

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

Jean Carlos Meotti

**QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NA MODELAGEM DE  
CONTATOS DE CORPOS ESTRATIFICADOS EM UM DEPÓSITO DE  
FOSFATO USANDO SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA**

Porto Alegre

2023

Jean Carlos Meotti

**QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NA MODELAGEM DE  
CONTATOS DE CORPOS ESTRATIFICADOS EM UM DEPÓSITO DE  
FOSFATO USANDO SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do Título de Geólogo.

Orientador(a): Prof. Dr. Diego Machado Marques

Porto Alegre

2023

### CIP - Catalogação na Publicação

Carlos Meotti, Jean  
QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NA MODELAGEM DE  
CONTATOS DE CORPOS ESTRATIFICADOS EM UM DEPÓSITO DE  
FOSFATO USANDO SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA / Jean Carlos  
Meotti. -- 2023.  
50 f.  
Orientador: Diego Machado Marques.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,  
BR-RS, 2023.

1. Simulação Plurigaussiana. 2. Geoestatística. 3.  
Recursos minerais . 4. Modelagem numérica . 5.  
Mineração. I. Machado Marques, Diego, orient. II.  
Título.

Jean Carlos Meotti

**QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NA MODELAGEM DE  
CONTATOS DE CORPOS ESTRATIFICADOS EM UM DEPÓSITO DE  
FOSFATO USANDO SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Geólogo e aprovado em sua forma final pelo Curso de Geologia

Porto Alegre, 17 de julho de 2023.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Enrique Munaretti (UFRGS)

---

Prof. Dr. Giovani Matte Cioccarri (UFPEL)

---

Prof. Dr. Rommulo Vieira Conceição (UFRGS)

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que trabalharam incansavelmente durante toda uma vida para me proporcionar oportunidades que eles nunca tiveram. Tudo o que faço é por vocês.

Às minhas irmãs Duda, Milena e Caren, que convivem comigo há muito tempo e me ajudam em tudo que eu preciso.

Ao meu sobrinho, que deixou os últimos 3 anos muito mais leves e felizes. Obrigado por me fazer esquecer da UFRGS e da geologia quando estamos juntos.

Aos meus amigos João, Will, Andrey, Leo e Misa. Por tudo aquilo que não precisa ser citado aqui. Em especial ao Ismael, que me proporciona uma morada em Porto Alegre e nada me cobra. Vocês vou levar pra sempre. Obrigado.

Aos amigos que conheci depois, Rooooooooooooooooonaldinho, Lukinhas e Lucca. Grande abraço feras.

E ao amigo que sempre esteve lá. Cunha, valeu a parceria de sempre.

Aos professores Clóvis e Frank. Vocês são exemplos de profissionais, cada um à sua maneira.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Diego Machado Marques. Por toda paciência, compreensão e ensinamentos.

Aos meus colegas e amigos da Braskem, que me ajudaram com incontáveis trocas para que eu pudesse comparecer às aulas e saídas de campo. Em especial ao Tiego e David, meus parceiros do G3.

Maypitaj wañu?

## RESUMO

Técnicas complexas de análise de incerteza vêm sendo cada vez mais aplicadas nas Geociências, sendo largamente utilizadas em Recursos Minerais, Avaliação de Óleo e Gás, Hidrologia e Análises Ambientais. Dessa maneira, a incorporação dessas técnicas por profissionais permite, não só identificar e quantificar formas geológicas, mas também associar um nível de incerteza aos modelos, auxiliando na otimização de processos prospectivos, por exemplo. Hoje, além da etapa de mapeamento de campo, amostragem, descrição de testemunhos e contextualização geológica, essa importante etapa tem sido implementada no dia a dia de trabalho do geólogo. Com o uso de geoestatística, através de simulações, pode-se entender melhor o comportamento de um determinado fenômeno geológico, quantificando e analisando as incertezas e auxiliando na tomada de decisões baseadas em interpretações da realidade. Neste trabalho, foi utilizado um banco de dados de um depósito de fosfato, onde modelos simulados foram utilizados como alternativa para quantificação de incerteza associada à interpretação geológica. A técnica escolhida é a Simulação Plurigaussiana, sendo uma técnica amplamente difundida na avaliação de corpos estratificados, levando em conta a incerteza que cerca esse tipo de domínio. Em vez de usar modelos determinísticos para definir o corpo mineral, baseados apenas na interpretação dos furos de sondagem (que não levam em conta a incerteza dos domínios litológicos em áreas sem informações), este estudo apresenta a simulação Plurigaussiana como uma alternativa para gerar cenários igualmente prováveis do depósito mineral. Como resultados, foram geradas simulações que foram utilizadas para criar os mapas de risco da área estudada, sendo o resultado de cada simulação um cenário provável de ocorrência. Os mapas de risco produzidos a partir das simulações atingem o objetivo de quantificar a incerteza, apontando regiões deficientes de dados, que necessitam maior atenção.

**Palavras-Chave:** Simulação Plurigaussiana, Geoestatística, Recursos Minerais

## ABSTRACT

Complex techniques for uncertainty analysis are increasingly being applied in Geosciences, extensively used in Mineral Resources, Oil and Gas Evaluation, Hydrology, and Environmental Analyses. By incorporating these techniques, professionals can not only identify and quantify geological forms but also associate a level of uncertainty with the models, aiding in the optimization of prospective processes, for instance. Today, in addition to field mapping, sampling, core description, and geological contextualization, this crucial stage has been integrated into the daily work of geologists. Through the use of geostatistics and simulations, a better understanding of the behavior of specific geological phenomena can be achieved, quantifying and analyzing uncertainties, and assisting in decision-making based on interpretations of reality. In this study, a database from a phosphate deposit was utilized, where simulated models were used as an alternative for quantifying uncertainty associated with geological interpretation. The chosen technique is Plurigaussian Simulation, widely diffused in the evaluation of stratified bodies, taking into account the uncertainty surrounding this type of domain. Instead of relying on deterministic models to define the mineral body solely based on the interpretation of drill holes (which do not consider the uncertainty of lithological domains in information-scarce areas), this study presents Plurigaussian Simulation as an alternative to generate equally probable scenarios of the mineral deposit. As a result, simulations were generated and employed to create risk maps of the studied area, with each simulation representing a likely occurrence scenario. The risk maps derived from simulations achieve the objective of quantifying uncertainty, identifying data-deficient regions requiring greater attention.

**Keywords:** Pluri-Gaussian Simulation, Geostatistics, Mineral Resources.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	7
1.1 ÁREA DE ESTUDO .....	8
2 OBJETIVOS E METAS.....	10
3 JUSTIFICATIVA .....	11
4 ESTADO DA ARTE / REFERENCIAL TEÓRICO .....	12
4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA .....	12
4.1.1 Faixa Brasília .....	12
4.1.2 Província Ígnea do Alto Paranaíba .....	15
4.2 COMPLEXOS CARBONATÍDICOS.....	16
4.2.1 Série bebedourítica .....	17
4.2.2 Série foscorítica .....	18
4.2.3 Série carbonatítica .....	19
4.3 TÉCNICAS GEOESTATÍSTICAS.....	20
4.3.1 Análise exploratória dos dados .....	21
4.3.2 Variografia.....	21
4.3.3 Krigagem dos indicadores .....	23
4.3.4 Simulação Estocástica .....	24
4.3.5 Simulação Plurigaussiana .....	25
5 METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO .....	27
5.1 Banco de dados.....	29
5.2 Definição do nível de referência.....	30
5.3 Unfolding .....	30
5.4 Curva de Proporção Vertical (VPC) .....	31
5.5 Regra de truncagem .....	32
5.6 Variografia dos indicadores.....	33
6 RESULTADOS .....	35
7 DISCUSSÕES.....	42
8 CONCLUSÃO.....	43

## 1 INTRODUÇÃO

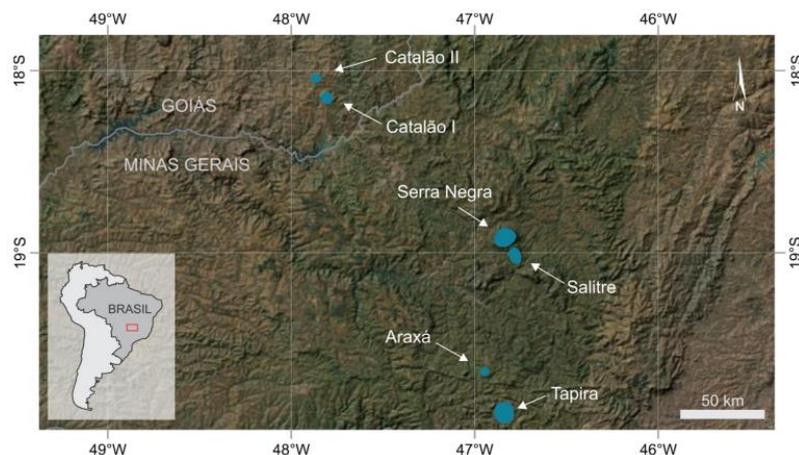
A produção de modelos tridimensionais utilizados para representar a distribuição espacial, as características e a qualidade do minério de fosfato em subsuperfície, é fundamental para a compreensão da geometria, extensão e teor do depósito e para o planejamento eficiente da exploração e produção de fosfato. O processo de modelagem geológica de um depósito de fosfato inicia-se com o mapeamento e coleta de dados de campo, como sondagens, análises de amostras de rocha, levantamentos geofísicos e imagens de sensoriamento remoto, que são utilizados para gerar mapas geológicos e estratigráficos. Esses mapas auxiliam na identificação das unidades geológicas e das estruturas associadas ao depósito de fosfato. Para integrar os dados geológicos, geofísicos e geoquímicos, as técnicas de modelagem numérica são aplicadas na criação de um modelo tridimensional do depósito de fosfato. Essas técnicas, além da modelagem tradicional, podem incluir a interpolação de dados, a geoestatística e a simulação estocástica. A interpolação de dados permite estimar os valores das propriedades do minério em locais não amostrados, enquanto a simulação estocástica auxilia na quantificação da incerteza associada às estimativas. É crucial realizar a validação e atualização do modelo geológico, especialmente durante a exploração e produção do depósito de fosfato. À medida que novos dados são coletados e analisados, o modelo pode ser ajustado e refinado para melhor refletir a realidade do depósito. Isso ajuda a otimizar a extração do minério, minimizar os custos operacionais e garantir a sustentabilidade ambiental da mineração de fosfato. Em resumo, a modelagem geológica de depósitos de fosfato é uma ferramenta essencial para o gerenciamento eficiente dos recursos de fosfato. Integrando dados e utilizando técnicas de modelagem numérica, cientistas e engenheiros podem obter uma visão detalhada do depósito, o que auxilia no planejamento e tomada de decisões informadas no setor de mineração de fosfato.

A incerteza presente nos modelos geológicos é uma questão fundamental nas geociências, visto que as informações acerca das propriedades e geometria das formações geológicas são frequentemente limitadas e esparsas. Tal incerteza pode influenciar de forma significativa a qualidade das decisões baseadas nos modelos. A simulação geoestatística se apresenta como uma abordagem eficiente para gerenciar e quantificar a

incerteza nos modelos geológicos. Esta técnica utiliza algoritmos matemáticos e estatísticos para gerar múltiplas realizações de modelos geológicos equiprováveis, cada uma representando uma possível configuração das propriedades e geometria das formações geológicas. Essas realizações podem ser utilizadas para estimar a variabilidade e incerteza associadas às propriedades geológicas de interesse, como teores de minério, porosidade ou permeabilidade. Existem diversas técnicas de simulação geoestatística, tais como a simulação sequencial Gaussiana, simulação sequencial dos indicadores e simulação de múltiplos pontos. Cada método possui suas próprias vantagens e desvantagens, sendo a escolha do método mais adequado dependente das características do problema geológico em questão e dos dados disponíveis. Utilizando a simulação geoestatística para gerenciar a incerteza nos modelos geológicos, os profissionais das geociências possuem grandes chances de uma tomada de decisão mais assertiva e, assim, podem mitigar os riscos associados aos projetos geológicos.

A área de estudo pertence a uma região de mineração de fosfato. A empresa detentora dos dados necessita melhorar seu banco de dados no que diz respeito a incerteza presente no depósito. A partir da modelagem numérica e aplicando técnicas mais avançadas de geoestatística e simulação Plurigaussiana, é possível obter bons resultados para tais necessidades.

