



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

MARIANA PAULA ROSSINI DE OLIVEIRA

**IMPACTO DO EFEITO SUPORTE NA ESTIMATIVA DE UMA
RESERVA MINERAL**

ARAXÁ/MG

2018

MARIANA PAULA ROSSINI DE OLIVEIRA

**IMPACTO DO EFEITO SUPORTE NA ESTIMATIVA DE UMA
RESERVA MINERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Allan Erlichman
Medeiros Santos

Coorientador: Prof. Me. Silvânia Alves Braga

ARAXÁ/MG

2018

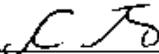
FOLHA DE APROVAÇÃO

MARIANA PAULA ROSSINI DE OLIVEIRA

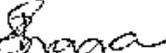
IMPACTO DO EFEITO SUPORTE NA ESTIMATIVA DE UMA RESERVA MINERAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 30 de novembro de 2018.



Presidente e Orientador: Prof. Me. Allan Erlichman Medeiros Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Coorientadora: Prof.ª Me. Silvânia Alves Braga
Instituto Federal de Educação Tecnológica Goiano – Campus Avançado Catalão



Membro Titular: Prof. Me. Guilherme Alzamora Mendonça
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

RESUMO

Fornecer uma estimativa de recurso faz parte do processo geral de avaliação de uma reserva mineral. É um estágio importante para definição das diretrizes dos processos subsequentes, visto que é uma etapa que irá determinar se é conveniente, do ponto de vista econômico, proceder com o projeto de aproveitamento da reserva ou se o mesmo se mostrar inviável. Por isso há importância de se fazer uma boa estimativa da reserva, uma vez que o sucesso de um empreendimento mineiro depende das tonelagens e teores estimados. Seguindo esse fundamento, esse trabalho visou avaliar o impacto da escolha do tamanho de suportes amostrais (blocos), principalmente no que diz respeito a estimativa de tonelagem de mineral de minério em um depósito hipotético de minério fosfático. Para tanto, fez uso do método de interpolação Inverso do Quadrado da Distância (IQD), bem como o Vizinho mais próximo, para determinação dos domínios litológicos mineralizados. A partir da análise estatística dos dados provenientes dos suportes 10x10x10 metros e 25x25x10 metros, pôde-se observar que a média do teor de P_2O_5 manteve-se constante para ambos suportes amostrais, como era de se esperar, ao passo que houve uma redução de variância em decorrência do aumento da dimensão do bloco. Ademais, não houve uma mudança significativa em relação a massa de minério fosfático estimado, em decorrência da alteração das dimensões do suporte amostral de 10x10x10 metros para 25x25x10 metros. Essa variação foi na ordem de 0,15%, o que corresponde a 85.042 toneladas. Outro fator observado foi que blocos menores geram uma melhor definição dos domínios mineralizados, ou seja, há uma suavização maior na estimativa quando comparado aos modelos com blocos de dimensões maiores.

Palavras-chave: Estimativa de reserva. Modelo de blocos. Efeito suporte.

ABSTRACT

Providing an estimate of resource is part of the overall process of evaluating a mineral reserve. It is an important stage in defining the guidelines for subsequent processes, since it is a step that will determine if it is economically convenient to proceed with the project of exploration of the reserve or if it proves itself impracticable. Therefore, it is important to make a good estimate of the reserve, since the success of a mining venture depends on the estimated tonnages and ores content. This paper proposed to evaluate the impact of the choice of sample support sizes (blocks), mainly in relation to the estimation of mineral ore tonnage in the evaluation of mineral reserves. For that, the Inverse Distance Square (IDS) interpolation method, as well as the Nearest Neighbor, was used to determine the mineralized lithological domains. From the statistical analysis of the data from the supports 10x10x10 meters and 25x25x10 meters, it could be observed that the average of the P₂O₅ content remained constant for both sample supports, as expected, whereas there was a reduction of variance due to the increase in size of the block. In addition, there was no significant change in relation to the estimated phosphate mass, as a result of the change in the dimensions of the sample support from 10x10x10 meters to 25x25x10 meters. This variation was in the order of 0.15%, which corresponds to 85,042 tons. Another observed factor was that smaller blocks generate a better definition of the mineralized domains, that is, there is a greater smoothing in the estimation when compared to the models with larger blocks.

Keywords: Reserve estimate. Block model. Supporting effect.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Classificação do recurso geológico (a) e da reserva mineral lavrável (b). Fonte: Adaptado de Yamamoto e Rocha (1996, p. 244).	4
FIGURA 2 - Exemplos de padrões de amostragem, sendo (a) amostragem aleatória e (b) amostragem sistemática. Fonte: Adaptado de Sinclair e Blackwell (2002, p.113).	6
FIGURA 3 - Modelo de blocos. Adaptado de Yamamoto e Rocha (1996, p. 252).....	7
FIGURA 4 - Esquema do processo de estimativa de uma reserva mineral. Fonte: Adaptado de Sinclair e Blackwell (2002, p.2).	9
FIGURA 5: Fluxograma do processo i.....	13
FIGURA 6: Fluxograma do processo ii.....	13
FIGURA 7: Fluxograma do processo iii e iv para o domínio de minério.	14
FIGURA 8: Fluxograma do processo iii e iv para o domínio de estéril.	14
FIGURA 9: Fluxograma do processo v e vi.	14
FIGURA 11 - Histograma do teor de P_2O_5 dos dados reais.	20
FIGURA 12 - Histograma do teor de P_2O_5 dos dados reais no (a) domínio de estéril e (b) domínio de minério.....	21
FIGURA 13 - Histograma do teor de P_2O_5 dos blocos 10x10x10 metros estimados por IQD.....	22
FIGURA 14- Histograma do teor de P_2O_5 dos blocos estimados por IQD de dimensão 10x10x10 m no (a) domínio de estéril e (b) domínio de minério.....	23
FIGURA 15 - Histograma do teor de P_2O_5 dos blocos 25x25x10 metros estimados por IQD.....	24
FIGURA 16 - Histograma do teor de P_2O_5 dos blocos estimados por IQD de dimensão 25x25x10 m no (a) domínio de estéril e (b) domínio de minério.....	25
FIGURA 17: Parâmetros da análise estatística de ambos suportes amostrais para o (a) domínio de estéril e (b) domínio de minério.....	26
FIGURA 18 - Parâmetros da análise estatística de ambos suportes amostrais no depósito de mineral fosfático.	26
FIGURA 19 - Validação visual do modelo de blocos 10x10x10 m na seção N-S quanto ao domínio de minério e estéril.	27
FIGURA 20 - Validação visual do modelo de blocos 25x25x10 m na seção N-S quanto ao domínio de minério e estéril.	27

FIGURA 21 - Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos 10x10x10 m na seção N-S.	28
FIGURA 22 - Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos 25x25x10 m na seção N-S.	28
FIGURA 23 - Análise de Deriva para o teor de P_2O_5 na direção no eixo Y para o modelo (a) 10x10x10 e (b) 25x25x10 metros.	29

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Detalhe da disposição dos dados fictícios que foram utilizados na avaliação do efeito suporte.	15
TABELA 2 - Número total de blocos presentes em ambos modelos.	17
TABELA 3 - Definições das coordenadas e número de blocos por eixo nos modelos de 10x10x10 e 25x25x10 metros.	17
TABELA 4 - Análise estatística do variável teor de P ₂ O ₅ dos dados reais.	21
TABELA 5 - Análise estatística do variável teor de P ₂ O ₅ dos dados reais em ambos domínios litológicos.	22
TABELA 6 - Análise estatística do variável teor de P ₂ O ₅ dos blocos 10x10x10 m.	22
TABELA 7 - Análise estatística do variável teor de P ₂ O ₅ dos blocos de dimensões 10x10x10 m em ambos domínios litológicos.	23
TABELA 8 - Análise estatística do variável teor de P ₂ O ₅ dos blocos 25x25x10 m.	24
TABELA 9 - Análise estatística do variável teor de P ₂ O ₅ nos blocos 25x25x10 m em ambos domínios litológicos.	25
TABELA 10 - Parâmetros utilizados na Análise de Deriva para o modelo de blocos 10x10x10 e 25x25x10 m.	29
TABELA 11 - Tonelagens de mineral minério para os dois suportes amostrais: 10x10x10 metros e 25x25x10 metros.	31

LISTA DE SÍMBOLOS

t	Teor do ponto a ser estimado
t_i	Teor de pontos vizinhos ao ponto a ser estimado
d_i	Distância do ponto amostrado a um ponto a ser estimado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Recursos e Reservas	4
2.2	Amostra e métodos de amostragem.....	6
2.3	Modelo de blocos.....	7
2.4	Interpolação	9
2.4.1	Inverso do Quadrado da Distância (IQD).....	9
2.4.2	Vizinho mais próximo	11
2.5	Software Datamine	11
2.6	Microsoft Office Excel	12
2.7	<i>Software R</i>	12
3	Metodologia.....	13
3.1	Banco de dados	14
3.2	Importação dos dados	16
3.3	Análise estatística	16
3.4	Criação do modelo de blocos.....	16
3.5	Interpolação dos modelos gerados.....	17
3.6	Validações	18
3.6.1	<i>Check</i> visual.....	19
3.6.2	Análise de deriva	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1	Análise estatística	20
4.2	<i>Check</i> visual.....	27
4.3	Análise de deriva	29
4.4	Comparativo das estimativas de tonelagem.....	31
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
	REFERÊNCIAS.....	35
	ANEXO A - SEÇÕES VERTICAIS.....	37

1 INTRODUÇÃO

O processo de estimativa de um recurso mineral é caracterizado como sendo a base sobre a qual serão estruturados os estudos de viabilidade econômica. Conde e Yamamoto (1995, p.14), certificam que o processo de avaliação de uma reserva mineral consiste em um procedimento que tem como prioridade a quantificação de minério e avaliação da qualidade do bem mineral presente no depósito.

Caso comprovada a existência de um recurso mineral com teor e volume consideráveis, e ainda certificado a sua viabilidade técnica/econômica, comprovando-se uma reserva mineral, o investimento torna-se possível. Assim, operações subsequentes, como a lavra e o beneficiamento, utilizadas para extrair e concentrar o bem mineral de interesse, podem operar de modo a produzir uma receita para compensar todo o investimento e proporcionar uma margem de lucro satisfatória. Importante ressaltar que as definições de recurso e reserva mineral não são definitivas, estando sujeitas resumidamente a fatores dinâmicos, de natureza tecnológica e mercadológica.

Claramente, todas as decisões de caráter financeiro e tecnológico relativas ao planejamento, são elaboradas com base no conhecimento dos recursos minerais disponíveis. Assim, as estimativas de tonelagens e teores de uma jazida mineral devem ter um grau de confiança aceitável. Todavia, essas estimativas, geralmente são determinadas a partir de suportes amostrais, furos de sonda, que não abrangem todo o volume de rocha mineralizado, não sendo possível quantificar parâmetros como tonelagem e teor de maneira exata.

Para caracterizar um depósito, geralmente, discretiza-se todo o domínio em uma série blocos e, estima-se o teor e a massa de minério por meio de algum método de interpolação (CRUZ JR.; REMACRE, 2001, p.2). Portanto, existe um erro associado ao método de estimativa empregado e na seleção do tamanho dos blocos (suporte amostral), além de demais falhas que antecedem esse processo e que podem comprometer toda a avaliação da reserva. De acordo com Cruz Jr e Remacre (2001 p.5) essas causas são ocasionadas em decorrência da amostragem insuficiente, ao erro inerente a escolha do método de estimativa, ao erro de interpretações geológicas (suposições quanto a geometria e a extensão do corpo de minério), e do próprio erro humano. Sendo assim, qualquer avaliação feita com base em dados amostrais estará sujeita a um desvio, conhecido somente após a operação de lavra.

Com intuito de gerar resultados mais coerentes e reproduzir fielmente as características do depósito em estudo, os métodos de avaliação de reservas vêm sendo otimizados, uma vez que a maior causa de insucesso de um empreendimento está ligada a uma estimativa errônea

dos recursos minerais, que pode ser mediante a escolha inadequada do suporte amostral. Assim, a existência de jazidas com teores cada vez mais pobres e o elevado investimento necessário à abertura de novas minas, justifica a necessidade de uma maior atenção nesse estudo com intuito de se obter uma estimativa dos teores e tonelagem de maneira confiável e condizente.

Este trabalho, portanto, foi proposto com o intuito de avaliar, pelo critério geoestatístico, o impacto da seleção de dois suportes amostrais de tamanhos distintos, equivalentes a 10x10x10 metros e 25x25x10 metros, na estimativa de tonelagem de um depósito hipotético de minério fosfático. A escolha dos suportes amostrais 10x10x10 e 25x25x10 metros foram definidos com base nos espaçamentos dos furos da malha de sondagem do depósito de minério fosfatado. Os furos encontram-se espaçados a uma distância máxima de aproximadamente 120 metros. Portanto, estas dimensões adotadas satisfazem uma das diretrizes estabelecidas por Darling (2011, p.212), segundo o qual a dimensão do bloco está condicionada a um quarto do espaçamento médio da malha.

Todavia, deve ser levado em conta outros parâmetros, como especificações do equipamento de mineração, altura do banco e características de detonação do maciço (DARLING, 2011, p. 212). A seleção de um suporte amostral ótimo para a caracterização de um recurso mineral favorece a obtenção de informações com maior confiabilidade acerca da reserva mineral de modo a caracterizá-la como sendo técnica e economicamente viável de ser ou não explorada.

Os métodos de interpolação usados de modo a estimar os blocos pertencentes ao modelo serão o método do vizinho mais próximo, também conhecido como polígono de influência, para estimativas das zonas litológicas mineralizadas, e o Inverso do Quadrado da Distância (IQD)

Este trabalho tem como principal objetivo analisar a existência ou não do impacto decorrente do emprego de diferentes suportes amostrais na estimativa de teor e tonelagem de minério em uma reserva mineral. Assim, serão avaliados dois suportes amostrais distintos definidos com base no espaçamento da malha de sondagem.

A proposta desse estudo é, a partir de informações de um banco de dados hipotético de um depósito de fosfato, caracterizá-lo por meio de técnicas de interpolação, sendo elas o Inverso do Quadrado da Distância (IQD) e o Vizinho mais próximo. Ambos os métodos de interpolação serão aplicados em duas dimensões distintas de suporte amostral (10x10x10 e 25x25x10 metros) de modo obter a estimativa de tonelagem do recurso mineral e avaliar os resultados obtidos em decorrência do tipo de suporte amostral adotado. Com isso, são definidos os seguintes objetivos específicos: criação do modelo de blocos 10x10x10 e 25x25x10 metros, estudo estatístico básico dos dados reais, bem como dos dados provenientes da estimativa de

ambos modelos, a estimativa dos domínios litológicos por meio do método do Vizinho mais próximo e dos teores de P_2O_5 , por meio do IQD, seguidos da validação e quantificação do mineral útil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Recursos e Reservas

A classificação de recursos e reservas são dinâmicas e estão sujeitas ao nível de informações obtidas por meio de pesquisas, bem como a fatores tecnológicos e mercadológicos. Em outras palavras, a partir do momento que novos dados, provenientes de furos de sondagem, são revelados, domínios, antes classificados como recursos podem se tornar reservas segundo novos conceitos, tanto do ponto de vista econômico, tecnológico e geológico. Verifica-se também o contrário, no qual mudanças nos cenários mercadológicos, a níveis regionais ou mundiais, podem levar uma reserva mineral a ser classificada como recurso mineral.

De maneira geral, dados obtidos mediante a campanha exploratória aliada a informações no contexto operacional, econômico, tecnológico e da região que o projeto está inserido definem a porção do recurso mineral que é passível de ser lavrada. A partir desse momento é estabelecido os limites finais da cava e, conseqüentemente, a reserva mineral lavrável, conforme apresenta a Figura 1 (HISTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013, p. 4).

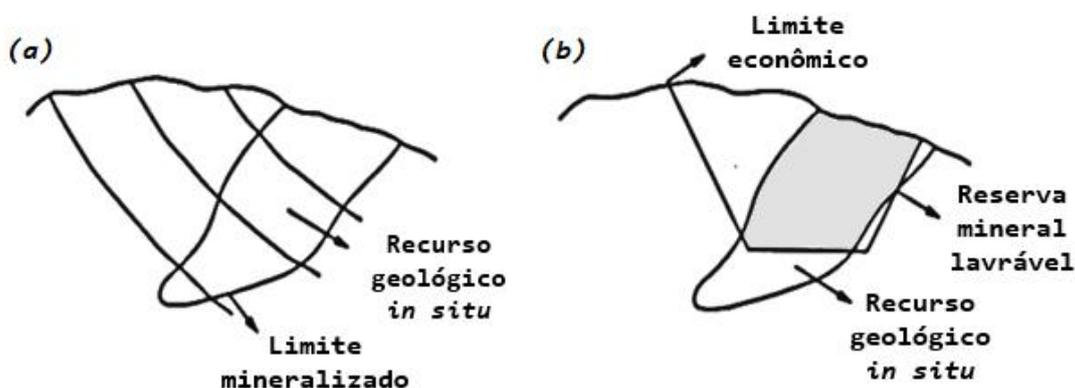


Figura 1 - Classificação do recurso geológico (a) e da reserva mineral lavrável (b). Fonte: Adaptado de Yamamoto e Rocha (1996, p. 244).

