

Joao Lucas de Oliveira Alves

Uso de Grids Não-estruturados no Planejamento de Lavra de Curto Prazo

Porto Alegre, RS

2020

Joao Lucas de Oliveira Alves

Uso de Grids Não-estruturados no Planejamento de Lavra de Curto Prazo

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

Orientador: João Felipe Coimbra Leite Costa

Coorientador: Vanessa Cerqueira Koppe

Porto Alegre, RS

2020

Joao Lucas de Oliveira Alves

Uso de Grids Não-estruturados no Planejamento de Lavra de Curto Prazo

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Trabalho aprovado. Porto Alegre, RS, xx de Agosto de 2020:

Professor
Convidado 1

Professor
Convidado 2

Professor
Convidado 3

Porto Alegre, RS
2020

*“Ao meu afilhado Davi (in memoriam),
sempre te amarei meu pequeno.*

Agradecimentos

A Deus, por me possibilitar graças imensuráveis.

Aos meus pais, Ney e Janete, pelo incentivo e apoio nas minhas decisões e nos meus estudos, sua sabedoria em tempos difíceis me auxiliaram nessa etapa importante. A minhas irmãs, Carol e Isadora, por estarmos unidos mesmo com a distância. Aos meus familiares que sempre torceram por mim, sou grato pelo apoio.

Ao meu orientador, professor João Felipe, pelo auxílio durante esses anos. Por todo aprendizado durante suas disciplinas e as conversas, esse momento são únicos. Admiro o quanto você acredita em nós, seus alunos, e nos auxilia a chegar nessas conquistas.

A minha coorientadora, professora Vanessa, pela paciência e ajuda nesse período. Seus conselhos durante o desenvolvimento deste trabalho não só enriqueceram a dissertação, e sim meus conhecimentos.

Ao professor Marcel, pelo auxílio no tema de *grids* não-estruturados. As conversas e a ajuda, me auxiliaram enormemente na elaboração da dissertação.

Aos professores e colegas do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM). As aulas, os aprendizados e as boas conversas estão guardadas como boas lembranças.

A Fundação Luiz Englert (FLE), pelos recursos. Sem recursos não se faz Ciência.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*“Vou seguindo pela vida me esquecendo de você,
Eu não quero mais a morte, tenho muito o que viver,
Vou querer amar de novo e se não der não vou sofrer,
Já não sonho, hoje faço com meu braço o meu viver.
(Travessia, Fernando Brant/ Milton Nascimento)*

Resumo

A maioria dos softwares de geoestatística e planejamento de mina trabalham com *grids* regular Cartesiano, comumente conhecidos por modelos de blocos. Alguns usam blocos de tamanhos e formas iguais, enquanto outros usam sub-blocos. A limitação dos *grids* regulares Cartesianos é que eles não se ajustam bem ao sólido irregular usado para delinear o horizonte mineralizado em depósitos tabulares. Uma solução para a falta de aderência entre os limites do sólido e o modelo de blocos envolve em um *grid* não-estruturado. O *grid* não-estruturado permite maior flexibilidade para conformar-se ao horizonte mineralizado, uma vez que os blocos podem ter tamanhos e formas diferentes.

O uso de um *grid* não-estruturado no planejamento de lavra de curto prazo em um depósito tabular é proposto. Uma investigação das diferenças entre um *grid* não-estruturado e um regular Cartesiano é necessária, para quantificar as diferenças entre seus volumes e espessuras na mineralização. Uma solução para o cálculo de teores e tonelagem dentro de uma linha de escavação é também necessária, visto que a maioria dos softwares de planejamento de mina não são capazes de utilizar um *grid* não-estruturado.

O *grid* não-estruturado é construído utilizando hexaedros irregulares e povoado com estimativas de teores via krigagem nos blocos irregulares. O *grid* não-estruturado foi comparado com um *grid* regular Cartesiano e o volume entre as superfícies de topo e base do horizonte mineralizado (referência). O *grid* não estruturado reproduziu melhor as formas curvilineares do sólido geológico em relação ao *grid* regular Cartesiano. O comparativo entre os volumes demonstrou uma ligeira diferença entre a referência e os *grids*. Em termos de espessura, a espessura do *grid* não-estruturado é mais próxima à espessura da referência quando comparada a espessura do *grid* regular Cartesiano. A espessura do *grid* não-estruturado é praticamente igual a da referência em toda a área considerada. Em contrapartida, a espessura do regular Cartesiano difere com a espessura da referência em alguns pontos. A diferença máxima corresponde o tamanho vertical dos blocos no *grid* regular Cartesiano, conduzindo a extração de um pouco de estéril junto ao minério.

Uma metodologia demonstra como usar as estimativas de teores em um *grid* não-estruturado no planejamento de lavra de curto prazo. Um estudo de caso demonstra como selecionar os blocos dentro das linhas de escavação e calcular seus respectivos teores médios, volume total e tonelagem. Seus resultados foram comparados com um *grid* regular Cartesiano. Foi demonstrado que o *grid* não-estruturado pode ser adequado para o cálculo de teores como uma referência do cenário real, visto que os blocos estão restritos ao horizonte mineralizado. A diferença entre seu volume total e tonelagem foi pequena, em torno de 0,1%, demonstrando a necessidade de usar o *grid* não-estruturado em outros depósitos

com maiores complexidades entre os contatos das superfícies a fim de ilustrar as melhorias no cálculo de teores.

Palavras-chave: *Grids* Não-estruturados. Planejamento de Lavra de Curto Prazo. Geostatística.

Abstract

Most geostatistical and mine planning software work with a regular Cartesian grid, commonly known as block models. Some block models use blocks of equal shape and size, while others use sub-blocks. The limitation of regular Cartesian grids is that they do not fit well to the irregular solid used to delineate the ore seam in tabular deposits. One solution for a lack of adherence between solid boundaries and block model involves an unstructured grid. The unstructured grid allows more flexibility to conform the blocks to the ore seam, since the blocks can have different size and shapes.

The usage of an unstructured grid in short-term mine planning in a tabular deposit is proposed. An investigation of the differences between an unstructured grid and a regular Cartesian grid are needed, to quantify the differences between their volumes and seam thickness. A solution to calculate the grade and tonnes inside a dig line is also required, as most mine planning software are not suitable for using an unstructured grid.

The unstructured grid is built using irregular hexahedrons and populated with grade estimates via kriging at irregular shaped blocks. The unstructured grid was compared with a regular Cartesian grid and the volume within the top and bottom ore surfaces (reference). The unstructured grid reproduced better the curvilinear shapes of the geological solid than the regular Cartesian grid. The comparison of the volume showed a slight difference between the reference and the grids. In terms of thickness, the thickness of the unstructured grid is much closer to the reference thickness than that of the regular Cartesian grid. The thickness of the unstructured grid is nearly equal to the reference thickness for all the area considered. Conversely, the thickness of the regular Cartesian grid differs from the reference thickness at some points. The maximum difference corresponds to the vertical size of the block in the regular Cartesian grid, leading to the extraction of some waste with ore.

A methodology displays how to use the grade estimates in an unstructured grid in short-term mine planning. A case study demonstrates how to select the blocks inside the dig lines and calculate their respective average grade, total volume and tonnes. Their results were compared to a regular Cartesian grid. It was showed that unstructured grids could be more suitable to calculate block grades, since the blocks are restricted to the ore seam. The difference of their total volume and tonnes was small, around 0,1%, showing that is necessary to use the unstructured grid in other deposits with more complex contacts between their surfaces to illustrate the improvements of the grade calculation.

Keywords: Unstructured Grid. Short-term Mine Planning. Geostatistics.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Fluxo de trabalho da metodologia	23
Figura 2.1 – Formas geométricas utilizadas comumente em <i>grids</i> <i>n</i> -dimensionais.	25
Figura 2.2 – Exemplo de um <i>grid</i> regular e suas características.	26
Figura 2.3 – Exemplo de um <i>grid</i> regular com a parcial do bloco entre o horizonte mineralizado (a); Exemplo de um <i>grid</i> regular com sub-blocos bloco delineando o horizonte mineralizado (b).	27
Figura 2.4 – Exemplo de um tetraedro irregular (a); Exemplo de um hexaedro irregular (b).	28
Figura 2.5 – Superfície no espaço real (a); Espaço deposicional após mudança de coordenadas (b); <i>Grid</i> no espaço real (c); <i>Grid</i> regular no espaço deposicional (d).	29
Figura 2.6 – Superfície no espaço Cartesiano (real) (a); Mudança de coordenadas estratigráficas em relação ao topo da superfície (b); Mudança de coordenadas estratigráficas em relação à base da superfície (c).	30
Figura 3.1 – Mapa de localização das amostras de Alumina Recuperável (AA).	36
Figura 3.2 – Mapa do espaçamento entre as amostras de Alumina Recuperável (AA).	37
Figura 3.3 – Histograma dos dados originais de Alumina Recuperável (a), histograma dos dados desagrupados (b).	37
Figura 3.4 – Fluxo de trabalho para estimativa de teores em <i>grids</i> não-estruturados	38
Figura 3.5 – Vista isométrica <i>grid</i> não-estruturado (a), seção transversal do <i>grid</i> não-estruturado (b). Exagero vertical de 25:1.	39
Figura 3.6 – Coordenadas Z no plano Cartesiano (a), coordenadas Z estratigráficas (b).	40
Figura 3.7 – Modelo variograma na direção horizontal de AA (a); Modelo variograma na direção vertical de AA (b).	40
Figura 3.8 – Vista isométrica do modelo de teores estimados no <i>grid</i> não-estruturado. Exagero vertical de 25:1.	41
Figura 3.9 – Vista isométrica do modelo de teores estimados no <i>grid</i> regular Cartesiano. Exagero vertical de 25:1.	42
Figura 3.10 – Inspeção visual do modelo de teores estimados no <i>grid</i> não-estruturado.	43
Figura 3.11 – Inspeção visual do modelo de teores estimados no <i>grid</i> regular Cartesiano.	43
Figura 3.12 – Análise de deriva na direção X (a); Análise de deriva na direção Y (b) e Análise de deriva na direção Z nos <i>grids</i> (c).	44
Figura 3.13 – Histograma do erro estimado no <i>grid</i> não-estruturado (a); Diagrama de dispersão dos valores reais e estimados (b).	45
Figura 4.1 – Seção transversal do <i>grid</i> regular Cartesiano (a) e seção transversal do <i>grid</i> não-estruturado (b).	46

Figura 4.2 – Exemplo dos pontos das arestas do <i>grid</i> da superfície (a) e centroide do hexaedro do <i>grid</i> não-estruturado (b).	47
Figura 4.3 – Seção transversal do <i>grid</i> regular Cartesiano com a porcentagem dos blocos entre as superfícies até 50% (a) e seção transversal do <i>grid</i> regular Cartesiano com a porcentagem dos blocos entre as superfícies até 1% (b).	48
Figura 4.4 – Duas de seis pirâmides utilizadas na decomposição de uma célula de hexaedro.	48
Figura 4.5 – Área ampliada do <i>grid</i> 2D do depósito no plano horizontal.	50
Figura 4.6 – Gráfico de dispersão da espessura do <i>grid</i> contra a espessura entre a superfície de topo e base.	52
Figura 5.1 – Bibliotecas <i>Python</i> utilizadas no software.	53
Figura 5.2 – Conversão dos arquivos do <i>grid</i> não-estruturado e modelo de teores estimados.	54
Figura 5.3 – Função para criação dos polígonos do modelo de blocos.	54
Figura 5.4 – <i>Geodata frame</i> do modelo de blocos	55
Figura 5.5 – Importação das linhas de escavação	55
Figura 5.6 – Operação de seleção dos blocos de acordo com as linhas de escavação.	55
Figura 5.7 – Cálculo dos blocos dentro das linhas de escavação.	56
Figura 5.8 – Definição do valor limite para seleção dos blocos de acordo com suas porcentagens.	56
Figura 5.9 – Criação do arquivo de saída com os blocos selecionados.	56
Figura 5.10–Fluxo de trabalho implementado no software de planejamento de lavra de curto prazo.	57
Figura 5.11–Modelo de blocos estimados de alumina recuperável em vista de planta.	58
Figura 5.12–Linhas de escavação de bauxita dos anos 2017 e 2018.	58
Figura 5.13–Modelo de blocos estimados de alumina recuperável com as linhas de escavação de acordo com seus meses e anos.	59
Figura 5.14–Blocos selecionados de acordo com as linhas de escavação.	59
Figura 5.15–Blocos selecionados de acordo com suas porcentagens dentro das linhas de escavação.	60
Figura 5.16–Blocos selecionados pelas porcentagens dentro das linhas de escavação filtrados por seus meses e anos.	60
Figura 5.17–Modelo de blocos estimados de alumina recuperável em vista de planta na abordagem "Centroide"(a); Modelo de blocos estimados de alumina recuperável em vista de planta na abordagem "Porcentagem"(b).	62
Figura 5.18–Porcentagens dos blocos do <i>grid</i> regular Cartesiano dentro do horizonte mineralizado (Vista de topo).	63

Figura 5.19–Modelo de blocos estimados de alumina recuperável com as linhas de escavação de acordo com seus meses e anos "Centroide"(a); Modelo de blocos estimados de alumina recuperável com as linhas de escavação de acordo com seus meses e anos "Porcentagem"(b).	64
Figura 5.20–Blocos selecionados pelas linhas de escavação no modelo "Centroide"(a); Blocos selecionados pelas linhas de escavação no modelo "Porcentagem"(b).	65
Figura 5.21–Blocos selecionados de acordo com suas porcentagens dentro das linhas de escavação no modelo "Centroide"(a); Blocos selecionados de acordo com suas porcentagens dentro das linhas de escavação no modelo "Porcentagem"(b).	66
Figura 5.22–Blocos do modelo "Centroide"selecionados pelas porcentagens dentro das linhas de escavação filtrados por seus meses e anos (a); Blocos do modelo "Porcentagem"selecionados pelas porcentagens dentro das linhas de escavação filtrados por seus meses e anos (b).	68
Figura 5.23–Diagrama de dispersão entre os teores médios do <i>grid</i> não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Centroide"(a); Diagrama de dispersão entre os teores médios do <i>grid</i> não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Porcentagem"(b).	71
Figura 5.24–Diagrama de dispersão entre os volumes do <i>grid</i> não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Centroide"(a); Diagrama de dispersão entre os volumes do <i>grid</i> não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Porcentagem"(b).	73
Figura 5.25–Diagrama de dispersão entre as tonelagens do <i>grid</i> não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Centroide"(a); Diagrama de dispersão entre as tonelagens do <i>grid</i> não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Porcentagem"(b).	75

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados na krigagem ordinária em <i>grid</i> Não-estruturado .	41
Tabela 3.2 – Tamanho e número de células do <i>grid</i> Cartesiano	41
Tabela 3.3 – Parâmetros utilizados na krigagem ordinária em <i>grid</i> regular Catesiano	42
Tabela 4.1 – Comparativo dos volumes entre os <i>grids</i>	49
Tabela 4.2 – Estatística global do comparativo entre as espessuras dos <i>grids</i>	51
Tabela 4.3 – Estatística da espessura do <i>grid</i> menos a espessura da superfície	51
Tabela 5.1 – Resultados de teor médio, volume total e tonelagem no planejamento de curto prazo com <i>grid</i> não-estruturado.	61
Tabela 5.2 – Resultados de teor médio, volume total e tonelagem no planejamento de curto prazo com <i>grid</i> regular Cartesiano na abordagem "Centroide".	69
Tabela 5.3 – Resultados de teor médio, volume total e tonelagem no planejamento de curto prazo com <i>grid</i> regular Cartesiano na abordagem "Porcentagem".	70
Tabela 5.4 – Comparativo do teor médio de Alumina Recuperável entre o grid não-estruturado e regular Cartesiano.	72
Tabela 5.5 – Comparativo do volume entre o grid não-estruturado e regular Cartesiano.	74
Tabela 5.6 – Comparativo da tonelagem entre o grid não-estruturado e regular Cartesiano.	76

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Meta	22
1.2	Objetivos Específicos	22
1.3	Metodologia	23
1.4	Organização da Dissertação	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Grids na Mineração	25
2.1.1	Grids Estruturados e Não-estruturados	26
2.1.2	Grids no espaço Cartesiano e Estratigráfico	28
2.2	Estimativa de Teores	30
2.2.1	Krigagem Ordinária	32
2.2.2	Krigagem de Bloco	33
2.3	Planejamento de Lavra	34
2.3.1	Planejamento de lavra de curto prazo	34
3	ESTIMATIVA DE TEORES EM <i>GRID</i> NÃO-ESTRUTURADO E <i>GRID</i> REGULAR CARTESIANO	36
3.1	Estimativa de Teores com <i>Grids</i> Não-estruturados	37
3.1.1	Construção de <i>Grids</i> Não-estruturados	38
3.1.2	Estimativa dos Teores utilizando um <i>grid</i> não-estruturado	39
3.2	Estimativa de Teores em <i>grid</i> regular Cartesiano	41
3.3	Validação das Estimativas de Teores	43
4	COMPARATIVO ENTRE O <i>GRID</i> NÃO-ESTRUTURADO E <i>GRID</i> REGULAR CARTESIANO	46
4.1	Comparativo dos volumes entre o <i>grid</i> não-estruturado e <i>grid</i> regular Cartesiano	46
4.2	Comparativo das espessuras entre o <i>grid</i> não-estruturado e <i>grid</i> regular Cartesiano	49
5	PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO COM <i>GRID</i> NÃO-ESTRUTURADO E <i>GRID</i> REGULAR CARTESIANO	53
5.1	Desenvolvimento de um software para o planejamento de lavra à curto prazo	53
5.2	Estudo de caso do planejamento de lavra de curto prazo	57

5.2.1	Planejamento de lavra de curto prazo com <i>grid</i> não-estruturado	57
5.2.2	Planejamento de curto prazo com <i>grid</i> regular Cartesiano	61
5.3	Comparativo entre o planejamento de curto prazo com <i>grid</i> não-estruturado e regular Cartesiano	70
6	CONCLUSÃO	77
6.1	Recomendações para trabalhos futuros	78
	REFERÊNCIAS	79

1 Introdução

Na mineração, a maioria dos softwares de geoestatística e planejamento de mina trabalham com *grids* regulares Cartesianos, comumente conhecidos como modelos de blocos com tamanho e formas iguais, e sub-blocos. São utilizados modelos de blocos 2D e 3D. Modelos 2D são usados em alguns depósitos sedimentares e representações de iso-contornos. Modelos 3D são aplicados em depósitos relativamente mais espessos (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

Modelos 3D são de difícil ajuste ao sólido que define depósitos tabulares, dado o fato dos softwares de mineração trabalharem com modelos de blocos regulares, ou com sub-blocos, não se ajustando bem com as superfícies dos horizontes mineralizados (BERTOLI et al., 2003). Uma solução seria a utilização de um *grid* não-estruturado no qual permite-se uma maior aderência dos blocos modelo geológico, pois seus blocos possuem tamanhos e formas distintas.

