram subsídios para a construção de modelos geológicos e geotécnicos tridimensionais aplicando interpolação geoestatística, cujos resultados estão detalhados no capítulo 4. Essa etapa da proposta indicou que mesmo em dados classificados como variáveis categóricas, como são os parâmetros geológicos e geotécnicos: litologia, classificação de fraturamento, índice RQD e classificação RMR, a interpolação geoestatística, comumente usada em análises voltadas a mineração; por exemplo no cálculo de teor de minérios, se mostrou muito eficaz para identificação e visualização de áreas instáveis perante as condições geotécnicas de maciços rochosos.

Em complementação aos modelos produzidos e detalhados no capítulo 4, os dados das medidas de descontinuidades foram utilizados para uma análise paralela, descrita no artigo publicado e apresentado no capítulo 5. Para viabilizar essa análise, as medidas das descontinuidades, em *dip/dipdirection*, foram transformadas em cossenos diretores e analisadas, estatisticamente, para possibilitar que a simulação de Monte Carlo obtivesse sucesso. Para uma mesma unidade geológica, a simulação foi efetuada após algumas etapas necessárias para o tratamento dos dados, onde foram utilizadas as medidas de foliação e fraturas/descontinuidades, as quais foram coletadas em superfície e simuladas para os dados em profundidade. É fundamental ressaltar que em litologias heterogêneas, haveria a necessidade do acréscimo de uma nova variável dentro da simulação, portanto, isso seria uma inovação para trabalhos futuros.

No terceiro artigo, examinado no capítulo 6, as informações provenientes das medidas da simulação de Monte Carlo descrita no artigo indicado no capítulo 5, foram aplicadas objetivando um diagnóstico sobre a estabilidade em túneis. A análise em paredes de túneis é um tema conhecido, entretanto com referências e discussões incipientes sobre a influência das tensões tectônicas nessa investigação. Utilizando-se de ferramentas e *softwares* específicos para o cálculo desse tipo de análise, a investigação levou em consideração os sistemas regionais compressivos e distensivos. Os resultados do comportamento das descontinuidades em relação à estabilidade em função dos esforços regionais foram primorosos, pois mostraram uma

influência significativa nas análises de estabilidade quando considerado o sistema de tensões que está atuante na área pesquisada.

A aplicabilidade das três técnicas utilizadas para avaliação de maciços rochosos, embora cada um com uma meta distinta, mostraram-se eficazes e abrem novas discussões referente a utilidade de novos métodos para construções de modelos geológicos-geotécnicos para a aferição do comportamento dos maciços rochosos perante a intervenção antrópica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ang, A.H.S., Tang, W., 2007, Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering. John Wiley & Sons, New York, USA, 420 p.
- Assis, A.P., Espólito, T.J., Gardoni, M.G., Silva, P.D.E.A. & Maia, J.A. (2002). Métodos estatísticos e probabilísticos em geotecnia. Apostila Publicação G.AP-002/2012, UnB, Brasília, Distrito Federal, 278 p.
- Azevedo, G.F., 2015, Sistema de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais. [Tese de Doutorado, Publicação G.TD - 107/15]: Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 254 p.
- Baecher, G.B. & Christian, J.T., 2003, Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley, Chichester, UK, 618 p.
- Brajnikov, B. 1953, A geologia, a fisiografia e a hidrografia da bacia do rio Paranaíba. Carta geológica de reconhecimento da Bacia do Rio Paranaíba, escala 1:1.000.000. Dep. Nac. da Prod. Miner. Div. de águas Brazil. Boletim Fluviométrico no.12, 1953 - (UPMC - <http://jubil.upmc.fr/repons/portal>)
- Costa, E.A., 2005, Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 160 p.
- Duncan, J.M., 2000, Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(4): 307-316.
- Einstein, H., 2003, Uncertainty in Rock Mechanics and Rock Engineering - Then and Now. 10th ISRM Congress, ISRM, Sandton, South Africa, 1: 281-293.
- Flores, E.A.F., 2008, Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo. [Dissertação de Mestrado], PUC, Rio de Janeiro, RJ, 178 p.
- Ge, H., Tu, J., Qin, F. 2011, Analysis of Slope Stability with First Order Second Moment Method. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 5(12): 445-451.
- Gitirana, J. F. N. 2005, Weather-Related Geo-Hazard Assessment Model for Railway Embankment Stability. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 411 p.