O JORC CODE (2004 *Edition*) definiu recurso mineral como sendo uma ocorrência anômala de um bem mineral de interesse presente na crosta terrestre, cuja forma e dimensão do corpo mineralizado, e parâmetros como qualidade e tonelagem sejam tais que justificam os gastos provenientes da extração econômica. Informações como teor, continuidade e características geológicas, bem como localização e tonelagem são definidas a partir da estimativa ou mediante a interpretações de evidências geológicas (reveladas a partir de

interpretações provenientes de testemunhos de sondagens, afloramentos, trincheiras, entre outros). O recurso mineral é subdividido em três categorias, são elas:

- **Recurso medido:** a tonelagem e a avaliação da qualidade do bem mineral são rigorosamente definidas a partir de análises e interpretações de testemunhos de sondagens, devendo os pontos da malha estarem mais adensados, ou seja, menos espaçados.
- **Recurso indicado:** a tonelagem e a avaliação da qualidade do bem mineral são determinadas a partir de dados parciais provenientes da campanha de amostragem coletados de forma mais espaçada ou ainda de evidências geológicas, tais como afloramentos.
- **Recurso inferido:** trata-se de uma estimativa realizada mediante a interpretações de evidências geológicas, não havendo um trabalho de pesquisa detalhado, possuindo assim, um menor grau de certeza.

Sendo assim, reserva mineral é definida como uma porção de um recurso mineral viável de ser lavrada em termos operacionais e econômicos. As reservas lavráveis são classificadas ainda em reservas prováveis de minério e reservas provadas de minério, a depender do nível de confiança das informações. De acordo com Miranda Júnior (2011, p. 10), elas podem ser caracterizadas como:

- **Reservas prováveis de minério:** trata-se da fração economicamente lavrável de um recurso mineral indicado ou mesmo de um recurso mineral medido e, possui um volume de informações inferior quando comparado a uma reserva provada de minério. Portanto, possui um nível de confiança menor, todavia, as informações obtidas são suficientes para decidir se é viável ou não, do ponto de vista econômico, técnico e operacional, seguir com o desenvolvimento do depósito. Para tanto, há estudos e análises envolvendo alguns elementos que podem influenciar diretamente na avaliação, são elas: economia e mercado, fatores legais, ambientais, sociais e a lavra e metalurgia, por exemplo.
- **Reservas provadas de minério:** trata-se da fração economicamente lavrável de recurso mineral medido. Da mesma maneira, são analisados parâmetros no âmbito legal, social e ambiental de modo a demonstrar a viabilidade técnica e econômica da reserva. Ademais, possui um grande volume de informações acerca da reserva e, assim, possui um grau de confiança elevado quanto a estimativa da reserva mineral.

2.2 Amostra e métodos de amostragem

Para a estimativa de um recurso mineral necessita-se do conhecimento e caracterização de todo o domínio geológico, sendo o processo de amostragem responsável por fornecer dados quanto a extensão e geometria do corpo mineralizado e quantificação de parâmetros como massa e teor. Para tanto é imprescindível ter informações representativas, de caráter quantitativo e qualitativo acerca de todo o domínio. Assim, a amostragem é um processo que permite fazer conclusões sobre o todo, a partir do conhecimento de uma porção do domínio.

Geralmente, a amostragem é feita com base em um planejamento, que deve definir o critério de obtenção das amostras, uma vez que, se não conduzidos de maneira adequada, os resultados de análise, mesmo que conduzidos com precisão, não fornecerão as características do universo amostrado.

Um critério a ser bem definido na fase de amostragem diz respeito a localização e a distribuição das amostras. Tradicionalmente a amostragem pode seguir um padrão estratificado, regular ou aleatório (SINCLAIR e BLACKWELL, 2002, p.113) conforme exemplificado na Figura 2.

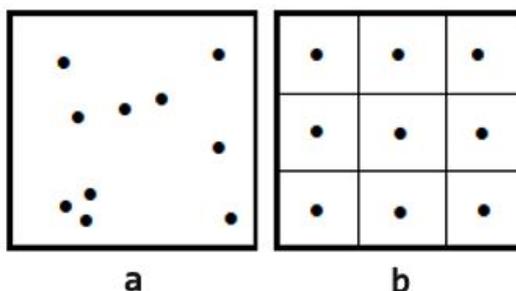


Figura 2 - Exemplos de padrões de amostragem, sendo (a) amostragem aleatória e (b) amostragem sistemática. Fonte: Adaptado de Sinclair e Blackwell (2002, p.113).

A amostragem aleatória não é recomendada para o processo de avaliação de reservas minerais, visto que a influência da geologia, topografia e da própria vegetação (limites físicos) induz o amostrador a retirar amostras em pontos de fácil acesso e próximos a afloramentos, levando a uma superestimativa ou subestimativa da reserva.

Já na amostragem sistemática, as amostras são coletadas seguindo intervalos regulares, previamente definidos. E, nessa metodologia é possível caracterizar todo o domínio, uma vez que essa amostragem abrange toda a área sem tender a uma estimativa errônea.

2.3 Modelo de blocos

Foi em 1964, mediante a trabalhos desenvolvidos por A. H. Axelson, que surgiu o primeiro conceito de modelo de blocos quanto a representação de unidades de extração de lavra. O modelo de blocos corresponde ao volume do corpo mineralizado, e este é subdividido em unidades tridimensionais, que, corresponde com a unidade lavra (Braga, 2015). Essa convenção surgiu pelo fato de a utilização de blocos ser mais apropriada para simbolizar as operações unitárias da lavra (JOHNSON, 1968, p. 8).

Conforme é apresentado na Figura 3, o modelo de blocos é um processo que consiste na discretização do corpo mineralizado em blocos, geralmente de mesma dimensão, no qual cada bloco contém/ armazena dados, como: litologia, teor, massa, volume, densidade, grau de alteração, e demais parâmetros relevantes para o processo de estimativa (CAMPOS, 2017, p. 12). Caso haja uma quantidade razoável de informações geológicas provenientes a partir de interpretações de testemunhos de sondagem e de afloramentos, são utilizados tamanhos uniformes de blocos para a discretização do corpo (ROSSI; DEUTSCH, 2014 p. 45).

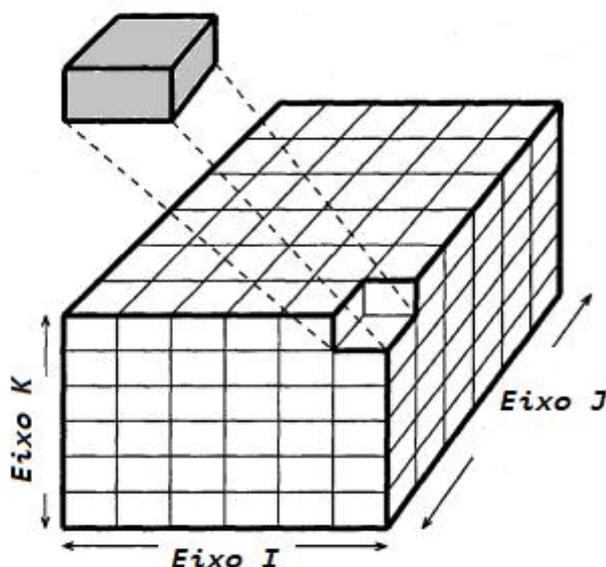


Figura 3 - Modelo de blocos. Adaptado de Yamamoto e Rocha (1996, p. 252).

Também conhecido como suporte amostral, a dimensão do bloco é um volume no qual atributos geológicos são determinados, e é definida com base em uma série de variáveis. Segundo Campos, (2017, p. 12), a capacidade da usina, o porte dos equipamentos, métodos de lavra, altura dos bancos são só alguns dos parâmetros que influenciam diretamente na escolha do tamanho dos blocos. O tamanho do bloco para estimativa é uma questão discutida por muitos autores e, segundo eles, o tamanho do bloco não pode ser muito menor que a malha de

amostragem, pois eles acarretam em uma alta variância de estimação, apesar da melhora quanto à flexibilidade na operação.

Todavia os blocos não podem ser grandes, visto que impacta diretamente do seu processamento, além da perda de flexibilidade e refinamento na etapa de planejamento. Um bloco de dimensão considerável não é interessante para otimização de cava e planejamento de mina (ROSSI; DEUTSCH, 2014, p. 44). Portanto, daí vem a importância de definir bem a dimensão dos blocos e do modelo tridimensional, uma vez que se tem um impacto decorrente do seu processo de estimativa (BRAGA, 2015, p.74). Teoricamente, as dimensões ótimas do suporte amostral (blocos) devem ser estabelecidas a partir do espaçamento entre os pontos da malha de amostragem. Portanto, afim de assegurar uma boa estimativa, as dimensões do bloco deveriam ser iguais a metade da distância que separa os pontos de amostragem, o que asseguraria pelo menos um ponto de amostragem no interior do bloco a ser estimado (YAMAMOTO; ROCHA, 1996, p.252).

De acordo com Darling (2011, p. 212), há algumas diretrizes para a definição do tamanho de blocos:

- i. De modo a minimizar o tempo de processamento e o espaço para armazenamento, prioriza-se o maior tamanho possível para o bloco;
- ii. A dimensão do bloco é estabelecida com base no espaçamento da malha de amostragem e, geralmente, está condicionada entre um quarto do espaçamento médio da malha;
- iii. A definição do tamanho dos blocos é também estipulada a partir das estruturas geológicas e seu grau de continuidade. Sendo assim, a dimensão do bloco deve possuir no mínimo a metade da dimensão da menor estrutura geológica a ser modelada, uma vez que blocos maiores causam uma diluição dessas estruturas e, portanto, uma estimativa errônea do recurso mineral;
- iv. O método de lavra a ser empregado também define a dimensão do bloco a ser utilizado no processo. E, normalmente, a altura do bloco coincide com a altura da unidade de extração de lavra;
- v. Essas diretrizes para a definição do tamanho ótimo dos blocos, geralmente, se divergem. Assim, convém avaliar a melhor opção a depender do caso.

2.4 Interpolação

A interpolação ou estimativa em pontos não amostrados é sempre necessária, pois a amostragem nunca é feita em pontos muito próximos, devido a limitações físicas e econômica. Assim, para caracterizar um depósito mineral em termos de tonelagem e teor, discretiza-se todo o domínio mineralizado em blocos, geralmente de tamanho uniforme, e estima o valor dos atributos em cada bloco a partir das amostras vizinhas, dentro de uma área de busca, conforme é exposto na Figura 4.

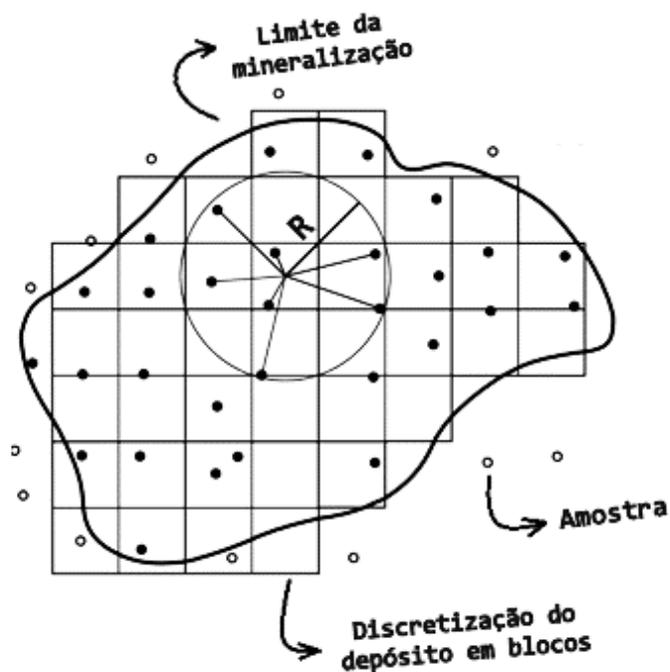


Figura 4 - Esquema do processo de estimativa de uma reserva mineral. Fonte: Adaptado de Sinclair e Blackwell (2002, p.2).

Geralmente, as técnicas utilizadas para a estimativa de reservas minerais variam desde as técnicas tradicionais às geoestatísticas. As técnicas tradicionais englobam métodos como o Inverso do Quadrado da Distância (IQD) ou vizinho mais próximo, cuja metodologia utiliza conceitos relacionados a área de influência em torno dos furos de sondagem. (JÚNIOR; REMACRE, 2001).

2.4.1 Inverso do Quadrado da Distância (IQD)

O método Inverso do Quadrado da Distância (IQD) fundamenta-se na premissa de que amostras distantes de um determinado ponto amostral têm pequena influência sobre os demais domínios, em tal proporção que, o valor estimado é inversamente proporcional a sua distância

(DARLING, 2011, p. 212). É equivalente dizer que amostras adjacentes, em relação ao ponto amostrado, possuem uma contribuição maior quando comparado às amostras mais distantes.

Abaixo, há a fórmula utilizada para estimativa pelo método IQD. Trata-se de uma combinação linear ponderada das amostras vizinhas ao ponto a ser estimado. Os ponderadores são definidos com base nas distâncias das amostras ao ponto ou bloco que se deseja estimar.

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

Onde,

t_i é o teor de um determinado ponto;

d_i é a distância do ponto amostrado a um ponto a ser estimado.

O método assume que a variável a ser interpolada é isotrópica, ou seja, a variação da correlação entre as amostras é a mesma independente da distância adotada. É empregado quando há uma distribuição uniforme dos dados, e quando existe um volume de informações consideráveis. Todavia não é interessante utilizá-lo para estimar dados que se encontram agrupados, visto que sofre influência de amostras anômalas locais. Segundo Landim (2000, p. 6), este método apresenta algumas vantagens quanto a sua aplicação, são elas:

- Exige tempo relativamente pequeno para processamento dos dados;
- Garante que os valores estimados estejam entre os valores máximos e mínimos dos dados amostrados, sendo uma boa ferramenta para a estimativa de espessura, propriedades físicas e químicas;
- É uma ferramenta simples do contexto matemático e o método mais utilizado entre os métodos de média ponderada;
- Disponível em muitos *softwares*;
- Pode ser utilizada para estimar por domínios, no qual permite definir a quantidade de amostras que serão interpoladas.

Todavia, o método apresenta desvantagens:

- Dados agrupados podem influenciar na estimativa de modo a superestimar ou subestimar o ponto estimado;
- Sofre influência em decorrência de amostras com valores extremos;

- Não é aconselhável para estimativas de dados estruturais.

2.4.2 Vizinho mais próximo

Esse método consiste na atribuição de uma área de influência sobre o ponto amostrado. Dentro desse domínio, a variável em estudo possui um valor constante e é igual àquele determinado no ponto (GUTIÉRREZ RAMÍREZ, 2009, p. 55). Cada amostra é delimitada por uma área de influência, sendo que a estimativa de um determinado ponto ou bloco é feita a partir da seleção de uma única amostra vizinha, de modo a não gerar valores intermediários.

De maneira geral, o método apresenta uma boa resposta em áreas com um volume considerável de dados. E, apesar de gerar inconformidades quanto a presença de pequenas estruturas geológicas, este método possui as seguintes vantagens:

- Trata-se de uma ferramenta de interpolação simples;
- Método simples e requer pouco tempo para o processamento dos dados;
- Não fornece valores intermediários.

2.5 Software Datamine

O software Studio 3[®] é uma linha da Datamine que possibilita o gerenciamento de dados, assim como a modelagem de corpos geológicos, planejamento e operações de minas. A Datamine foi fundada em 1981 e, desde então, é reconhecida como precursora no desenvolvimento de ferramentas computacionais que garantem a modelagem e estimativa de recursos naturais.

O Studio 3[®] é uma ferramenta que possibilita a geração de modelos geológicos até a construção de cavas a céu aberto. Além disso, é dotado de uma interface que é capaz de visualizar e formatar dados de forma independente, permitindo com que o usuário analise, visualize, modele, inspecione e altere dados geológicos, para assim, permitir uma interpretação geológica mais adequada, independentemente da complexidade do depósito em estudo (DATAMINE).