Grids podem ser classificados em estruturados e não-estruturados. Os *grids* estruturados são aqueles cujo o padrão de conectividade entre as células são o mesmo, como em uma estrutura cristalina. Em *grids* não-estruturados, a conectividade entre as células é informada de forma explícita (CAUMON et al., 2005).

O uso de tetraedros apresenta-se como uma forma de modelar bem formas geológicas, visto que possuem uma maior flexibilidade para delinear diversas formas geométricas. Para a caracterização de um reservatório de petróleo, Manchuk (2010) utilizou tetraedros como células de um *grid*. Porém, para uma melhor representatividade da unidade seletiva de lavra, a utilização de hexaedros apresentam-se favoráveis em relação a tetraedros.

Bassani, Araújo e Costa (2019) apresentaram uma metodologia para a construção e estimativa de teores em *grids* não-estruturados, cujas células são hexaedros irregulares. Entretanto, o artigo apresenta somente uma validação visual do *grid* não-estruturado em relação à um *grid* regular Cartesiano. Uma investigação quantificando as diferenças dos dois *grids* mostra-se necessária.

Outro aspecto a ser estudado é a utilização do modelo estimado em um *grid* não-estruturado no planejamento de lavra. Neste trabalho, será investigado o uso da estimativa em *grid* não-estruturado no planejamento de curto prazo. Um dos objetivos do planejamento de curto prazo é classificar o minério e estéril, onde linhas de escavação (*dig lines*) delimitam essa classificação selecionando os blocos.

Diversos estudos na literatura demonstram o uso de técnicas geoestatísticas para a classificação dos blocos no planejamento de curto prazo, comparando modelos de teores

construídos por estimativa e por simulação, (GODOY; DIMITRAKOPOULOS; COSTA, 2001; VERLY, 2005; ABZALOV et al., 2010; ROSSI; DEUTSCH, 2014; VASYLCHUK; DEUTSCH, 2018). O modelo de teores usado para o planejamento de lavra de curto prazo será construído por krigagem. Verly (2005) afirma que a melhoria com o uso de abordagens com simulação no lugar de estimativa é baixa se houver alta densidade amostral e boas práticas de amostragem. O foco dessa dissertação não é testar diferentes técnicas geoestatísticas, e sim aplicar o uso de um *grid* não-estruturado no planejamento de lavra de curto prazo.

Houlding (1999) destacou as vantagens de estimar diretamente o teor em blocos com volumes irregulares para o planejamento, dado que abordagem convencional com blocos regulares resulta em erros volumétricos. A utilização de um modelo estimado em um *grid* não-estruturado apresenta-se adequada sendo necessária uma solução para calcular o teor e tonelagem por linha de escavação. A maioria dos softwares de planejamento de lavra não está apto para a utilização de *grids* não-estruturados.

1.1 Meta

A meta desta dissertação compreende na investigação do uso de *grids* não-estruturados no planejamento de curto prazo. A fim de verificar as diferenças entre os *grids* não-estruturado e regular Cartesiano serão investigados os resultados comparativos entres os *grids* e sua influência no planejamento de curto prazo.

1.2 Objetivos Específicos

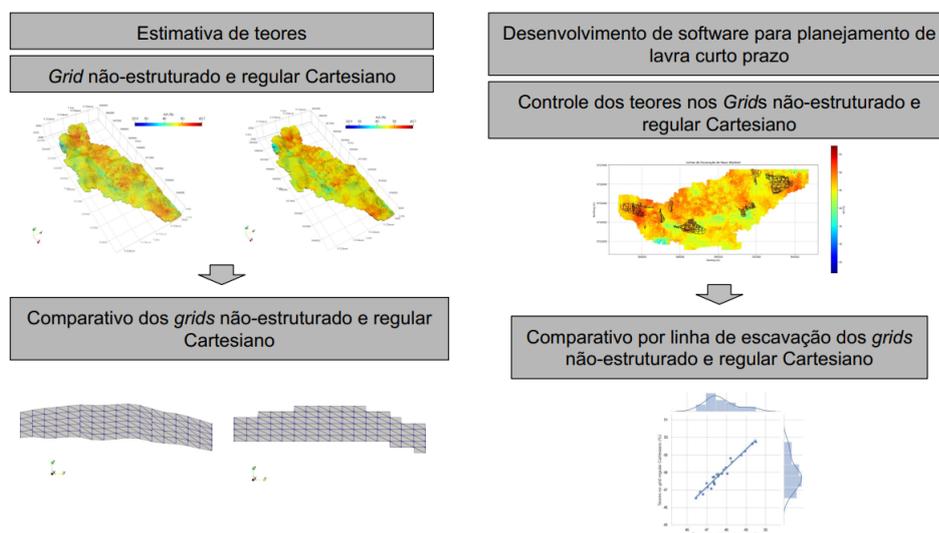
Essa dissertação propõe atingir sua meta cumprindo os seguintes objetivos específicos:

1. Analisar as estimativas de teores em *grids* não-estruturado e regular Cartesiano.
2. Calcular e comparar a variação da espessura dos *grids* ao longo da superfície.
3. Desenvolver um software para utilizar o modelo estimado de teores em um *grid* não-estruturado.
4. Comparar o teor, volume e tonelagem por linha de escavação entre os modelos de blocos por *grid* não-estruturado e regular Cartesiano.

1.3 Metodologia

A metodologia implementada neste trabalho segue os passos apresentado na figura 1.1. Inicialmente, através do método desenvolvido por Bassani, Araújo e Costa (2019), os *grids* não-estruturados serão construídos e realizada a estimativa de teores. Numa abordagem mais tradicional, os teores serão estimados utilizando um *grid* regular Cartesiano. Um comparativo entre o *grid* não-estruturado e o *grid* regular Cartesiano será quantificado em relação ao volume e a espessura apresentada nos *grids*. Em sequência, será desenvolvida uma rotina em *Python* para o controle de teores usando o modelo de blocos estimado em um *grid* não-estruturado e regular Cartesiano. Os resultados de teor médio, volume total e tonelagem por linha de escavação de ambos os *grids* serão comparados.

Figura 1.1 – Fluxo de trabalho da metodologia



Fonte: Elaborada pelo autor.

1.4 Organização da Dissertação

Essa dissertação se organizará em seis capítulos aos quais desenvolvem o fluxo da pesquisa, seja na revisão bibliográfica, na apresentação dos estudos de caso, até as conclusões obtidas pelo trabalho:

Capítulo 1 Compõe o capítulo inicial da dissertação. Contém uma introdução, metas e objetivos, a metodologia utilizada, a organização da dissertação.

Capítulo 2 Apresenta uma revisão envolvendo os aspectos relacionados ao uso *grids* na mineração e planejamento de lavra de curto prazo.

Capítulo 3 Apresenta a estimativa de teores utilizando *grids* não-estruturado e regular Cartesiano.

Capítulo 4 Apresenta o comparativo entre os *grids* não-estruturado e regular Cartesiano.

Capítulo 5 Apresenta o estudo de caso para o uso de *grids* não-estruturados no planejamento de lavra de curto prazo.

Capítulo 6 Apresenta a conclusão do trabalho e indica trabalhos futuros a partir desta dissertação.

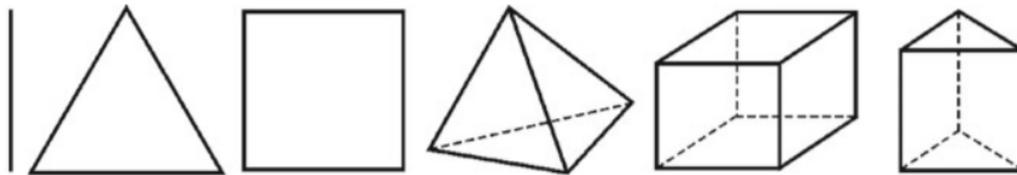
2 Revisão Bibliográfica

2.1 Grids na Mineração

Grids são ferramentas de grande importância para a representação visual de um meio físico. Através de uma coleção de objetos geométricos, podemos discretizar uma superfície ou domínio físico. Em um domínio, temos um conjunto de pontos específicos, os nós do *grid*, e uma coleção de formas geométricas padrões que cobrem sua área sem lacunas e sobreposições, sendo nomeadas como células do *grid* (LISEIKIN, 2017).

Comumente, células bidimensionais são construídas por triângulos ou quadriláteros, sendo suas arestas seus limites. Células tridimensionais são definidas por poliedros tridimensionais, cujo limite são as faces do poliedro. Suas formas mais comuns são de tetraedros lineares ou curvilineares e hexaedros. A figura 2.1 apresenta algumas das formas geométricas utilizadas como células de *grids*.

Figura 2.1 – Formas geométricas utilizadas comumente em *grids* n -dimensionais.



Fonte: Adaptado de Liseikin (2017)

Na mineração, os *grids* são tradicionalmente chamados de modelos de blocos. Eles são utilizados desde a estimativa dos recursos minerais ao planejamento e sequenciamento de lavra. A geometria dos modelos de blocos utilizados varia de acordo com as características do depósito, particularidades da geologia, e os requerimentos para o planejamento mineiro. Utilizam-se modelos em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D) (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

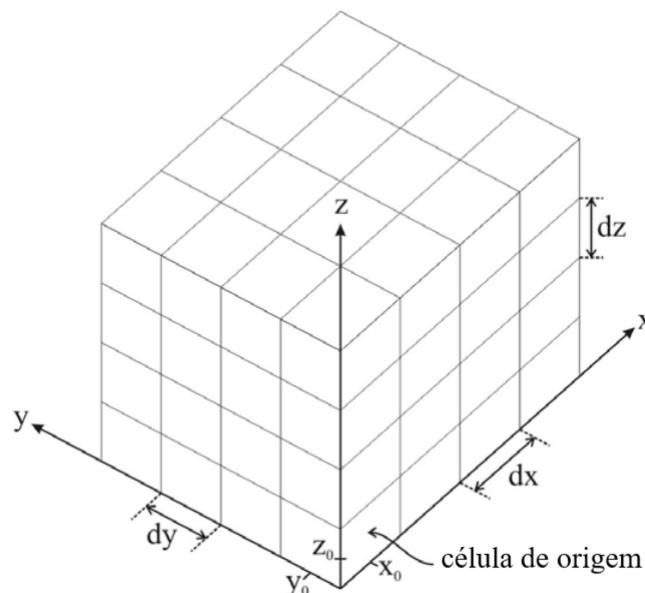
Modelos 2D são utilizados comumente em depósitos tabulares, como depósitos de carvão. Os modelos 2D são geralmente formados por superfícies 2D empilhadas que definem estratos mineralizados. Modelos 3D são utilizados em depósitos mais espessos, como depósitos de cobre-pórfiro, ferro, entre outros.

2.1.1 Grids Estruturados e Não-estruturados

A geometria de um *grid* consiste em um conjunto de n vértices definidos cada por um vetor $v = (x, y, z)$ no espaço tridimensional. Um modelo topológico de espaço descreve como os vértices são conectados entre si. De acordo com a forma de conectividade entre esses vértices, podemos elencar os *grids* em duas classes fundamentais, estruturados e não-estruturados. *Grids* estruturados apresentam um padrão na conectividade entre os vértices, seguindo uma regra geral, como uma estrutura cristalina. Em contrapartida, o *grid* não-estruturado tem a conectividade variando de ponto a ponto, sendo definida explicitamente (CAUMON et al., 2005; LISEIKIN, 2017).

Na geoestatística, primordialmente, *grids* estruturados são usados. As células utilizadas para a modelagem são quadriláteros (*grids* bidimensionais) e hexaedros (*grids* tridimensionais). Os *grids* também podem ser regulares quando todos as células (retângulos ou blocos) possuem volumes iguais (MANCHUK, 2010). Os *grids* regulares podem ser definidos a partir do vértice ou centroide do bloco. A definição pelo centroide é utilizada nos programas do *GSLib*, por exemplo (DEUTSCH; JOURNAL, 1998). A discretização do *grid* é definida pelas dimensões de suas células (dx, dy, dz), origem do *grid* (x_0, y_0, z_0) e número de células (nx, ny, nz) nas direções ortogonais de interesse ((x, y, z)) (MANCHUK, 2006). A figura 2.2 apresenta como um *grid* regular é discretizado através da definição da origem, tamanho e número de blocos.

Figura 2.2 – Exemplo de um *grid* regular e suas características.



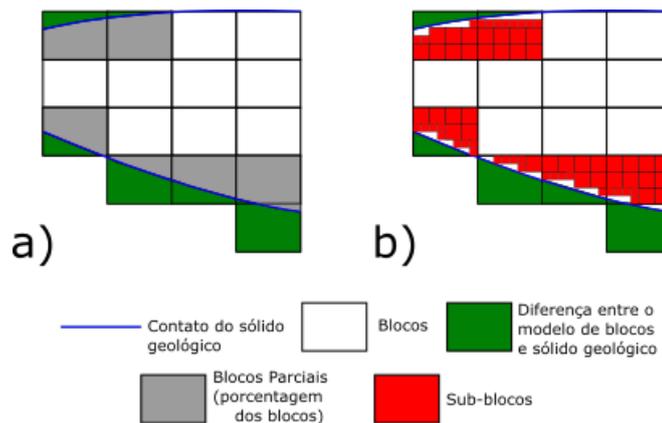
Fonte: Adaptado de Manchuk (2006)

Em geral, o tamanho de bloco em X e Y é menor do que a malha amostral, sendo utilizado 1/3 ou 1/4 do seu espaçamento (ROSSI; DEUTSCH, 2014). O tamanho em Z está relacionado com a seletividade dos equipamento de lavra. Em mineração a céu aberto,

o tamanho de bloco em Z geralmente corresponde à altura da bancada.

Ao trabalharmos em depósitos tabulares, o ajuste é difícil ao modelo 3D devido à pouca espessura e grande variação na dimensão vertical ao longo do depósito. Por exemplo, suponha um *grid* regular estruturado com 5 células na direção vertical. O *grid* terá 5 células de 2 metros de altura onde a espessura do minério possui 10 metros. O mesmo *grid* terá 5 células de 1 metro de altura onde a espessura do minério é 5 metros. Essa variação não é desejável quando a dimensão vertical da célula do *grid* está associada a uma seletividade vertical fixa de lavra. Algumas soluções são utilizadas, como a estimativa em blocos maiores, usando parciais do bloco (porcentagem do bloco) e sub-blocagem (Fig. 2.3), buscando delinear melhor o *grid* regular com o sólido geológico (BERTOLI et al., 2003).

Figura 2.3 – Exemplo de um *grid* regular com a parcial do bloco entre o horizonte mineralizado (a); Exemplo de um *grid* regular com sub-blocos bloco delineando o horizonte mineralizado (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

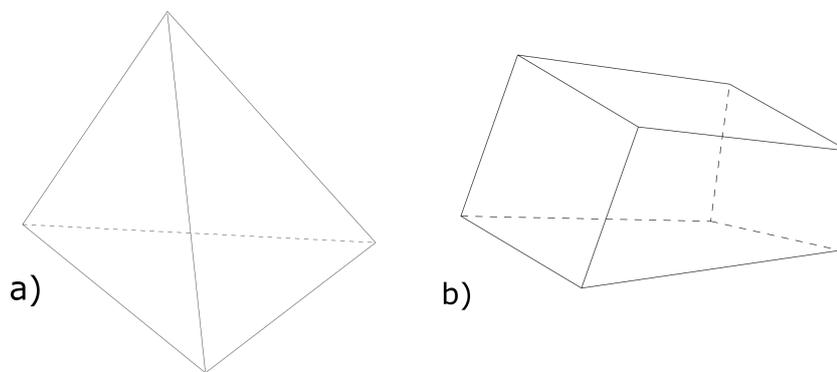
Uma alternativa para delinear melhor o *grid* ao horizonte mineralizado e satisfazer uma seletividade vertical fixa de lavra, seria a utilização de um *grid* não-estruturado. *Grids* não-estruturados possuem seus nós distribuídos irregularmente e suas células não são necessariamente no mesmo formato, sendo flexíveis para modelar formas geológicas.

Diversos estudos demonstram o uso de *grids* não-estruturados na modelagem de reservatórios de petróleo com geologia e geometria do reservatório complexas (XIE; DEUTSCH; TRAN, 2001; PYRCZ; DEUTSCH, 2002; PYRCZ, 2002; PYRCZ; DEUTSCH, 2003; CAUMON; GROSSE; MALLET, 2005).

Destaca-se uma série de estudos realizados por John G. Manchuk no tópico, onde ele apresenta a implementação de simulação geoestatística (MANCHUK; LEU-ANGTHONG; DEUTSCH, 2005; MANCHUK; DEUTSCH, 2006), algoritmos e ferramentas para estruturação, visualização e requisitos para a utilização geoestatística dos *grids* não-estruturados (MANCHUK, 2006; MANCHUK; DEUTSCH, 2008a; MANCHUK; DEUTSCH, 2008b; MANCHUK; DEUTSCH, 2009b; MANCHUK; DEUTSCH, 2009a;

MANCHUK; DEUTSCH, 2009c). Em sua tese, Manchuk (2010) utilizou tetraedros para caracterizar um reservatório, um poliedro flexível na delimitação de geologias (Fig. 2.4-a). Porém, tetraedros não representam bem a unidade seletiva de lavra (*selective mining unit* - *SMU*) e uma alternativa é o uso de hexaedros irregulares (Fig. 2.4-b), como utilizado por Rasera (2014) na simulação de variáveis categóricas em um depósito de ferro e na abordagem demonstrada por Bassani, Araújo e Costa (2019), na estimativa de teores em um depósito tabular.