## 1.1 ÁREA DE ESTUDO



**Figura 1:** mapa geral da localização do banco de dados, região da Província Ígnea do Alto Paranaíba (NOVAES, 2018)

O banco de dados utilizado neste projeto possui um termo de confidencialidade, sendo vetada sua localização exata pela empresa detentora. A localização geral desse banco de dados fica dentro dos limites da Província Ígnea do Alto Paranaíba, exemplificado na figura 1, mais especificamente no setor meridional da Faixa Brasília.

O conjunto de dados é composto por 463 furos obtidos por sondagem rotativa diamantada em uma direção vertical. O conjunto de informações passa por variáveis categóricas (litotipos e intemperismo) até teores obtidos por análise geoquímica para 12 óxidos diferentes, totalizando 18.106 amostras.

## 2 OBJETIVOS E METAS

O estudo busca atingir o seguinte objetivo:

- Avaliação e quantificação da variabilidade e incerteza do corpo de minério de fosfato utilizando métodos de simulação Plurigaussiana e modelagem geológica.

### **3 JUSTIFICATIVA**

A empresa detentora dos dados necessita ampliar e melhorar as informações sobre a incerteza presente no depósito, e as técnicas utilizadas neste trabalho oferecem bons resultados em um curto espaço de tempo e boa confiabilidade.

## 4 ESTADO DA ARTE / REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

#### 4.1.1 Faixa Brasília

A Faixa Brasília consiste em uma região localizada na borda ocidental do Craton do São Francisco, repleta de dobramentos datados do Neoproterozoico, abrangendo partes dos Estados de Tocantins, Goiás e Minas Gerais, possuindo dimensões aproximadas de 1200 Km de comprimento por 300 Km de largura. Sua evolução é considerada complexa e possivelmente diacrônica, com a porção meridional resultado da interação entre os Craton do São Francisco e Paranapanema, enquanto a porção setentrional deriva da interação entre os Craton do São Francisco e Amazônico. Ademais, durante o processo orogênico que deu origem à Faixa Brasília, houve ainda a participação de outras unidades tectônicas, incluindo o Maciço de Goiás, arcos magmáticos Neoproterozoicos e sequências sedimentares meso-Neoproterozóicas (UHLEIN *et al.*, 2012).

A região da Faixa Brasília é dividida em meridional (região do depósito) e setentrional. O setor meridional é classificado como um cinturão de dobras e empurrões com idade aproximada de 790 – 600 Ma, formado durante o ciclo Brasileiro pela inversão tectônica de uma bacia do tipo *rift* com sequências sedimentares datadas de 900 – 800 Ma ocorridas na borda oeste do Craton do São Francisco (FUCK *et al.*, 1993; BROD, 1999). Nessa porção da Faixa Brasília, as relações estratigráficas entre as várias unidades regionais foram obliteradas devido à intensa deformação e metamorfismo relacionados à orogênese Neoproterozoico. Consequentemente, rochas de várias origens e padrões metamórficos são justapostas por falhamentos de diferentes estilos e idades (SILVA, 2003).

Na região centro-sul de Goiás, o Setor Meridional (figura 2) exhibe uma estrutura predominantemente orientada no sentido norte-sul, porém com uma inflexão para WNW, especialmente na área de Pirenópolis, formando assim um arco com concavidade voltada para o sudoeste. A Faixa Brasília apresenta um gradiente metamórfico inverso, que se estende da fácies xisto verde de baixo grau (domínio externo) até a fácies anfíbolito de alto grau (domínio

interno). A existência de rochas menos metamorizadas subjacentes a rochas mais metamorizadas sugere que as inversões tectônicas ocorreram após o pico do metamorfismo (UHLEIN *et al.*, 2012).

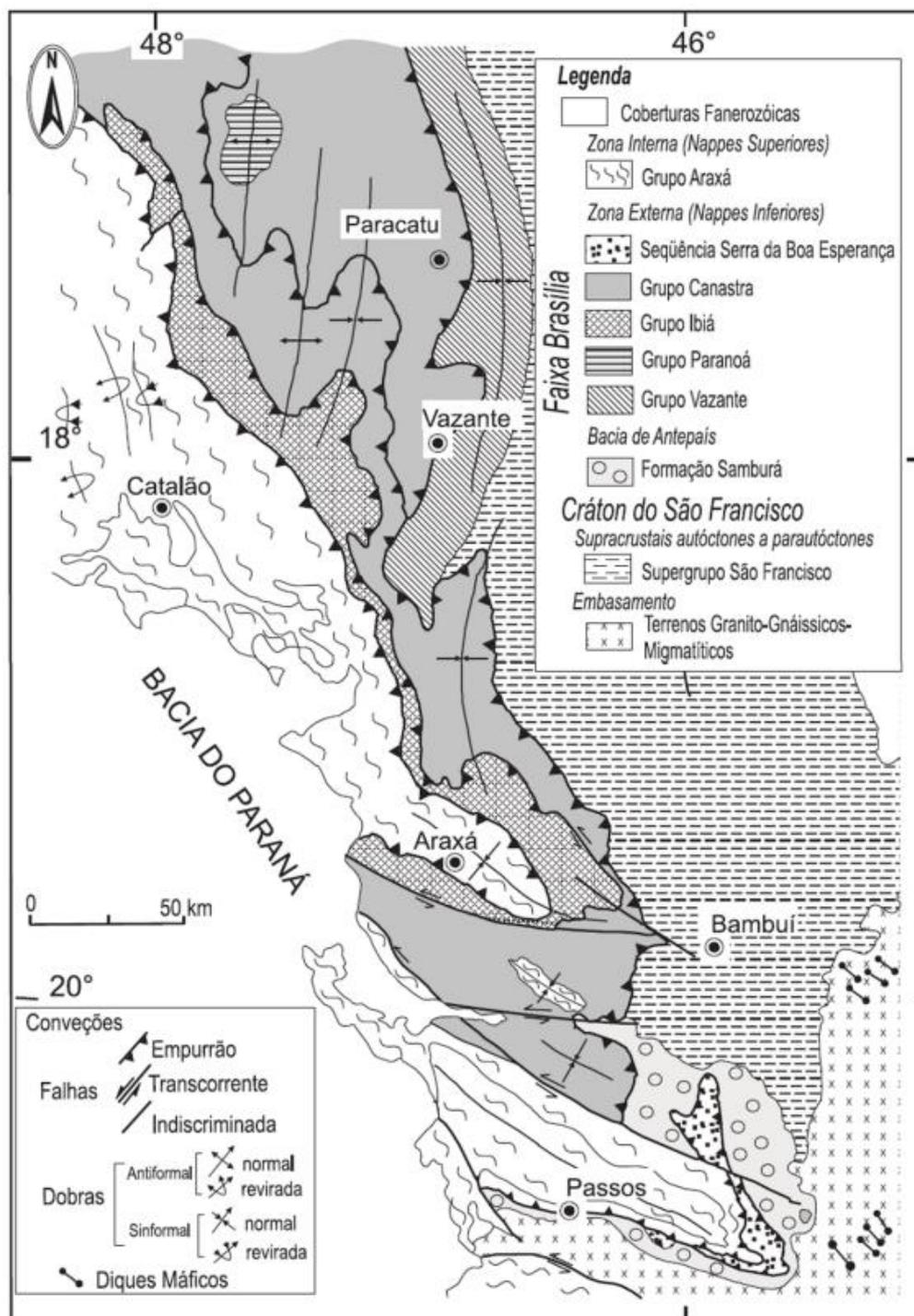


Figura 2: mapa estrutural da porção sul da Faixa Brasília (SILVA *et al.*, 2006).

Segundo Silva (2003), a evolução da deformação e do grau metamórfico reflete uma clara vergência da Faixa Brasília em direção ao Craton do São Francisco que levou à proposição de uma compartimentação:

Zona Externa: constituída por unidades metassedimentares (grupos Paranoá, Canastra, Ibiá e Vazante) e porções do embasamento. O metamorfismo encontrado nessa região é de fácies xisto verde. As fácies sedimentares correspondentes à margem passiva são predominantes na região.

Zona Interna: região originada por sucessões metassedimentares e metavulcanossedimentares, incluindo fácies de plataforma distal (com predominância de pelitos), de talude e elevação continental (Grupo Araxá). Inclui rochas metaultramáficas interpretadas como restos de assoalho oceânico, como por exemplo nas regiões de Abadia dos Dourados, Abadiânia e Araxá. O metamorfismo encontrado nessa zona é de fácies xisto verde superior e comumente atinge a fácies anfíbolito, chegando a granulito; possui padrões deformacionais relativamente mais complexos que a zona externa;

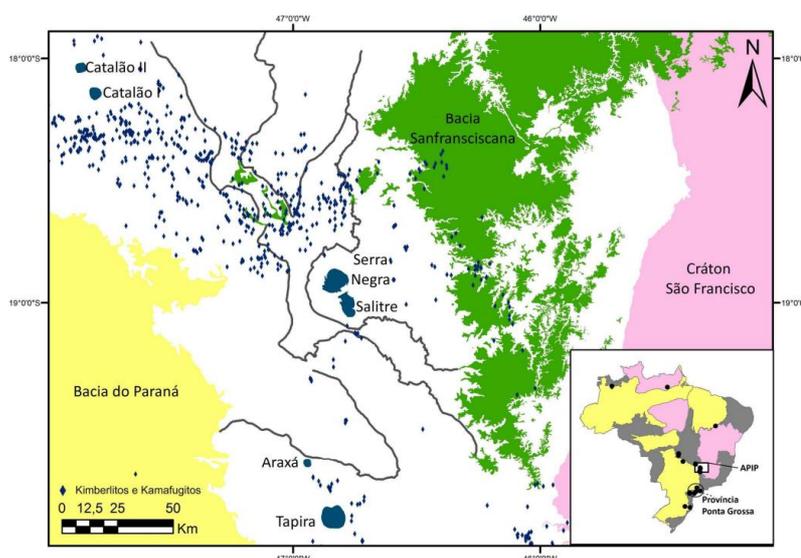
Maciço Goiano: consiste em um fragmento continental gerado por terrenos ortognáissicos paleoproterozoicos recobertos pelo Grupo Serra da Mesa, terrenos granitogreenstone arqueanos e pelo manto alóctone de metassedimentos atribuídos ao Grupo Araxá. Próximo a eles, encontram-se as sequências vulcano-sedimentares de Juscelândia, Coitezeiro e Palmeiropolis contíguos aos complexos máfico-ultramáficos Barro Alto, Niquelândia e Cana Brava.

Arco magmático de Goiás: compreende os terrenos ortognáissicos e as sequências vulcano-sedimentares Neoproterozoicas expostas entre Sanclerlândia e Bom Jardim de Goiás, estendendo-se para norte, até Mara Rosa e Porangatu. Evidencia a fase pré-colisional, quando o consumo de litosfera oceânica gerou magmatismo juvenil e híbrido.

#### 4.1.2 Província Ígnea do Alto Paranaíba

A Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP). Se constitui como uma das maiores províncias ultramáficas-ultrapotássicas do mundo, e uma das únicas associações kamafugíticas-carbonatíticas registradas (Gibson *et al.*, 1995; BROD *et al.*, 2000). Está localizada na parte oeste do Estado de Minas Gerais e sul do Estado de Goiás (figura 3), originada por um magmatismo intenso de característica alcalina. Tal atividade resultou na formação de corpos intrusivos diversos como condutos, diques, diatremas e complexos carbonatíticos, sendo estes últimos, intrusões formadas por diferentes fases, derivados de rochas da série bebedourítica, carbonatítica e foscóritica (BROD *et al.*, 2000; BROD *et al.*, 2004; GOMIDE, 2015). Datada do Neocretáceo, a PIAP está relacionada a uma estrutura alongada de direção NW-SE denominada Arco do Alto Paranaíba. As rochas pré-cambrianas constituintes das zonas interna e externa da Faixa Brasília, foram intrudidas pelos magmas de composição alcalina (FUCK *et al.*, 1994).

Uma grande diversidade litológica ocorre dentro da PIAP, originadas por processos de fusão parcial de partes metassomatizadas do manto. Esses processos ocorreram em diferentes níveis de enriquecimento, profundidades de fusão diversas, diferentes pontos de estabelecimento na crosta além de eventos com complexidade elevada ocorrendo de forma concomitante e interligada, como cristalização fracionada e imiscibilidade de líquidos (BROD, 1999; BARBOSA, 2009; BROD *et al.*, 2012; GOMIDE, 2015).