2.6 Microsoft Office Excel

O Microsoft Office Excel, também conhecido Excel[®], é um *software* criado pela Microsoft em 1987. Trata-se de um aplicativo que permite a criação de planilhas eletrônicas. Possibilita ainda a realização de cálculos, confecção de gráficos e a apresentação de dados de maneira rápida.

2.7 Software R

O software R é uma importante ferramenta no que refere a análise e interpretação de dados. Trata-se de um recurso gratuito que abrange uma série de técnicas estatísticas e que permite a elaboração de diversos tipos de gráficos para análise dos dados. E, ademais, conta com um sistema integrado para manipulação dos dados.

3 METODOLOGIA

Nessa seção, apresentou-se a descrição do banco de dados hipotético de um depósito de minério fosfático, assim como o modelo de blocos e métodos empregados no processo de interpolação das variáveis de tonelagem de mineral minério. A metodologia é composta pelas seguintes etapas:

- i. Validação do banco de dados, desagrupamento em domínios litológicos, seguido da importação dos dados para o software Datamine Studio 3[®], conforme Figura 5.

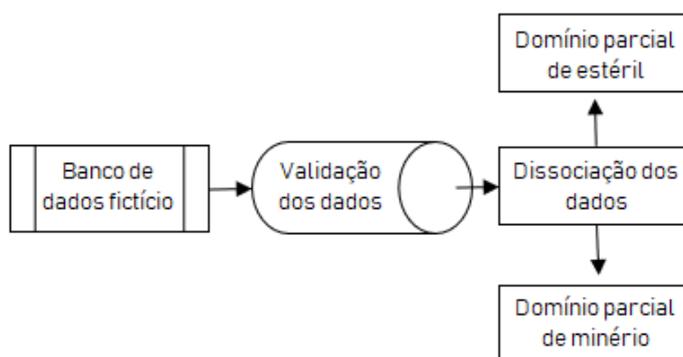


Figura 5 - Fluxograma do processo i.

- ii. Definição do suporte e criação do modelo de blocos. Conforme a Figura 6.

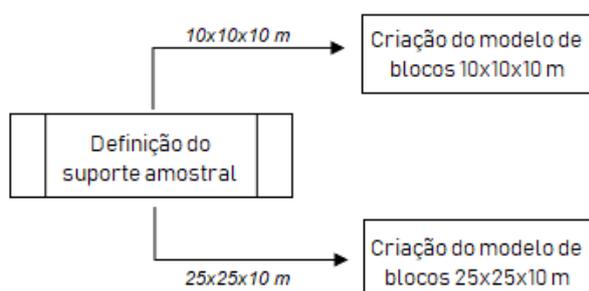


Figura 6 - Fluxograma do processo ii.

- iii. Estimar pelo vizinho mais próximo as zonas litológicas a partir das informações parciais contidas nos furos de sondagem, caracterizando as zonas mineralizadas e zonas de estéril;
- iv. Estimar o teor de ambos modelos de blocos parciais, gerados na etapa iii, pelo método Inverso do Quadrado da Distância (IQD);

Os passos iii e iv são ilustrados pelas Figura 7 e 8, respectivamente. É importante salientar que essa etapa foi feita para ambos modelos de blocos criados na etapa ii.

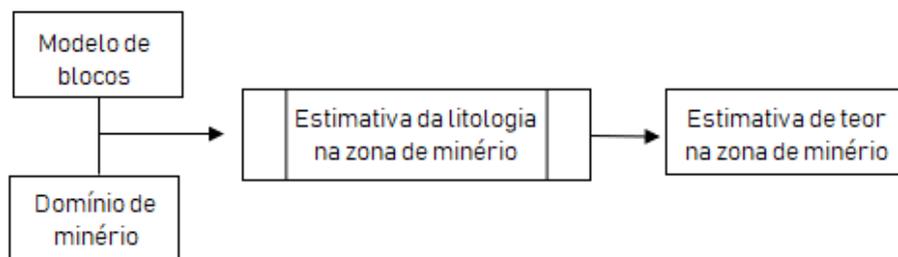


Figura 7 - Fluxograma do processo iii e iv para o domínio de minério.

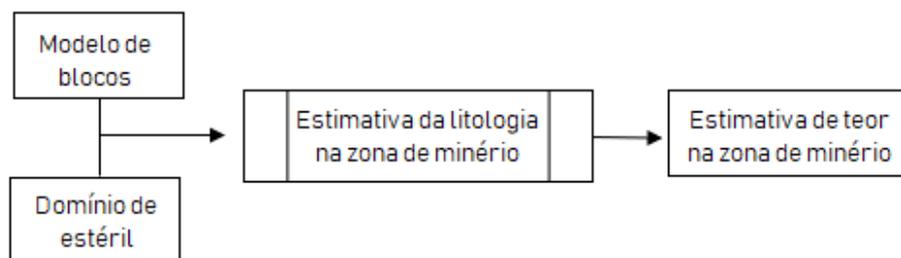


Figura 8 - Fluxograma do processo iii e iv para o domínio de estéril.

- v. Validar o processo de estimativa por meio de duas técnicas: Check Visual e Análise de Deriva;
- vi. Comparar massa e distribuição de teor de P_2O_5 para os diferentes suportes amostrais adotados na construção de ambos modelos de blocos.

Os passos v e vi são ilustrados pela Figura 9.

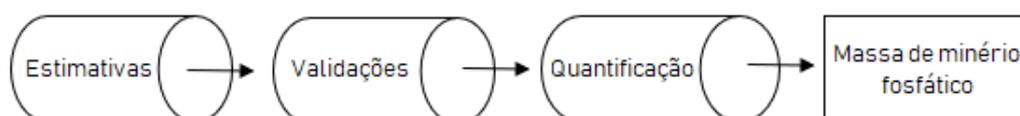


Figura 9 - Fluxograma do processo v e vi.

3.1 Banco de dados

Para avaliar o efeito suporte da estimativa, foi utilizado um banco de dados hipotético de reserva de minério fosfático, cujo mineral minério é a apatita. O banco de dados foi trabalhado em formato Excel[®] e posteriormente importado para o software Datamine[®]. O mesmo contava com informações de 241 furos de sondagens, onde foram feitos compósitos de 5 metros, resultando em um total de 6.273 amostras. Todas as amostras apresentavam informações quanto a:

- Identificação do furo e coordenadas;

- Os teores de fósforo;
- Caracterização de dois domínios tipológicos, divididas em função do teor de fosforo em zona de minério e zona de estéril.

Acerca do espaçamento da malha de amostragem, parâmetro este que influenciou diretamente na escolha do suporte amostral, verificou-se que os furos possuem espaçamentos distintos a depender da região analisada. De modo geral, a distância máxima média entre os furos é de aproximadamente 120 metros, todavia há zonas de maior adensamento o que justifica a escolha dos blocos 10x10x10 metros, uma vez que satisfaz um dos critérios estabelecidos por Darling (2011, p.212), no qual recomenda que a dimensão do bloco esteja condicionada a um quarto do espaçamento médio da malha de amostragem.

No que se refere a variável densidade, foi atribuído um valor constante equivalente à 2 g/cm³ para as litologias presentes em ambos domínios, classificados em minério e estéril, de modo a quantificar o bem mineral contido em cada bloco a ser estimado. É importante ressaltar que se trata de um dado comum no cálculo de ambos modelos, sendo assim, a densidade, independentemente do valor estipulado, não interfere nos resultados.

Além dessas informações foi necessário preparar o banco de dados fornecido. Sendo assim, criou-se uma coluna, nomeado “domínio litológico”, que recebeu uma codificação binária. As amostras que foram identificados como minério receberam o número 1 (um) e os demais furos, classificados como sendo estéril, receberam 0 (zero) como identificação. A Tabela 1 apresenta como as informações das amostras estavam dispostas na planilha.

Tabela 1 - Detalhe da disposição dos dados fictícios que foram utilizados na avaliação do efeito suporte.

Identificação dos furos	Coordenadas Espaciais			Teor de P ₂ O ₅ (%)	Domínio Litológico
	X	Y	Z		
F1	238093,4	6258526	907,744	5,6	0
F1	238093,4	6258526	903,744	10	0
F1	238093,4	6258526	899,744	7,8	0
F1	238093,4	6258526	895,744	5,74	0
F1	238093,4	6258526	891,744	7,16	0
F2	238333,4	6258528	878,648	9,38	0
F2	238333,4	6258528	874,648	8	0
F2	238333,4	6258528	870,648	7,88	0
F2	238333,4	6258528	866,648	6,62	0

F2	238333,4	6258528	861,848	12,86	1
F3	237964,6	6258645	905,536	6,02	0
F3	237964,6	6258645	901,536	11,38	0
F3	237964,6	6258645	897,536	7,68	0
F3	237964,6	6258645	893,536	3,66	0
F3	237964,6	6258645	889,536	4,34	0

3.2 Importação dos dados

Após feita a verificação dos dados, foi realizada a importação para o *software* Datamine Studio 3[®].

3.3 Análise estatística

Foram realizadas as análises estatísticas dos dados relativos aos teores de P₂O₅ em ambos modelos de blocos gerados, 10x10x10 e 25x25x10 metros. O *software* utilizado para este processo foi o R.

A partir do banco de dados avaliou-se a distribuição de teores nas zonas de estéril e minério. As informações relativas a cada zona foram desagrupados através do *software* Excel[®] e com auxílio do *software* R, foi possível construir os histogramas referentes a eles e comparar o comportamento em ambos suportes amostrais.

3.4 Criação do modelo de blocos

Com o intuito de avaliar o efeito suporte na estimativa de massa do minério fosfático, foi necessário adotar duas dimensões distintas para o tamanho das células que compõem o modelo de blocos.

O primeiro modelo foi composto por um total de 56.428 blocos cujas dimensões são de 25 por 25 metros no plano XY e 10 metros no eixo Z. Enquanto que o segundo modelo contém um total de 352.899 blocos cujas dimensões são de 10 metros em relação a qualquer um dos eixos analisados, X Y ou Z, conforme exemplificado na Tabela 2.

Tabela 2 - Número total de blocos presentes em ambos modelos.

Modelo	Número de Blocos
10x10x10 m	352.899
25x25x10 m	56.428

As informações referentes à origem; tamanho de célula e número de células em cada direção são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Definições das coordenadas e número de blocos por eixo nos modelos de 10x10x10 e 25x25x10 metros.

Parâmetros	Modelos de Blocos					
	Modelo 25x25x10 m			Modelo 10x10x10 m		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Coordenadas espaciais do vértice de origem	355.560	9.386.640	960	355.560	9.386.640	960
Número de blocos	120	118	44	300	295	44
Dimensões dos blocos	25	25	10	10	10	10

As dimensões definidas para a confecção dos modelos de blocos foram estabelecidas com base nos espaçamentos dos furos do banco de dados. Enquanto que, a dimensão no suporte ao longo do eixo Z foi definida com base na altura dos blocos comumente empregados em processos unitários de lavra.

3.5 Interpolação dos modelos gerados

Foi realizado o processo de interpolação dos domínios, bem como dos teores dos modelos gerados anteriormente. Segundo PERONI, et al. (2016, p.5), entende-se por domínio o agrupamento de estruturas que apresentam características similares entre si, de caráter químico e geológico. É importante ressaltar que, antes mesmo de qualquer processo de interpolação foi necessário selecionar e desagrupar as amostras pertencentes a zona de minério e a zona de estéril para então fazer o processo de estimativa de domínios parciais, por meio do método vizinho mais próximo, seguido da estimativa de teor pelo IQD, de modo a ter uma estimativa mais condizente, sem causar uma superestimativa ou subestimativa do modelo.

O processo das estimativas dos domínios litológicos e teor de P_2O_5 foi realizado mediante o emprego de elipsoides de busca. Os elipsoides são responsáveis por transitar bloco a bloco de modo a selecionar, com base nos alcances dos seus eixos, as amostras que serão utilizadas no processo de estimativa (SOUZA, 2016, p. 65). A escolha do comprimento dos eixos X, Y e Z na elipsoide de busca foram definidas com base a malha de sondagem mais espaçada, possibilitando que haja uma estimativa coerente em ambos domínios – na zona de interesse, onde há um maior volume de informações, e na zona com malhas mais espaçadas. Sendo assim, foram atribuídos para os eixos X, Y e Z um valor igual a 120, 120 e 10 metros, respectivamente. Segundo Darling (2011, p.212) o raio máximo deve ser pelo menos igual a distância entre os furos de sondagem de modo a evitar blocos sem informação no interior do modelo.

Foi considerado ainda, um mínimo de 03 (três) e um máximo de 20 (vinte) amostras para a estimativa. De maneira que o elipsoide posicionado no centro do bloco analisasse uma quantidade superior a 03 (três) amostras e inferior a 20 (vinte). Por último, de modo a evitar uma superestimava ou subestimativa, foi considerado o octante como uma outra maneira quanto à procura de amostras para o processo de interpolação.

Segundo Marques (2014, p.35), uma busca mediante a utilização de octantes consiste no seccionamento do plano horizontal em 08 (oito) regiões de mesma dimensão e, para o cálculo da estimativa dos blocos, ele utiliza um número ‘n’ de amostras que seja constante para os domínios resultantes do corte do plano. Além disso, uma busca por octantes evita superestimativa e subestimativa, uma vez que não são dados privilégios a apenas um setor, haja vista que a seleção é aleatória. Caso não exista octantes com amostras suficientes à volta de um determinado bloco, este não é estimado. Neste caso foi utilizado um octante e um número mínimo e máximo de amostras por área seccionada igual a 01 (um) e 03 (três), respectivamente, de modo a fornecer um conjunto de dados reais que seja representativo da região em torno dos blocos.

3.6 Validações

A priori, o processo de estimativa, geralmente é acompanhando de uma validação, uma vez que torna necessário checar os resultados e investigar se os mesmos estão condizentes com os dados amostrais. A validação consiste em uma técnica para comparar e avaliar os dados estimados com dados amostrados em um determinado domínio, uma vez que existem erros em

decorrência do dimensionamento dos elipsoides de busca e no critério de seleção de amostras para processo de interpolação (SOUZA, 2016, p. 66).

3.6.1 *Check visual*

Segundo Souza (2016, p.66), a primeira validação a ser realizada, após o processo de interpolação dos blocos, é a validação visual. Esta técnica consiste em verificar, seção a seção, se a estimativa feita no modelo de blocos adere as informações provenientes dos furos de sondagem. Divergências quanto as informações reais indicam problemas quanto ao processo de estimativa. O processo de validação só é aceito quando as estimativas feitas apresentarem um comportamento semelhante aos valores reais.

3.6.2 *Análise de deriva*

A análise de deriva também é um procedimento de validação que consiste no seccionamento do modelo de blocos em fatias, ao longo dos três eixos cartesianos X, Y e Z. Posteriormente são realizadas análises estatísticas em cada porção seccionada para a obtenção das médias dos atributos de interesse. Assim, é possível avaliar a média dos teores do modelo e a média das amostras dos furos de sondagens. Esse processo comparativo é feito mediante a construção de gráficos que permitem a visualização da aderência da estimativa e verificar o comportamento da estimativa ao longo das direções X, Y e Z do domínio.

O valor obtido pela estimativa da faixa não necessariamente será o mesmo das amostras presentes na faixa. Porém, deve possuir um comportamento semelhante (SOUZA, 2016, p.68).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão discutidos os resultados adquiridos a partir da metodologia aplicada. De maneira sucinta, serão apresentados os resultados decorrentes da análise estatística dos teores de P_2O_5 presentes nos modelos 10x10x10 e 25x25x10, bem como as validações dos modelos dos domínios litológicos e teor e um comparativo entre os resultados da estimativa de tonelagem de mineral minério de ambos modelos.

4.1 Análise estatística

A análise estatística do teor de P_2O_5 para os dados reais, bem como os dados estimados nos suportes 10x10x10 e 25x25x10 metros foram executados mediante a utilização do *software* R. A Figura 10 e a Tabela 4 trazem, respectivamente o histograma da distribuição dos teores e um resumo estatístico provenientes dos dados reais, ou seja, dos furos de sondagem.