Figura 2.4 – Exemplo de um tetraedro irregular (a); Exemplo de um hexaedro irregular (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.2 *Grids* no espaço Cartesiano e Estratigráfico

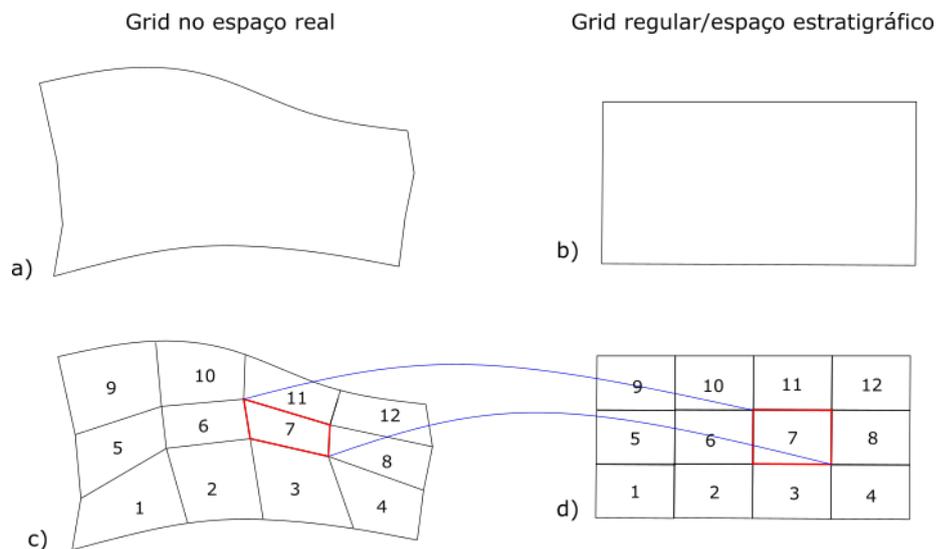
Depósitos tabulares de Bauxita na Amazônia são formados principalmente por rochas sedimentares. Essas formações são resultados de um processo lento de acumulação de alumínio, associados a solos lateríticos e ferricrete (acumulações de ferro) por diferentes eventos erosivos e deposicionais (CARVALHO et al., 1997).

A modelagem geoestatística utiliza da continuidade espacial obtida através das amostras para a estimativa dos teores. Comumente, o posicionamento das amostras e a modelagem de depósitos minerais são realizados em coordenadas cartesianas a fim de representar o depósito em estudo. Porém, as superfícies entre as diferentes camadas de rochas sedimentares podem corresponder a épocas geológicas específicas, diferentes períodos de deposição e com isso, a continuidade espacial deve se apoiar na continuidade de cada camada. (PYRCZ; DEUTSCH, 2014).

Eventos geológicos posteriores à formação geológica podem modificar as formas das camadas rochosas, como dobramentos por exemplo. Dessa forma, a direção da continuidade de certos atributos pode ser modificadas. Então, o uso de coordenadas no espaço cartesiano podem dificultar a continuidade dos valores amostrais, produzindo estimativas equivocadas de valores do atributo (KOPPE; COSTA; KOPPE, 2006).

Uma alternativa é a mudança das coordenadas para o espaço estratigráfico, deposicional ou geocronológico (MALLET, 2002; MALLET, 2004; PYRCZ; DEUTSCH, 2014). Essa mudança é utilizada para alinhar os teores ao longo dos níveis estratigráficos (ou nível geoquímico, como no caso de depósitos de bauxita), melhorando a análise de continuidade espacial (RUBIO et al., 2015). A figura 2.5 demonstra um exemplo de como é realizada a mudança do espaço real para o espaço estratigráfico. Os elementos criados no espaço real são mapeados para o espaço estratigráfico, onde as estimativas são realizadas em um *grid* regular (Fig. 2.5-d) e retro-transformadas para o espaço real (Fig. 2.5-c).

Figura 2.5 – Superfície no espaço real (a); Espaço deposicional após mudança de coordenadas (b); *Grid* no espaço real (c); *Grid* regular no espaço deposicional (d).



Fonte: Adapto de Manchuk (2010)

Pyrcz e Deutsch (2014) apresentam uma sugestão para a transformação de coordenadas cartesianas para coordenadas estratigráficas. As coordenadas verticais serão definidas como a distância relativa entre o topo e a base das superfícies de ajuste. A nova coordenada vertical é calculada de acordo a equação 2.1:

$$Z(i)_{estr} = \frac{Z(i) - Z(i)_{base}}{Z(i)_{topo} - Z(i)_{base}} * E \quad i = 1, \dots, n \quad (2.1)$$

onde $Z(i)_{estr}$ é a coordenada vertical após a mudança para coordenada estratigráfica da amostra (i); $Z(i)$ a coordenada vertical atual da amostra (i); $Z(i)_{base}$ a coordenada vertical referente à base da superfície abaixo da amostra (i); $Z(i)_{topo}$ a coordenada vertical referente ao topo da superfície da acima da amostra (i); E a espessura média e n número de amostras.

Koppe, Costa e Koppe (2006), Rubio et al. (2015), demonstram que observada uma pequena mudança na espessura ao longo do horizonte mineralizado, a equação 2.1 pode

ser redefinida para as equações 2.2 e 2.3:

$$Z(i)_{estr} = Z(i) - Z(i)_{topo} \quad i = 1, \dots, n \quad (2.2)$$

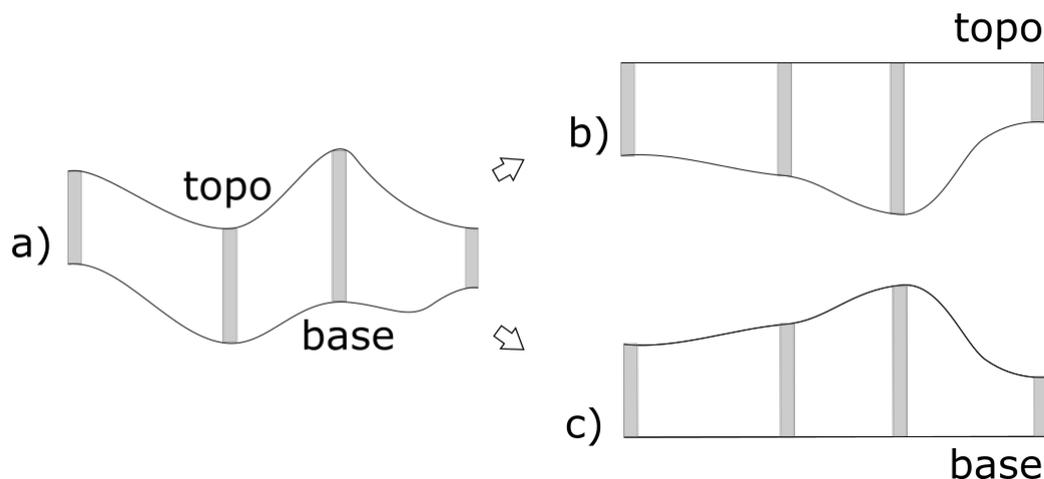
$$Z(i)_{estr} = Z(i) - Z(i)_{base} \quad i = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

As equações 2.2 e 2.3 representam a mudança para coordenadas estratigráficas usando o topo e a base da superfície como referência, respectivamente. A nova coordenada vertical ficará em uma forma plana sem alterar as distâncias horizontais das amostras.

Essa transformação não corrige as distâncias horizontais entre as amostras. Para depósito com dobras mais expressivas, a continuidade horizontal das amostras pode ser modificada, levando a erros na modelagem dos variogramas. Neste caso, esta transformação é apropriada para depósitos que demonstre um leve dobramento entre as camadas, não resultando em erros significativos na determinação da continuidade horizontal.

A figura 2.6 demonstra como é realizada a transformação para coordenadas estratigráficas de um horizonte mineralizado de acordo com a superfície de referencia (topo ou base). Nesta dissertação, será feita a mudança de coordenadas de acordo com a superfície de topo do horizonte mineralizado, comumente realizada em depósitos de características próximas ao depósito em estudo.

Figura 2.6 – Superfície no espaço Cartesiano (real) (a); Mudança de coordenadas estratigráficas em relação ao topo da superfície (b); Mudança de coordenadas estratigráficas em relação à base da superfície (c).



Fonte: Adaptado de Rubio et al. (2015).

2.2 Estimativa de Teores

A estimativa de teores tem como um dos seus principais objetivos a previsão do teor e tonelagem dos materiais a serem minerados. As estimativas podem ser voltadas para

decisões de longo prazo, ou utilizadas no controle de teores, selecionando o que é minério e estéril. Cada situação necessita de uma abordagem adequada (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

Diversos métodos são utilizados para a estimativa. Têm-se abordagens tradicionais como o método dos vizinhos mais próximos (*Nearest Neighbour - NN*), inverso do quadrado da distância (IQD) e a krigagem (MATHERON, 1963).

A krigagem é um nome genérico adotado à diversos algoritmos variantes do algoritmo de estimativa linear apresentado por Matheron (1963). Autores como Isaaks e Srivastava (1989), Goovaerts (1997), Deutsch e Journel (1998) demonstram algumas dessas variações. A krigagem busca obter estimativas de um atributo Z em locais (u), não amostrados, de uma determinada área de estudo A . Os estimadores de krigagem $Z^*(u)$ são definidos pela equação 2.4:

$$Z^*(u) - m(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u) [Z(u_{\alpha}) - m(u_{\alpha})] \quad (2.4)$$

onde $Z^*(u)$ é o valor da estimativa, $m(u)$ a esperança matemática da variável aleatória $Z(u) = m(u)$, $\lambda_{\alpha}(u)$ o peso assinalado para as amostras na estimativa, $Z(u_{\alpha})$ o valor das amostras utilizadas na estimativa, $m(u_{\alpha})$ a esperança matemática das variáveis aleatórias de $Z(u_{\alpha})$.

De acordo com Goovaerts (1997), os algoritmos de krigagem dividem o mesmo objetivo de minimizar o erro estimado ou variância do erro $\sigma_E^2(u)$ (Eq. 2.5), sobre a condição do estimador ser não-tendencioso (Eq. 2.6).

$$\sigma_E^2(u) = Var \{Z^*(u) - Z(u)\} \quad (2.5)$$

$$E \{Z^*(u) - Z(u)\} = 0 \quad (2.6)$$

O estimador de krigagem varia de acordo com o modelo adotado para a função aleatória $Z(u)$. A função aleatória $Z(u)$ é usualmente dividida em uma componente residual $R(u)$ e uma componente de esperança matemática $m(u)$ (Eq. 2.7).

$$Z(u) = R(u) + m(u) \quad (2.7)$$

A componente residual é modelada como uma função aleatória estacionária com média zero e covariância $C_R(h)$ (Eq. 2.8):

$$\begin{aligned} E \{R(u)\} &= 0 \\ Cov \{R(u), R(u+h)\} &= E \{R(u) \cdot R(u+h)\} = C_R(h) \end{aligned} \quad (2.8)$$

O valor esperado da variável aleatória Z para a localização u é, então, o valor da componente de esperança matemática para essa localização (Eq. 2.9).

$$E \{Z(u)\} = m(u) \quad (2.9)$$

Os algoritmos de krigagem podem ser diferenciados pelo modelo considerado para a esperança matemática $m(u)$, como na krigagem simples (*Simple Kriging - SK*), onde o valor da média $m(u)$ é conhecido e constante pela área de estudo A (Eq. 2.10).

$$m(u) = m, \text{ conhecido} \quad \forall u \in A \quad (2.10)$$

Neste trabalho, será utilizada a krigagem ordinária (*Ordinary Kriging - OK*). A krigagem ordinária considera a flutuação da média local limitando o domínio de estacionariedade da média para vizinhança local $W(u)$ (Eq. 2.11).

$$m(u') = \text{constante, porém desconhecido} \quad \forall u \in W(u) \quad (2.11)$$

2.2.1 Krigagem Ordinária

A krigagem ordinária é um estimador considerado "BLUE", acrônimo em inglês para *best linear unbiased estimator*. A krigagem ordinária é um estimador linear (*linear*); não-tendenciosa (*unbiased*), pois a média do erro da estimativa é zero; e melhor (*best*) porque minimiza a variância do erro da estimativa (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

A krigagem ordinária considera a flutuação da média local, limitando o domínio de estacionariedade da média para vizinhança local $W(u)$ do ponto u a ser estimado. A média local desconhecida $m(u)$ é filtrada no estimador linear forçando os pesos de krigagem somarem um (Eq. 2.12).

$$Z^*(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{OK}(u) Z(u_{\alpha}) \quad \text{com} \quad \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{OK}(u) = 1 \quad (2.12)$$

Através do sistema de krigagem, que possui $n(u) + 1$ equações lineares, os pesos de krigagem $\lambda_{\alpha}^{OK}(u)$ são calculados (Eq. 2.13):

$$\begin{cases} \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{OK}(u) C(u_{\alpha} - u_{\beta}) + \mu_{OK}(u) = C(u_{\alpha} - u) & \alpha = 1, \dots, n(u) \\ \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{OK}(u) = 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

onde $C(u_{\alpha} - u_{\beta})$ é a covariância entre as amostras utilizadas na estimativa, $C(u_{\alpha} - u)$ é a covariância entre a amostra utilizada na estimativa e o ponto a ser estimado e $\mu_{OK}(u)$ é o parâmetro de Lagrange.

O parâmetro de Lagrange é introduzido na equação da variância do erro, utilizada no sistema de krigagem ordinária, não afetando o valor dessa variância. Através desse artifício é garantida uma única solução ao sistema de krigagem ordinária, pois esse sistema terá $n + 1$ equações e $n + 1$ variáveis (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

A variância de krigagem ordinária (σ_{OK}^2), descrita pela equação 2.14, pode ser usada na determinação da incerteza de cada estimativa, em cada local u .

$$\sigma_{OK}^2(u) = \sigma^2 - \left(\sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{OK}(u) C(u_{\alpha} - u) + \mu_{OK}(u) \right) \quad (2.14)$$

onde, $\sigma_{OK}^2(u)$ é a variância de krigagem ordinária; σ^2 variância das amostras; $C(u_{\alpha} - u)$ covariância das amostras usada na estimativa com o ponto a ser estimado; $\lambda_{\alpha}^{OK}(u)$ peso para a amostra usada na estimativa; $n(u)$ número de amostras usadas na estimativa; $\mu_{OK}(u)$ parâmetro de Lagrange.

2.2.2 Krigagem de Bloco

As equações de krigagem ordinária apresentadas até o momento são atribuídas a krigagem de pontos. Frequentemente, prefere-se utilizar a krigagem de bloco. Na krigagem de bloco, a área de estudo é dividida em blocos, onde vários pontos dentro de cada bloco são interpolados, e a média dos valores interpolados é o valor do atributo dado ao bloco (JOURNAL; HUIJBREGTS, 1978; ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

A quantidade de pontos que deverão ser interpolados dentro de cada bloco depende do grau de discretização desejado. Porém, dependendo do número de pontos a serem estimados dentro de um volume pode exigir um grande esforço computacional, pois cada ponto a ser estimado, deverá solucionar um sistema de krigagem. Journal e Huijbregts (1978), Isaacs e Srivastava (1989), demonstram uma solução para reduzir esse esforço computacional, através do sistema de krigagem ordinária de bloco (Eq. 2.15):

$$\begin{cases} \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha V}^{OK}(u) C(u_{\alpha} - u_{\beta}) + \mu(u) = \bar{C}(u_{\alpha}, V(u)) & \alpha = 1, \dots, n(u) \\ \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha V}^{OK}(u) = 1 \end{cases} \quad (2.15)$$

onde $C(u_{\alpha} - u_{\beta})$ é a covariância entre as amostras utilizadas na estimativa, $\mu(u)$ o parâmetro de Lagrange; $\lambda_{\alpha V}^{OK}(u)$ o peso assinalado para as amostras na estimativa; $\bar{C}(u_{\alpha}, V(u))$ a covariância ponto-bloco.

A equação 2.16 define a covariância ponto-bloco, $\bar{C}(u_{\alpha}, V(u))$:

$$\bar{C}(u_{\alpha}, V(u)) = \frac{1}{N} \sum_{(i=1)}^N C(u_{\alpha} - u'_i) \quad (2.16)$$

onde N é o número de pontos discretizando o bloco $V(u)$.

A variância das estimativas por krigagem ordinária de bloco é definida pela equação 2.17:

$$\sigma_{OK}^2(u) = \bar{C}(V(u), V(u)) - \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha V}^{OK}(u) \bar{C}(u_{\alpha}, V(u)) - \mu(u) \quad (2.17)$$

onde o valor de $\bar{C}(V(u), V(u))$ é definido pela equação 2.18:

$$\bar{C}(V(u), V(u)) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C(u'_i - u'_j) \quad (2.18)$$

onde $C(u'_i - u'_j)$ é a covariância definida pela discretização dos pontos u'_i e u'_j .

2.3 Planejamento de Lavra

Após a criação dos modelos de teores, no planejamento de lavra são realizadas a avaliação econômica desses modelos, a definição da cava final, a determinação do seu desenvolvimento e a sequência de extração adequada ao longo da vida mina (*LoMP – Life of Mine Plan*). A determinação da vida útil da mina está relacionada à razão de produção da mina, projetos de avanços operacionais e a sequência de extração dos blocos, definindo-se diretrizes gerais para as atividades de planejamento de curto e longo prazo (PERONI, 2002; ROSSI; DEUTSCH, 2014).

COUZENS (1979) apresenta dois tipos de planejamento operacional, planejamento produção longo prazo e operacional ou curto prazo. O planejamento produção de longo prazo tem como objetivo a definição dos limites lavráveis do depósito, e a partir da capacidade técnica, econômica e ambiental avaliam-se as reservas minerais. O planejamento de curto prazo, em essência, estabelece a produção operacional para o funcionamento de uma mina.

2.3.1 Planejamento de lavra de curto prazo

No planejamento de longo prazo, os modelos de blocos são baseados em amostragens mais esparsas que são gradualmente adensadas durante o avanço da mineração. Esses modelos são usualmente atualizados anualmente através de novos furos, porém esses modelos tornam-se desatualizados rapidamente por causa da dinâmica das operações da mina (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

Para o planejamento de curto de prazo, o modelo de blocos necessita ser atualizados para uma melhor acurácia e assim diminuir as incertezas das estimativas. Os modelos de curto prazo podem ser definidos como modelos de controle de teores, onde os blocos

a serem minerados são selecionados entre minério e estéril. Essa seleção é muitas vezes realizadas por linhas de escavação (*dig lines*).