**Figura 3:** mapa representativo da Província Ígnea do Alto Paranaíba (GOMIDE, 2015)

## 4.2 COMPLEXOS CARBONATÍTICOS

Na região da Província do Alto Paranaíba, há intrusões carbonatíticas e ultramáficas de grandes dimensões (de até 65 km<sup>2</sup>), incluindo os complexos de Catalão I e II, localizados no sul de Goiás, e Serra Negra, Salitre I, II e III, Araxá e Tapira, situados no oeste de Minas Gerais. Esses complexos estão encaixados em rochas metamórficas Neoproterozoicas dos domínios interno e externo da Faixa Brasília, as quais possuem estruturas dômicas típicas (BROD *et al.*, 2000; BROD *et al.*, 2004).

De acordo com Mariano e Marchetto (1991) e Danni *et al.*, (1991), a região é caracterizada pela predominância do intemperismo tropical e pela formação de padrões de drenagem centrípeta a partir de rochas encaixantes mais resistentes. Essas condições resultaram em uma espessa cobertura de solo na maioria dos complexos, levando à concentração de fosfato e nióbio, que são tradicionalmente explorados na área, além de concentrações de titânio ainda não aproveitadas comercialmente. A ocorrência de afloramentos é rara, o que limita o acesso a amostras para estudos petrográficos e geoquímicos aos testemunhos de sondagem e às minas em operação na área (BROD *et al.*, 2000; BROD *et al.*, 2004).

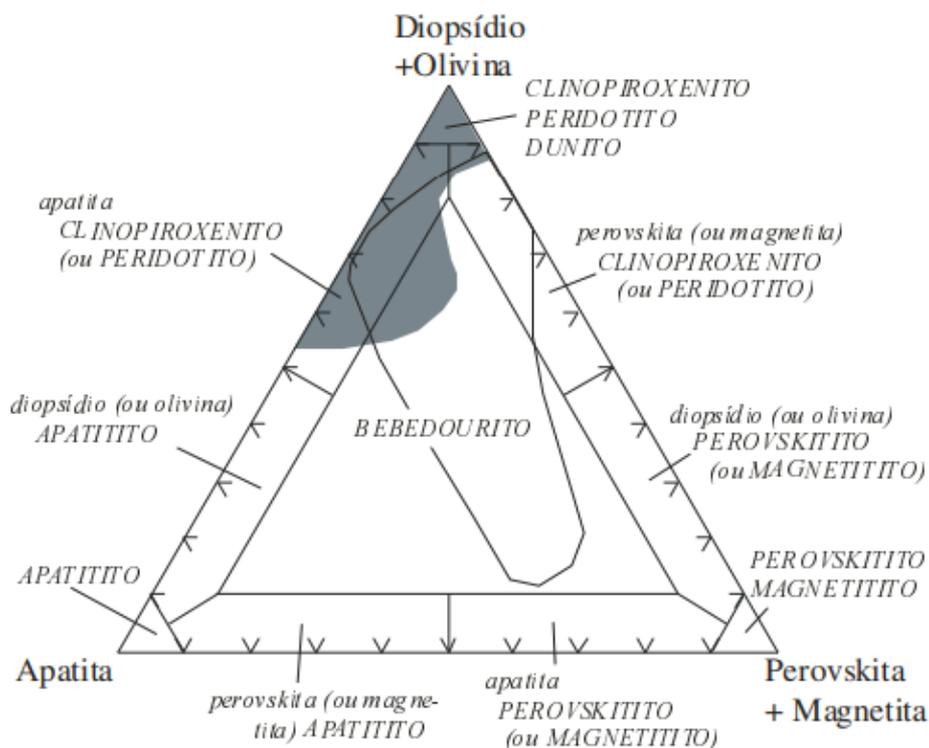
Complexos carbonatíticos estão associados ao magmatismo alcalino sódico onde as rochas silicáticas presentes nesses complexos são geralmente da série ijolítica (Jacupiranguito-Melteigito-Ijolito-Urtito), que apresenta variações na proporção de clinopiroxênio e nefelina essenciais. No entanto, foram posteriormente reconhecidos alguns exemplos de carbonatitos associados ao magmatismo ultrapotássico, como a associação carbonatito-kamafugito da Itália (LE BAS, 1985; STOPPA & CUNDARI, 1995; STOPPA *et al.*, 1997; BROD *et al.*, 2004).

Os complexos carbonatíticos na Província Ígnea do Alto Paranaíba pertencem à categoria de carbonatitos associados a magmatismo ultrapotássico. Eles diferem dos carbonatitos associados a magmatismo alcalino sódico, já que apresentam uma quase ausência de nefelina e não possuem rochas da série ijolítica. Esses complexos podem ser compostos por proporções variáveis de rochas pertencentes a três séries de diferenciação distintas: bebedourítica, foscorítica e carbonatítica. A evolução dessas rochas

está intimamente relacionada com processos como cristalização fracionada e/ou imiscibilidade de líquidos, a partir de magmas primitivos de afinidade kamafugítica (flogopita picritos). As rochas ultramáficas primárias foram transformadas em flogopititos por metassomatismo alcalino de intensidade variável, enquanto as encaixantes neoproterozóicas foram fenitizadas em grau variável (LLOYD; BAILEY, 1991; GIBSON *et al.*, 1995b; BROD, 1999; BROD *et al.*, 2000; BROD *et al.*, 2004).

#### **4.2.1 Série bebedourítica**

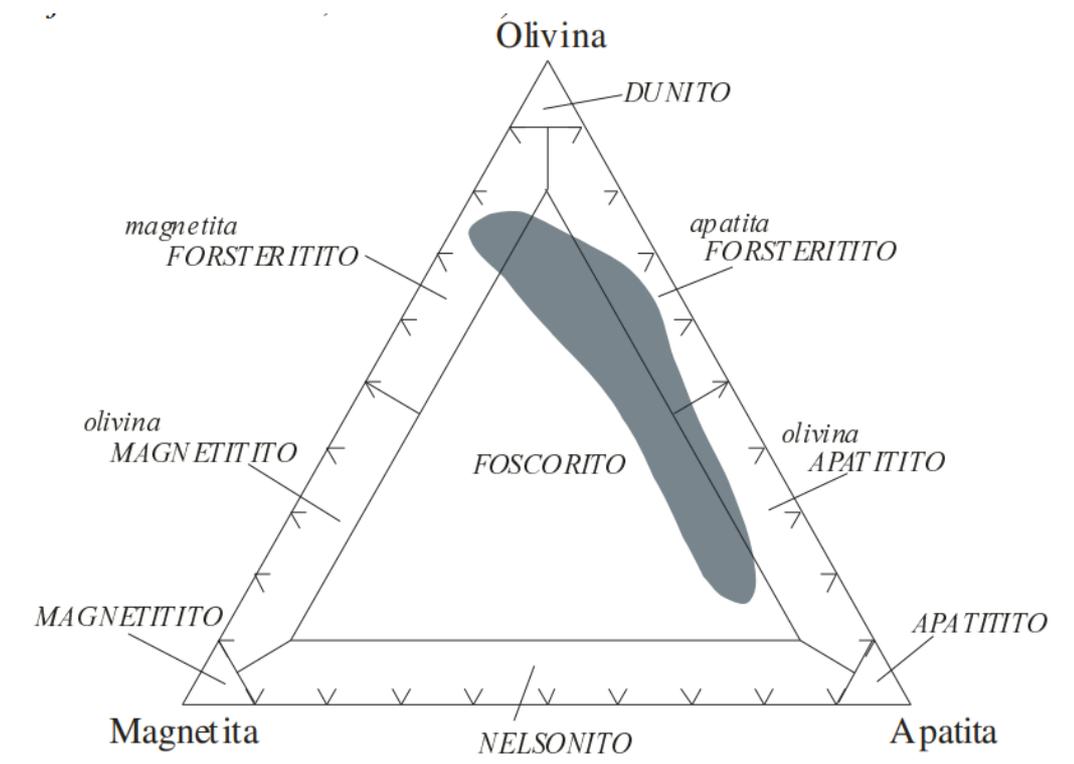
A série bebedourítica, demonstrada na figura 4 é composta por rochas que resultam da cristalização fracionada de um magma silicático ultrapotássico, também conhecido como flogopita picrito (BROD, 1999; BROD *et al.*, 2000). Do ponto de vista petrográfico, apresentam variações modais nas quantidades de olivina, clinopiroxênio, apatita, perovskita, magnetita e flogopita. Nos complexos de Tapira e Salitre, são bem preservadas as feições de acamamento magmático, onde se intercalam leitos de bebedourito típico com leitos de apatitito, perovskitito ou magnetitito. Sienitos podem ocorrer como termos finais nessa série de diferenciação. Diferente das séries ijolítica, carbonatítica e foscorítica, até o momento não há um sistema formal de classificação petrográfica para os termos da série bebedourítica (LLOYD; BAILEY, 1991; GIBSON *et al.*, 1995b; BROD, 1999; BROD *et al.*, 2000; BROD *et al.*, 2004).



**Figura 4:** proposta de classificação da série bebedourítica (BROD *et al.*, 2004).

#### 4.2.2 Série foscorítica

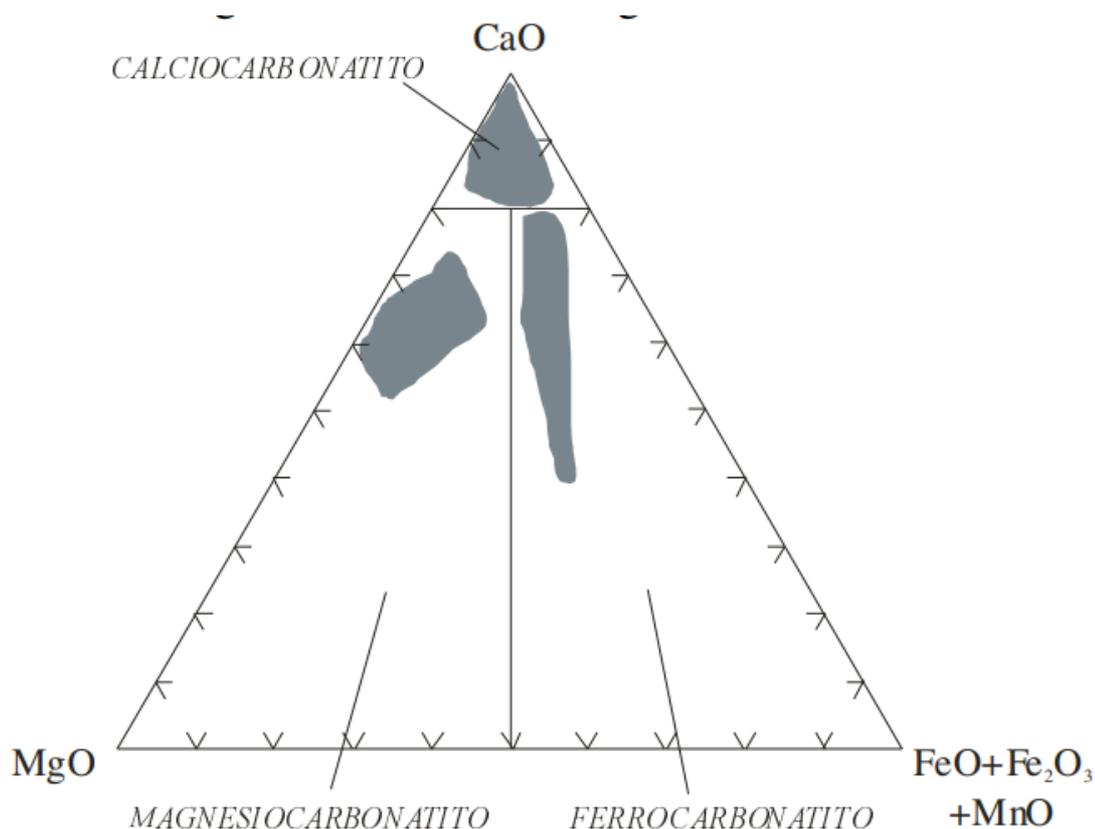
A série foscorítica, demonstrada na figura 5, é composta por rochas formadas a partir de magmas fosfáticos, e seus termos são definidos por variações modais de apatita, magnetita e olivina. De acordo com Yegorov (1993), o foscorito *sensu stricto* é composto por proporções equilibradas dessas três fases, mas dunitos, magnetititos, apatititos e nelsonitos (apatita + magnetita) também são comuns. Segundo Brod *et al* (2004), as rochas dessa série estão presentes em todos os complexos carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba e são particularmente comuns em Catalão e Araxá.