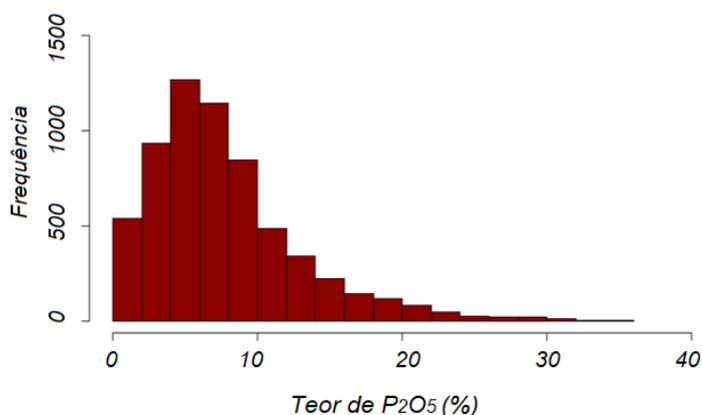


Figura 10 - Histograma do teor de P_2O_5 dos dados reais.

O histograma apresenta a distribuição estatística das análises para P_2O_5 com teores variando de 0 a 37%. É ainda possível observar que se trata de uma distribuição assimétrica positiva, uma vez que há um predomínio de amostras com teor em torno de 5 % e um coeficiente de variação igual a 0,67.

Tabela 4 - Análise estatística da variável teor de P_2O_5 dos dados reais.

Análise Estatística	
Média	7,97
Desvio	5,25
Variância	27,51
Coefficiente de Variação	0,67

Já na análise estatística descritiva, verifica-se que a variável teor apresenta esperança matemática de 7,97 %, enquanto que a variância e desvio foram valorados em 27,51 % e 5,25 %, respectivamente.

De modo a verificar a distribuição e o comportamento da variável teor de P_2O_5 por domínios litológicos, foi elaborado os histogramas (Figura 11) de modo a avaliar a distribuição do variável teor na zona de minério e na zona de estéril. Apesar da assimetria, o coeficiente de variação é de apenas 0,56 e 0,42, respectivamente.

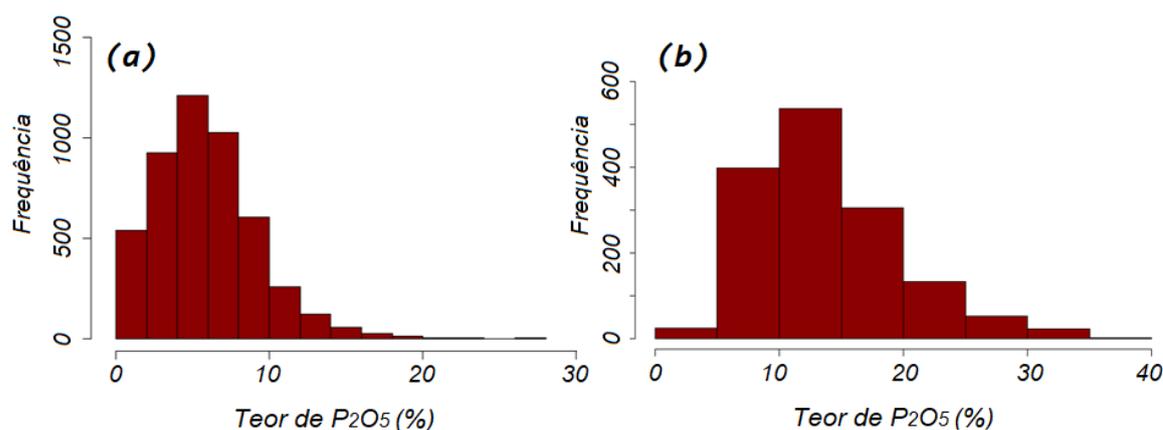


Figura 11 - Histograma do teor de P_2O_5 dos dados reais no (a) domínio de estéril e (b) domínio de minério.

A Tabela 5 a seguir apresenta um resumo da estatística descritiva para os domínios litológicos caracterizados como zona de minério e zona de estéril. Como se pode notar, as amostras contendo apatita possuem um teor médio de 13,84 % e 5,94 % para os domínios de minério e estéril, respectivamente.

Tabela 5 - Análise estatística da variável teor de P_2O_5 dos dados reais em ambos domínios litológicos.

Análise Estatística		
Domínios Litológicos	Zona de Minério	Zona de Estéril
Média	13,84	5,94
Desvio	5,78	3,32
Variância	33,44	11,03
Coeficiente de Variação	0,42	0,56

Da mesma maneira, a Figura 12 e a Tabela 6 fornecem, respectivamente, um resumo estatístico dos resultados da estimativa por IQD para o suporte amostral 10x10x10 metros e os histogramas da distribuição de P_2O_5 dos teores contidos em cada bloco estimado.

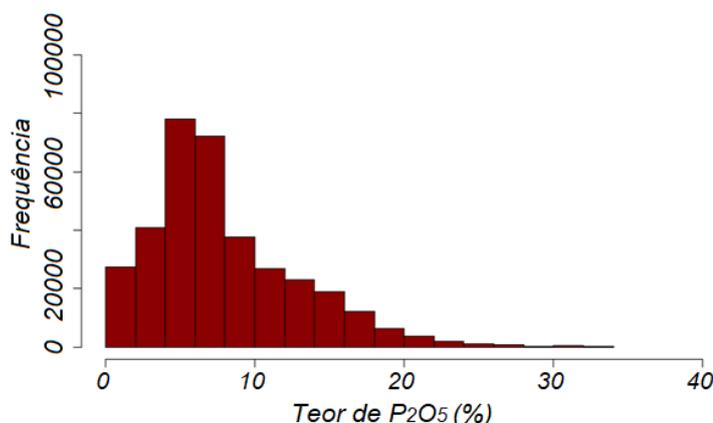


Figura 12 - Histograma do teor de P_2O_5 dos blocos 10x10x10 metros estimados por IQD.

O histograma aponta a distribuição estatística dos teores, e estes variam de 0 a 34%. É possível ainda observar que, assim como o histograma da Figura 12, este também se trata de uma distribuição assimétrica positiva, uma vez que há um predomínio de amostras com teor em torno de 7% e um coeficiente de variação de 0,63.

Tabela 6 - Análise estatística da variável teor de P_2O_5 dos blocos 10x10x10 m.

Análise Estatística	
Média	7,97
Desvio	4,99
Variância	24,89
Coeficiente de Variação	0,63

Verifica-se que a variável possui média de 7,97 %, ao passo que uma variância e desvio igual a 24,89 % e 4,99 %, respectivamente. De forma a manter um parâmetro comparativo, foi feito a distribuição de teor por domínios litológicos. A Figura 13 revela a distribuição do domínio de minério e estéril. Apesar da assimetria positiva, o coeficiente de variação é de 0,45 e 0,31, respectivamente.

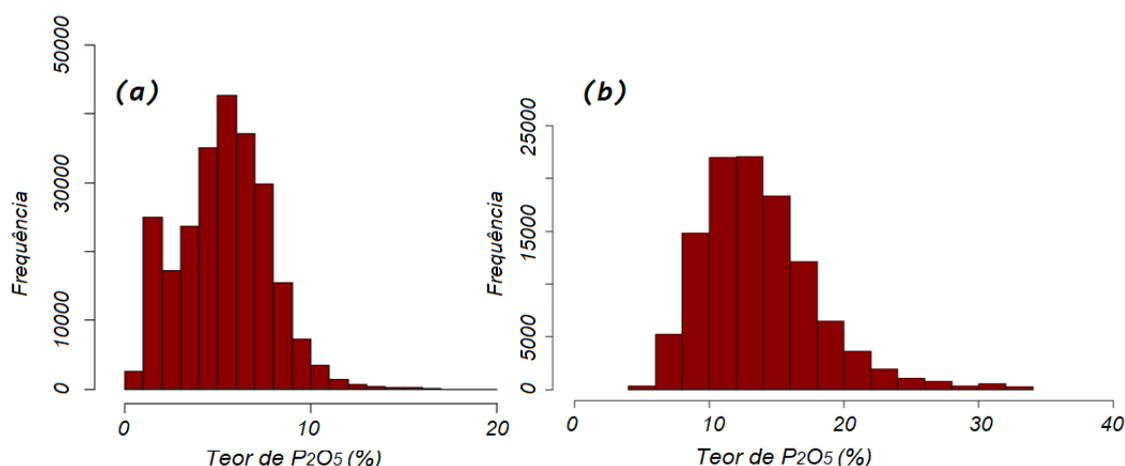


Figura 13- Histograma do teor de P_2O_5 dos blocos estimados por IQD de dimensão 10x10x10 m no (a) domínio de estéril e (b) domínio de minério.

A Tabela 7 apresenta um resumo da estatística descritiva de ambos domínios litológicos.

Tabela 7 - Análise estatística da variável teor de P_2O_5 dos blocos de dimensões 10x10x10 m em ambos domínios litológicos.

Análise Estatística		
Domínios Litológicos	Zona de Minério	Zona de Estéril
Média	13,72	5,37
Desvio	4,32	2,44
Variância	18,65	5,95
Coeficiente de Variação	0,31	0,45

Por último, a Figura 14 e a Tabela 8 fornecem, respectivamente, um resumo estatístico dos resultados da estimativa por IQD para o suporte amostral 25x25x10 metros, bem como o histograma representativo dos teores contidos em cada bloco estimado.

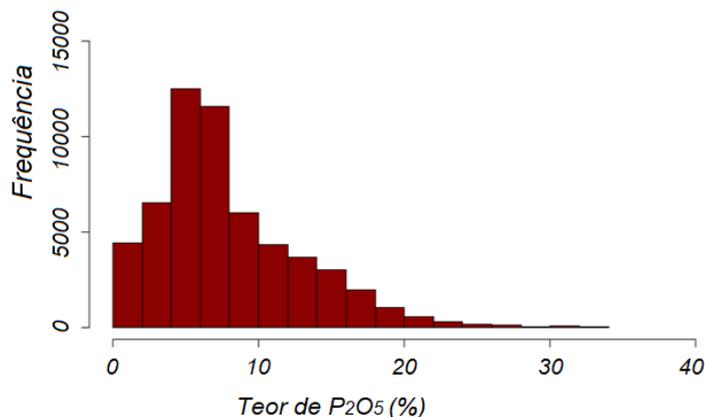


Figura 14 - Histograma do teor de P_2O_5 dos blocos 25x25x10 metros estimados por IQD.

O histograma apresenta uma distribuição semelhante a distribuição de teor para o suporte 10x10x10 metros, com teores variando de 0 a 34%. É ainda possível observar que se trata de uma distribuição assimétrica positiva, uma vez que há um predomínio de amostras com teor em torno de 7% e um coeficiente de variação igual a 0,63.

Tabela 8 - Análise estatística da variável teor de P_2O_5 dos blocos 25x25x10 m.

Análise Estatística	
Média	7,97
Desvio	4,98
Variância	24,83
Coeficiente de Variação	0,63

Já na análise estatística descritiva, verifica-se que a variável teor se distribui em torno de 7,97 %, enquanto que a variância foi equivalente a 24,83 % e o desvio de 4,98 % (semelhantes aqueles dados provenientes da análise estatística para o suporte igual a 10x10x10 metros). Da mesma maneira, foi realizado a distribuição de teor por domínios litológicos. A Figura 15 revela a distribuição na zona de minério e na zona de estéril. O coeficiente de variação foi de 0,45 e 0,31, respectivamente.

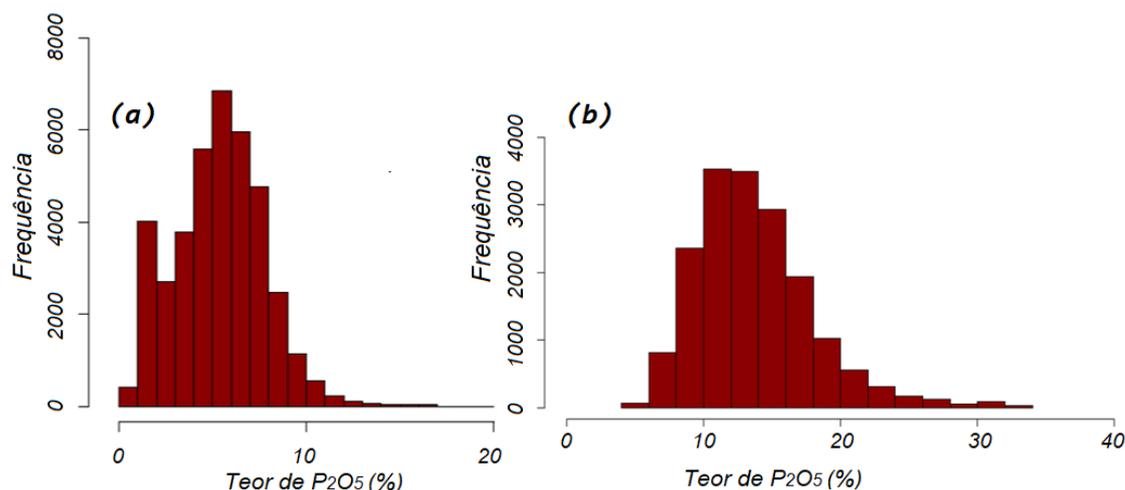


Figura 15 - Histograma do teor de P_2O_5 dos blocos estimados por IQD de dimensão 25x25x10 m no (a) domínio de estéril e (b) domínio de minério.

A Tabela 9 apresenta um resumo da estatística descritiva para os domínios litológicos caracterizados: zona de minério e zona de estéril.

Tabela 9 - Análise estatística da variável teor de P_2O_5 nos blocos 25x25x10 m em ambos domínios litológicos.

Análise Estatística		
Domínios Litológicos	Zona de Minério	Zona de Estéril
Média	13,72	5,37
Desvio	4,32	2,44
Variância	18,63	5,94
Coefficiente de Variação	0,31	0,45

Nota-se que o comportamento da distribuição de teores de fosfato para ambos suportes foi bem semelhante. Tal ocorrência pode ser confirmada ao comparar os histogramas dos dois suportes, identificando assim um conjunto de valores equiprováveis comuns aos dois modelos em análise. Além disso, há um comportamento semelhante entre os parâmetros na análise da estatística descritiva.

Todavia, verifica-se que houve uma leve redução na variância do suporte de blocos 25x25x10 metros, em relação a variância dos blocos 10x10x10 metros e que a média permaneceu igual para ambos suportes analisados, como pode ser observado nas Figuras 16 e 17, respectivamente. Segundo Cruz Jr. e Remacre (2001, p.6), espera-se que o valor em torno

do qual a variável se distribui permaneça constante para todos os suportes analisados ao passo que a variância diminua em decorrência do aumento do suporte amostral.

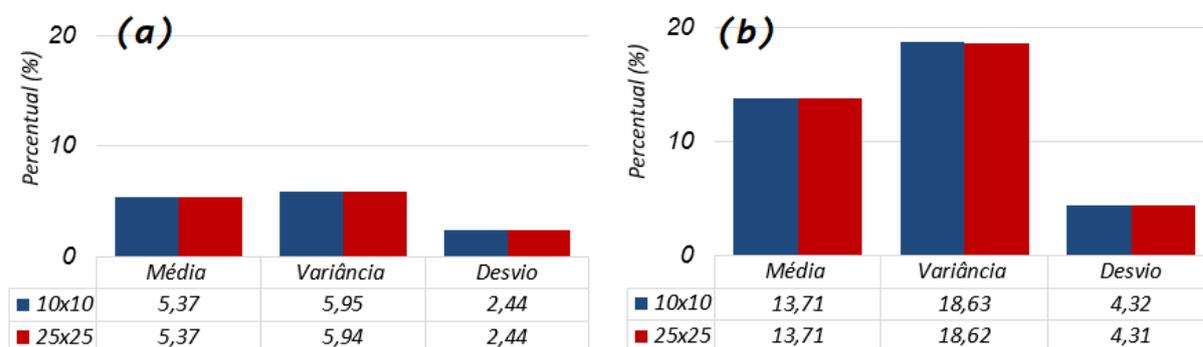


Figura 16 - Parâmetros da análise estatística de ambos suportes amostrais para o (a) domínio de estéril e (b) domínio de minério.

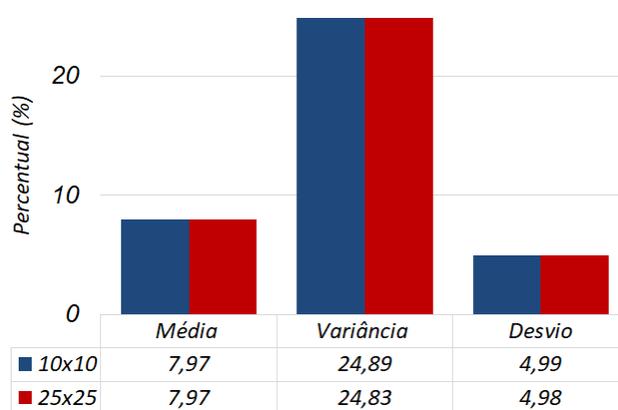


Figura 17 - Parâmetros da análise estatística de ambos suportes amostrais no depósito de mineral fosfático.