A utilização de dados da produção na atualização dos modelos de curto prazo (atualização dos modelos geológicos e a estimativa de domínios) é polêmica. Devido a sua baixa precisão e acuracidade das informações, em relação aos furos de sondagem, deve-se garantir que os dados não portem viés significativo comparado aos teores provindos de furos de longo prazo (ROSSI; DEUTSCH, 2014). Algumas técnicas podem garantir um menor impacto desses dados, como a utilização da cokrigagem ordinária estandardizada apresentada por Araújo, Bassani e Costa (2015).

A classificação do material em minério ou estéril é uma das mais importantes decisões para uma mina, dado que o recurso mineral é finito e a decisão final é irreversível. Minimizar erros na classificação é importante, pois está diretamente ligado ao retorno financeiro das operações de lavra (VERLY, 2005; ROSSI; DEUTSCH, 2014)

Geralmente no controle de teores, têm-se atividades como amostragem, mapeamento geológico, estimativa de teores, seleção minério/estéril, desmonte e despacho. A eficiência do controle de teores é ligada a fatores como erros de amostragem, malha amostral e a precisão do método de amostragem, e o viés condicional através da estimativa de teores (GODOY; DIMITRAKOPOULOS; COSTA, 2001).

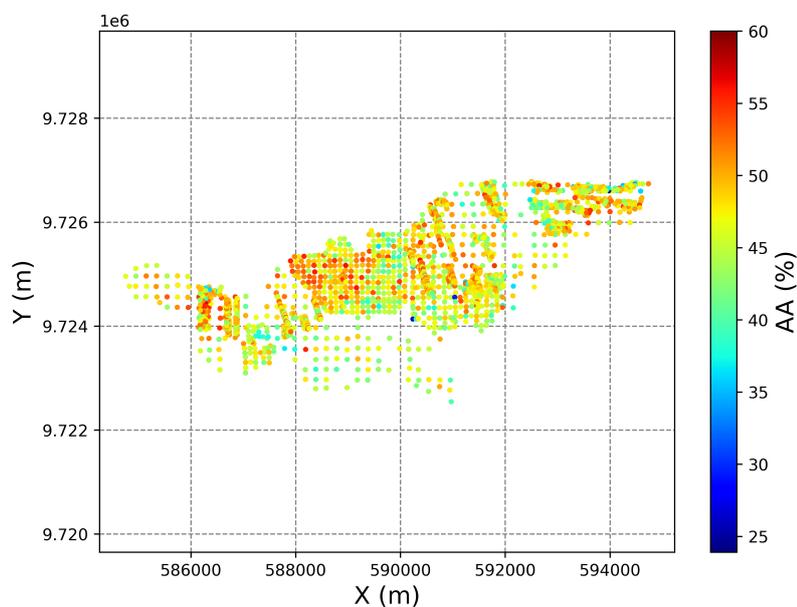
Os dados do controle de teores são utilizados para assegurar que o material a ser minerado se encontre dentro do teor e especificações metalúrgicas necessárias. A determinação do destino do material depende das características do minério. A escolha de procedimentos de controle de teores requer encontrar uma combinação ótima da qualidade e quantidade dos dados. Com isso, se permite uma delimitação efetiva e acurada do minério e estéril através das características do material a ser minerado (ABZALOV et al., 2010).

Os modelos de controle de teores são construídos através de blocos utilizando os dados de teores disponíveis. O tamanho do *grid*, usualmente, é escolhido de acordo com as dimensões da unidade seletiva de lavra *selective mining unit - SMU*. O tamanho da unidade seletiva de lavra depende dos equipamento de escavação e transporte utilizados na mina. Usualmente são utilizado modelos determinísticos obtidos por interpoladores lineares (krigagem) (VASYLCHUK; DEUTSCH, 2018). De acordo com Verly (2005), melhorias significativas no controle de teores estão ligadas em uma simples regra: boas práticas de amostragem, geologia e geoestatística.

3 Estimativa de teores em *grid* não-estruturado e *grid* regular Cartesiano

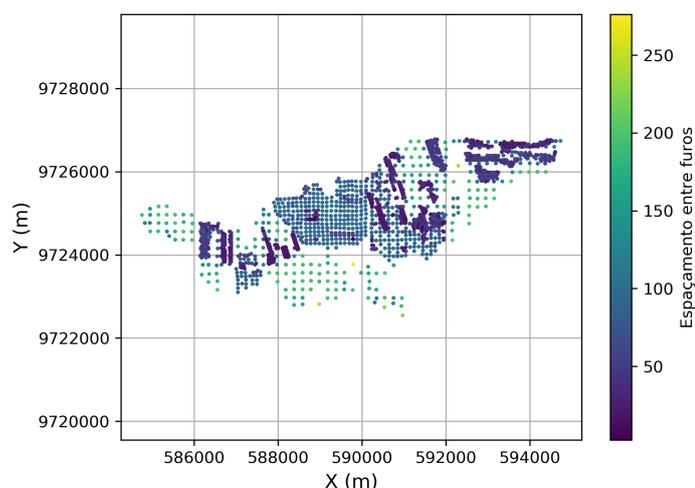
O presente estudo de caso foi realizado em um depósito de bauxita localizado no Brasil. A variável de interesse é a Alumina Recuperável (AA). A figura 3.1 apresenta o mapa de localização dos teores de Alumina Recuperável. Na figura 3.2, têm-se o espaçamento das amostras. É observado um espaçamento de 50 e 100 metros ao longo de X e Y. As amostras foram regularizadas pelo comprimento, sendo compostadas em torno de 0,5 metros.

Figura 3.1 – Mapa de localização das amostras de Alumina Recuperável (AA).



Fonte: Elaborada pelo autor.

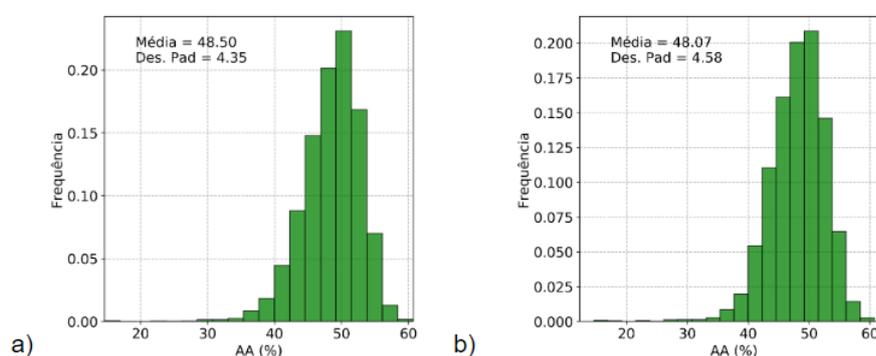
Figura 3.2 – Mapa do espaçamento entre as amostras de Alumina Recuperável (AA).



Fonte: Elaborada pelo autor.

O desagrupamento das amostras foi realizado pelo método de células móveis em duas dimensões (DEUTSCH; JOURNAL, 1998). Pyrcz e Deutsch (2014), aconselham realizar o desagrupamento por células móveis em duas dimensões para furos de sondagem que são verticais e intersectam completamente o horizonte mineralizado. O tamanho escolhido para as células foi o espaçamento entre as amostras mais esparsas, 200 metros ao longo de X e Y. A figura 3.3 apresenta o histograma original dos dados e o histograma dos dados desagrupados. A média de Alumina Recuperável (AA) apresentou-se similar entre as duas distribuições, demonstrando que o agrupamento não é significativo.

Figura 3.3 – Histograma dos dados originais de Alumina Recuperável (a), histograma dos dados desagrupados (b).



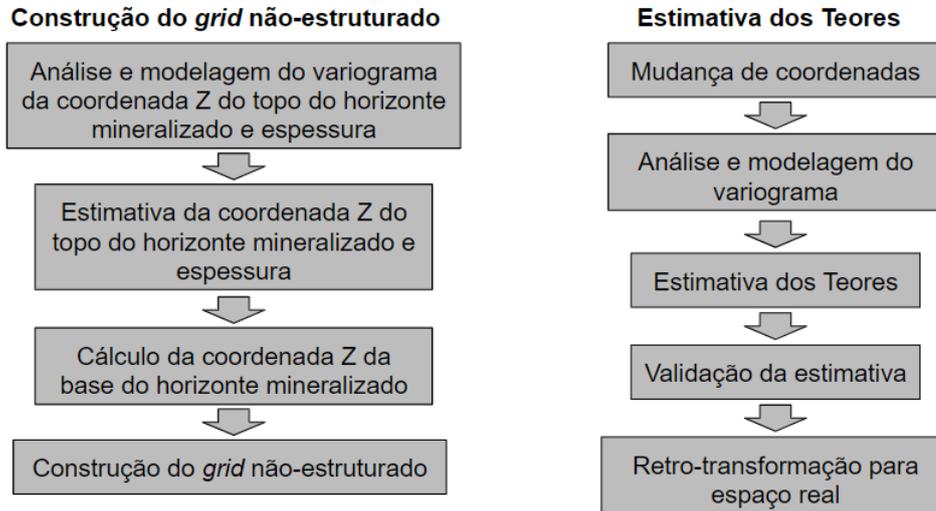
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1 Estimativa de Teores com *Grids* Não-estruturados

A estimativa de teores utilizando um *grid*s não-estruturados em depósitos tabulares é apresentada por Bassani, Araújo e Costa (2019). Inicialmente, o *grid* não-estruturado

é construído e a estimativa é realizada nos blocos irregulares deste *grid*. A Figura 3.4 apresenta o fluxo de trabalho para esta metodologia.

Figura 3.4 – Fluxo de trabalho para estimativa de teores em *grids* não-estruturados



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.1 Construção de *Grids* Não-estruturados

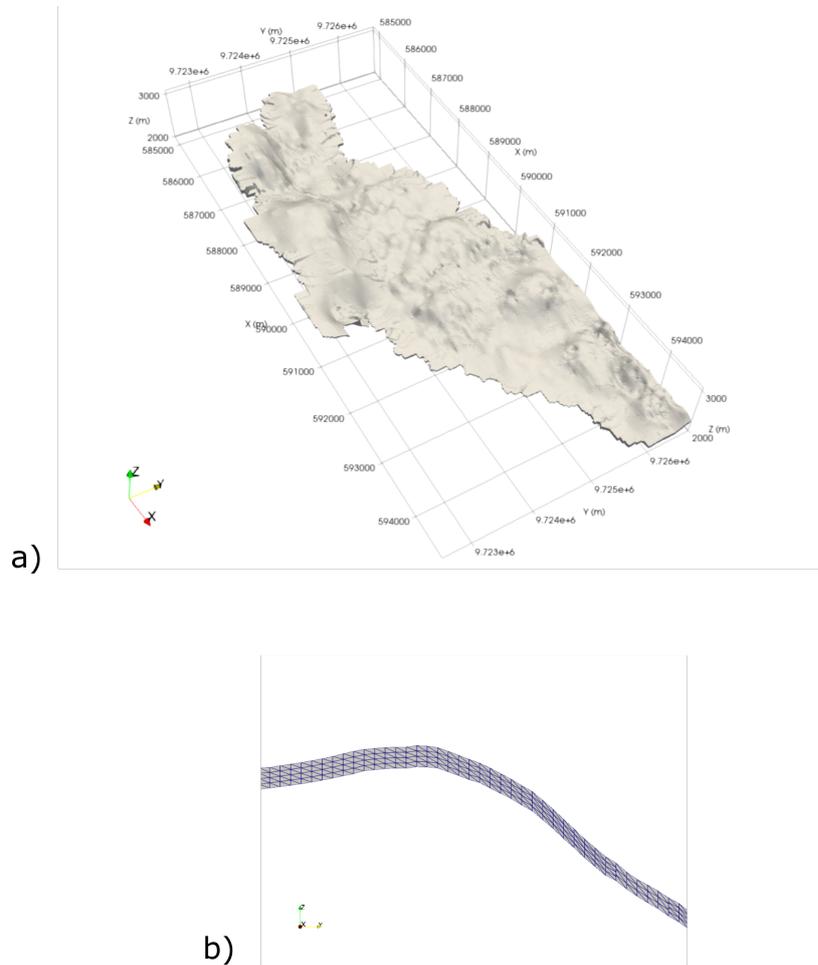
A construção dos *grids* não-estruturados requer as superfícies de topo e base do horizonte mineralizado. Obtém-se estas superfícies através da estimativa da coordenada Z do topo do horizonte mineralizado (Z_{topo}) e Espessura. A estimativa para a coordenada Z da base do horizonte mineralizado (Z_{base}) é alcançada pela diferença de Z_{topo} e a estimativa da Espessura. Esta abordagem mitiga os problemas na obtenção de valores de Z_{base} excedendo as estimativas de Z_{topo} .

Hexaedros irregulares são utilizados como células nos *grids* não-estruturados e são construídos de acordo com os seguintes passos:

- i Obter as coordenadas Z dos 8 vértices para definir o topo e base do horizonte mineralizado e calcular a espessura média (média das 4 arestas verticais);
- ii Calcular quantas células se encaixam dentro da espessura média baseada na resolução desejada. O número de células ao longo de Z é o inteiro mais próxima da fração entre a espessura média e resolução vertical. Se a espessura média é menor que metade da resolução vertical, nenhuma célula é construída neste local;
- iii Construção do *grid* irregular com o número de células calculados no passo (ii).

A figura 3.5 mostra uma vista isométrica e uma seção transversal do *grid* não-estruturado, respectivamente. É observado como o *grid* não-estruturado reproduz as feições curvilíneas.

Figura 3.5 – Vista isométrica *grid* não-estruturado (a), seção transversal do *grid* não-estruturado (b). Exagero vertical de 25:1.

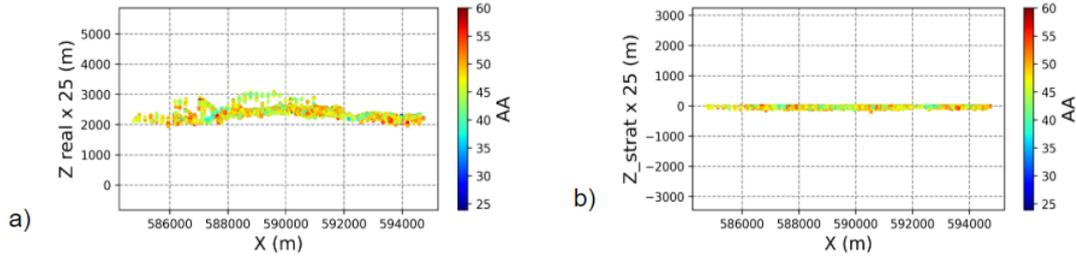


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Estimativa dos Teores utilizando um *grid* não-estruturado

Seguindo a metodologia demonstrada por Bassani, Araújo e Costa (2019), o primeiro passo para a estimativa de teores em um *grid* não-estruturado envolve a mudança de coordenadas. As coordenadas Z do banco de dados foram transformadas para coordenadas Z estratigráficas. As coordenadas estratigráficas foram obtidas através da diferença entre as coordenadas de Z e as coordenadas Z do topo do horizonte mineralizado. A figura 3.6 apresenta as coordenadas Z no plano Cartesiano das amostras de Alumina Recuperável (AA) e as coordenadas Z estratigráficas.

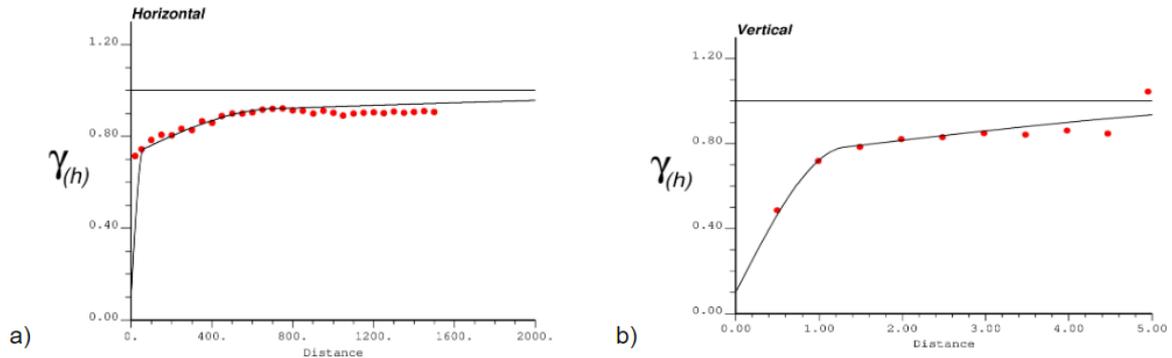
Figura 3.6 – Coordenadas Z no plano Cartesiano (a), coordenadas Z estratigráficas (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os variogramas experimentais foram calculados usando as coordenadas estratigráficas. O variograma foi modelado pelos variogramas experimentais. A figura 3.1 apresenta os variogramas modelados e a equação 3.1 descreve os variogramas, com sua maior continuidade no eixo horizontal e sua menor continuidade no eixo vertical.

Figura 3.7 – Modelo variograma na direção horizontal de AA (a); Modelo variograma na direção vertical de AA (b).