**Figura 5:** proposta de classificação para a série foscorítica (BROD *et al.*, 2004).

#### 4.2.3 Série carbonatítica

Segundo Brod *et al.*, (2004) a série carbonatítica, demonstrada na figura 6, consiste em rochas contendo mais de 50% de carbonatos, essencialmente dolomita, calcita, calcita+dolomita, ou dolomita+Fe-dolomita/ankerita, com grande variedade de acessórios. Segundo Le Maitre *et al.*, (2002), a classificação de carbonatitos deve ser, idealmente, baseada nas proporções modais dos tipos de carbonato presentes e independe do caráter plutônico ou vulcânico da rocha.



**Figura 6:** classificação dos carbonatitos (BROD *et al.*, 2004).

#### 4.3 TÉCNICAS GEOESTATÍSTICAS

Diferentes técnicas podem ser utilizadas na simulação de variáveis categóricas em um projeto de geoestatística. As mais comuns são a simulação sequencial de indicadores (JOURNEL, 1982), a simulação gaussiana truncada (MATHERON *et al.*, 1987) e a simulação de objetos Booleanos (LANTUÉJOUL, 2002). Porém, tais técnicas se tornam mais adequadas em projetos onde a geometria de um depósito é simples, com as fácies geológicas pouco deformadas. Para situações de maior complexidade, onde a geometria e posição do domínio são alteradas pela gênese envolvida no processo sedimentar, a técnica de simulação Plurigaussiana pode ser uma alternativa mais assertiva, sendo consolidada em diversos trabalhos de autores como Galli *et al.*, (1994), Le Loc'h (1997), Armstrong *et al.*, (1998) e Armstrong *et al.*, (2003) (MARQUES, 2011).

Para aplicações de técnicas geoestatísticas no entendimento do comportamento do fenômeno geológico, bem como na análise de incertezas,

é necessário uma série de procedimentos, desde a análise exploratória dos dados, até o entendimento do comportamento de continuidade espacial, sendo as principais listadas nas subseções a seguir.

#### **4.3.1 Análise exploratória dos dados**

A análise exploratória dos dados é o primeiro passo para o entendimento do fenômeno, bem como para a aplicação de técnicas geoestatísticas, como simulação. Nesta etapa, é realizada uma análise preliminar dos dados para identificar possíveis tendências, variabilidade e correlações entre as propriedades geológicas. Além disso, nesta etapa é gerado um mapa com a disposição espacial das amostras, que auxilia no entendimento do fenômeno e como este se comporta geometricamente. Outro aspecto importante da análise exploratória dos dados é a verificação da existência de um agrupamento preferencial dentro do depósito. Isso é importante para a continuidade do trabalho por identificar regiões onde os teores estão correlacionados, podendo apresentar valores mais elevados de minério que em outros pontos do domínio. Para realizar a análise exploratória dos dados, foi utilizada a ferramenta EDA dentro do *software Isatis.neo Mining®*.

#### **4.3.2 Variografia**

A análise da continuidade espacial é o primeiro passo do processo de utilização de métodos geoestatísticos em estimadores clássicos, como krigagem e simulações. O variograma calculado nesta etapa, demonstra graficamente a correlação espacial das amostras, sendo produzido a partir dos ajustes de parâmetros de busca para as direções de anisotropia aplicados no banco de dados. Como resultado, é obtido um modelo teórico que representa a continuidade espacial do domínio modelado. Dois valores de uma variável regionalizada devem ser considerados para o cálculo do variograma  $z(u)$  e  $z(u + h)$  em locais distintos  $u$  e  $u + h$  separados por um vetor  $h$ . A partir desses dois pontos é calculada a variância entre eles, utilizando a função

variograma  $2\gamma(u, h)$  sendo definida pela esperança matemática de  $[Z(u) - Z(u + h)]^2$ , ou seja:

$$2\gamma(u, h) = E[Z(u) - Z(u + h)]^2$$

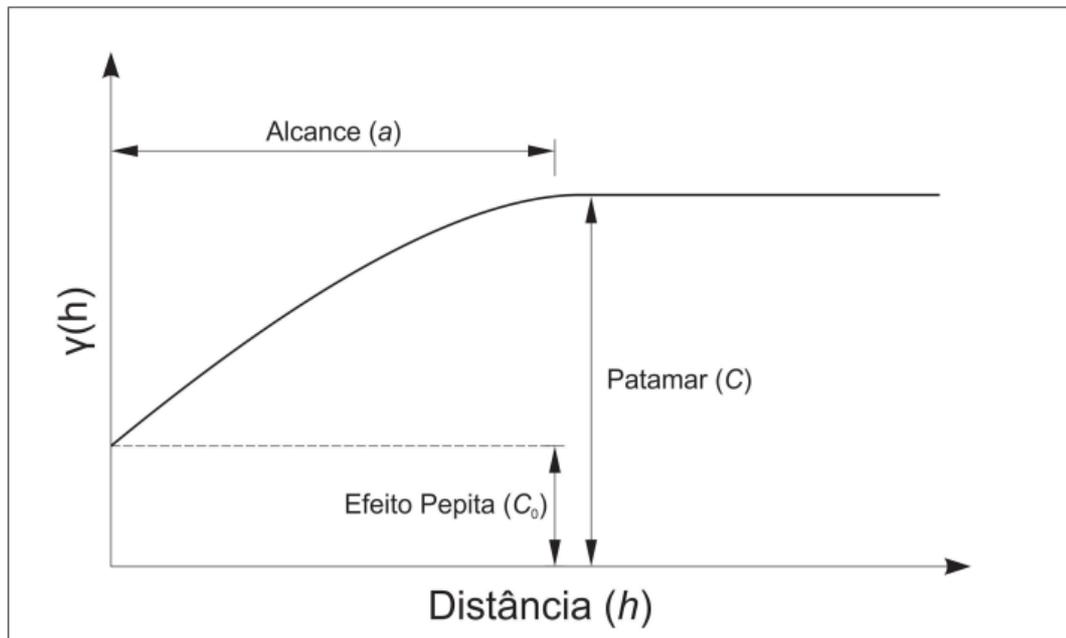
onde:

$2\gamma(u, h)$ : é a função variograma dos pares de amostras

$h$ : é o vetor de separação entre os pares

$Z(u)$ : é o valor da amostra na posição  $u$

Depois de calcular o variograma experimental, é possível agrupar os dados em uma nuvem variográfica e gerar um gráfico demonstrando a curva experimental dos dados, para no final gerar um modelo matemático que represente a continuidade espacial, como ilustrado na Figura 7:



**Figura 7:** demonstração das propriedades de um variograma (PEREIRA, 2017).

O Alcance (a) representa o valor da distância onde os pares de valores  $z(u)$  e  $z(u + h)$  não estão correlacionados espacialmente, em determinada direção. A zona de influência de uma amostra é quantificada através desse valor, ou seja, teores que estejam separados por uma distância maior que o alcance, não estão correlacionados. Esse parâmetro é tido como o ponto onde um variograma tem seu patamar atingido, separando amostras correlacionadas das amostras independentes (MATHERON, 1971; YAMAMOTO, 1991; PEREIRA, 2017)

O Patamar (C) representa o nível de estabilização do variograma, sendo correspondente à variância da variável regionalizada. É o valor no qual a correlação entre as amostras é nula, sendo uma correlação positiva para valores abaixo do Patamar (C), e uma correlação negativa para valores acima desse mesmo patamar (YAMAMOTO, 2001; ROSSI; DEUTSCH, 2014; PEREIRA, 2017)

O Efeito Pepita ( $C_0$ ) corresponde ao valor do variograma na distância  $h=0$ , ou seja, na sua origem. Apesar de que, amostras de um mesmo ponto deveriam apresentar valores iguais da variável regionalizada, na prática, devido ao efeito pepita esse valor geralmente é diferente de zero. Existem diversos motivos para a ocorrência dessa diferença, desde falhas na amostragem ou em análises até mesmo uma real variabilidade geológica em escalas muito pequenas. (YAMAMOTO, 2001; SINCLAIR;BLACKWELL, 2004; ROSSI; DEUTSCH, 2014, PEREIRA, 2017).

### **4.3.3 Krigagem dos indicadores**

A amostragem é capaz de prover informações apenas de uma parcela ínfima do volume total de um depósito mineral, representando uma pequena cota da população amostrada. Por isso, é crucial realizar estimativas das características geológicas, especialmente dos teores, em áreas não amostradas. O objetivo final é prever tanto os teores quanto as tonelagens, com a finalidade de avaliar a viabilidade da extração em um primeiro momento e, posteriormente, realizar controles de teor durante as operações de lavra (ROSSI; DEUTSCH, 2014). Para isso, pode-se utilizar um estimador como procedimento, capaz de prever um valor em um ponto não amostrado, a partir

das amostras e informações conhecidas. Esse processo é baseado na combinação linear de amostras conhecidas seguindo a equação (MATHERON, 1963; KITANIDIS, 1997):

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

Onde,

$\lambda_i$  e  $z(x_i)$ : são, respectivamente, o ponderador e valor da amostra  $i$  no local  $x_i$ .

Apesar de trabalhos recentes em fosfato apresentarem krigagem e simulação dos indicadores na análise de incertezas de fosfato (EULER, 2023), nesse estudo, optou-se por não utilizar essa técnica, por acreditar que não seria a técnica mais indicada para depósitos estratigráficos.

#### **4.3.4 Simulação Estocástica**

A técnica de simulação está sendo cada vez mais aplicada na indústria geológica, principalmente no setor de recursos minerais, podendo ser utilizada para auxiliar a tomada de decisões na frente de lavra.

De modo geral, a técnica consiste na utilização de algoritmos que viabilizam a criação de cenários equiprováveis para a distribuição da variável em questão. Cada um dos cenários representa a simulação de  $n$  valores em diferentes posições. Os valores simulados devem corresponder os valores dos dados originais, mantendo características semelhantes no que se refere a histogramas e continuidade (GOOVAERTS, 1997; KOPPE, 2009). De forma geral, são gerados  $n$  cenários equiprováveis, ou seja, cada cenário tem igual possibilidade de ocorrência, permitindo analisar o fenômeno levando em consideração essas variações.

#### 4.3.5 Simulação Plurigaussiana

Com o método de simulação Plurigaussiana, ao invés de simular uma função gaussiana, várias funções são utilizadas para gerar as diversas realizações dos modelos geológicos equiprováveis. As etapas de construção de uma simulação Plurigaussiana buscam refletir a complexidade geométrica do domínio em subsolo. São eles:

- Definir os litotipos;
- Dividir o reservatório ou depósito mineral em unidades;
- Definir o nível de referência para *unfolding*;
- Estimar os valores dos parâmetros: definição da proporção de cada fácies (tipo de rocha) e determinação dos limiares, modelagem do variograma para as funções gaussianas subjacentes;
- Gerar valores gaussianos em poços/furos de sondagem;
- Simular valores nos nós da grade, dados os valores nos poços.

A técnica da Simulação Plurigaussiana se baseia o máximo possível nos dados geológicos locais do domínio, com o objetivo de reproduzir os efeitos da gênese de um depósito em subsuperfície. Tais informações são retiradas de perfis de amostragem de cada tipo de rocha presente nas sondagens, juntamente com a caracterização geológica da área de interesse. Para realizar a construção de uma simulação Plurigaussiana, deve-se tomar decisões preliminares como a definição dos litotipos a serem estudados, a divisão da mineralização em unidades, a escolha dos níveis de referência e, por fim, a seleção de parâmetros a serem colocados na grade simulada (ARMSTRONG et al., 2003; MARQUES, 2011).

Segundo Armstrong et al., (2011), nos últimos 10 anos, simulações Plurigaussianas começaram a ser usadas para modelar depósitos na indústria de mineração. Uma das primeiras aplicações foi em um depósito de urânio hospedado em granito. Desde então, eles foram aplicados a um depósito de cobre pórfiro no Chile, um depósito de urânio *roll front* no Cazaquistão, um depósito de níquel laterítico e na porção superior de um tubo de diamante em

Botswana que é preenchido com rochas sedimentares, sendo utilizados neste ultimo caso para simular fraturas em rochas.