De acordo com Cruz Jr. (2001, p.5), a diferença nos histogramas entre os dois suportes analisados é chamada de efeito suporte. Neste caso, observou-se que não houve uma diferença acentuada na variância, ao alterar a dimensão do suporte amostral. Isso pode ser justificado pelo fato de os blocos não apresentarem uma diferença de tamanho expressivo.

Além disso, uma outra observação a ser feita dos dados apresentados anteriormente diz respeito a diferença na grandeza dos valores dos parâmetros estatísticos, para os domínios de minério e estéril. Tal fato pode ser explicado pelo efeito proporcional. Logicamente, há um maior volume de dados provenientes de domínios com teores mais elevados (caracterizados pelas zonas de interesse), o que proporciona uma maior variabilidade dos dados, ao passo que, em zonas de estéril, existem poucos dados e, portanto, menor variabilidade, ocasionando assim, grandezas distintas para os parâmetros de ambos domínios.

4.2 Check visual

O check visual é um processo de inspeção visual que avalia a sobreposição dos resultados provenientes da estimativa com as informações dos furos de sondagem de um corte de seção vertical e garantir que os blocos foram indicados corretamente com os atributos litológicos. Esse processo foi realizado para os modelos de teor e domínio litológico.

As Figuras 18 e 19 apresentam a sobreposição dos dados do modelo de blocos proveniente da estimativa dos domínios litológicos, para as dimensões 10x10x10 e 25x25x10 metros, com as informações fornecidas pelos furos de sondagem na seção vertical Norte-Sul. As demais seções encontram-se disponíveis no Anexo 1.

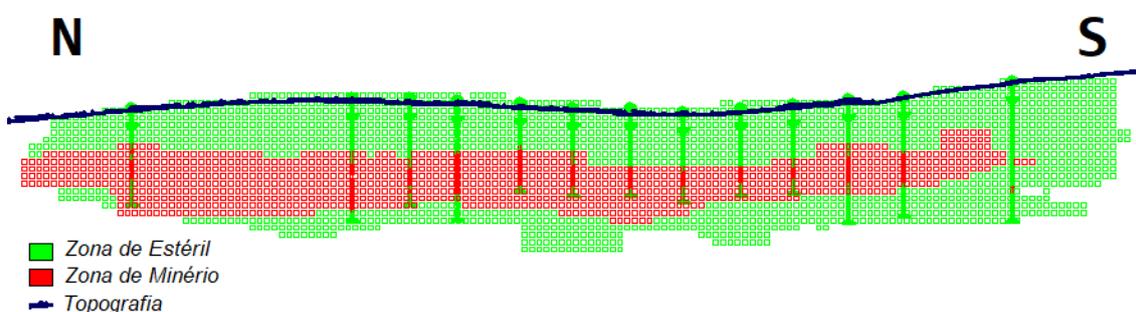


Figura 18 - Validação visual do modelo de blocos 10x10x10 m na seção N-S quanto ao domínio de minério e estéril.

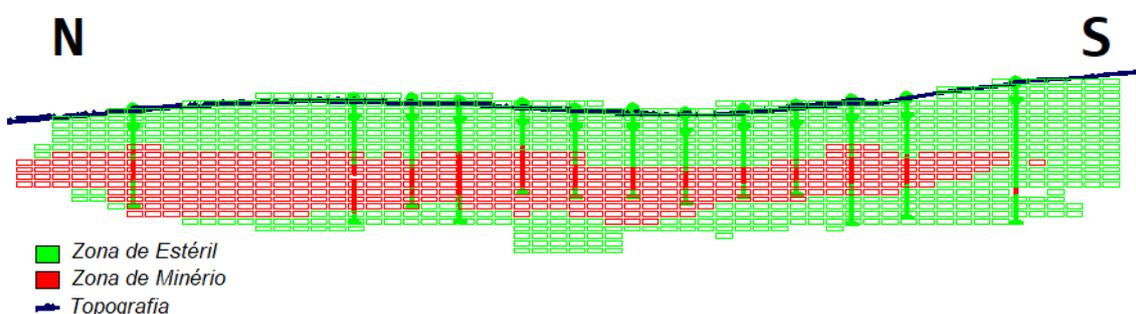


Figura 19 - Validação visual do modelo de blocos 25x25x10 m na seção N-S quanto ao domínio de minério e estéril.

De maneira similar, foi realizada a validação *check* visual para o modelo de blocos de teor de P_2O_5 , para os suportes amostrais 10x10x10 e 25x25x10 metros, na seção Norte-Sul, conforme apresentado nas Figuras 20 e 21.

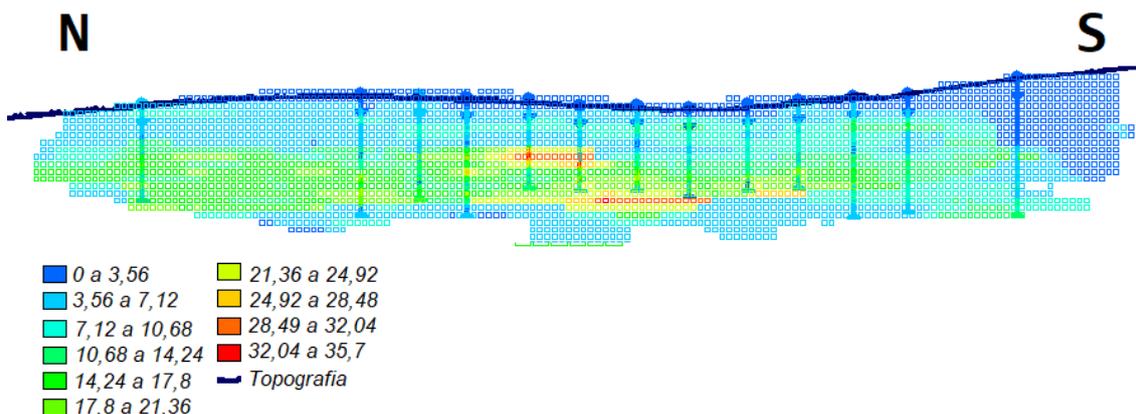


Figura 20 - Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos 10x10x10 m na seção N-S.

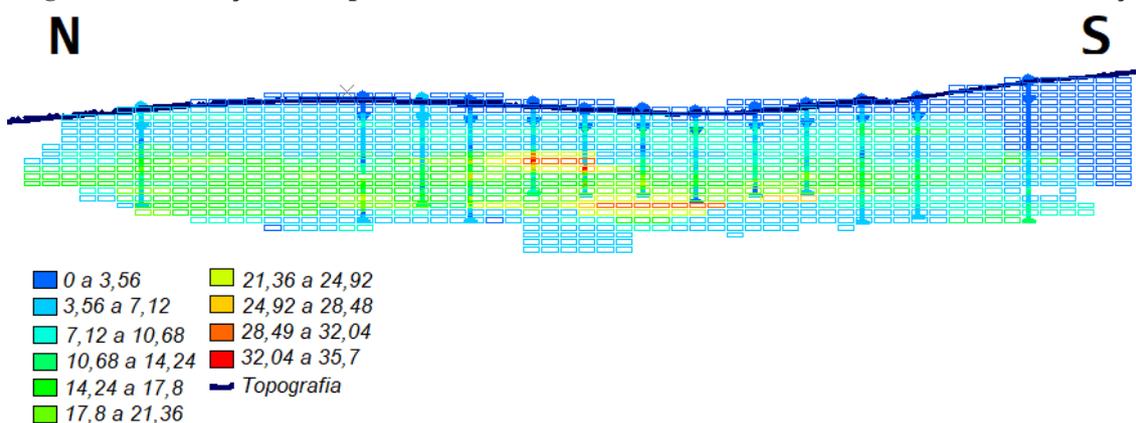


Figura 21 - Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos 25x25x10 m na seção N-S.

De modo geral, constata-se que houve uma boa aproximação de valores apresentados pela legenda, validando assim a estimativa. Observa-se ainda a presença de cavidades nas seções, principalmente nas bordas dos modelos de teor e de domínios de minério e estéril, para ambos suportes amostrais. Isso pode ocorrer devido a irregularidades no depósito, principalmente nas proximidades das bordas e pelo fato de existirem poucos dados reais nas extremidades dos depósitos, o que impediu a estimativas de alguns blocos.

Ademais, verificou-se que houve algumas divergências quando os dados reais (provenientes dos furos de sondagem) e dos dados estimados (blocos). Tal fato pode ser justificado pela influência de furos adjacentes. Assim, alguns blocos foram estimados com base em informações provenientes de furos adjacentes a seção analisada, o que contribuiu para que houvesse uma discordância. Todavia, é importante frisar que isso não significa que a estimativa esteja incoerente.

4.3 Análise de deriva

Posteriormente, após a inspeção visual dos modelos de teores e dos domínios litológicos, classificados em minério e estéril, é efetuado uma análise de tendência local, também conhecida como análise de deriva. Essa validação permite checar o comportamento da estimativa da variável do modelo de blocos ao longo dos eixos X, Y e Z.

Para prosseguir com o processo de validação, foram verificadas as médias dentro de faixa de 100 metros nas direções X e Y e de 10 metros na direção Z. A Tabela 10 apresenta os parâmetros utilizados para efetuar a análise de tendência local dos dois modelos de teores estimados: 10x10x10 e 25x25x10 metros.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados na Análise de Deriva para o modelo de blocos 10x10x10 e 25x25x10 m.

Parâmetros	Modelos de Blocos					
	Modelo 25x25x10 m			Modelo 10x10x10 m		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Largura da Faixa (m)	100	100	10	100	100	10
Número de Faixas	4	4	1	10	10	1

As Figura 22 e 23 apresentam o resultado da análise de tendência local das estimativas de teor na direção dos eixos Y e Z, respectivamente. O eixo das abscissas indica as distâncias ao passo que o eixo das ordenadas revela os teores.

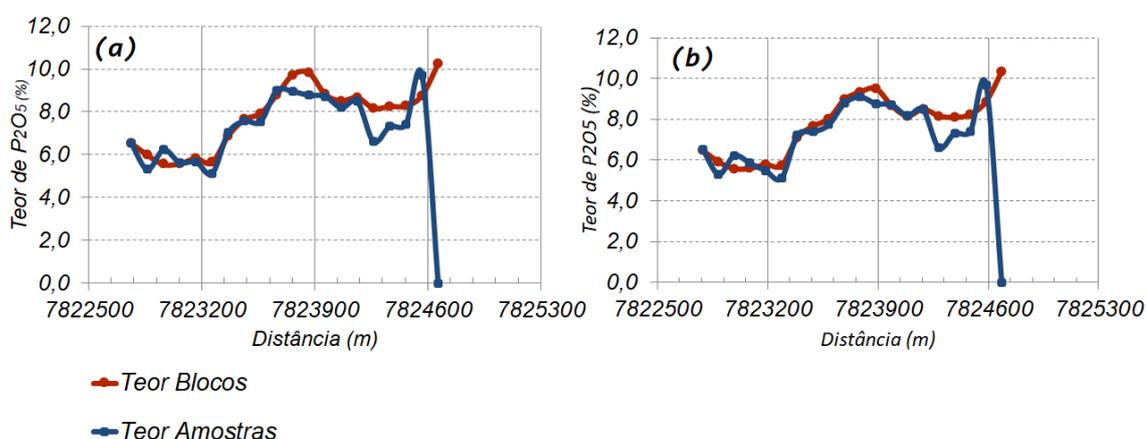


Figura 22 - Análise de Deriva para o teor de P₂O₅ na direção no eixo Y para o modelo (a) 10x10x10 e (b) 25x25x10 metros.

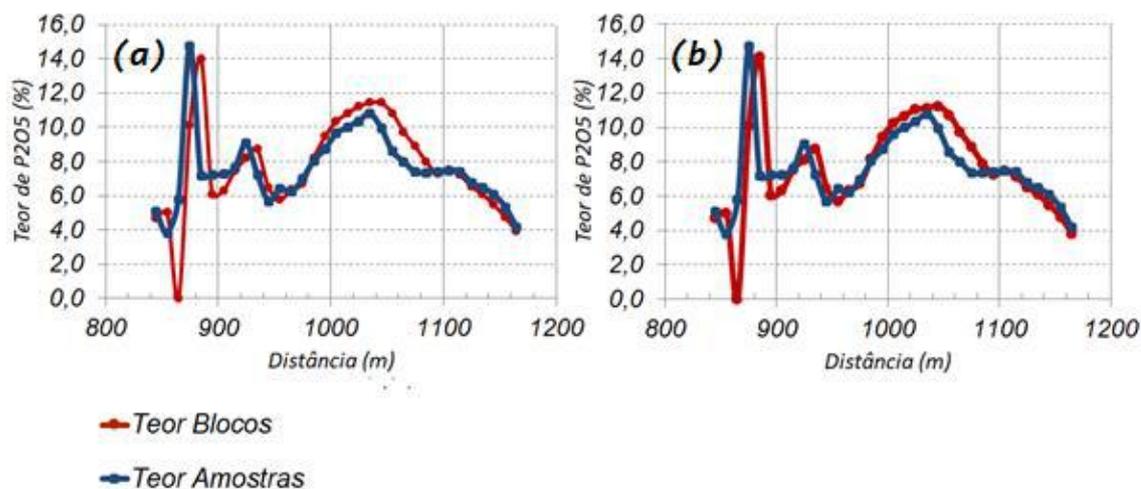


Figura 23 - Análise de deriva para o teor de P₂O₅ na direção no eixo Z para o modelo (a) 10x10x10 e (b) 25x25x10 metros

A análise de deriva na direção do eixo X apresentou um comportamento diferente, em um pequeno intervalo ao longo de todo eixo, quando comparado com as análises apresentadas anteriormente, conforme pode ser visualizado na Figura 24. Tal fato pode ser sustentado em decorrência de ausência de dados reais naquele ponto analisado. Ao passo que, houve estimativas de blocos neste mesmo ponto devido as elipsoides de busca que obtiveram informações de dados vizinhos.

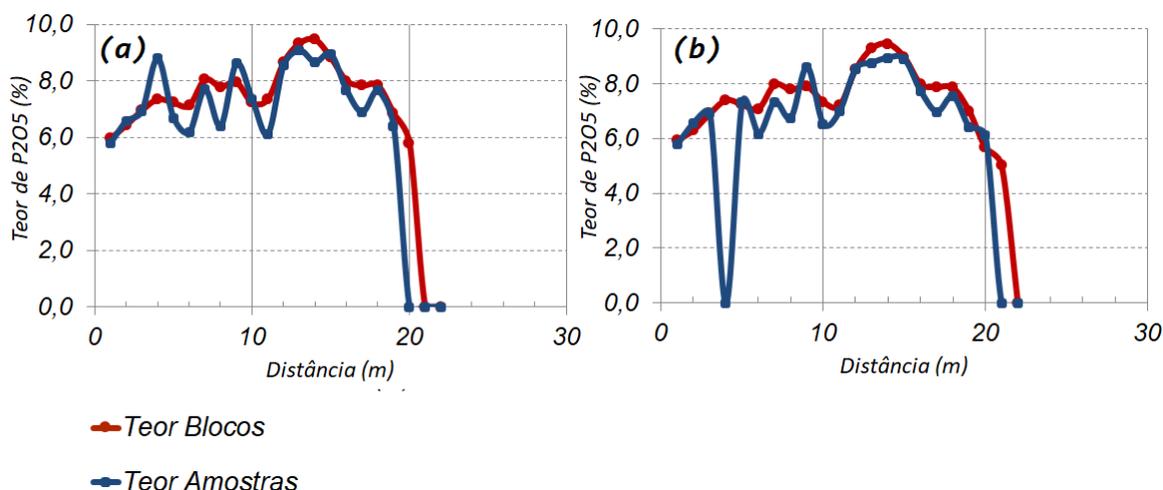


Figura 24 - Análise de deriva para o teor de P₂O₅ na direção no eixo X para o modelo (a) 10x10x10 e (b) 25x25x10 metros.

De maneira geral, verifica-se que a estimativa apresentou o mesmo comportamento quando comparado as amostras as direções dos três eixos, ou seja, a linha azul

(dados amostrais) e a linha vermelha (dados estimados) seguem a mesma tendência, validando assim a estimativa.

Segundo Pelissari et. al, (2014, p. 54), intervalos que possuem uma distorção aos dados amostrados podem ser explicados pelo fato de os blocos não estarem rotacionados com a direção do corpo mineralizado e de existirem domínios com muitos blocos estimados a partir de poucos dados reais. Para se ter uma ideia, domínios que possuem a malha de sondagem densamente amostrada acarreta em um aumento na aderência entre o real e estimado, devido a excesso de informações reais utilizadas na estimativa dos blocos.