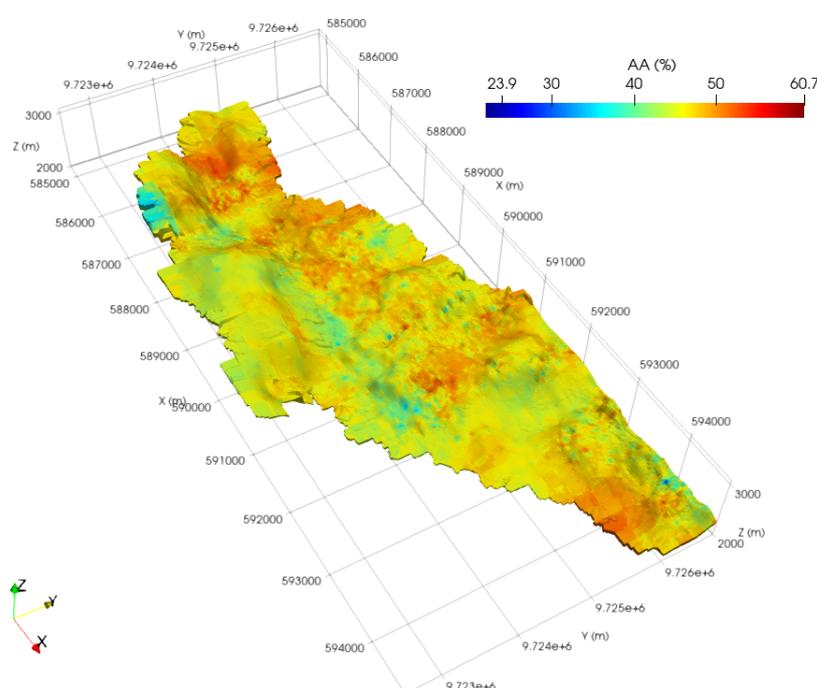
Fonte: Elaborada pelo autor.

$$\begin{aligned} \gamma(h) = & 0,10 + 0,62 \cdot Sph \left(\frac{EW}{60\text{ m}}, \frac{NS}{60\text{ m}}, \frac{vert.}{1,30\text{ m}} \right) \\ & + 0,18 \cdot Sph \left(\frac{EW}{700\text{ m}}, \frac{NS}{700\text{ m}}, \frac{vert.}{8,5\text{ m}} \right) + 0,10 \cdot Sph \left(\frac{EW}{5000\text{ m}}, \frac{NS}{5000\text{ m}}, \frac{vert.}{9\text{ m}} \right) \quad (3.1) \end{aligned}$$

A estimativa foi realizada por krigagem ordinária, onde as células dos hexaedros irregulares são utilizadas para calcular a covariância ponto-bloco e a variância de krigagem. A tabela 3.1 apresenta os parâmetros utilizado. A figura 3.8 demonstra o modelo de teores em vista isométrica após retro-transformação.

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados na krigagem ordinária em *grid* Não-estruturado

Parâmetros de Krigagem	
Discretização do Bloco (X-Y-Z)	5 - 5 - 1
Núm. Min. Amostras	4
Núm. Máx. Amostras	24
Núm. Máx. Octante	3
Alcance do Elipsoide de Busca	500 - 500 - 5
Ângulos do Elipsoide de Busca	0 - 0 - 0

Figura 3.8 – Vista isométrica do modelo de teores estimados no *grid* não-estruturado. Exagero vertical de 25:1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Estimativa de Teores em *grid* regular Cartesiano

Os teores de Alumina Recuperável (AA) foram também estimados a partir de uma abordagem tradicional, utilizando um *grid* regular Cartesiano no software *Isatis*. O *grid* regular cartesiano utilizado para a estimativa é discretizado pela tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Tamanho e número de células do *grid* Cartesiano

	Número de células	Tamanho da célula (m)
X	399	25,0
Y	169	25,0
Z	89	0,5

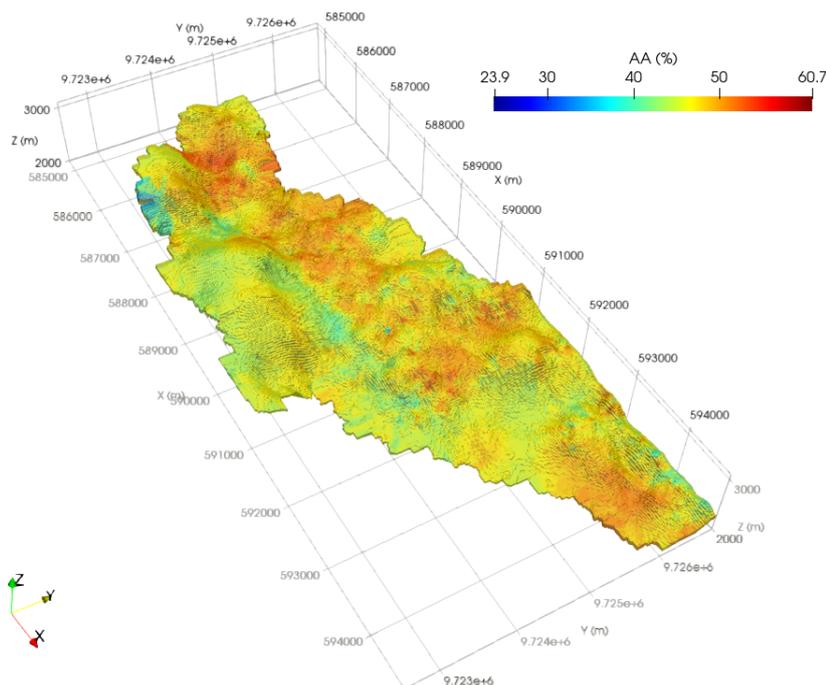
O primeiro passo para a estimativa de teores no *grid* regular Cartesiano consistiu na transformação das coordenadas cartesianas para estratigráficas. Como realizada na estimativa com o *grid* não-estruturado, o Z do topo do horizonte mineralizado foi considerado como referência para a transformação das coordenadas.

Foram utilizados os mesmos variogramas apresentados na figura 3.7, onde a equação 3.1 descreve os variogramas. A estimativa dos teores foi realizada por krigagem ordinária, utilizando os parâmetros de busca apresentados na tabela 3.3. Após a krigagem, o modelo de teores foi re-transformado para coordenadas cartesianas. A figura 3.9 demonstra o modelo de blocos estimado em vista isométrica.

Tabela 3.3 – Parâmetros utilizados na krigagem ordinária em *grid* regular Cartesiano

Parâmetros de Busca	
Discretização do Bloco (X-Y-Z)	5 - 5 - 1
Núm. Min. Amostras	4
Núm. Setores Horizontais Angulares	6
Núm. Ótimo Amostras por Setor	3
Alcance Elipsóide de Busca	500 - 500 - 5
Ângulos do Elipsóide de Busca	0 - 0 - 0

Figura 3.9 – Vista isométrica do modelo de teores estimados no *grid* regular Cartesiano. Exagero vertical de 25:1.



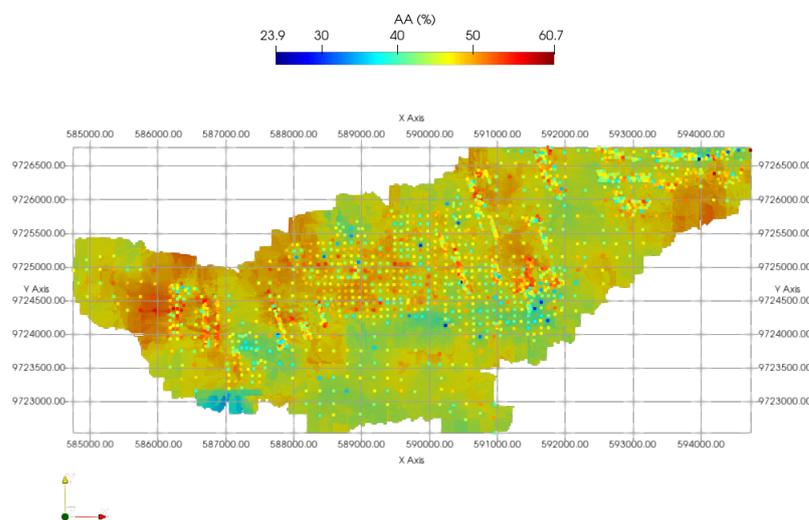
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Validação das Estimativas de Teores

Os modelos estimados dos teores utilizando ambos os *grids* não-estruturado e regular Cartesiano foram validados por inspeção visual, análise de deriva (*swath plot*) e validação cruzada.

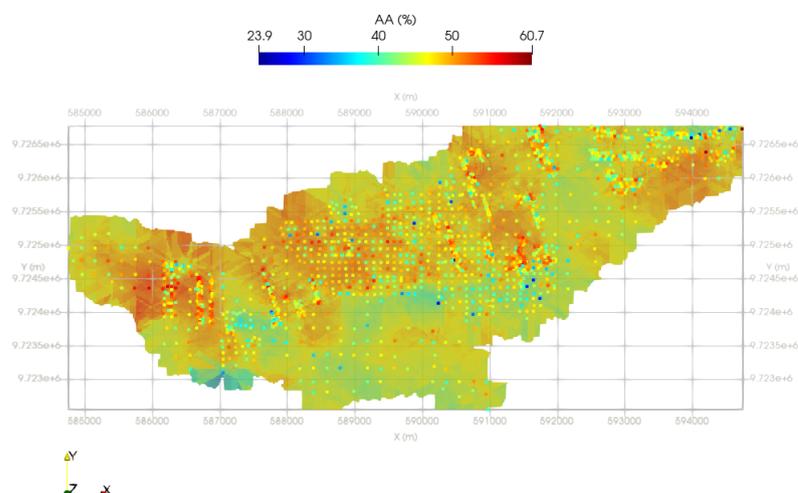
A inspeção visual na estimativa utilizando um *grid* não-estruturado, demonstrada na figura 3.10, apresenta as amostras sobre o modelo estimado. Observam-se locais com amostras de alto valores com alto valores estimados. O modelo estimado dos teores pela abordagem tradicional, *grid* regular Cartesiano, na inspeção visual (Fig. 3.11) observam-se também locais de alto valores estimados com amostras de altos valores.

Figura 3.10 – Inspeção visual do modelo de teores estimados no *grid* não-estruturado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.11 – Inspeção visual do modelo de teores estimados no *grid* regular Cartesiano.

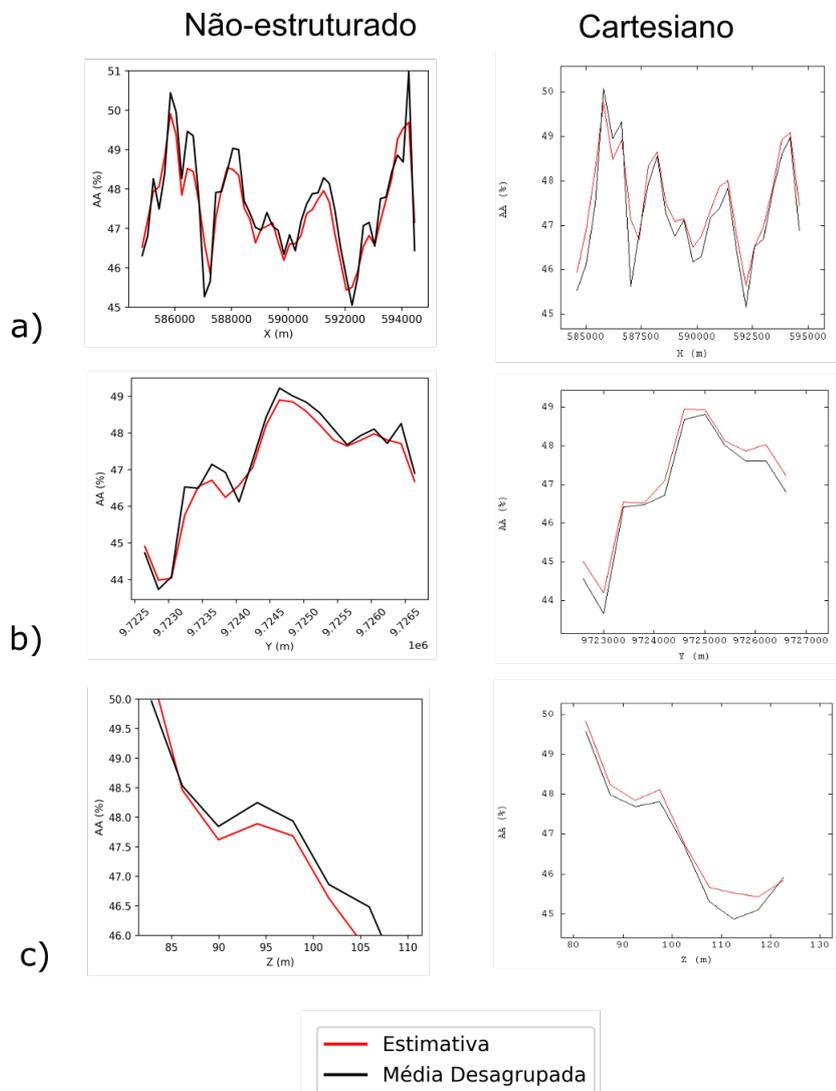


Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise de deriva consiste na definição de uma série de faixas ao longo das direções X, Y e Z. A média dos teores estimados e a média dos dados desagrupados são comparadas dentro de cada faixa. Os dados foram desagrupados pelo método dos vizinhos mais próximos para a análise de deriva.

A figura 3.12 demonstra as análises de derivas nos eixos X, Y e Z para as estimativas em um *grid* não-estruturado e um regular Cartesiano. Ao compararmos as duas análises são observadas médias estimadas compatíveis com as médias desagrupada nas duas estimativas. Na direção Z, são observadas diferenças entre determinadas faixas, onde no *grid* não-estruturado têm-se uma pequena subestimativa e no regular Cartesiano uma superestimativa.

Figura 3.12 – Análise de deriva na direção X (a); Análise de deriva na direção Y (b) e Análise de deriva na direção Z nos *grids* (c).



Fonte: Elaborada pelo autor.

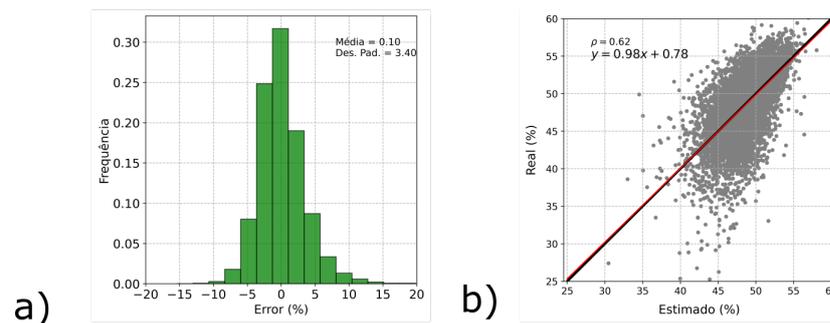
A validação cruzada permite a comparação entre os valores estimados e reais a partir do banco de dados. Ela consiste na retirada de uma amostra em uma determinada

localização. Com isso, um novo valor nesta localização é estimado utilizando as demais amostras. Ela também é uma ferramenta que pode auxiliar a escolha do modelo de variograma e estratégia de krigagem (OZ; DEUTSCH, 2000).

Os mesmos parâmetros empregados na estimativa do modelo foram usados na validação cruzada. O erro estimado é calculado pela subtração dos valores estimados e valores reais. Os valores estimados e reais foram plotados em um diagrama de dispersão (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; GOOVAERTS, 1997).

A figura 3.13 apresenta o histograma do erro estimado juntamente com o diagrama de dispersão entre os valores estimados e reais. O erro estimado apresentou uma média próxima de zero, indicando que as estimativas globais são não-enviesadas. Os valores estimados e reais apresentaram uma boa correlação, no valor de 0,62. A reta da regressão linear no diagrama de dispersão apresentou uma inclinação no valor de 0,98, próximo a um, demonstrando uma estimativa com pequeno viés condicional.

Figura 3.13 – Histograma do erro estimado no *grid* não-estruturado (a); Diagrama de dispersão dos valores reais e estimados (b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

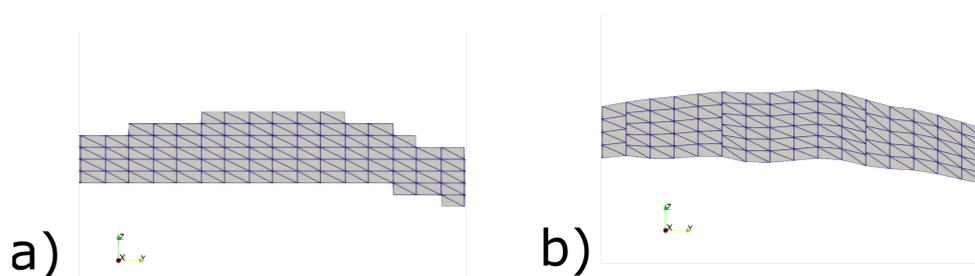
4 Comparativo entre o *grid* não-estruturado e *grid* regular Cartesiano

Neste capítulo, será realizado o comparativo entre o *grid* não-estruturado em relação ao *grid* regular Cartesiano criados no capítulo anterior, sendo quantificada as diferenças entre os *grids*. Um comparativo de característica semelhante foi realizado por Bassani, Araújo e Costa (2019), porém comparados somente visualmente em uma seção vertical.

4.1 Comparativo dos volumes entre o *grid* não-estruturado e *grid* regular Cartesiano

Ao compararmos visualmente o *grid* não-estruturado em relação ao *grid* regular Cartesiano, é observado que o *grid* não-estruturado reproduz melhor as feições curvilineares do depósito. A figura 4.1 apresenta o comparativo de uma seção transversal dos *grids* regular Cartesiano e não-estruturado, respectivamente.

Figura 4.1 – Seção transversal do *grid* regular Cartesiano (a) e seção transversal do *grid* não-estruturado (b).



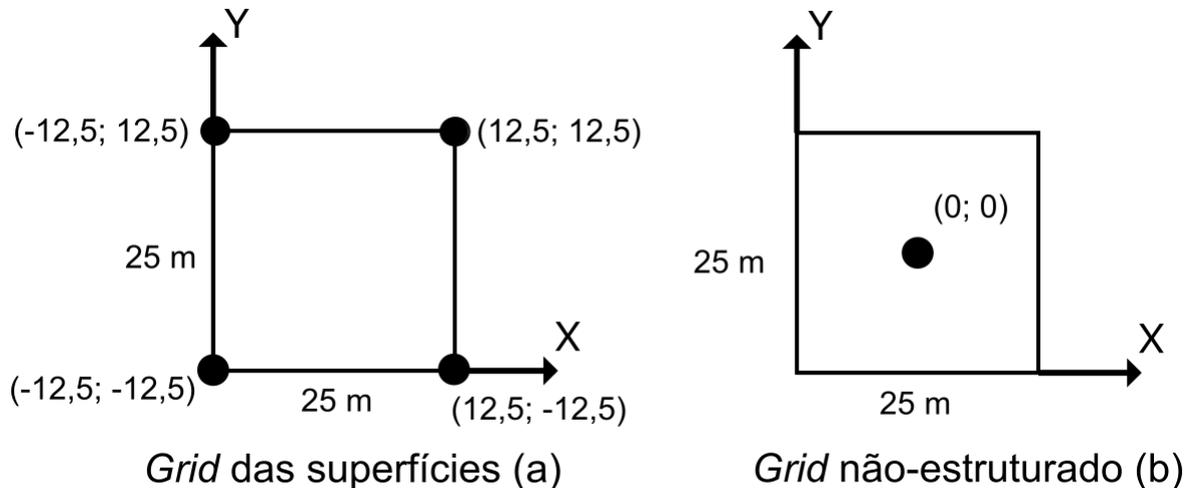
Fonte: Adaptado de Bassani, Araújo e Costa (2019)

A fim de comparar os volumes entre o *grid* não-estruturado e *grid* regular Cartesiano, as superfícies de topo e base do horizonte mineralizado foram utilizadas como referência para o comparativo. Estas superfícies consistem de um *grid* 2D que contém as coordenadas Z estimadas do topo e base do horizonte mineralizado. A geometria destes *grids* correspondem a geometria das arestas dos hexaedros utilizados no *grid* não-estruturado.