## 5 METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO

As simulações Plurigaussianas se apresentam como uma excelente ferramenta para analisar a incerteza associada à forma e volume de fácies e litotipos em depósitos minerais complexos, possibilitando avaliar a precisão dos modelos tridimensionais. Nesse contexto, em algumas situações, as flutuações na qualidade do minério não são suficientes para analisar as incertezas associadas ao fenômeno analisado na mineração. Além dos teores, outras variáveis como densidade e até mesmo a forma do corpo geológico podem ser consideradas. Portanto, as simulações são técnicas difundidas nas mais diversas áreas da engenharia e são comumente usadas para prever as flutuações na qualidade do minério.

A simulação Plurigaussiana é aplicada utilizando o método proposto inicialmente por Galli *et al.* (1994). Esse método utiliza dois campos randômicos gaussianos para realizar as simulações, que posteriormente são truncados, resultando nas simulações no espaço categórico.

Para aplicar o método, é necessário definir os domínios (quadro 1) e escolher uma superfície de referência para o desdobramento de cada unidade. Isso corrige as coordenadas dos dados geológicos, levando-os aos níveis estratigráficos e não cartesianos. A escolha da superfície de referência deve considerar a formação do depósito mineral. No caso do perfil laterítico, o topo da mineralização é escolhido como referência para a correção, sendo selecionado o topo do aloterito (ALO). Todos os dados são nivelados e a simulação é realizada nesse sistema planificado. Ao final do processo, os dados e simulações são transformados de volta para sua posição original.

**Quadro 1:** litotipos presentes no depósito estudado.

<b>SIGLA/COR</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<b>ALO</b>	Topo do domínio, constituído por material completamente intemperizado e sem preservação das estruturas originais da rocha. Estéril.
<b>ISAT</b>	Saprólito de rochas plutônicas alcalinas, com preservação de algumas feições da rocha. Apresenta concentrações econômicas de titânio.
<b>ISAB</b>	Saprólito de rochas plutônicas alcalinas, com preservação de algumas feições da rocha. Apresenta concentrações econômicas de fosfato.
<b>RSI</b>	Rocha semi-intemperizada, podendo conter concentrações econômicas de fosfato.
<b>RSA</b>	Rocha Sã; material não intemperizado.

Após definir essas informações, a simulação Plurigaussiana é realizada em etapas. Primeiramente, estimam-se os parâmetros de proporção de cada categoria utilizando o método de Curvas de Proporções Verticais (VCP), proposto por Matheron *et al.* (1987). Essa ferramenta quantifica a mudança na quantidade de cada litotipo presente em função da profundidade. Além disso, é necessário determinar uma regra de truncagem, que representa como os contatos ocorrem no depósito mineral. Essa regra é utilizada para definir os limites imputados nas variáveis gaussianas, resultando nas simulações categóricas.

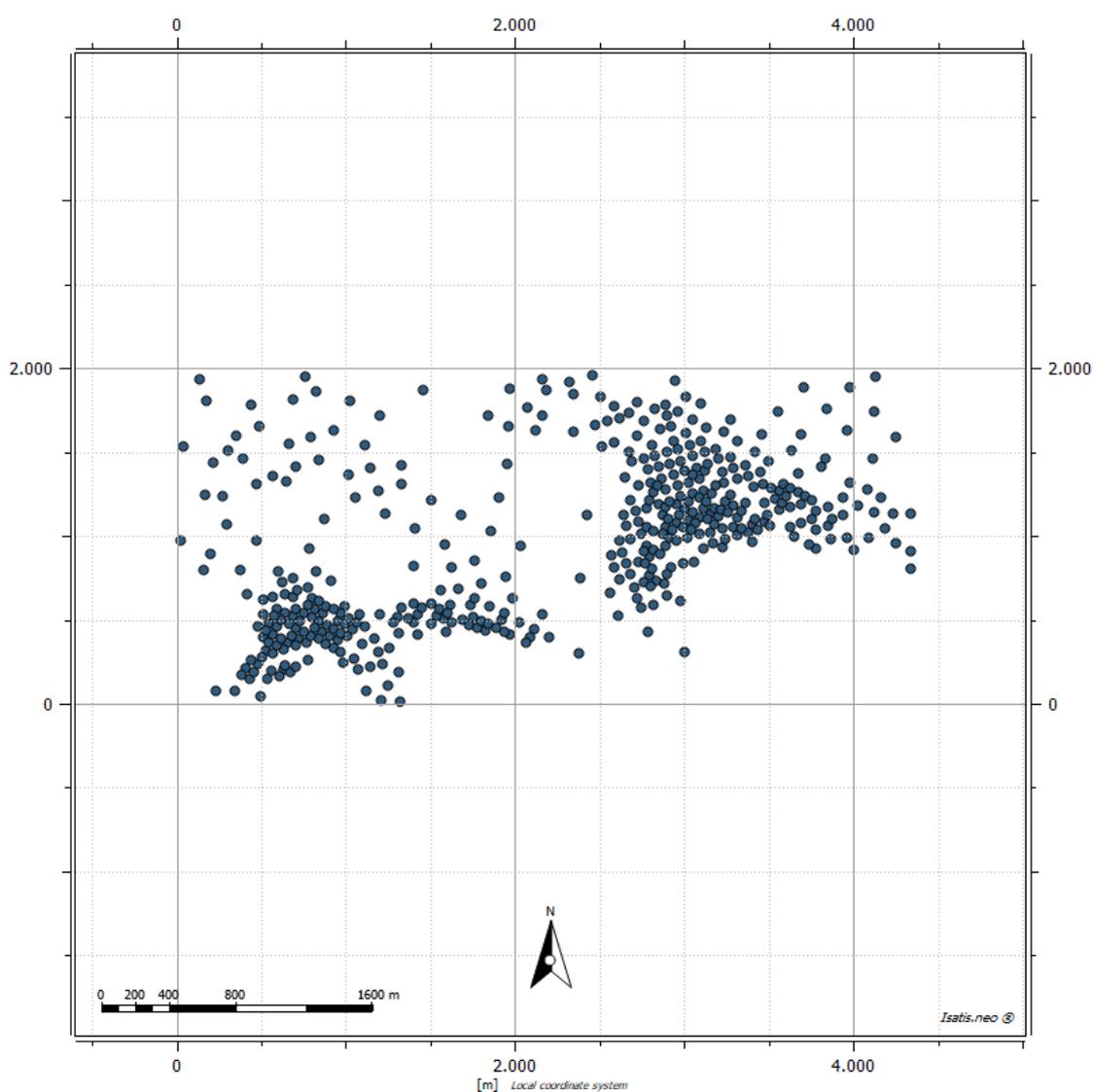
Foi definido um grid de 10x10x1 m para a geração do modelo, em que o domínio de simulação está entre o topo de ALO e o topo de RSA. Testaram-se diferentes alternativas para a superfície de referência, mas o topo do ALO foi escolhido por fazer mais sentido geológico e por apresentar resultados mais consistentes na análise de continuidade espacial dos indicadores.

Foram gerados 100 cenários equiprováveis do depósito mineral, e os resultados foram processados de duas maneiras. Para cada bloco, verificou-se a tipologia de maior ocorrência, gerando um modelo da maior probabilidade

de ocorrência (modelo mais provável). Em uma segunda etapa, calculou-se a probabilidade de cada bloco pertencer a uma determinada tipologia.

### 5.1 BANCO DE DADOS

O banco de dados é composto por um total de 18.106 amostras originadas de 463 furos verticais sem desvio), distribuídos em uma área de aproximadamente 8 km<sup>2</sup> (como pode ser visto na Figura 8). O espaçamento da grade amostral nas zonas de maior densidade é de aproximadamente 50 metros, sendo cerca de 100 metros no restante do depósito.



**Figura 8:** mapa de localização dos furos no plano XY.

## 5.2 DEFINIÇÃO DO NÍVEL DE REFERÊNCIA

A primeira etapa constitui na escolha do nível de referência para o desdobramento (*unfolding*), sendo a forma da Curva de Proporção Vertical (VPC) e os resultados das simulações dependentes desse processo.

Para este trabalho, a superfície de ALO foi selecionada por se tratar de um perfil laterítico, onde a topografia é o principal determinante para a infiltração dos fluidos geradores da alteração.

Os dados utilizados para gerar a superfície são apresentados na Figura 9, onde a escala de cores representa a elevação da topografia em metros.

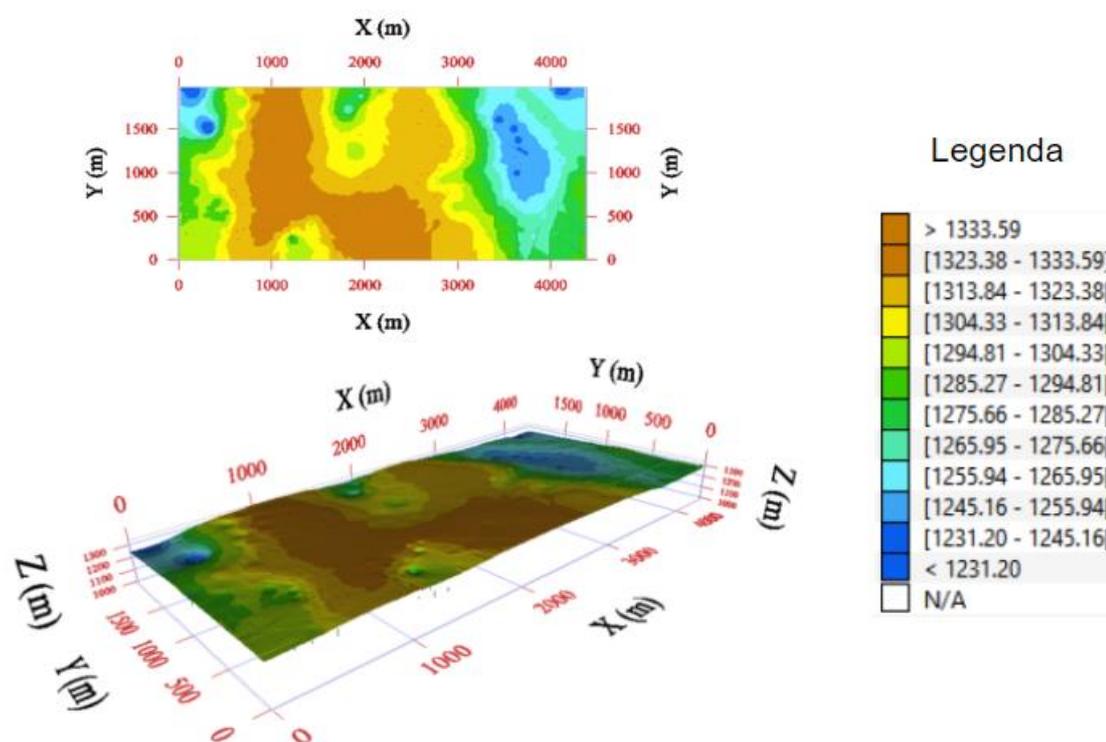


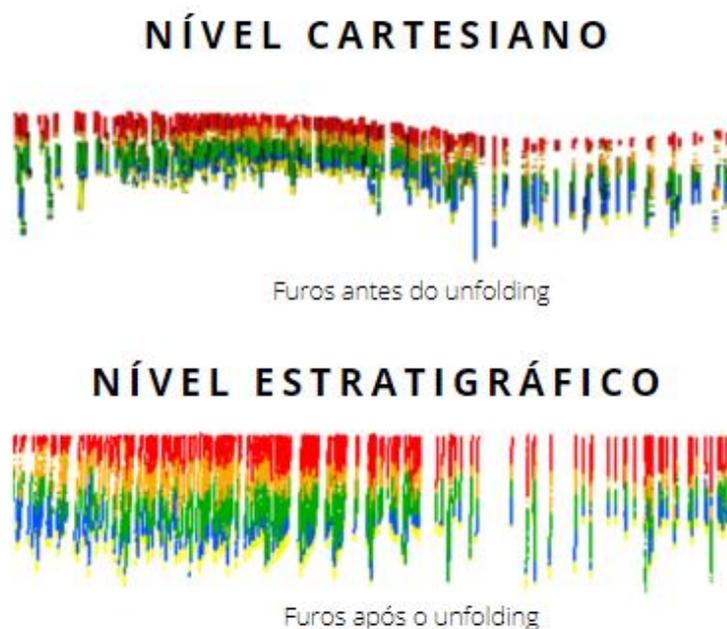
Figura 9: topo da camada ALO com escala de cores para elevação.