Um outro item a ser levantado é em relação a variabilidade da variável teor. Segundo Souza (2016, p. 69), parâmetros com alta variabilidade ao longo de uma direção apresentam uma inconsistência quando comparados ao comportamento das médias das amostras.

4.4 Comparativo das estimativas de tonelagem

Suportes amostrais distintos ocasiona em estimativas diferentes e, conseqüentemente, em tonelagens de metal divergentes para a mesma reserva mineral. Na Tabela 11, são apresentados os valores de tonelagens obtidas mediante a aplicação da estimativa Inverso do Quadrado da Distância (IQD) para os dois suportes em questão: 10x10x10 metros e 25x25x10 metros.

Tabela 11 - Tonelagens de mineral minério para os dois suportes amostrais: 10x10x10 metros e 25x25x10 metros.

Modelos	Tonelagem de mineral minério
10x10x10	56.266.415,35
25x25x10	56.181.373,35

Comparando o resultado entre os dois suportes, verifica-se que a seleção de blocos 25x25x10 metros resultou em perdas de tonelagens, de aproximadamente 0,15% (o que corresponde a 85.042 toneladas) em relação a seleção de blocos 10x10x10 metros. Assim, conclui-se que essa mudança do suporte amostral não gerou mudanças significativas quanto a massa de minério fosfático. Todavia, a adoção de um limite geométrico, ou seja, de uma cava final, poderia resultar em diferenças mais acentuadas, visto que há um efeito da aderência dos blocos nos limites gerados pela projeção da cava, além do que, ao estabelecer um limite

geométrico é possível estabelecer com maior precisão parâmetros de massa e teor da reserva mineral.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A variabilidade espacial de atributos litológicos em um depósito mineral é um dos grandes problemas que tange a estimativa de reservas minerais e, trata-se de uma questão de grande importância a ser discutida, uma vez que a estimativa de recursos minerais extrapola questões de caráter econômico e ambiental.

O principal objetivo desse trabalho foi verificar a existência ou não do impacto decorrente do uso de diferentes suportes amostrais na estimativa de tonelagem de minério de uma reserva mineral. Para tanto, foram avaliados dois suportes amostrais distintos, com base no espaçamento da malha de sondagem de um depósito de minério fosfatado fictício. Com base nos resultados expostos, conclui-se que a adoção de diferentes suportes amostrais resulta em estimativas e, conseqüentemente, em diferentes massas de minério fosfático para uma mesma reserva mineral. Todavia, essa diferença foi ínfima.

Ao analisar o comportamento da distribuição de teores de P_2O_5 para os suportes de dimensões iguais a 10x10x10 metros e 25x25x10 metros, consta que a média, valor no qual a variável se distribui, permanece constante para ambos suportes adotados, todavia a variância diminui em decorrência do aumento do suporte. Em outras palavras, o erro de estimativa do bloco aumenta em decorrência da redução do tamanho de blocos.

Mostrou-se ainda que quando as dimensões do modelo de blocos são alteradas de 10x10x10 metros para 25x25x10 metros, há reduções nos valores de tonelagem de minério fosfatado de cerca de 0,15%, o que corresponde a 85.042 toneladas, todavia essa redução é pouco significativa. É importante salientar que não foi utilizado uma cava final para a estimativa de massas e teores de P_2O_5 , contudo, a avaliação desses parâmetros, decorrentes da adoção de diferentes suportes amostrais, dentro de um limite geométrico, poderiam apresentar de forma muito diferente, visto que o modelo de blocos de 10x10x10 metros apresenta uma maior aderência em vista do seu tamanho, contraponto ao modelo 25x25x10 metros.

Portanto, de maneira geral, conclui-se que a escolha da dimensão do suporte amostral impacta diretamente na estimativa da reserva, logo, na tonelagem de mineral minério. Dado isso, surge a importância de se estabelecer e definir com clareza a dimensão dos blocos para a estimativa de uma reserva mineral, visto que ela impacta no âmbito econômico do empreendimento.

Como sugestão de trabalho futuro, é de suma importância avaliar o comportamento dos blocos nos limites de uma cava final, com o intuito de verificar a aderência dos mesmos no limiar da superfície gerada pela cava, e ter mais um critério a ser avaliado e discutido quanto

ao efeito do suporte amostral para blocos com dimensões equivalentes a 10x10x10 e 25x25x10 metros.

REFERÊNCIAS

BRAGA, S. A. **Krigagem dos indicadores aplicada a modelagem das tipologias de minério fosfatados da mina F4**. 2015. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/142023>>. Acesso em: 16 out. 2018.

CAMPOS, P. H. A. **Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra : sequenciamento direto de blocos vs. planejamento tradicional**. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CONDE, R. P.; YAMAMOTO, J.K. Avaliação de reservas por métodos convencionais: um estudo de caso na Mina de Canoas 2 (PR). **Revista Geologia USP. Série Científica**, São Paulo, v. 6, n.26, p. 13-28, jan. 1995.

CRUZ JUNIOR, A. C.; REMACRE, A. Z. Impacto do efeito suporte e do efeito informação sobre a recuperação de reservas. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.54, n.2, p137-142, 2001.

DARLING, P. **SME Mining Engineering Handbook**. 3.ed. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. 1984p.

DATAMINE (2018). Disponível em: < <https://www.dataminesoftware.com/>>. Acesso em: 10 de out. de 2018.

ESTATÍSTICA NO PROGRAMA R. Disponível em: < <http://www.estatisticador.xpg.com.br/4.html>>. Acesso em: 16 nov. 2018.

GUTIÉRREZ RAMÍREZ, J. E. **Variabilidade Espacial do Parâmetro Geomêcanico RQD no Depósito Mineral Animas-Peru**. 2009. 167f. Dissertação de Mestrado - Departamento de Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: < https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/14482/14482_1.PDF >. Acesso em: 16 out. 2018.

HUSTRULID, W. et al. **Open Pit Mine: Planning and Design**. 3. ed. Londres: CRC Press 2013, 1306 p.

JOHNSON, T. B. **Optimum open pit mine production scheduling**. 1968. 120 f. Tese (Doutorado) - Operations Research Department, University of California, Berkeley, 1968. Disponível em: < <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/672094.pdf>>. Acesso em: 18 de out. 2018.

LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. 2000. 20 p. Texto Didático 02, DGA, IGCE, UNESP/ Rio Claro, Lab. Geomatematica.2000. Disponível em<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>.

MARQUES, M. J. J. F. C. **Desenvolvimento de uma Metodologia Geoestatística para Planejamento das Pedreiras da SECIL-Outão**. 2017. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas) - Técnico Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014. Disponível em:

<<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/megm/dissertacao/565303595499970>>. Acesso em: 14 out. 2018.

MIRANDO JÚNIOR, I. S. **Diretrizes fundamentais para um estudo de avaliação econômica de empreendimentos de mineração: um estudo bibliográfico**. 2011. 321 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2648/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_DiretrizesFundamentaisEstudo.pdf>. Acesso em: 14 de out. 2018.

PELLISSARI, F. P. et al. **Projeto de pré-viabilidade de um depósito de ouro**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/7265>>. Acesso em: 14 out. 2018.

PERONI, R et. al. **Análise do impacto da variação do teor de corte no planejamento estratégico e cálculo de reservas para a mina de Tapira-MG**. In: 6º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e Mina Subterranea, 2010, Belo Horizonte. 6º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e Mina Subterranea. Belo Horizonte : IBRAM, 2010. p. 1-17.

ROSSI, M. E.; DEUTSCH, C. V. **Mineral Resource Estimation**. London: Springer. 2014, 337 p.

SINCLAIR, A.J., BLACKWELL, G.H. **Applied mineral inventory estimation**. Cambridge: University Press, 2002, 401p.

SOUZA, R A. **Análise da influência da incerteza geológica no planejamento de lavra**. 2016, 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/7265/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_An%C3%A1liseInflu%C3%AanciaIncerteza.pdf>. Acesso em: 18 out. 2018.

The JORC Code (2004 Edition). Disponível em: < <https://www.ausimm.com.au>>. Acesso em: 17 out. 2018.

YAMAMOTO, J. K.; ROCHA, M. M. Uma Revisão das Classificações de Reservas Minerais Adotadas no Brasil e Recomendações para Cálculo/ Classificação de Reservas. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 26, n. 4, p. 243-254,1996.

ANEXO A - SEÇÕES VERTICAIS

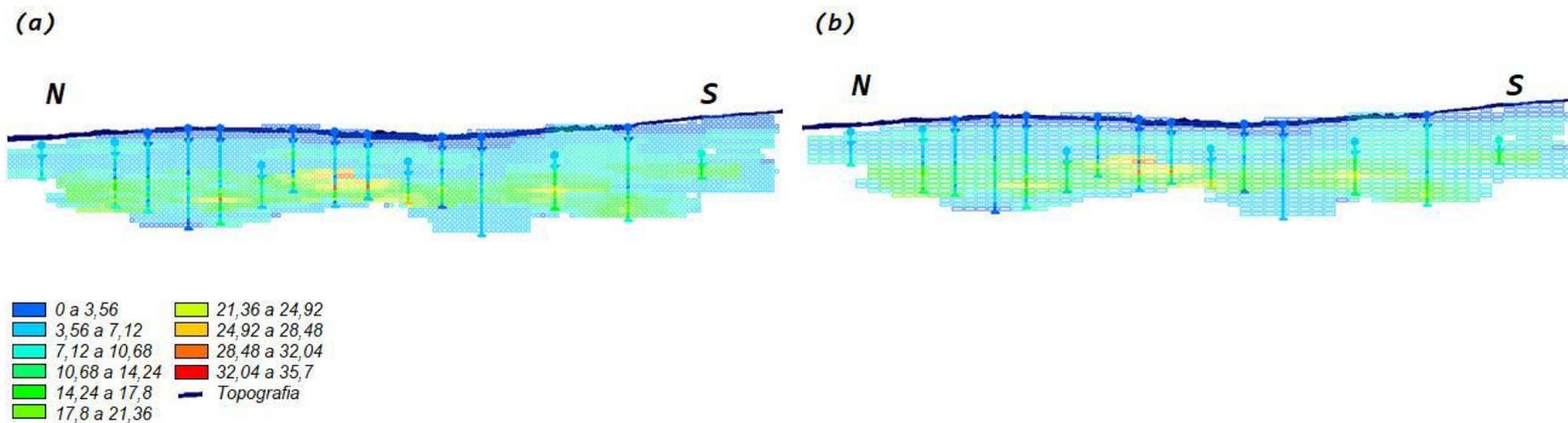


Figura 24 - Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção N-S.

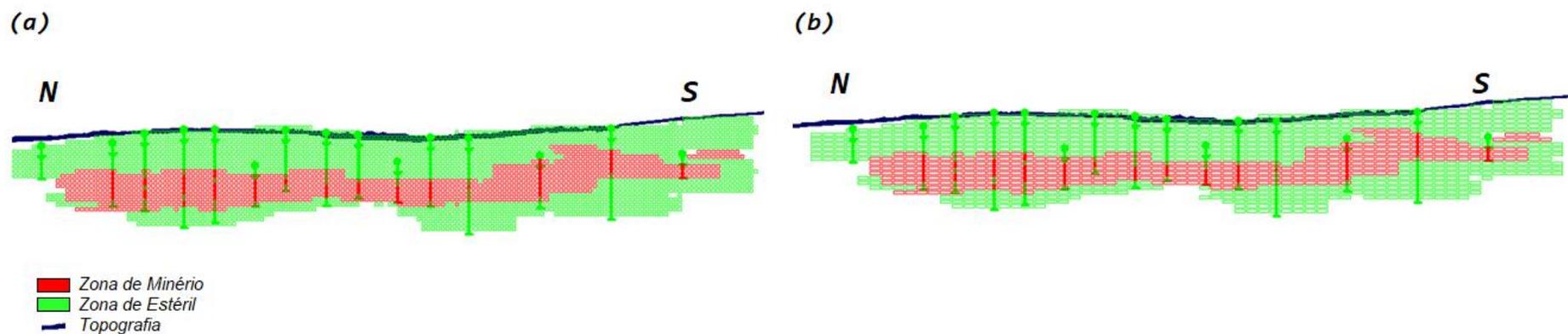


Figura 25 - Validação visual do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção N-S quanto ao domínio classificado de minério e estéril.

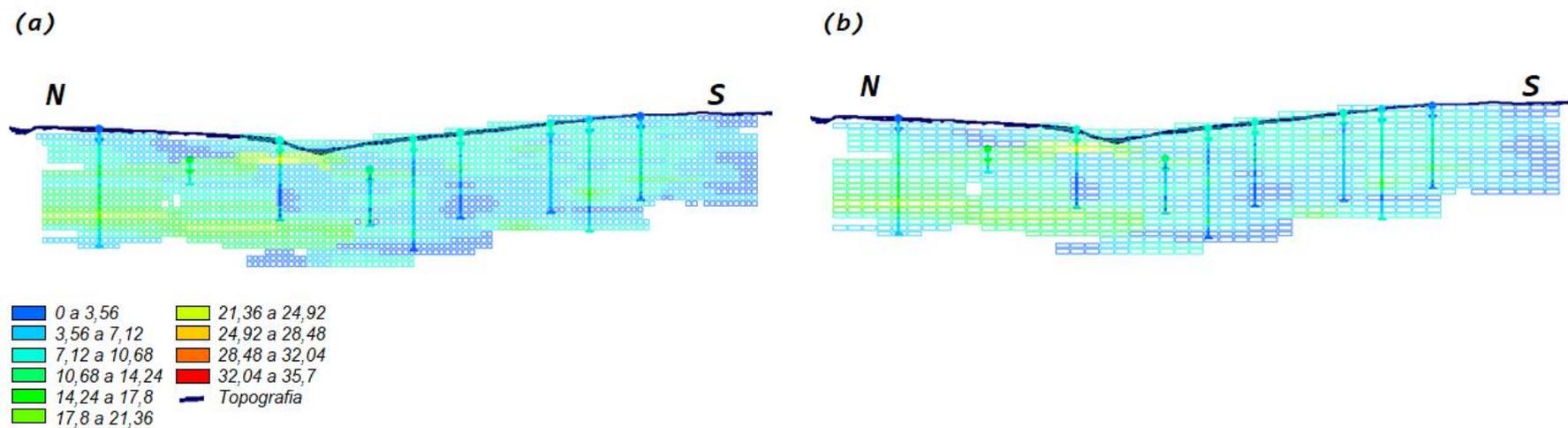


Figura 26 - Validação visual para o atributo teor de P₂O₅ do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção N-S.

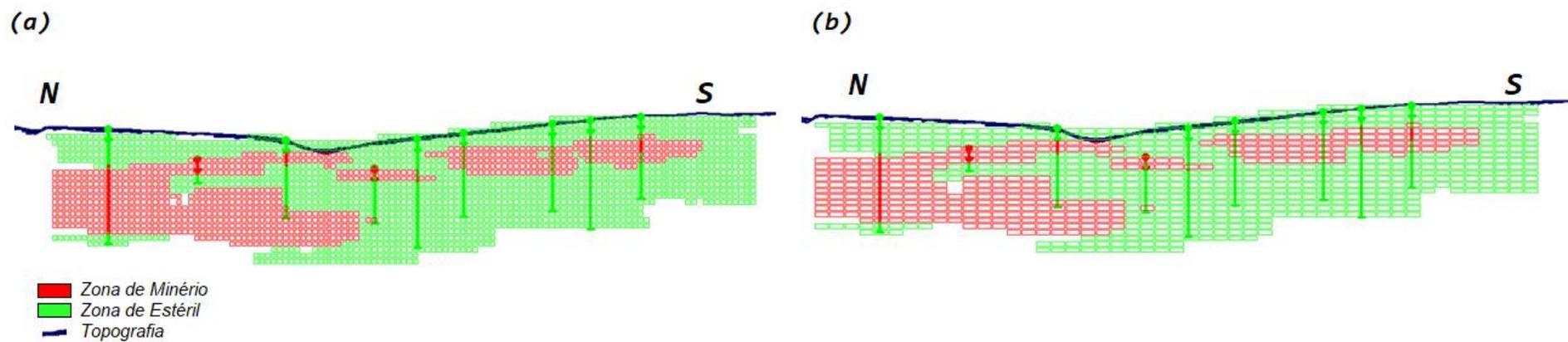


Figura 27 - Validação visual do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção N-S quanto ao domínio classificado de minério e estéril..