Por exemplo, considere um hexaedro do *grid* não-estruturado com 25 m de tamanho ao longo das direções X e Y, e com um centroide localizado a partir da origem - ponto (0;0). As quatro arestas que definem este bloco estão localizadas nos seguintes pontos: (-12,5; -12,5), (-12,5; 12,5), (12,5; -12,5) e (12,5; 12,5). A figura 4.2 exemplifica como o

grid da superfície contém estes quatro pontos, enquanto o *grid* não-estruturado contém o centroide do hexaedro.

Figura 4.2 – Exemplo dos pontos das arestas do *grid* da superfície (a) e centroide do hexaedro do *grid* não-estruturado (b).



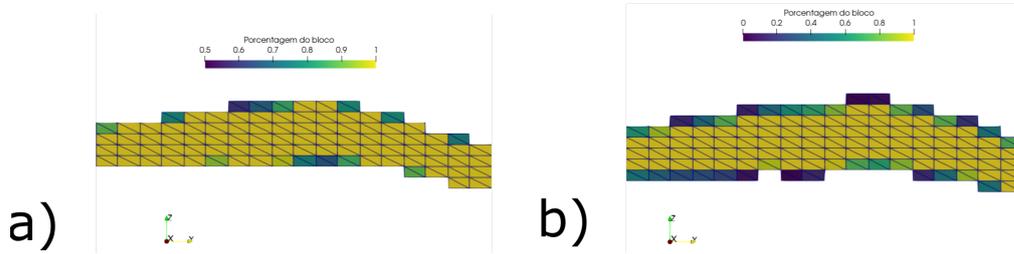
Fonte: Elaborado pelo autor.

A espessura média dos hexaedros foram calculadas como a média aritmética das espessuras das quatro arestas. O volume entre as superfícies foi calculado pela multiplicação da espessura média dos hexaedros por suas respectivas áreas do *grid* 2D, no qual é $25 \times 25 \text{ m}^2$ (a geometria das faces dos hexaedros do topo e base do horizonte mineralizado é um quadrado com 25 metros de comprimento ao longo das direções X e Y).

O *grid* regular Cartesiano foi construído utilizando blocos de $25 \times 25 \times 0,5 \text{ m}$. Duas abordagens foram adotadas para o cálculo. Uma, os blocos foram considerados dentro do sólido geológico se seus respectivos centroides estivessem entre o topo e a base da superfície Z. O volume do *grid* regular Cartesiano é obtido através da soma de todos os blocos dentro do horizonte mineralizado. Se o centroide do bloco estiver dentro do horizonte mineralizado, o volume completo do bloco será considerado. Este método é uma aproximação, porém é simples e rápido.

Outra abordagem considera a porcentagem do bloco entre as superfícies de topo e base do horizonte mineralizado, sendo realizada no software *Isatis*, ou em qualquer software de planejamento. Essa porcentagem é calculada através da sub-blocagem do bloco. A proporção do sub-bloco entre as superfícies é definida por um valor limite, se esse valor é maior que a porcentagem escolhida, o bloco é considerado entre as superfícies. Foram avaliados dois valores de porcentagem do bloco entre as superfícies, 50% (valor do centroide do bloco) e 1%. O volume do bloco considera sua porcentagem multiplicada pelo volume completo. A figura 4.3 apresenta uma seção transversal da abordagem considerando as porcentagens dos blocos entre as superfícies de topo e base do horizonte mineralizado.

Figura 4.3 – Seção transversal do *grid* regular Cartesiano com a porcentagem dos blocos entre as superfícies até 50% (a) e seção transversal do *grid* regular Cartesiano com a porcentagem dos blocos entre as superfícies até 1% (b).



Fonte: Elaborado pelo Autor

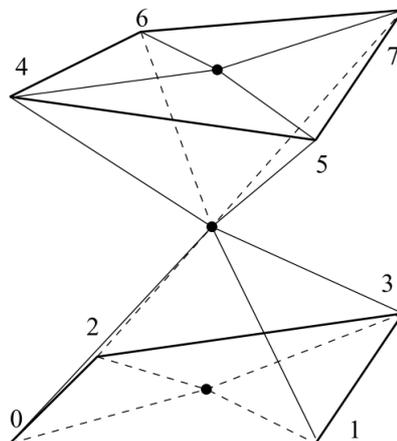
O volume do *grid* não-estruturado é obtido através do método das pirâmides apresentado por Grandy (1997). Este método é realizado através de três passos:

- i Divide-se o hexaedro em seis pirâmides (octaedros);
- ii Calcula-se o volume de cada pirâmide de acordo com a equação 4.1
- iii Soma-se o volume de cada pirâmide.

$$v_{oct} = 1/12[\vec{x}_c - \vec{x}_b, \vec{x}_0 - \vec{x}_1, \vec{x}_2 - \vec{x}_3, \vec{x}_0 + \vec{x}_1 - \vec{x}_2 - \vec{x}_3] \quad (4.1)$$

onde x_c é o ponto central do hexaedro, x_b é o baricentro localizado na face do hexaedro, e x_0, x_1, x_2 e x_3 são os nós ao redor da face do hexaedro. A notação $[\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}]$ refere-se ao produto triplo desses vetores. A figura 4.4 demonstra como uma célula de hexaedro é dividida em pirâmides.

Figura 4.4 – Duas de seis pirâmides utilizadas na decomposição de uma célula de hexaedro.



Fonte: Adaptado de (GRANDY, 1997)

Ambos os volumes, do *grid* não-estruturado e *grid* regular Cartesiano, foram comparados com o volume entre as superfícies do topo e base (referência). A tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos para os volumes calculados. Em geral, o volume do *grid* não-estruturado e *grid* regular Cartesiano são bastante similares ao volume referência. O *grid* não-estruturado apresenta uma perda relativa no volume comparado ao da referência. Uma das razões pode estar associada ao método do cálculo de volume de cada hexaedro.

Considerando a primeira abordagem, o *grid* regular Cartesiano ganhou um pequeno volume em comparação a referência, devido principalmente o fato de alguns blocos possuírem seus centroides dentro do sólido geológico, porém algumas de suas partes possam estar fora do limite do sólido geológico das superfícies, adicionando um volume irrealístico de minério.

Ao considerar as porcentagens dos blocos observou-se uma diferença de 6% quando a porcentagem mínima do bloco é igual a 50 % (valor igual ao centroide do bloco). Esse valor evidenciaria o volume irrealístico encontrado na primeira abordagem. Na porcentagem mínima de 1% do bloco, o volume total apresentou-se próximo da referência, devido ao fato de serem considerados blocos com pequenos volumes, buscando se aproximar as superfícies do horizonte mineralizado.

Tabela 4.1 – Comparativo dos volumes entre os *grids*

Volume da superfície (Referência)	52 124 244 m³
Volume do grid Não-estruturado	52 122 209 m ³
Diferença absoluta	-2034,70
Diferença relativa	-0,0039 %
Volume do grid regular Cartesiano - Centroides	52 124 688 m ³
Diferença absoluta	443,5625
Diferença relativa	0,00085 %
Volume do grid regular Cartesiano - Porcentagem igual a 50%	49 057 784 m ³
Diferença absoluta	-3066459,5575
Diferença relativa	-5,88298 %
Volume do grid regular Cartesiano - Porcentagem igual a 1%	52 123 056 m ³
Diferença absoluta	-1188,2475
Diferença relativa	-0,00228 %

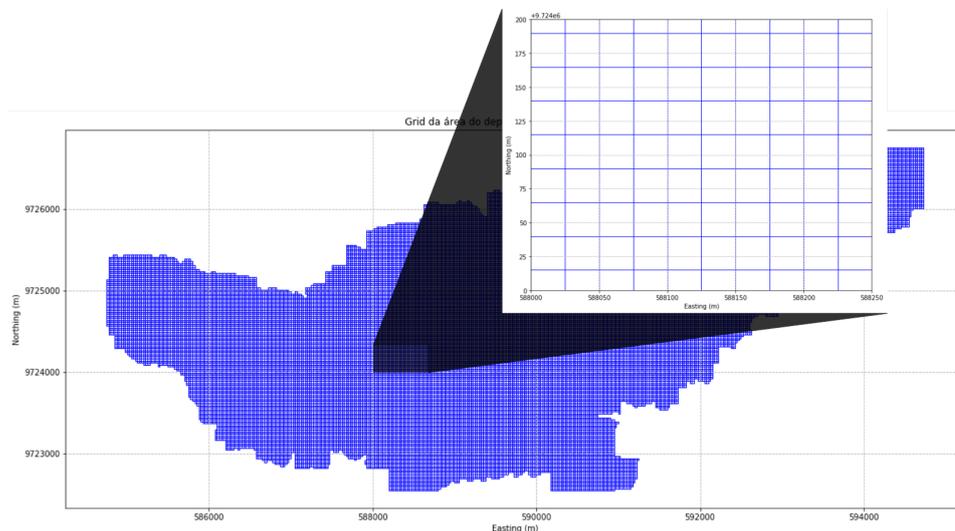
4.2 Comparativo das espessuras entre o *grid* não-estruturado e *grid* regular Cartesiano

Para o comparativo da espessura, um *grid* 2D foi usado para as superfícies. O *grid* divide a área do depósito em células de 25 X 25 m² no plano horizontal, como exemplificado na figura 4.5 em uma porção do depósito. Este *grid* corresponde a geometria dos centroides do *grid* regular Cartesiano e *grid* não-estruturado. Cada centroide é cercado por quatro

arestas. No caso do *grid* regular Cartesiano, as quatro arestas possuem mesma espessura. No caso das superfícies e do *grid* não-estruturado, suas quatro arestas possuem diferentes espessuras. O comparativo envolveu comparar a espessura obtida pelas superfícies, *grids* não-estruturado e regular Cartesiano para todas as células de $25 \times 25 \text{ m}^2$. Para cada célula de $25 \times 25 \text{ m}^2$, foi:

- i Calculada a média da espessura entre o topo e base das superfícies;
- ii Calculada a média da espessura do *grid* regular Cartesiano
- iii Calculada a média da espessura do *grid* não-estruturado.

Figura 4.5 – Área ampliada do *grid* 2D do depósito no plano horizontal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A média de espessura é a média das espessuras das quatro arestas ao redor do centroide do bloco. A tabela 4.2 compara o sumário estatístico das espessuras. A média de espessura de ambos *grids* não-estruturado e Cartesiano é a mesma média de espessura entre as superfícies. O resultado mostra que ambos *grids* são globalmente não-enviesados em termos de espessura. Entretanto, observando atentamente, a espessura do *grid* não-estruturado combina melhor com a espessura das superfícies. Isto é esperado, pelo fato das células do *grid* não-estruturado serem construídas para se encaixar de forma ótima nas superfícies do horizonte mineralizados.

Tabela 4.2 – Estatística global do comparativo entre as espessuras dos *grids*

	Superfície (m)	Cartesiano (m)	Não-estruturado (m)
Num. Amostras	39352	39352	39352
Média	2,12	2,12	2,12
Desvio Padrão	0,67	0,70	0,67
Minímo	0,67	0,50	0,67
25 %	1,65	1,50	1,65
50 %	2,13	2,00	2,13
75 %	2,56	2,50	2,56
Máximo	4,23	4,50	4,23

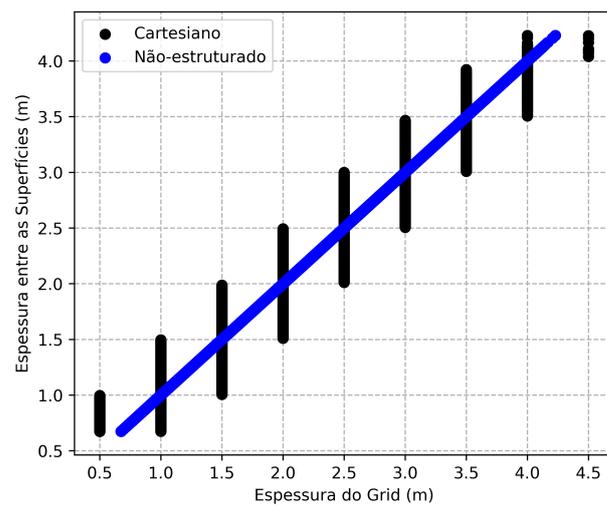
As espessuras de ambos os *grids*, não-estruturado e regular Cartesiano, foram subtraídas pela espessura entre as duas superfícies (topo e base do horizonte mineralizado). Esta diferença representa o erro da espessura. A tabela 4.3 demonstra o sumário estatístico do erro das espessuras. O *grid* não-estruturado superou o *grid* regular Cartesiano. No caso do *grid* regular Cartesiano, o erro máximo é de 0,49 m, enquanto o erro máximo para o *grid* não-estruturado é menor que 1 centímetro.

Tabela 4.3 – Estatística da espessura do *grid* menos a espessura da superfície

	Cartesiano (m)	Não-estruturado (m)
Num. Amostras	39352	39352
Média	0	0
Desvio Padrão	0,2023	0
Minímo	-0,4989	-0,0001
25 %	-0,1411	0
50 %	0,0038	0
75 %	0,1418	0
Máximo	0,4949	0,0001

A figura 4.6 apresenta o gráfico de dispersão entre as espessuras obtidas pelas superfícies e os *grids* (regular Cartesiano e não-estruturado). Os resultados demonstram, claramente, que o *grid* não-estruturado corresponde melhor com as superfícies do horizonte mineralizado. No caso do *grid* Cartesiano, a espessura do *grid* apresenta uma diferença entre a espessura de referência em até 0,5 metros. Essa diferença pode ser observada no diagrama de dispersão: a espessura entre as superfícies no valor de 1,0 m e o *grid* Cartesiano pode apresentar uma espessura entre 0,5 e 1,5 metros. Em contraponto, a espessura do não-estruturado é aproximadamente a mesma espessura entre as superfícies, como os pontos seguem uma reta $y = x$.

Figura 4.6 – Gráfico de dispersão da espessura do *grid* contra a espessura entre a superfície de topo e base.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 Planejamento de curto prazo com *grid* não-estruturado e *grid* regular Cartesiano

Neste capítulo, será realizado o planejamento de lavra de curto prazo com *grid* não-estruturado e regular Cartesiano. Inicialmente, é demonstrado o desenvolvimento de uma rotina para a seleção dos blocos dentro das linhas de escavação, pois a maioria dos softwares de planejamento necessita de uma adaptação para o uso de um modelo de blocos em *grid* não-estruturado. Posteriormente, serão apresentados estudos de casos do planejamento de curto prazo utilizando *grids* não-estruturado e regular Cartesiano, e um comparativo entre os resultados obtidos no planejamento.

5.1 Desenvolvimento de um software para o planejamento de lavra à curto prazo

O desenvolvimento de um software para o planejamento de lavra utilizando *grid* não-estruturado foi escrito em *Python 3.7* usando as bibliotecas contidas no pacote *Anaconda*. *Geopandas* foi a principal biblioteca utilizada para as operações de seleção dos blocos dentro das linhas de escavação. Para a visualização do modelo de blocos e linhas de escavação, a biblioteca *matplotlib.pyplot* foi usada. Demais bibliotecas foram utilizadas para a importação e conversão de arquivos do formato *GEO-EAS* (formato *GSLib*) para um *data frame*. A figura 5.1 apresenta as bibliotecas aplicadas e a figura 5.2 demonstra como o *grid* e o modelo estimado de teores são importados e convertidos.

Figura 5.1 – Bibliotecas *Python* utilizadas no software.

```

1 #Short-Term Mine Planning with Unstructured Grid
2
3 import geopandas as gpd
4 import pandas as pd
5 import numpy as np
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 import Python_Module.Extract_Column_from_gslib as io
8

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.2 – Conversão dos arquivos do *grid* não-estruturado e modelo de teores estimados.

```

9  if __name__ == '__main__':
10
11     # importing grids
12     data_grid = '4-Ir_Grids/grid_points.out'
13
14     grid_df = io.Get_Df_From_File(data_grid)
15     print(grid_df.columns)
16
17     data_est = '7-Estimates/kt3d.out'
18
19     est_df = io.Get_Df_From_File(data_est)
20     print(est_df.columns)
21

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, uma função foi aplicada para a criação dos polígonos do modelo de blocos. Os primeiros quatro valores são selecionados para cada coordenada do vértice do bloco. Esta seleção retorna uma lista de coordenadas dos polígonos. A figura 5.3 demonstra como é realizada a criação dos polígonos.