## 5.3 UNFOLDING

Para obter uma melhor correlação entre as litofácies, foi realizado um nivelamento das camadas (*unfolding*). Esse procedimento possibilita tratar os dados no nível estratigráfico do depósito, e considerando o caso de

um perfil laterítico, que possui continuidade lateral, essa etapa se torna importante.

Para isso, foram criadas malhas para as superfícies das camadas ALO, ISAB e RSA e para a base de ISAB (conforme tabela 1).

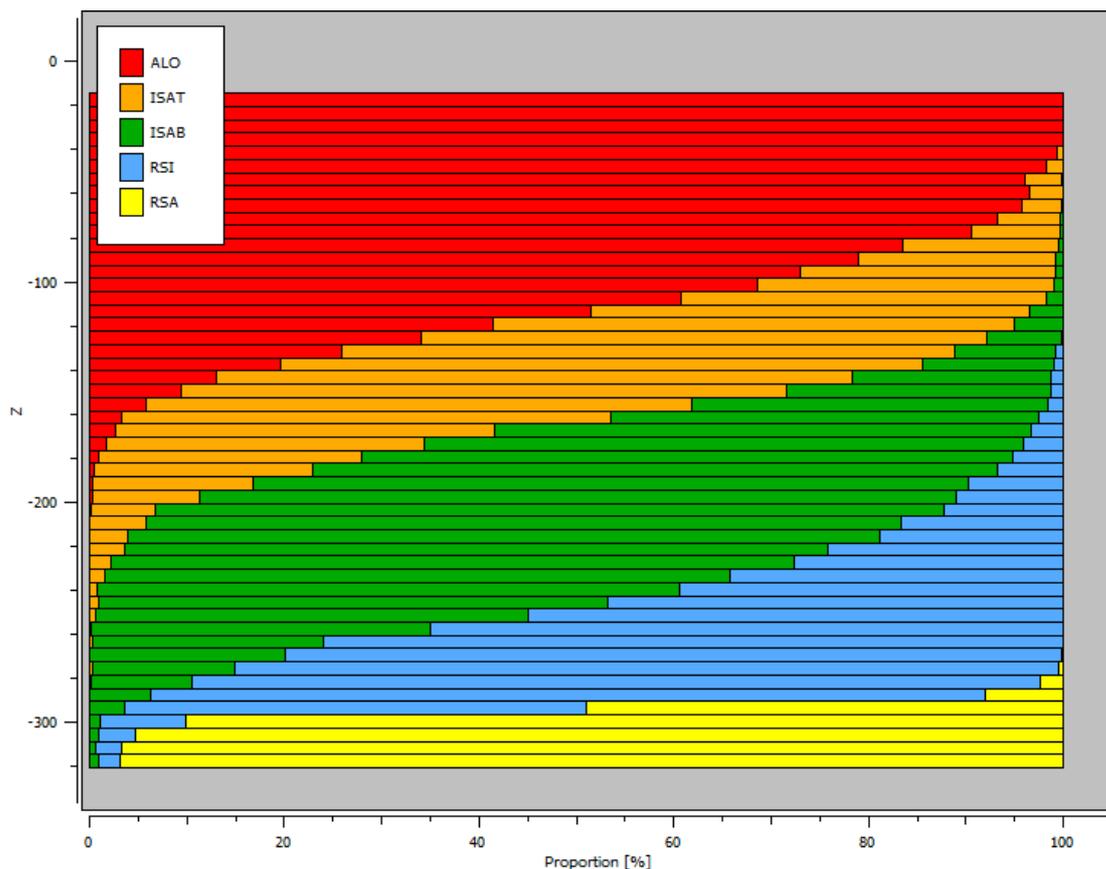


**Figura 10:** transformação dos furos do nível cartesiano para o estratigráfico.

#### 5.4 CURVA DE PROPORÇÃO VERTICAL (VPC)

Uma Curva de Proporção Vertical (VPC) é um gráfico de barras empilhadas que ilustra a progressão vertical da proporção de cada tipo de rocha presente no domínio. Cada linha do diagrama corresponde a uma camada na malha de simulação (nivelada), derivada dos dados discretizados dos poços. As VPCs são empregadas para interpretar a variação vertical dos litotipos em uma reserva. Essa ferramenta é extremamente útil para os geólogos, pois proporciona uma visão da distribuição original (antes da deformação) dos tipos de rocha. A litoestratigrafia pode ser analisada para compreender a origem da reserva.

Para a realização das simulações, neste estudo foi utilizada uma VPC Global, mais suavizada, exemplificada na Figura 10 abaixo:



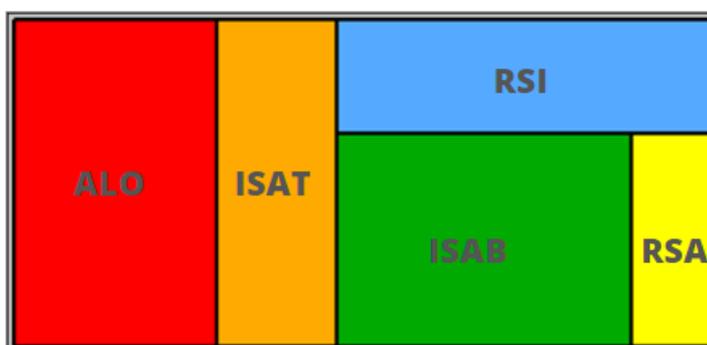
**Figura 11:** Curvas de Proporção Vertical (VPC Global); demonstra a proporção de cada litotipo a cada nível do depósito, variando verticalmente partindo da cota zero (superfície do aloterito).

## 5.5 REGRA DE TRUNCAGEM

Na Simulação Plurigaussiana (ou em qualquer simulação gaussiana truncada), as litofácies não são simuladas diretamente. Primeiramente, é realizada a simulação de uma função gaussiana aleatória estacionária, que posteriormente é transformada na variável litofácies. A metodologia consiste em truncar duas ou mais variáveis gaussianas, que podem estar correlacionadas ou não, a fim de obter um número igual de modelos de covariância para descrever o comportamento espacial de diferentes fácies ou grupos de fácies (domínios). A construção da simulação Plurigaussiana é fundamentada na gênese do subsolo, sendo essencial incorporar o máximo de conhecimento geológico e a distribuição possível do domínio no corpo mineralizado. Essas informações são obtidas a partir dos perfis descritivos dos domínios em cada furo de sondagem, juntamente com a descrição geológica da área de estudo. O objetivo é garantir que o modelo de covariância cruzada

entre as fácies seja consistente, a estratégia de truncamento seja otimizada e a geração de restrições para a simulação contenha a máxima relevância geológica.

O modelo plurigaussiano se baseia no arranjo de retângulos de litologia. No entanto, esse arranjo, representado graficamente pelas cores dos retângulos, é localmente modificado pela matriz de proporção. Isso significa que, para cada nó, o algoritmo pode calcular um novo arranjo de litologias determinado pelos valores locais de proporção.



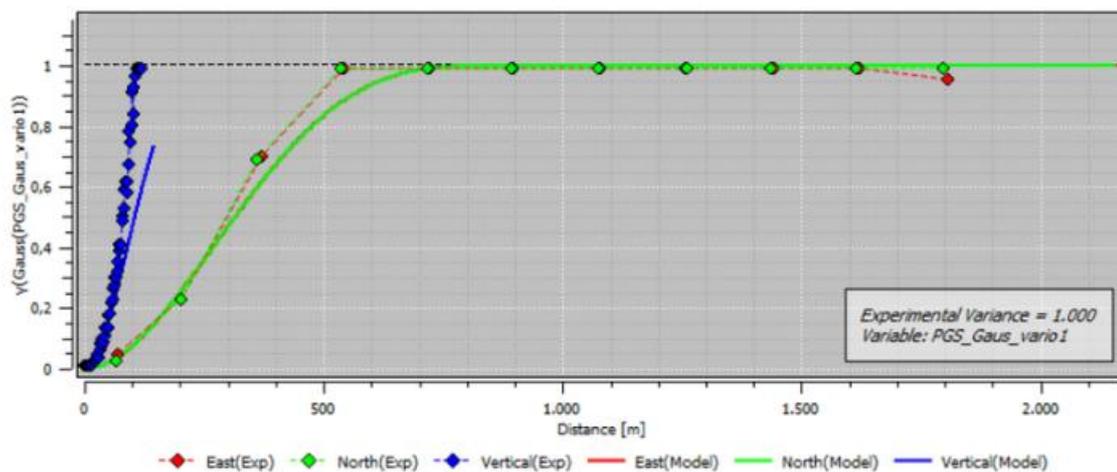
**Figura 12:** regra de truncagem.

A construção da imagem, chamada de regra de litotipo, tenta refletir a informação geológica sobre a transição do campo no depósito e a definição de modelos de variograma gaussiano. Na figura 12, pode-se observar a regra de truncagem escolhida, a qual foi baseada nos dados originais. Apesar de os domínios terem um comportamento estratigráfico, existem variações da ordem das rochas ao longo dos furos ( e conseqüentemente no modelo). Foi observado que o ISAT pode ter contato com o ALO, o RSA e o ISAB, mas nunca o RSI. O ALO só toca o ISAT. O ISAB pode ter contato com o ISAT, o RSA e o RSI.

## 5.6 VARIOGRAFIA DOS INDICADORES

Com a regra de truncamento acima mostrado e o desdobramento realizado, é necessário analisar a continuidade espacial dos domínios, tanto lateralmente como verticalmente. Note que a continuidade vertical é muito menor do que a lateral, tal qual esperado de um depósito mineral com essas

características. Esse variograma será utilizado na simulação Plurigaussiana, bem como base para a estratégia de busca da mesma.



**Figura 13:** variograma vertical e horizontal dos indicadores.

## 6 RESULTADOS

Neste estudo foram utilizadas simulações Plurigaussianas para gerar cenários equiprováveis da geometria do domínio de alteração, devido à complexidade do corpo mineralizado. O processo foi realizado em etapas, descritas na metodologia, para a obtenção dos parâmetros que foram utilizados nas realizações.

As etapas acima permitiram a realização das simulações, que foram geradas a partir de uma função gaussiana aleatória, com estrutura de covariância obtida através dos dados amostrais.

Para a realização das simulações foi gerado um grid 3D de 10x10x1 m, sendo o domínio simulado o a camada entre o topo de ALO e o topo de RSA.

Para a realização das simulações, foram utilizados os seguintes parâmetros dentro do *software Isatis.neo*:

**Tabela 1:** parâmetros utilizados nas simulações.

Módulo de Cálculo	Multidirecional
Número de direções	2
Valor de Lag Horizontal	180 m
Distância Máxima Horizontal	1800 m
Valor de Lag Vertical	2 m
Distância Máxima Vertical	120 m
Número Máximo de Dados	100000
Número Máximo de Pares de Amostras	1000

Foram simulados 100 cenários equiprováveis para esse depósito, gerando dados que foram analisados a partir do modelo de probabilidade de ocorrência da camada de ISAB (figura 15). Utilizando esse modelo, foi aplicado um filtro nos blocos, onde a probabilidade de ser a camada ISAB deve ser superior a 70% (figura 14 e 16). Os resultados foram comparados com a modelagem implícita gerada no *Leapfrog*, quantificando as incertezas em forma de diluição dos contatos, tanto diluição interna quanto perda de minério.

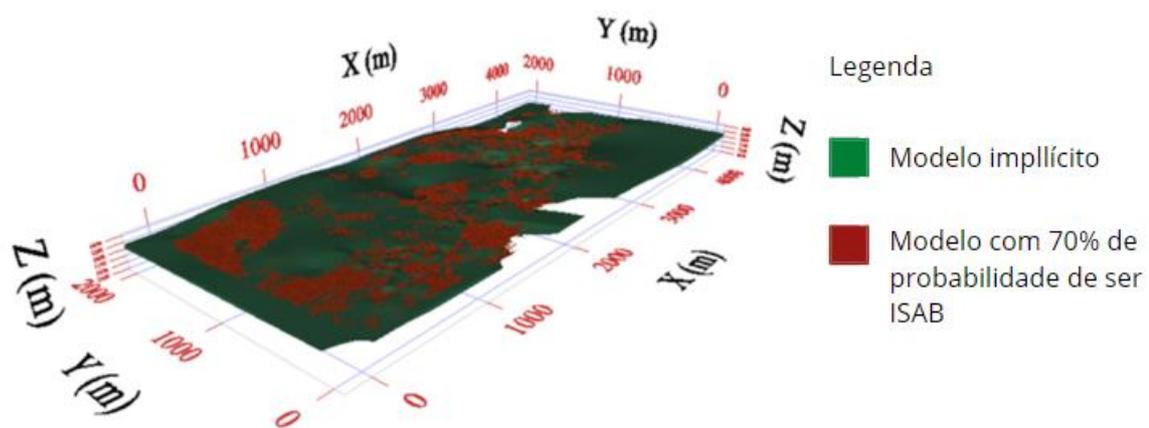


Figura 14: modelo de probabilidade de 70% de ser ISAB.