- Griffiths, D.V., Fenton, G.A. & Tveten, D.E., 2002, Probabilistic geotechnical analysis: How difficult does it need to be? Proceedings of the International Conference on Probabilistics in Geotechnics: Technical and Economic Risk Estimation, R. Pottler, H. Klapperich & H. Schweiger (eds.), United Engineering Foundation, New York, USA, pp. 3-20. G., 1968. Idade Potássio-Argônio de rochas eruptivas Mesozoicas do Oeste Mineiro e sul de Goiás. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 22. Belo Horizonte. Anais... 1: 139-143.*
- Hachich, W., 1998, Segurança das fundações e escavações. Fundações: Teoria e prática, W. Hachich, F.F. Falconi, J.L. Saes, R.G.Q. Frota, C.S. Carvalho & S. Niyama (eds.), Pini, São Paulo, SP, pp. 197-208.
- Hasui, Y., Mito J.A., 1992, Geologia Estrutural Aplicada, São Paulo, ABGE Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e S.A. Indústrias Votorantim.
- Hasui, Y., Sadowski, G. R., 1976, Evolução geológica do Pré-Cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 6, n. 3, p. 182-200.
- Hasui, Y., Tassinari, C. C. G., Siga Júnior, O., Teixeira, W., Almeida, F. F. M. D., & Kawashita, K., 1980, Datações Rb-Sr e K-Ar do centro-norte do Brasil e seu significado geológico-geotectônico. *Anais*.
- Journel, A. G., 1983, Non-parametric estimation of spacial distribution. *Math Geology*, volume 15, p.445-468.
- Journel, A. G., Huijbregts and C. J., 1978, *Mining geostatistics*. Vol. 600. London: Academic press, 1978.
- Koike, K., Matsuda S., 2005, "Spatial modeling of discontinuous geologic attributes with geotechnical applications." *Engineering Geology* 78.1-2: 143-161.
- Lacasse, S. & Nadim, F. 1996, Uncertainties in Characterizing Soil Properties. *Uncertainty in the Geologic Environment: from theory to practice*, C.D. Shackelford, P.P. Nelson & M.J.S. Roth (eds.), ASCE, New York, USA, pp. 49-75. Landim, P. M. B., 2003, *Análise estatística de dados geológicos*. Unesp. 260 p.
- Leuangthong, O., Deutsch, C. V. 2008 eds. *Geostatistics banff 2004*. Vol. 14. Springer Science & Business Media.
- Luzi, L., Pergalani, F. & Terlien, M. T. J. (2000), Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. *Engineering Geology*, 58: 313-336.
- Maia, J.A.C., 2003 Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rochas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 228 p.

- Milani, E. J., França, A. B., & Medeiros, R. A., 2007, Roteiros Geológicos. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 15 (1), 135-162.
- Montoya, C.A.H. 2013, Incertezas, vulnerabilidade e avaliação de risco devido a deslizamento em estradas. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 273 p.
- Montoya, C.A.H. & Assis, A.P., 2011b, Tools for reliability analysis in geotechnical engineering: application (in Spanish). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18): 79-86.
- Morgenstern, N.R., 1995, Managing Risk in Geotechnical Engineering. Proc. 10th Panamerican Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, SMMS, Guadalajara, México, 4: 2-126.
- Pastore, E. L., Fontes, R. M., Oliveira, A. M. S., & Brito, S. N. A., 1998, Geologia de Engenharia. *Caracterização e Classificação de Solos Cap*, 12, 197-210.
- Pedrosa-Soares, A., Pacheco, F.E.R.C., Serrano, P.M., Caxito, F.A., Moura, C.D. Quintão, D.A. 2017, Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais CONDEMIG, Brasil, 1:100.000 (in Portuguese).
- Petri, S. & Fúlfaro, J.V. 1983. *Geologia do Brasil*. São Paulo. T.A. Queiroz – USP. 631p.
- Quintas, M. C. L., 1995, O embasamento da Bacia do Paraná: reconstrução geofísica de seu arcabouço. [Tese de doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.
- Quintas, M.C.L., Mantovani, M.S.M., Zalán, P.V., 1997, Contribuição para o estudo da evolução mecânica da bacia do Paraná. *Boletim de Geociências. PETROBRAS*, Rio de Janeiro, 11 (1/2): 48-73, jan./dez.
- Refice, A. & Capolongo, D. 2002, Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment. *Computer & Geosciences*, 28: 735-749.
- Restrepo, P.A.I. 2011, Avaliação do Risco Aceitável por Escorregamentos de Encostas em Regiões Tropicais Montanhosas: Caso de Aplicação, Medellín-Colômbia. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 204 p.
- Ribeiro, R. C. H. 2008, Aplicações de probabilidade e estatística em análises geotécnicas. Tese de doutorado em Engenharia Civil Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008, pp 30-112.
- Rilho, A.S. 2011, Aplicação de métodos probabilísticos e análise da decisão em projetos de fundações profundas. Trabalho de diplomação, Universidade Federal do Rio Grande do

- Sul, Porto Alegre, RS, 76 p. Stevens, S.S. 1946 On the theory of scales of measurements. *Science* volume 103 n° 2684 p. 677-680.
- Schweiger, H. F., & Peschl, G. M., 2005, Reliability analysis in geotechnics with the random set finite element method. *Computers and Geotechnics*, 32(6), 422-435.
- Silva, E.M. 2006, Análise de Estabilidade de Taludes em Solos de Alteração de Rochas Metamórficas do Quadrilátero Ferrífero. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 143 p.
- Teng, Y., Koike T., 2007 Three-dimensional imaging of a geothermal system using temperature and geological models derived from a well-log dataset. *Geothermics* 36.6: 518-538.
- Whitman, R.V., 1984, Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *Journal of Geot. Eng.*, 110(2): 143-188.
- Yamamoto, J.K., 2001, Avaliação e classificação de reservas minerais. Vol. 38. Edusp. 240 p.
- Yamamoto, J. K., Landim, P. M. B., 2013, Geoestatística: conceitos e aplicações. Oficina de textos, 215 p.