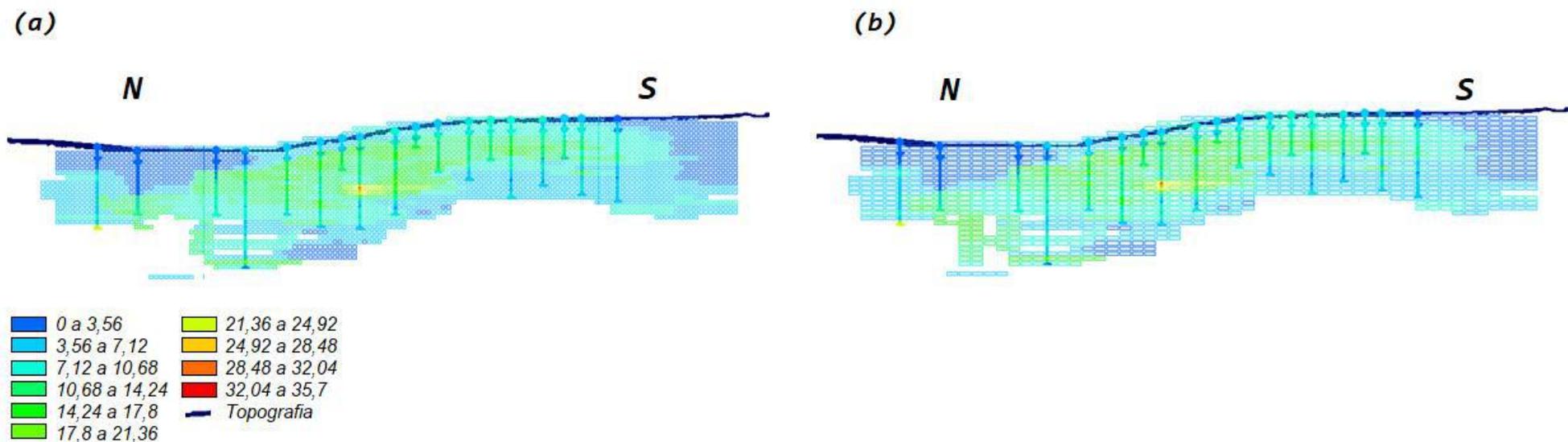


Figura 28 - Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção N-S.

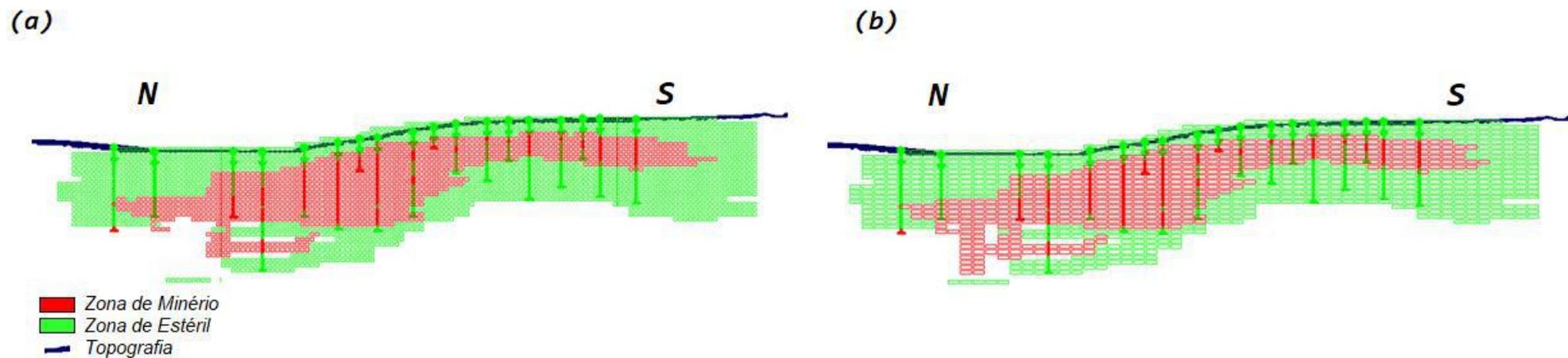


Figura 29 - Validação visual do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção N-S quanto ao domínio classificado de minério e estéril.

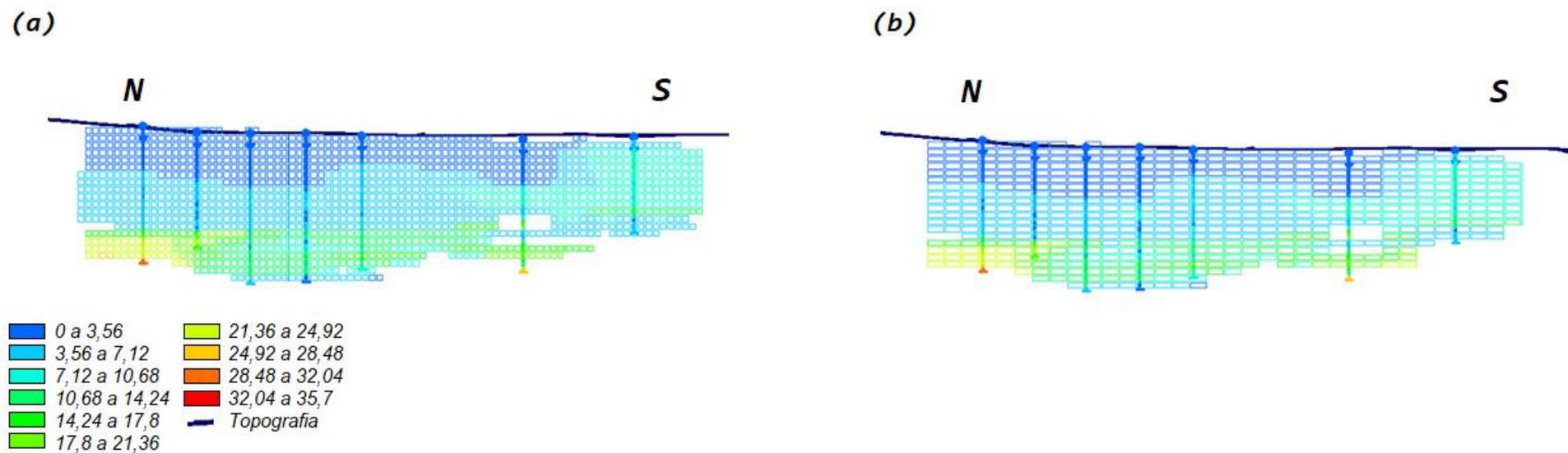


Figura 30 - Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção N-S.

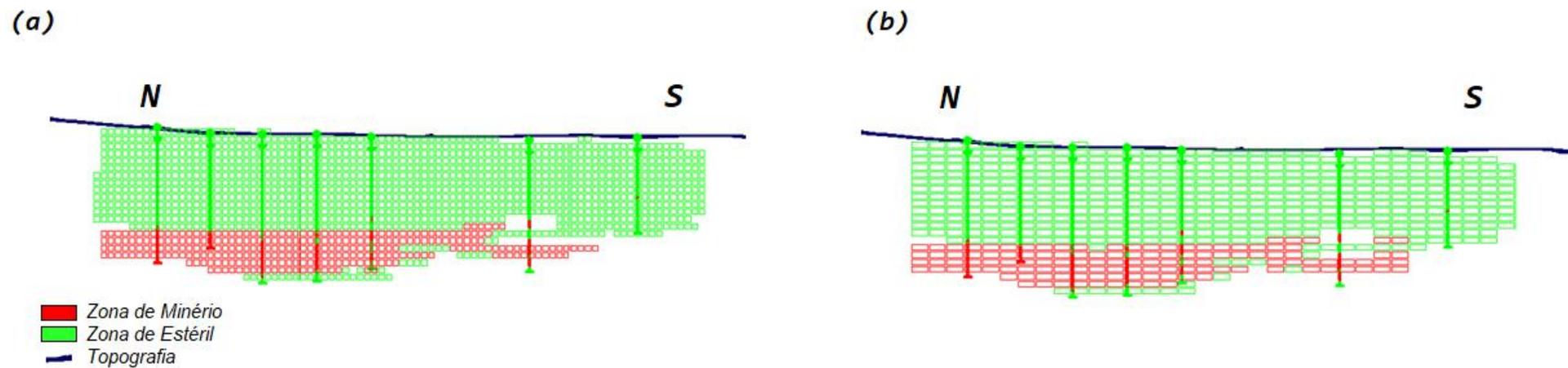


Figura 31 - Validação visual do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção N-S quanto ao domínio classificado de minério e estéril.

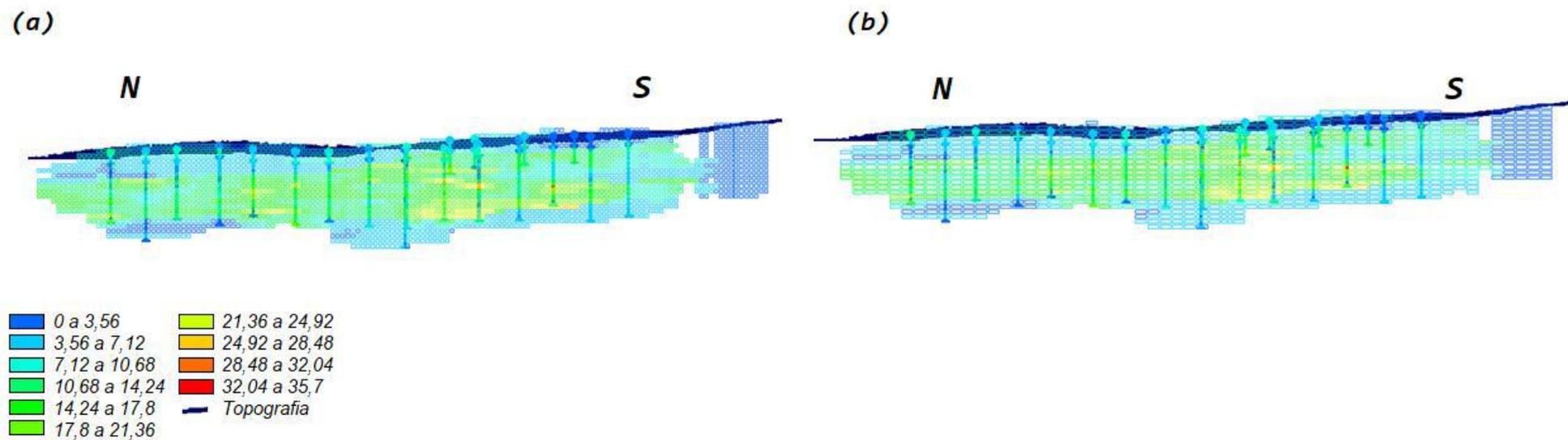


Figura 32 -Validação visual para o atributo teor de P₂O₅ do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção N-S.

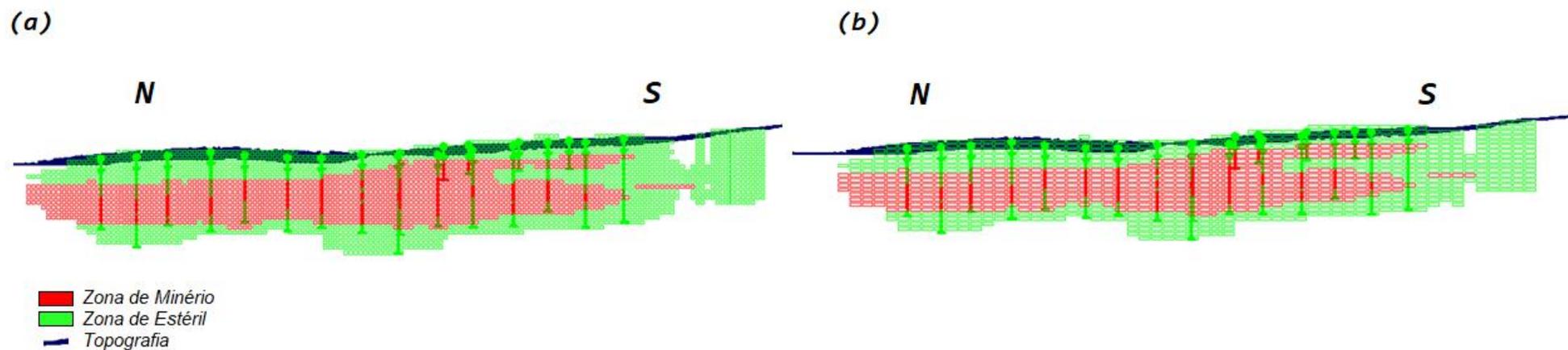


Figura 33 - Validação visual do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção N-S quanto ao domínio classificado de minério e estéril.

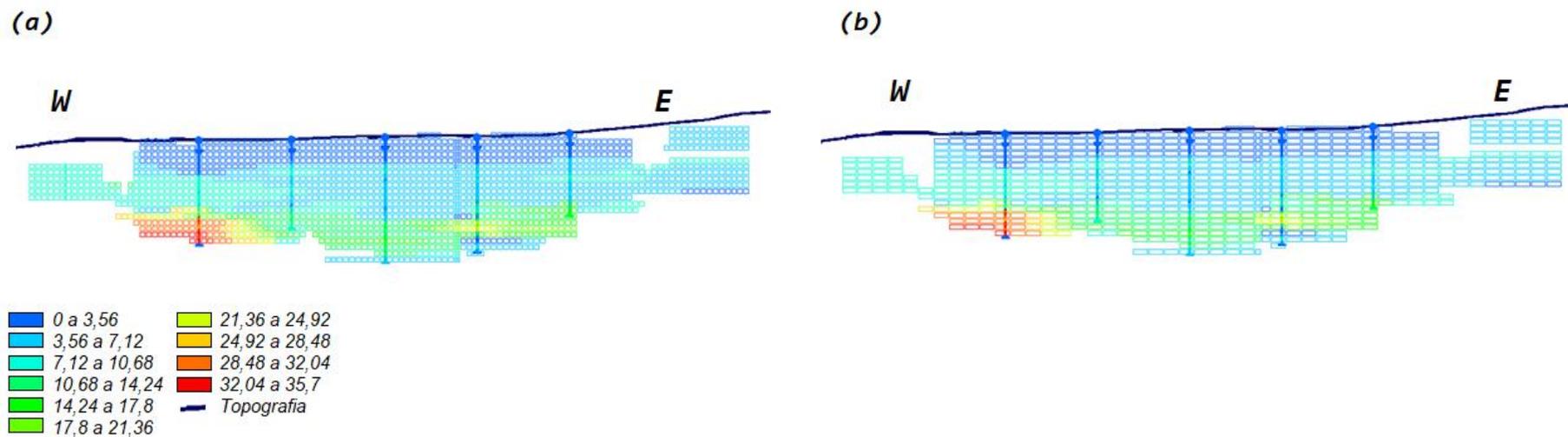


Figura 34 - Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção W-E.

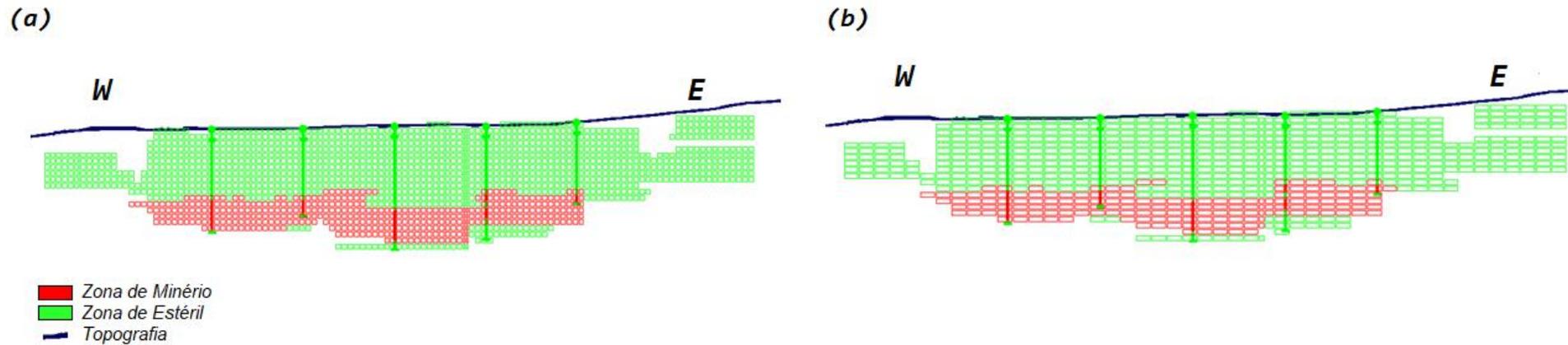


Figura 35 - Validação visual do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção W-E quanto ao domínio classificado de minério e estéril.