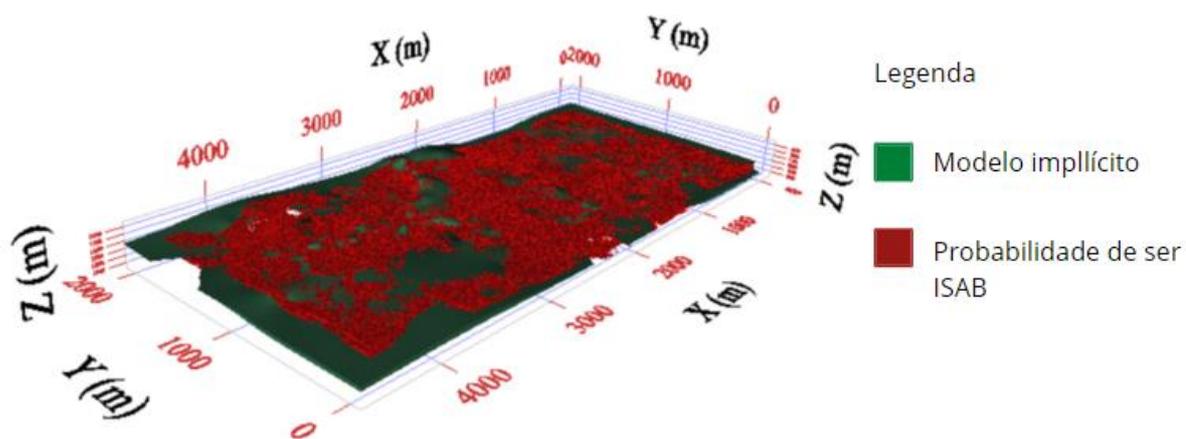


Figura 15: modelo de probabilidade de ocorrência do domínio ISAB.

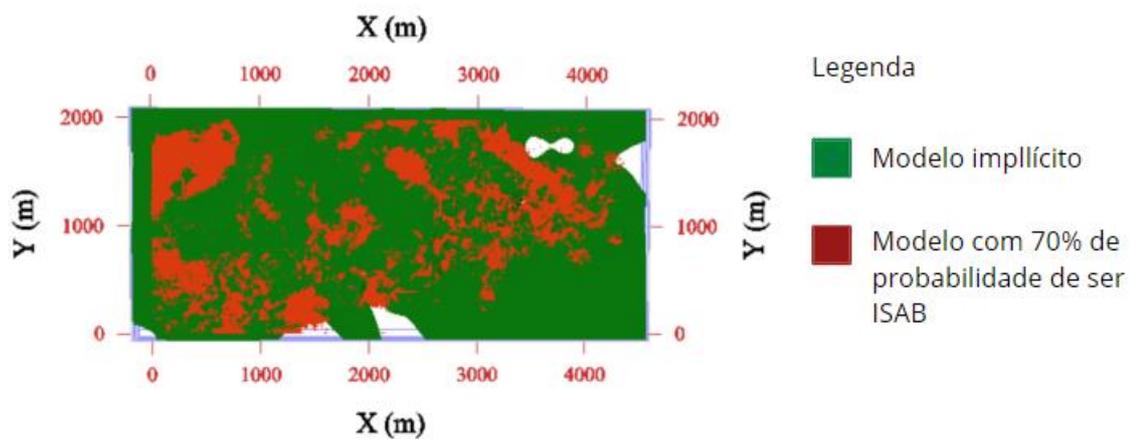


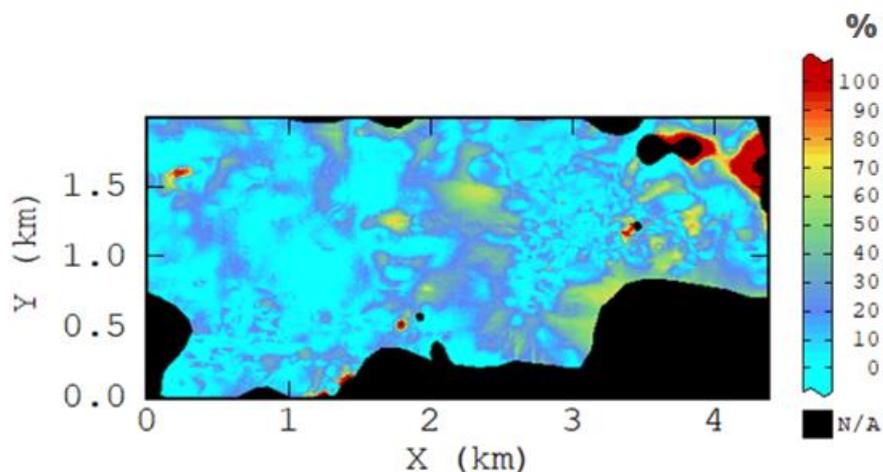
Figura 16: mapa de probabilidade de 70% de ser ISAB.

Um método de validação consiste em comparar as proporções das fácies simuladas, como identificado na tabela 2. É possível verificar que houve uma pequena variação se forem comparados os dados originais com duas simulações (6 e 8):

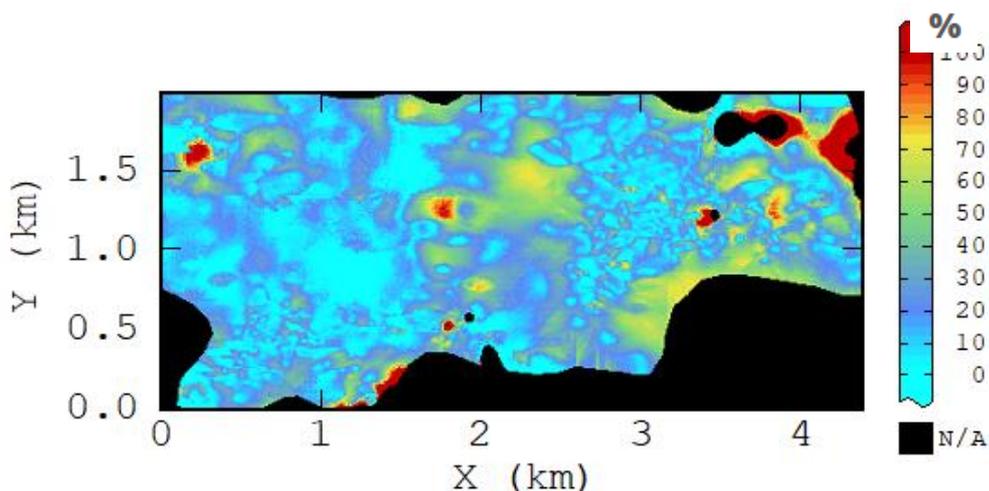
Tabela 2: comparação de proporções das fácies ALO, ISAT, ISAB, RSI e RSA simuladas, com os dados originais.

	DADOS ORIGINAIS		SIMULAÇÃO 6		SIMULAÇÃO 8	
	UNIDADES	PROPORÇÃO %	UNIDADES	PROPORÇÃO %	UNIDADES	PROPORÇÃO %
ALO	4.970	28,40	4.100.253	34,18	3.647.973	30,42
ISAT	2.761	15,78	2.017.811	16,84	1.949.526	16,25
ISAB	4.634	26,48	2.781.902	23,22	2.915.075	24,30
RSI	3.170	18,11	2.027.377	16,91	2.283.197	19,06
RSA	1.966	11,23	1.063.165	8,85	1.941.737	9,97

Para realizar as análises de risco, foram somados os volumes totais do litotipo ISAB implícito, juntamente com os volumes dos modelos resultantes das simulações, em um contexto bidimensional. Para os cálculos de volume, foi adotada uma densidade média de 2,8 g/cm<sup>3</sup>. Em seguida, foi calculada a relação entre os volumes obtidos pelas simulações e os volumes modelados implicitamente. As Figuras 17 e 18 apresentam os resultados em percentagem de diluição interna.

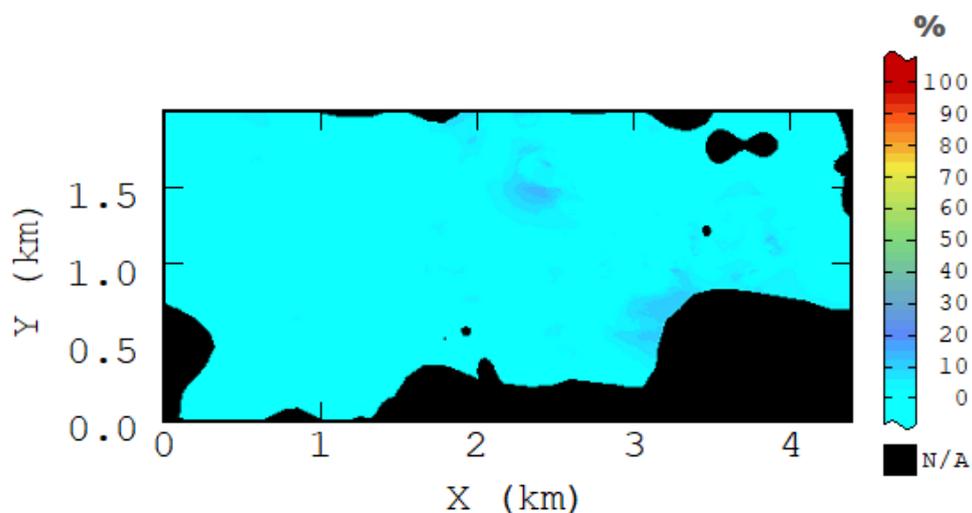


**Figura 17:** Mapa de risco da diluição interna, confrontando o modelo implícito e o modelo mais provável obtido pelas simulações. Os pontos representam os furos de sondagem.

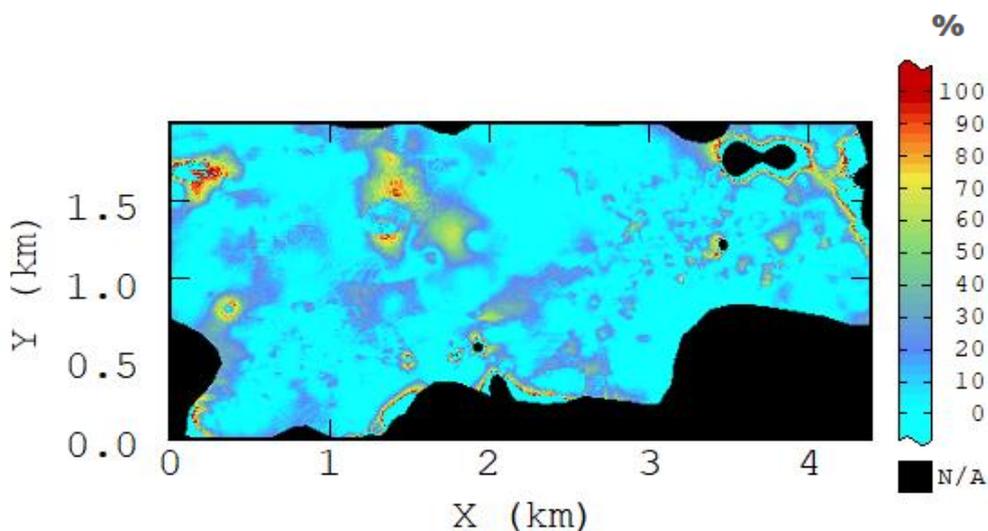


**Figura 18:** Mapa de risco da diluição interna, confrontando o modelo implícito e o modelo com 70% de probabilidade de ocorrência. Os pontos representam os furos de sondagem.

Para a ocorrência de perda de minério nos contatos, ou seja, o minério localizado fora do modelo implícito, foi realizado o procedimento semelhante. Levou-se em consideração o volume total do corpo modelado implicitamente, juntamente com os volumes do minério obtidos tanto pelo modelo "mais provável" quanto pelo modelo com uma probabilidade de 70%, que estão localizados fora do corpo modelado implicitamente. As Figuras 19 e 20 apresentam os resultados em forma de porcentagem para a perda de minério.