Figura 5.3 – Função para criação dos polígonos do modelo de blocos.

```

22     #creating blocks
23     points = grid_df.apply(lambda row: [row.X, row.Y, row.Z], axis = 1) #Apply a
function along the axis of the UGrid DataFrame
24
25     p = np.array(points.values) # creating an array of the point values
26
27     coords = p.reshape((167011,8)) #reshaping the array into the same shape as
Estimate Dataframe
28
29     df_coords =pd.DataFrame(coords) #Creating a DataFrame with the coordinates
30
31
32     from shapely.geometry import Polygon #Importing Polygon class from Shapely to
create the estimated polygons
33
34
35     def create_polygon_list(df_blocks):
36         polygon_list = []
37         n_blocks = df_blocks.shape[0]
38         for i in range(n_blocks):
39             block = df_blocks.values[i,:]
40             first_four_points = block[:4]
41             polygon = Polygon(list(first_four_points))
42             polygon_list.append(polygon)
43         return polygon_list
44
45     polygon_list = create_polygon_list(df_coords)

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

A lista de polígonos é utilizada como a geometria para a criação de um *geodata frame* que contém as estimativas, variância de krigagem e volume de cada bloco. As linhas de escavação são carregadas no software. Elas possuem uma coluna determinando o seu respectivos mês e ano, juntamente a informação de sua geometria. A figura 5.4 apresenta a criação do *geodata frame* juntamente com a figura 5.5 é realizada a importação do arquivo das linhas de escavação.

Figura 5.4 – *Geodata frame* do modelo de blocos

```
47 ### Creating GDF Blocks
48
49 gdf = gpd.GeoDataFrame(est_df, geometry = polygon_list)
50 gdf = gdf.rename(columns = {'geometry' : 'Polygons'}).set_geometry('Polygons')
51 gdf.crs = {'init' : 'epsg:4326'}
52 print(gdf.columns)
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.5 – Importação das linhas de escavação

```
55 ##### Importing Dig Lines 2017 and 2018
56
57 BAUX_WASHED = gpd.read_file('Poligonos_UFRGS/2017_2018.shp')
58 BAUX_WASHED.crs = {'init' : 'epsg:4326'}
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o modelo de blocos e as linhas de escavação serem carregadas, uma junção espacial (*spatial join*) foi realizada. Na junção espacial, dois objetos geométricos são combinados de acordo com suas relações espaciais para um outro objeto. Neste caso, o modelo de blocos será unido com as linhas de escavação se o limite e interior dos blocos intersectam de qualquer maneira o limite e/ou interior das linhas de escavação. Assim, os blocos são selecionados e criado um novo *geodata frame* com os blocos dentro de cada linha de escavação. Na figura 5.6, têm-se a função aplicada para a junção espacial do modelo de blocos e linhas de escavação.

Figura 5.6 – Operação de seleção dos blocos de acordo com as linhas de escavação.

```
60 ### Selecting blocks inside the dig lines
61
62 ST_WASHED = gpd.sjoin(gdf, BAUX_WASHED, how="inner", op="intersects")
63 print(ST_WASHED.columns)
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os blocos selecionados, foi calculada a porcentagem de cada bloco dentro da linha de escavação. Primeiro, o algoritmo calculou a área fora e dentro da linha de escavação. A porcentagem de cada bloco dentro da linha de escavação é quantificada. A porcentagem do bloco dentro da linha de escavação é igual a área do bloco dentro da linha de escavação dividida pela área total do bloco. O volume é calculado pela porcentagem do bloco dentro da linha de escavação. O volume dentro da linha de escavação é o total do volume multiplicado pela porcentagem da área dentro da linha de escavação. A tonelagem é calculada utilizando um valor de densidade definido pelo usuário. A figura 5.7 apresenta como a porcentagem dos blocos é calculada.

Figura 5.7 – Cálculo dos blocos dentro das linhas de escavação.

```

65 ### Calculating Percentage of blocks inside the dig lines
66 a_out = ST_WASHED['Polygons'].difference(BAUX_WASHED.unary_union) #calculating
the area of the blocks outside the dig line
67
68 a_percent = (1- (a_out.area)/(ST_WASHED.area)) #calculating the percentage of
the area of the blocks inside of the dig lines
69
70 volume_percentage = ((a_percent)*(ST_WASHED.Volume)) #calculating the percentage
of the volume of the blocks
71
72 ST_WASHED['Percentage_Area'] = a_percent*100
73
74 ST_WASHED['Volume_Percentage'] = volume_percentage
75
76 ST_WASHED['Tonnes'] = volume_percentage*2.5
77
78 ST_WASHED.head()
79
80 print(ST_WASHED.columns)

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Um valor limite é selecionado pelo usuário e utilizado para informar o mínimo de porcentagem do bloco. Este mínimo de porcentagem filtra os blocos cuja porcentagem foi irrisória. Por exemplo, se 10% for a porcentagem mínima, os blocos cuja porcentagem dentro das linhas de escavação forem menor que 10% não serão considerados para o cálculo de teor médio e tonelagem sobre o volume das linhas de escavação. Na figura 5.8, demonstra-se como é realizada a seleção dos blocos de acordo com o valor mínimo informado pelo usuário. Um arquivo de saída é gerado com os blocos selecionados como ilustrado na figura 5.9.

Figura 5.8 – Definição do valor limite para seleção dos blocos de acordo com suas porcentagens.

```

83 ### Defining minimum percentage inside the dig lines
84
85 min_perc_inside = 25
86
87 ST_WASHED = ST_WASHED[ST_WASHED['Percentage_Area'] >= min_perc_inside ]
88
89 print(ST_WASHED.columns)