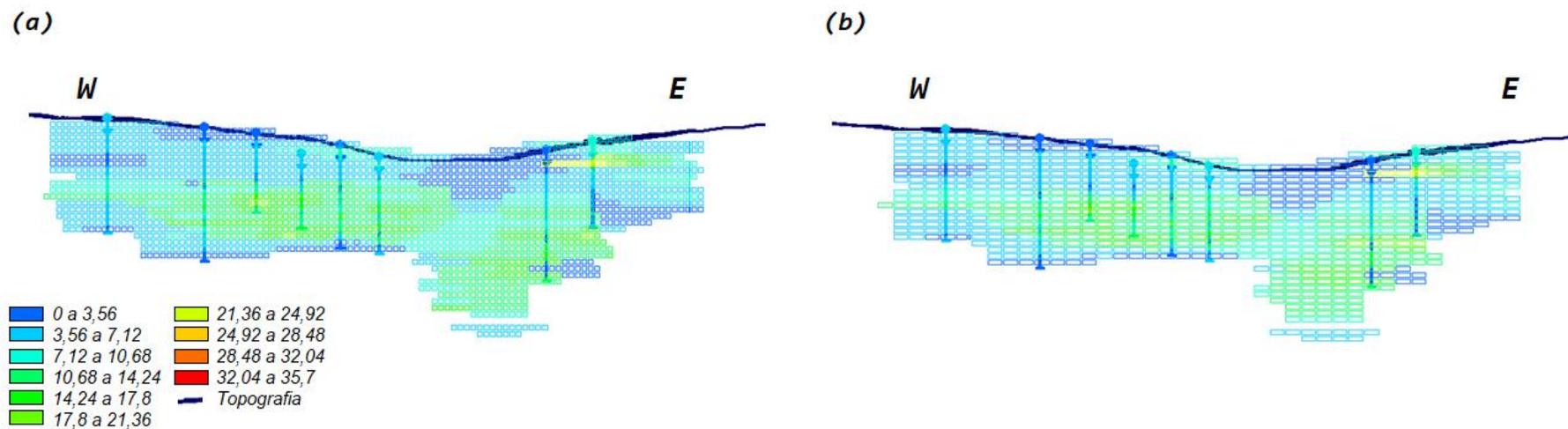


Figura 36 - Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção W-E.

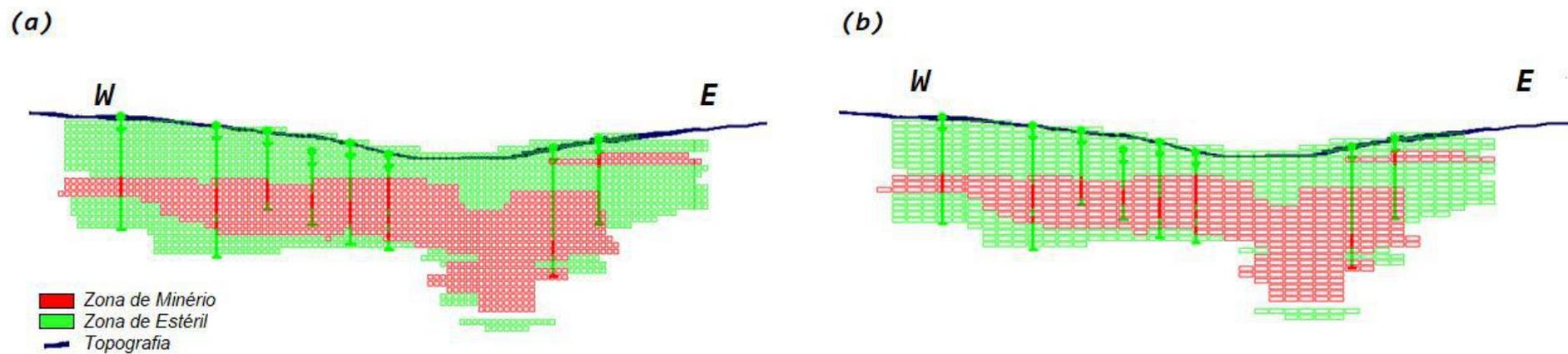


Figura 37 - Validação visual do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção N-S quanto ao domínio classificado de minério e estéril.

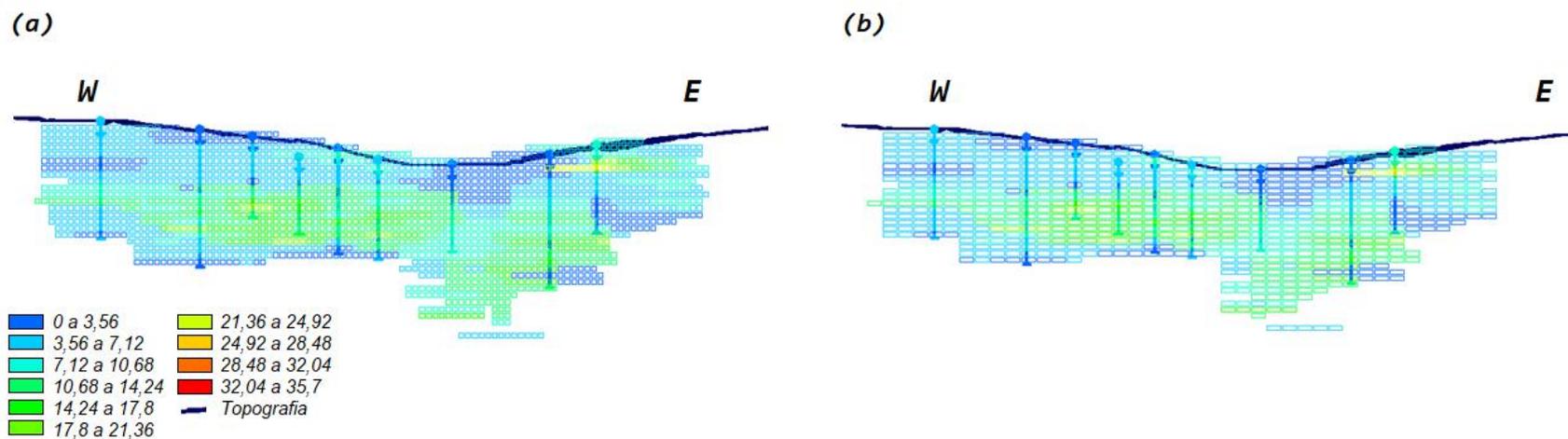


Figura 38 - Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção W-E.

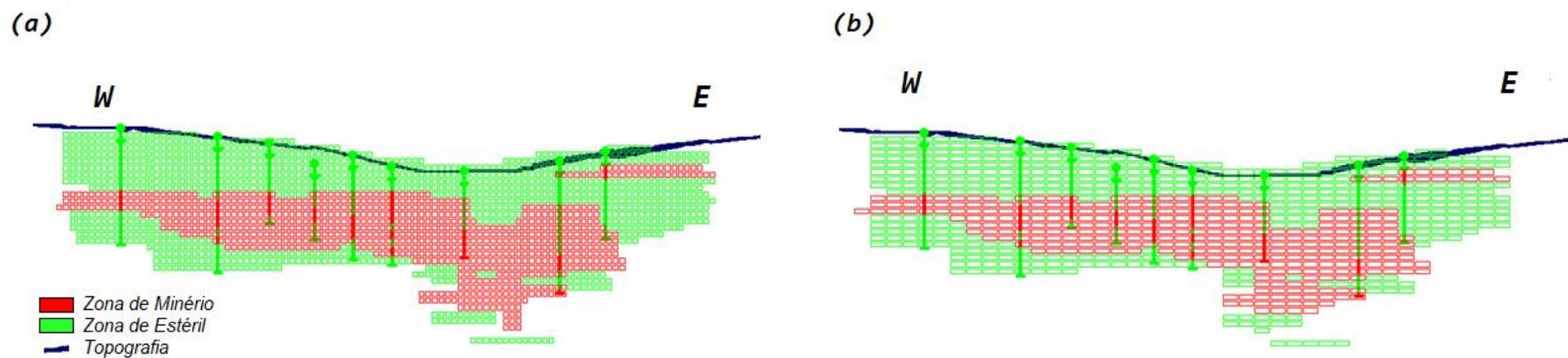


Figura 39 - Validação visual do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção W-E quanto ao domínio classificado de minério e estéril.

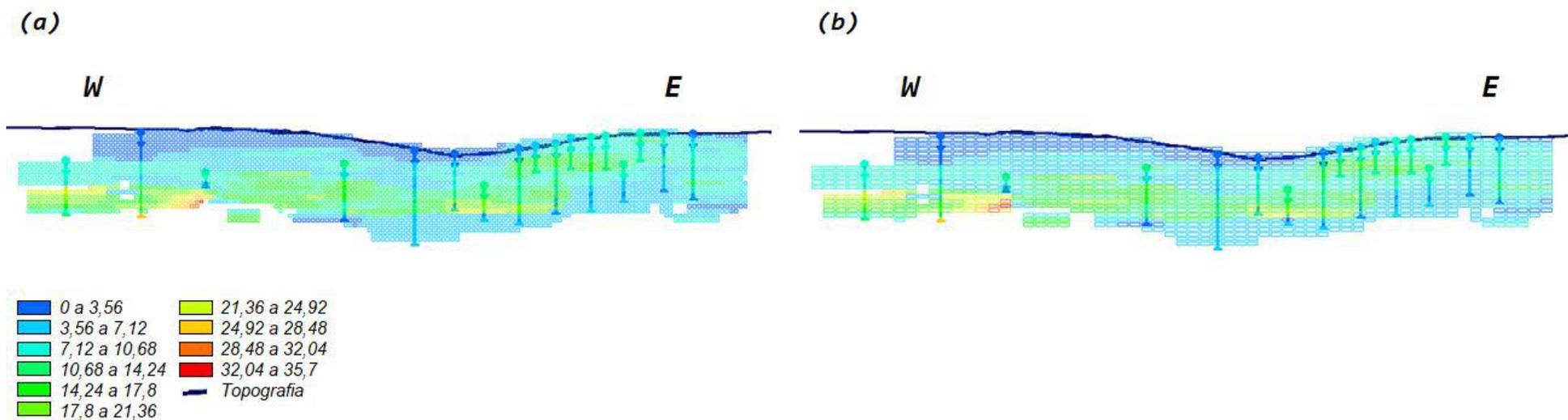


Figura 40 - Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção W-E.

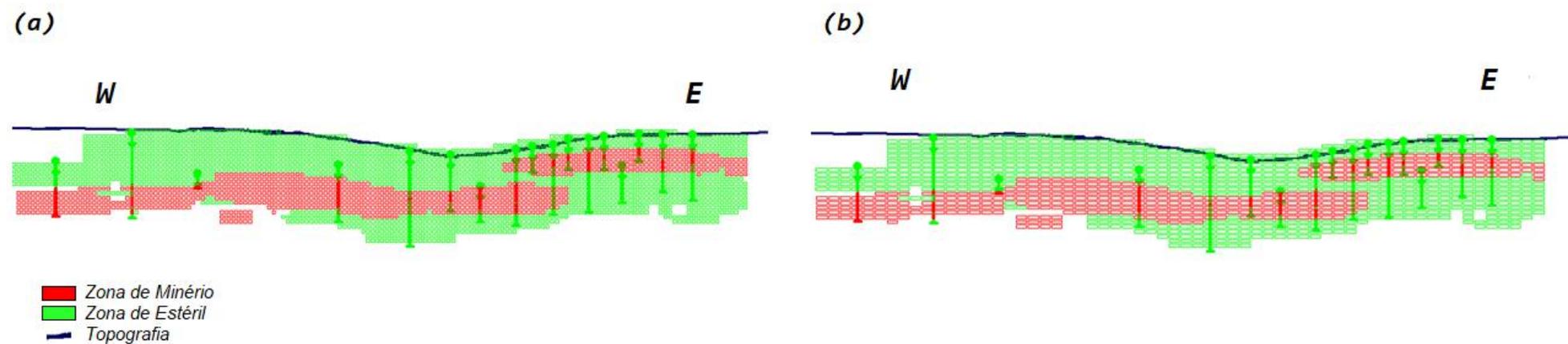


Figura 41 - Validação visual do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção W-E quanto ao domínio classificado de minério e estéril.

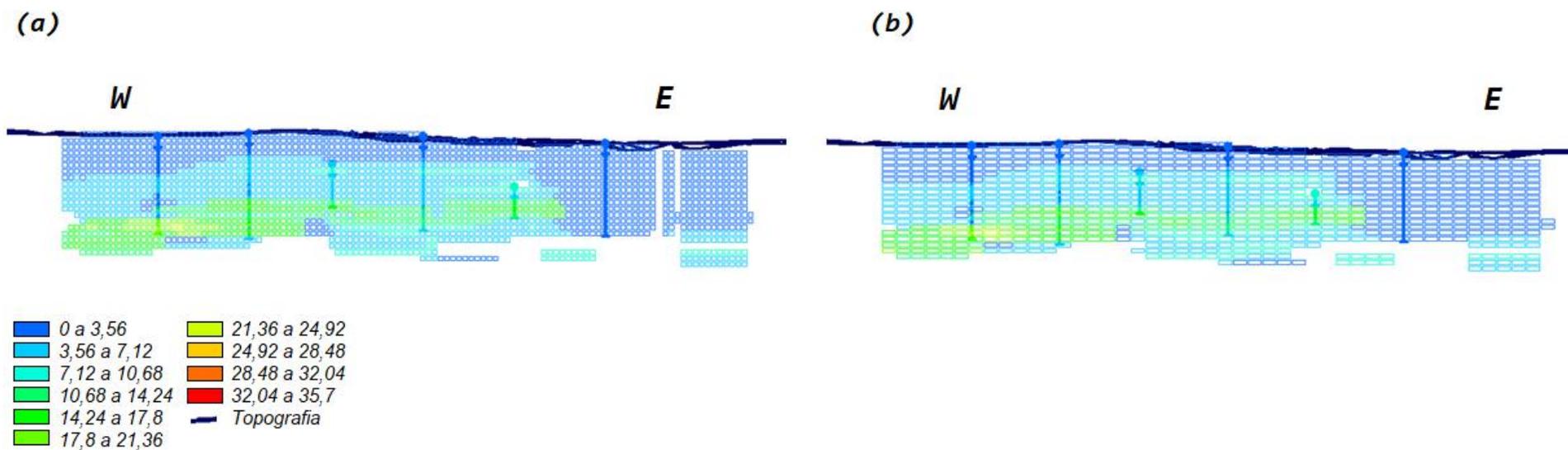


Figura 42 -Validação visual para o atributo teor de P_2O_5 do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção W-E.

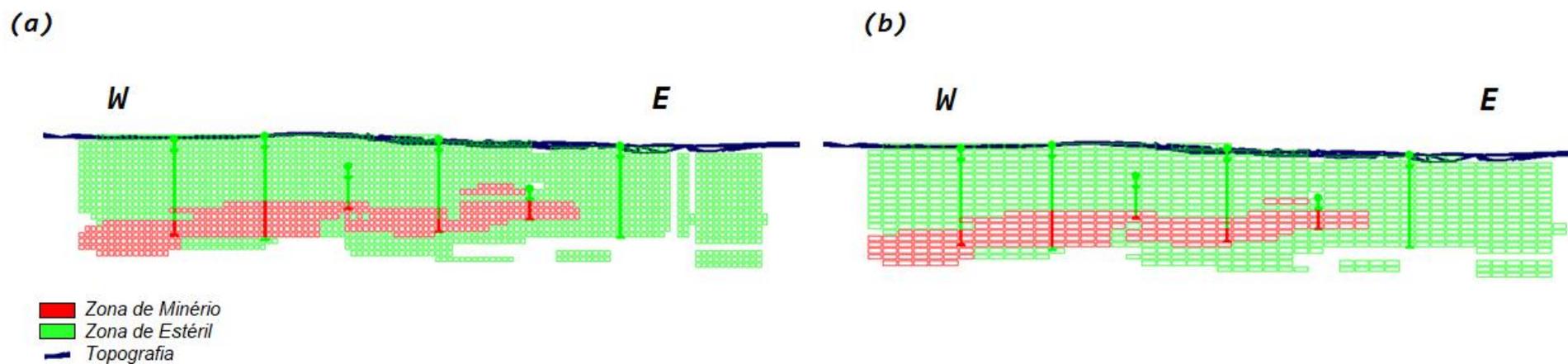


Figura 43 - Validação visual do modelo de blocos (a) 10x10x10 m e (b) 25x25x10 m na seção W-E quanto ao domínio classificado de minério e estéril.