**Figura 19:** Mapa de risco da perda de minério, confrontando o modelo implícito e o modelo mais provável obtido pelas simulações. Os pontos representam os furos de sondagem.



**Figura 20:** Mapa de risco da perda de minério, confrontando o modelo implícito e o modelo com 70% de probabilidade de ocorrência. Os pontos representam os furos de sondagem.

Observa-se que as áreas de borda são mais significativamente afetadas nas duas análises de risco. Ao utilizar o modelo "mais provável", que tende a reproduzir a categoria mais predominante no domínio, as variações nas análises são menores. Nesse sentido, para a análise de contatos realizada, o modelo com probabilidade acima de 70% proporciona uma medida de incerteza mais precisa.

O modelo implícito, ao estabelecer um envelope absoluto para a camada de minério, não considera as incertezas que ocorrem principalmente nas regiões de contato e na presença de lentes estéreis dentro do corpo

mineralizado. Nas análises realizadas, fica evidente que a abordagem estocástica permite mapear essas áreas de incerteza que anteriormente não seriam consideradas. A identificação das zonas de incerteza dos contatos geológicos possibilita otimizar o processo de obtenção de informações na subsuperfície, o que é crucial na avaliação de recursos minerais. Além disso, a análise da incerteza permite selecionar as regiões com maior precisão para a mineração, reduzindo a diluição causada pela incerteza dos contatos geológicos. Esse estudo pode ser associado a um processo de estimativa de teores, comparando os resultados e avaliando o impacto que a variação dos volumes teria na avaliação de recursos minerais.

## 7 DISCUSSÕES

As simulações geoestatísticas são cada vez mais utilizadas em análises de incerteza, principalmente em processos de otimização amostral relacionados à incerteza dos teores. No entanto, a incerteza associada à modelagem geológica não é frequentemente considerada.

O modelo implícito, devido à sua natureza determinística, não leva em conta medidas de incerteza. Ao ser combinado com os dados obtidos pelas simulações, é possível identificar áreas com maior grau de incerteza, o que pode ser útil para análises de risco relacionadas à diluição e perda de minério na área modelada.

Os resultados deste trabalho podem ser utilizados para auxiliar no planejamento de exploração ou em um programa de amostragem otimizado, com o objetivo de reduzir a incerteza nos contatos geológicos e minimizar a diluição desses contatos durante a exploração.

Recomenda-se evitar a análise com o modelo "mais provável", pois uma litologia pode ser predominante, mas ainda assim ter uma baixa probabilidade de ocorrência. Para este trabalho, foi possível obter bons resultados aplicando um filtro com mais de 70% de probabilidade nos blocos da camada ISAB.

Dessa forma, o trabalho desenvolvido aqui apresenta uma maneira de quantificar e gerenciar os riscos associados ao processo de modelagem, seja ele implícito ou de qualquer outra natureza.

## 8 CONCLUSÃO

Foi verificado neste trabalho que a aplicação de técnicas de simulação Plurigaussiana atendem aos objetivos propostos. Com os mapas de risco gerados, as áreas do domínio que possuem elevada incerteza, se tornaram evidentes. Nessas áreas foi sugerido aumentar o número e a qualidade das informações amostrais. Uma forma capaz de contemplar essa melhoria, seria uma nova campanha de sondagens.

Outro ponto importante confirmado ao longo do trabalho, é que a técnica de simulação Plurigaussiana produz bons resultados para domínios com continuidade lateral (domínios estratigráficos). Tais resultados são obtidos de forma rápida, se comparados com outros métodos, e possuem uma boa confiabilidade.

Por fim, as técnicas de geoestatística e modelagem se mostram cada vez mais importantes no mercado de trabalho de um profissional da geologia. Tais técnicas, combinadas com uma visão geológica dos eventos e ambientes, se tornam ferramentas extremamente úteis seja na área de exploração, na área de recursos minerais ou em frente de lavra.

## REFERÊNCIAS

- Armstrong, M.; Eschard, R.; Galli, A.; Le Loc'h, G. & Roth, C. (1998). Short course of plurigaussian simulations in mining and petroleum. Centre de Geostatistique, Fontainebleau-France, Sep. 21-23, 45p.
- Armstrong, M. (1999). Basic Linear Geostatistics. Springer, 153p.
- Armstrong, M.; Galli, A.; Le Loc'h, G.; Geffroy, F. & Eschard, R. (2003). Pluri-gaussian simulations in geosciences. Springer, 144p.
- Armstrong, M., *et al.*, (2011). Plurigaussian Simulation in Geosciences. Springer Science & Business Media.
- Barbosa, E.S.R. (2009). Mineralogia e Petrologia do Complexo Carbonatítico-Foscorítico de Salitre, MG, Universidade de Brasília, Brasília, 434 pp.
- Brod, J. A. (2012). Desenvolvimento de um sistema de informação geográfica para o gerenciamento de informações geotécnicas na engenharia civil. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- Brod J.A., Gibson S.A., Thompson R.N., Junqueira-Brod T.C., Seer H.J., Moraes L.C., Boaventura G.R. (2000). Kamafugite affinity of the Tapira alkaline-carbonatite complex (Minas Gerais, Brazil). *Ver. Bras. Geoc.* 30 :404-408.
- Brod J.A., Gaspar J.C., Araújo D.P. Gibson S.A., Thompson R.N., Junqueira-Brod, T.C. (2001). Phlogopite and tetra-ferriphlogopite from Brazilian carbonatite complexes: petrogenetic constraints and implications for mineral-chemistry systematics. *J. Southeast Asian Earth Sci.* 19:265-296.
- Brod J.A., Junqueira-Brod T.C., Gaspar J.C., Gibson S.A., Thompson R.N. (2003). Ti-rich and Ti-poor garnet from the Tapira carbonatite complex, SE Brazil: fingerprinting fractional crystallisation and liquid immiscibility. 8th Internat. Kimb. Conf. (CD-ROM), Victoria.
- Brod, J. A. (1999) Petrology and geochemistry of the Tapira alkaline complex, Minas Gerais state, Brazil. Tese (Doutorado) — Durham University, 1999.

- Brod, J.A., *et al.*, (2004). Excursão 1. Geologia e mineralizações dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba, Congresso Brasileiro de Geologia, XLII, Araxá, MG, pp. 1-29.
- Cordeiro, P.F.O., *et al.*, (2010). Mineral Chemistry, isotope geochemistry and petrogenesis of niobium-rich rocks from the Catalão I carbonatite-phoscorite complex, Central Brazil. *Lithos*, 118: 223-237.
- Danni J.C.M., Baecker M.L., Ribeiro, C.C.,(1991). The geology of the Catalão I carbonatite complex. In O.H. Leonardos, H.O.A. Meyer, J.C. Gaspar (Eds), 5th Internat. Kimb. Conf. (Field Guide Book). Araxá, CPRM, Special publication 3/91. 25-30.
- Fuck, R. A. *et al.* (1993) As faixas de dobramento marginais do cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos. In: DOMINGUEZ, J. M. L.; MISI, A. (Ed.). O Cráton do São Francisco. [S.I.], 1993. p. 161–185.
- Fuck R.A.; Pimentel M.M. & D'el-Rey S. L .J. (1994). Compartimentação Tectônica na porção oriental da Província Tocantins. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Camboriú (SC), Anais, p.215-216.
- Galli, A. *et al.* (1994). The pros and cons of the truncated gaussian method. In: Geostatistical simulations. [S.I.]: Springer, 1994. p. 217–233.
- Gibson S.A., Thompson R.N., Dickin A.P., Leonardos O.H.(1995). Hih-Ti and low-Ti mafic potassic magmas: Key to plume-lithosphere interactions and continental flood-basalt genesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 136: 149-165.
- Gibson S.A., Thompson R.N., Dickin A.P., Mitchell J.G., (1997). Temporal variation in magma sources related to the impact of the Tristan mantle plume. In C.J. Hatton (Ed.) PPM'97 International Symposium on plumes, plates & mineralisation (Abstracts).Pretoria, 37-38.
- Gibson S.A., Thompson R.N., Leonardos O.H., Dickin A.P., Mitchell J.G.(1995). The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume - evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. *J. Petrol.*, 36: 189-229.

- Gibson S.A., Thompson R.N., Weska R.K., Dickin A.P., Leonardo O.H., (1997). Late Cretaceous rift-related upwelling and melting of the Trindade starting mantle plume head beneath western Brazil. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 126: 303-314.
- Gomide, C.S. (2015). Geoquímica e química mineral de carbonatitos e isótopos estáveis em carbonatitos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. Tese de doutorado. Universidade de Brasília.
- Journel, A.G. (1982). The indicator approach to estimation of spatial distributions. In: *Proceedings of the 17th APCOM, SME-AIME, Golden, Colorado, USA*, p.793-806.
- Kitanidis, P. K. (1997). *Introduction to geostatistics Applications in hydrogeology*. Cambridge University Press.
- Lantuéjoul, C. (2002). *Geostatistical Simulation: Models and Algorithms*. Berlin: Springer, 256p.
- Le Bas M.J., (1985). Nephelinites and Carbonatites. *J. Geol. Soc. London*, 142: p.704
- Le Loc'h, G., Galli, A.(1997). Truncated Plurigaussian Method: theoretical and practical points of view. In: Baafi, E.Y. & Schofield, N.A. *Geostatistics Wollongong'96*, ordrecht: Kluwer Academic Press, 1:211-222. [International Geostatistics Congress, 5, Wollongong-Australia, September 22-26, 1996.
- Le Maitre, R.W., (2002). *Igneous Rocks: A classification and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. 2nd Edition*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lloyd F.E., Bailey D.K., (1991). Complex mineral textures in bebedourite: possible links with alkali clinopyroxenite xenoliths and kamafugitic volcanism. In O.H.

- Leonardos, H.O.A. Meyer, J.C. Gaspar (Eds.), (1991) 5th Internat. Kimb. Conf. (Ext. Abstr.) Araxá, CPRM, Sp. Publ. 3/91. 263-269.
- Mariano A.N., Marchetto M.,(1991). Serra Negra and Salitre carbonatite alkaline igneous complex. In O.H. Leonardos, H.O.A. Meyer, J.C. Gaspar (Eds.), *5th Internat. Kimb. Conf.* (Field Guide Book). Araxá, CPRM, Sp. Publ. 3/91. 75-79.
- Matheron, G. (1963) Principles of geostatistics. *Economic Geology*, Society of Economic Geologists, v. 58, n. 8, p. 1246–1266.
- Matheron, G. (1971) The theory of regionalised variables and its applications. *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique*, v. 5, p. 212.
- Matheron, G., *et al.*, (1987). *Estimating and choosing: an essay on probability in practice*. Springer-Verlag.
- Pereira, P.E.C. (2017). *Estimativa de recursos minerais e otimização de cava aplicados a um estudo de caso de uma mina de calcário*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás.
- Rossi, M. E.; Deutsch, C. V. (2014) *Mineral resource estimation*. [S.l.]: Springer science & Business Media, 2014.
- Silva, C. H. (2003) *Evolução geológica da Faixa Brasília na região de Tapira, sudoeste de Minas Gerais*. Tese (Doutorado) — Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista., 2003.
- Silva, C. H. D. et al (2006). Proveniência e idade do metamorfismo das rochas da Faixa Brasília, na região de Tapira (SW de Minas Gerais). *Geologia USP. Série Científica*, v. 6, n. 1, p. 53–66, 2006.
- Sinclair, A. J.; Blackwell, G. H.(2004). *Applied mineral inventory estimation*. [S.l.] Cambridge University Press, 2004.
- Stoppa, F., Cundari, A., (1995). A new Italian carbonatite occurrence at Cupaello (Rieti) and its genetic significance. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 122: 275-288.

Stoppa F., Sharygin V.V., Cundari A., (1997). New mineral data from the Kamafugite-carbonatite association: the melilitolite from Pian di Celle, Italy. *Mineral. Petrol.*, 61, 27-45.

Uhlein, A. et al., (2012). Tectônica da faixa de dobramentos Brasília – setores setentrional e meridional. *Geonomos*, 20(2), 1-14.

Yamamoto, J. K. (1991). Estimation and simulation of random fields with complex anisotropy. *Mathematical Geology*, 23(3), 329-353.

Yamamoto, J. K. (2001). Geostatistics applied to oil and gas reservoirs. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19(1), 23-30.

Yegorov, L.S. (1993). Phoscorites of the Maymecha-Kotuy ijolite-carbonatite association., *Int. Geol. Rev.* 35.: 346-358.