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.9 – Criação do arquivo de saída com os blocos selecionados.

```

92 ### Output CSV File
93
94
95 ST_WASHED.to_csv('10-Mine_Planning\ST_WASHED.csv', columns =
('Estimates', 'Volume_Percentage', 'Tonnes', 'YEAR'))

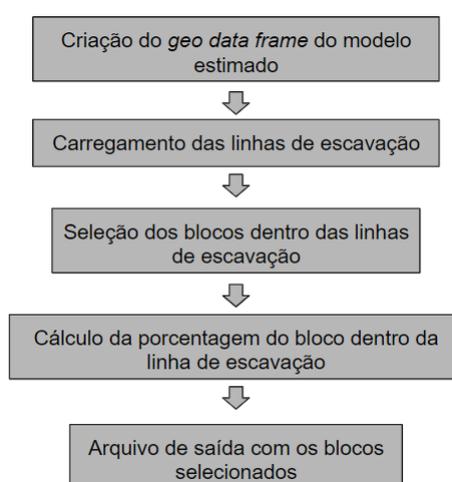
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Estudo de caso do planejamento de lavra de curto prazo

Foi proposto um estudo de caso para a realização do planejamento de lavra de curto prazo utilizando o software desenvolvido para os modelos de blocos estimados com *grid* não-estruturado e *grid* regular Cartesiano. O fluxo de trabalho implementado no software é apresentado na figura 5.10.

Figura 5.10 – Fluxo de trabalho implementado no software de planejamento de lavra de curto prazo.



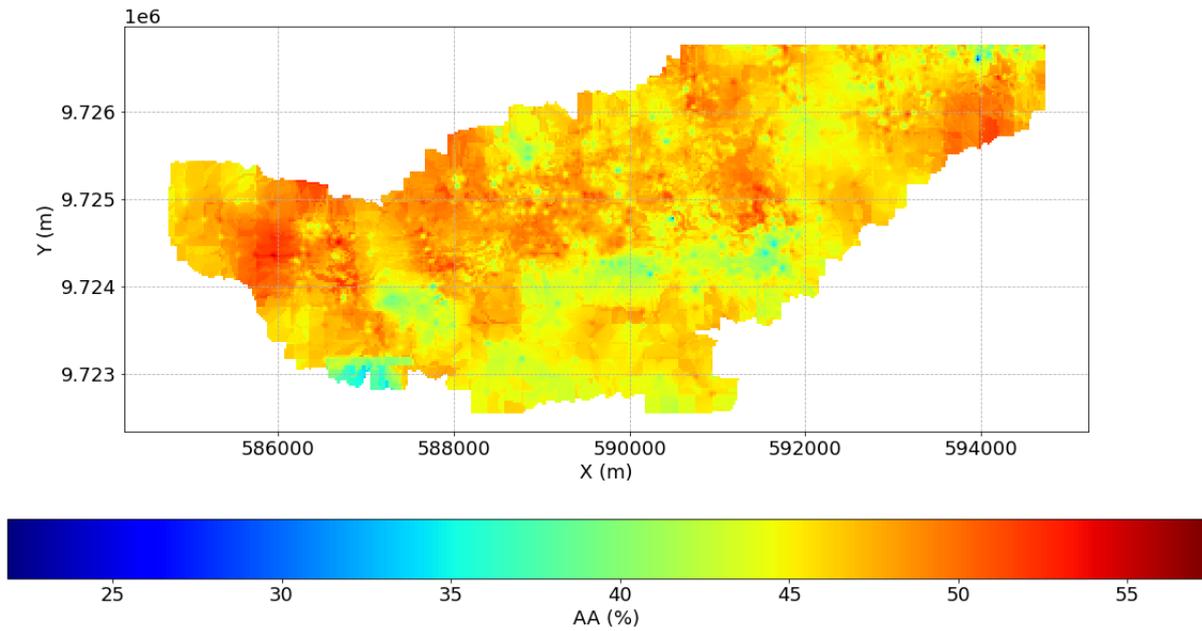
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1 Planejamento de lavra de curto prazo com *grid* não-estruturado

Seguindo o fluxo de trabalho apresentado, através do *data frame* da estimativa foi criado um *geo data frame* com os teores estimados, variância de krigagem, volume de cada bloco e suas geometrias. A figura 5.11 apresenta o mapa dos blocos estimados gerados.

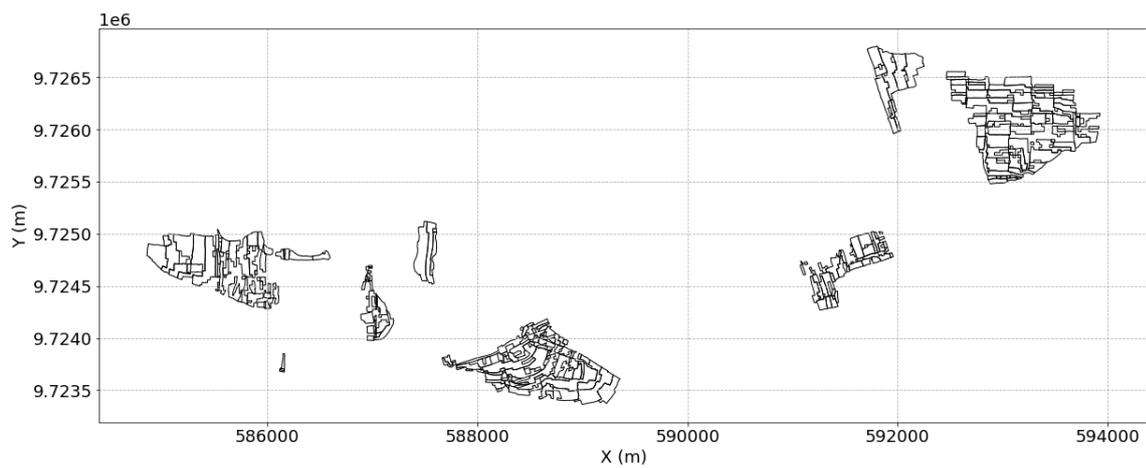
As linhas de escavação foram carregadas como demonstrada na figura 5.12. Cada linha de escavação recebeu um código indicado seu ano e mês, por exemplo, 2017/01 representa o polígono da linha de escavação de Janeiro de 2017. A figura 5.13 apresenta as linhas de escavação sobre o modelo de blocos estimado.

Figura 5.11 – Modelo de blocos estimados de alumina recuperável em vista de planta.



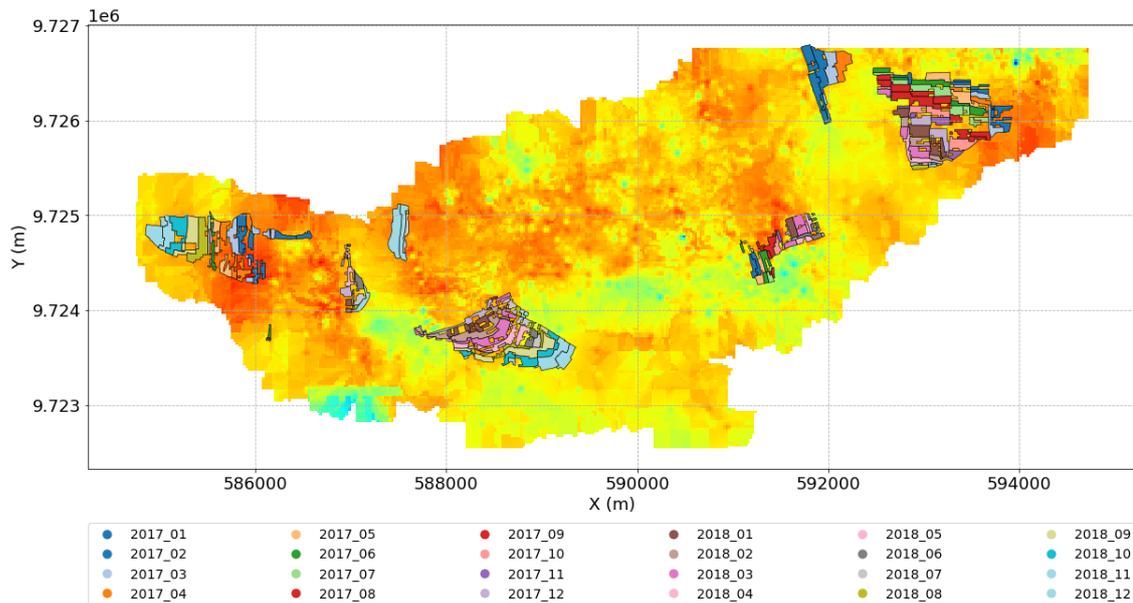
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.12 – Linhas de escavação de bauxita dos anos 2017 e 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

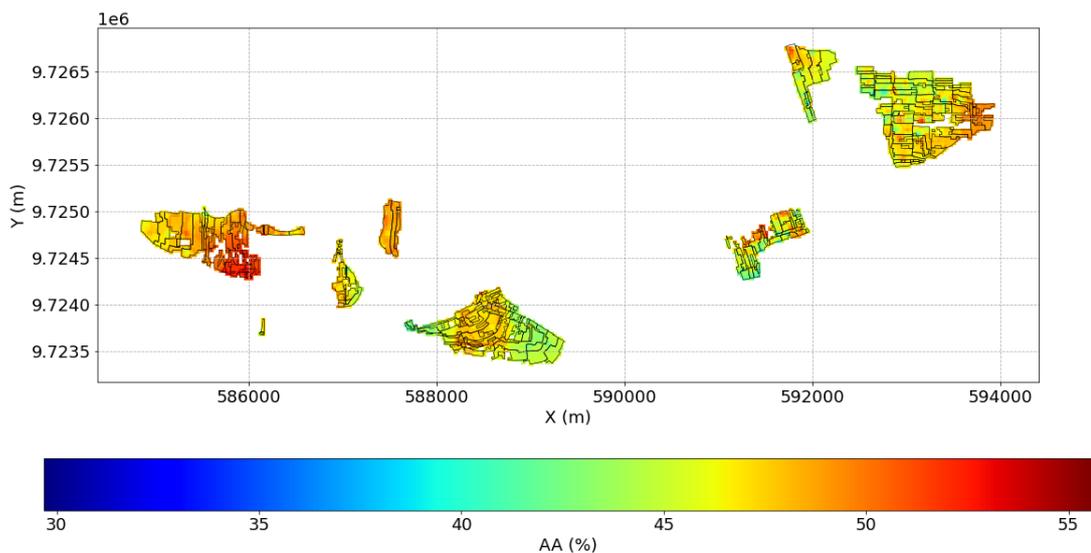
Figura 5.13 – Modelo de blocos estimados de alumina recuperável com as linhas de escavação de acordo com seus meses e anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

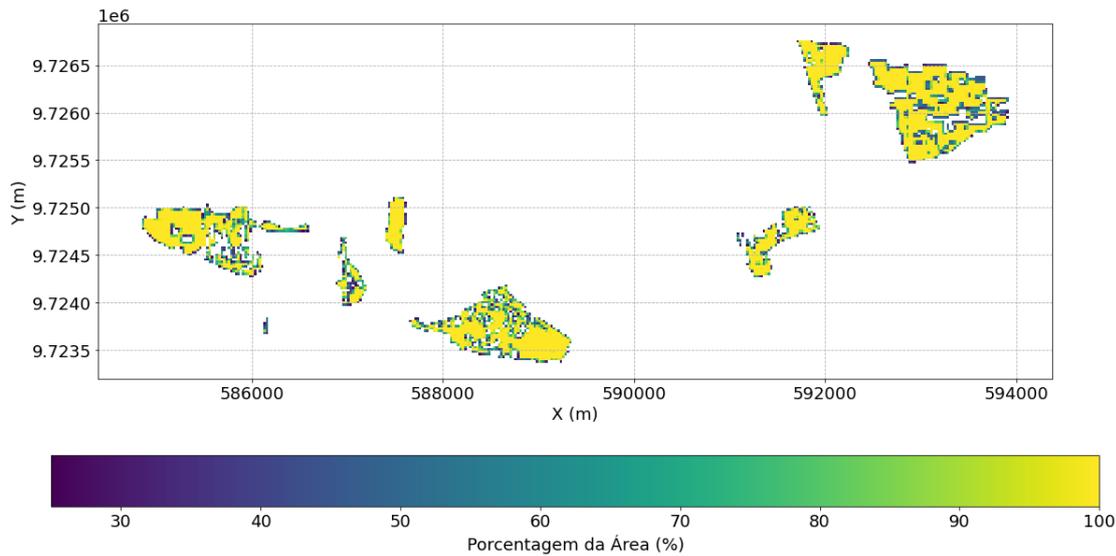
Os blocos são selecionados caso sejam intersectados pelas linhas de escavação. A figura 5.14 demonstra os blocos selecionados. A porcentagem da área dos blocos dentro das linhas de escavação foi calculada. Os blocos foram classificados como dentro da linha de escavação se estes possuírem ao menos 25% de sua área dentro da mesma. A porcentagem dos blocos dentro das linhas de escavação é apresentada na figura 5.15.

Figura 5.14 – Blocos selecionados de acordo com as linhas de escavação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

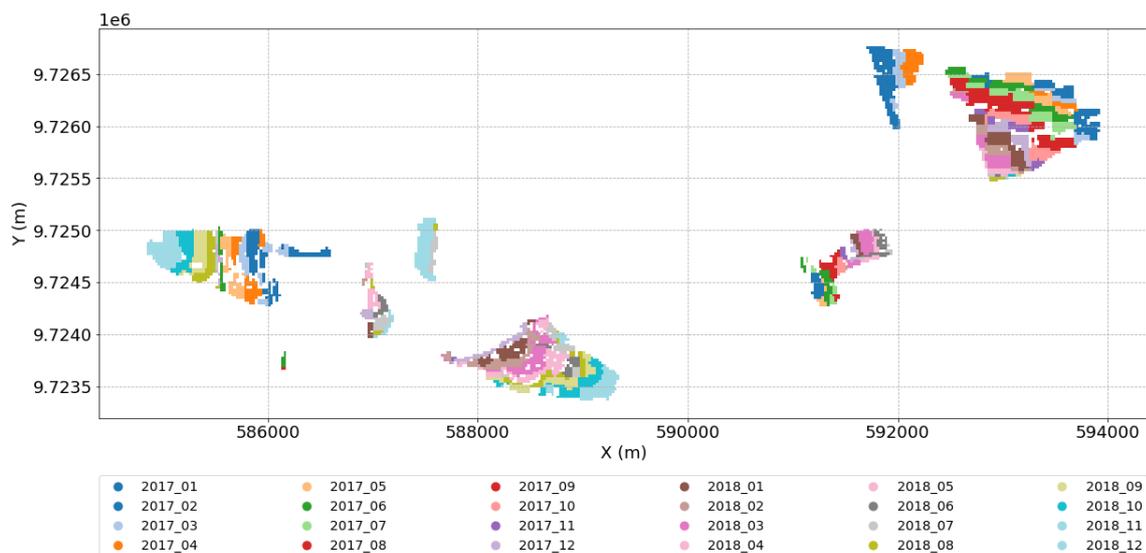
Figura 5.15 – Blocos selecionados de acordo com suas porcentagens dentro das linhas de escavação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada mês, foram calculados o teor médio de Alumina Recuperável (AA), o volume total e tonelagem. O volume foi calculado utilizando as porcentagens do bloco dentro da linha de escavação. O volume dentro da linha de escavação é o volume total multiplicado pela porcentagem da área dentro da linha de escavação. A tonelagem foi calculada utilizando um valor fixo de $2,5 \text{ t.m}^{-3}$. A figura 5.16 apresenta os blocos selecionados de acordo com seu correspondente código de ano e mês. Os resultados de teor médio, volume total e tonelagem para cada mês e ano são demonstrados na tabela 5.1.

Figura 5.16 – Blocos selecionados pelas porcentagens dentro das linhas de escavação filtrados por seus meses e anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5.1 – Resultados de teor médio, volume total e tonelagem no planejamento de curto prazo com *grid* não-estruturado.

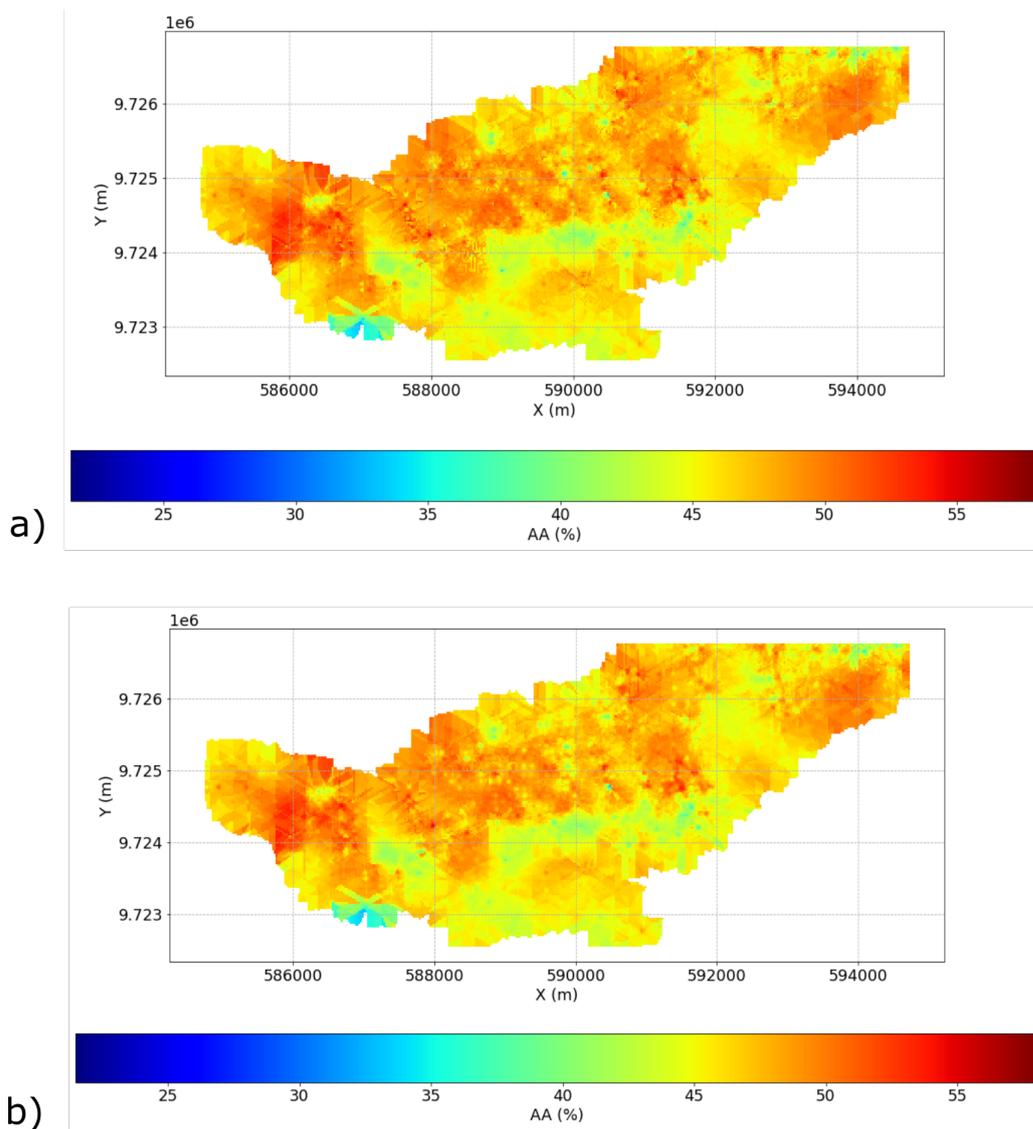
Mês e Ano	Teor médio de AA (%)	Volume Total (m^3)	Tonelagem (t)
jan/17	48,76	329260,52	823151,29
fev/17	48,96	405618,89	1014047,23
mar/17	49,31	350495,46	876238,64
abr/17	49,5	272790,23	681975,58
mai/17	48,27	288629,44	721573,61
jun/17	47,85	309280,9	773202,26
jul/17	47,31	252901,4	632253,5
ago/17	47,37	207764,53	519411,31
set/17	47,51	256403,3	641008,25
out/17	47,97	165858,38	414645,95
nov/17	48,21	87416,05	218540,14
dez/17	47,76	275715,23	689288,07
jan/18	47,58	401634,53	1004086,32
fev/18	46,8	351311,12	878277,81
mar/18	47,22	507155,58	1267888,95
abr/18	47,38	283677,52	709193,8
mai/18	47,36	238642,21	596605,53
jun/18	46,44	176448,81	441122,02
jul/18	47,04	289609,4	724023,5
ago/18	47,6	344555,01	861387,52
set/18	46,99	386895,34	967238,34
out/18	46,66	321729,97	804324,93
nov/18	47,34	391368,05	978420,12
dez/18	48,04	371559,21	928898,02
Média	47,72	302780,05	756950,11

5.2.2 Planejamento de curto prazo com *grid* regular Cartesiano

O planejamento de curto prazo utilizando o modelo de teores estimados em um *grid* regular Cartesiano foi realizado no software desenvolvido. Duas abordagens foram utilizadas. Uma, os blocos foram considerados dentro do sólido geológico se seus respectivos centroides estiverem entre o topo e a base do horizonte mineralizado, sendo intitulada como "Centroide". A abordagem "Porcentagem" foram realizada no software *Isatis*, onde foram calculadas as porcentagens dos blocos entre as superfícies de topo e base, sendo considerados blocos com um valor mínimo de 1% dentro do horizonte mineralizado.

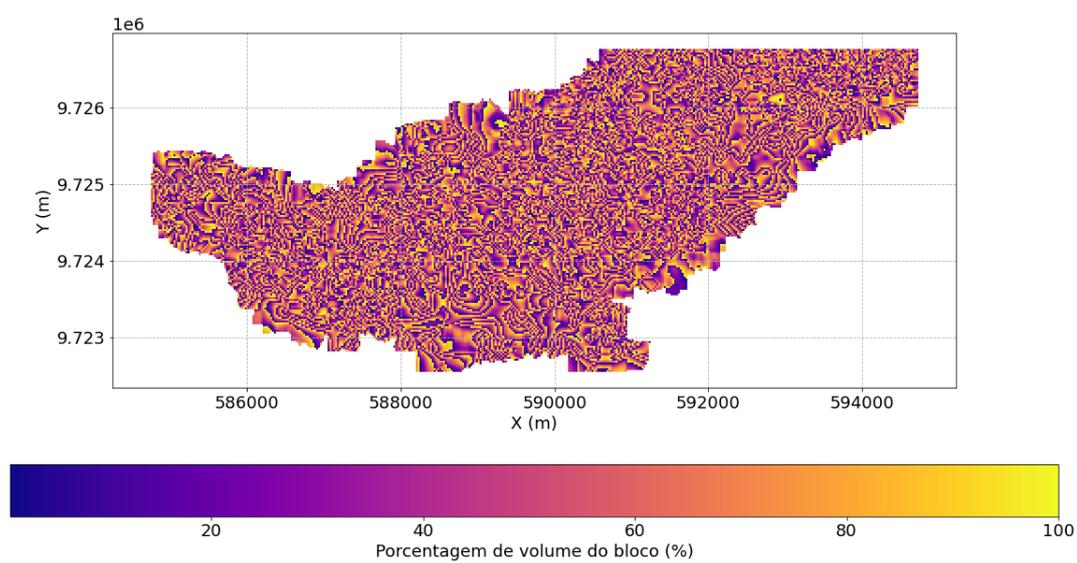
A partir das coordenadas dos blocos foram gerados polígonos representando sua geometria. Assim, sendo criado o *geo data frame* com os teores estimados e volume dos blocos. A figura 5.17 apresenta os mapas dos modelos de blocos do *grid* regular Cartesiano nas abordagens propostas. A figura 5.18 apresenta as porcentagens do bloco dentro do horizonte mineralizado.

Figura 5.17 – Modelo de blocos estimados de alumina recuperável em vista de planta na abordagem "Centroide"(a); Modelo de blocos estimados de alumina recuperável em vista de planta na abordagem "Porcentagem"(b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

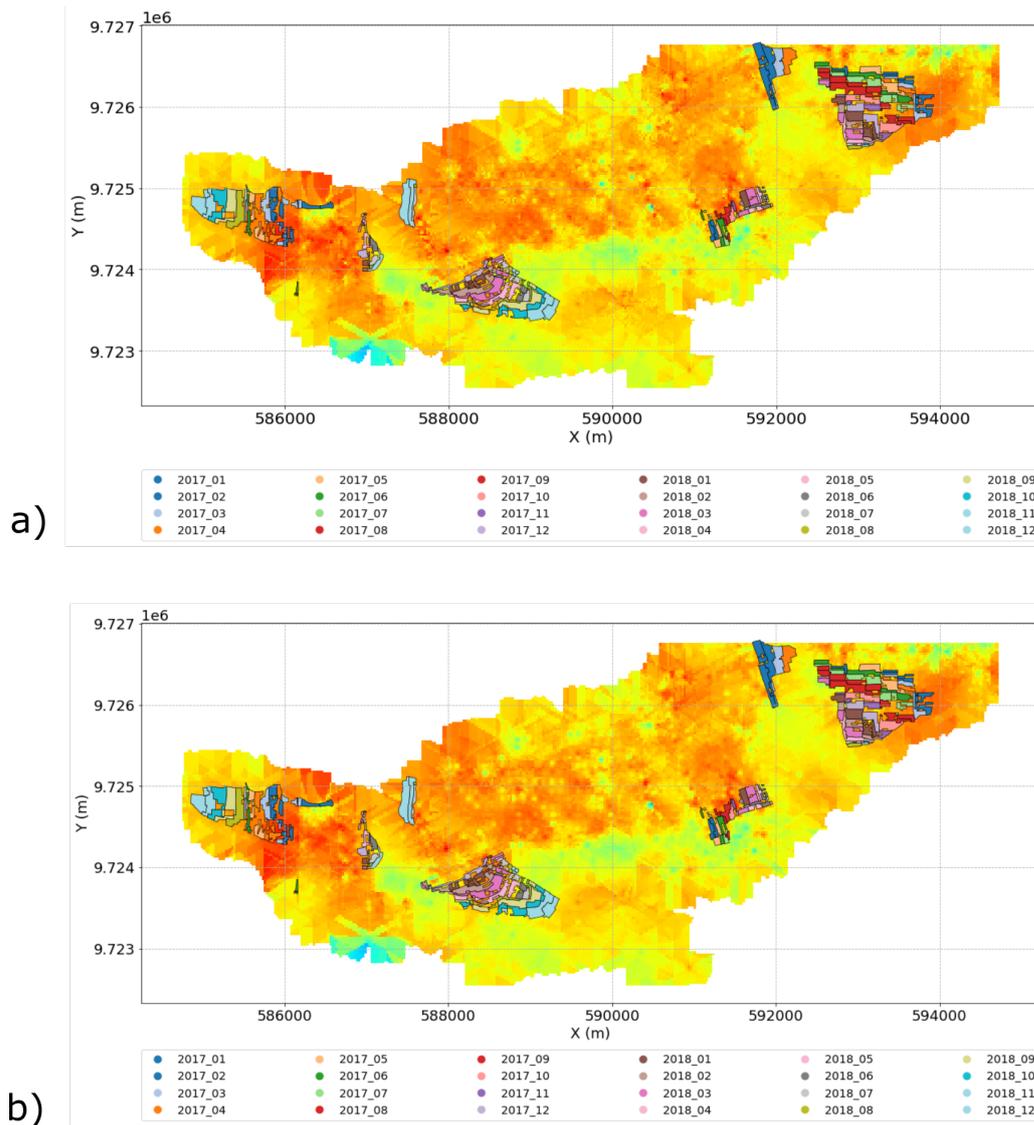
Figura 5.18 – Percentagens dos blocos do *grid* regular Cartesiano dentro do horizonte mineralizado (Vista de topo).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram utilizadas as linhas de escavação demonstradas na figura 5.12, com seu respectivo código indicando ano e mês. A figura 5.19 apresenta as linhas de escavação sobrepostas aos modelos de blocos do *grid* regular Cartesiano.

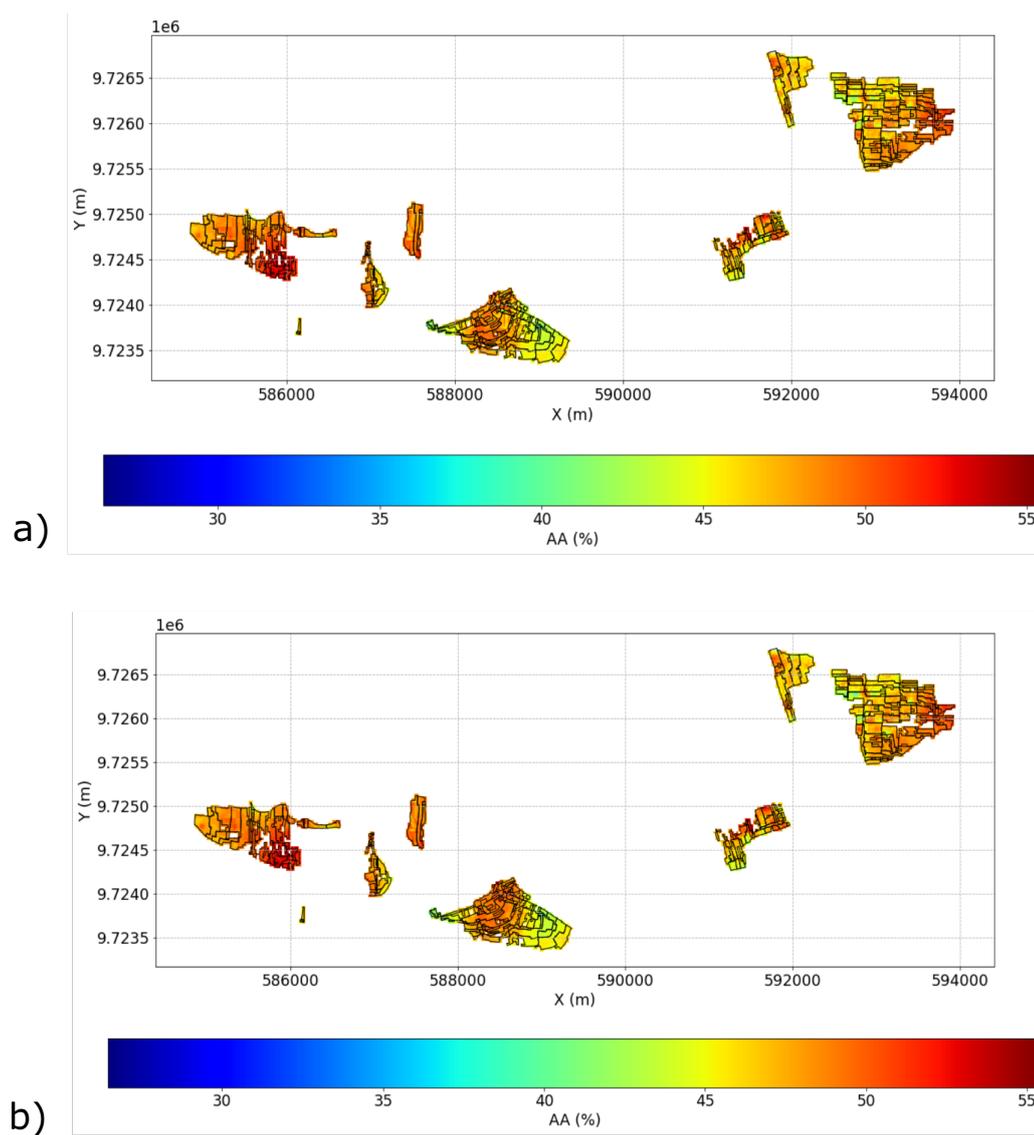
Figura 5.19 – Modelo de blocos estimados de alumina recuperável com as linhas de escavação de acordo com seus meses e anos "Centroide"(a); Modelo de blocos estimados de alumina recuperável com as linhas de escavação de acordo com seus meses e anos "Porcentagem"(b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

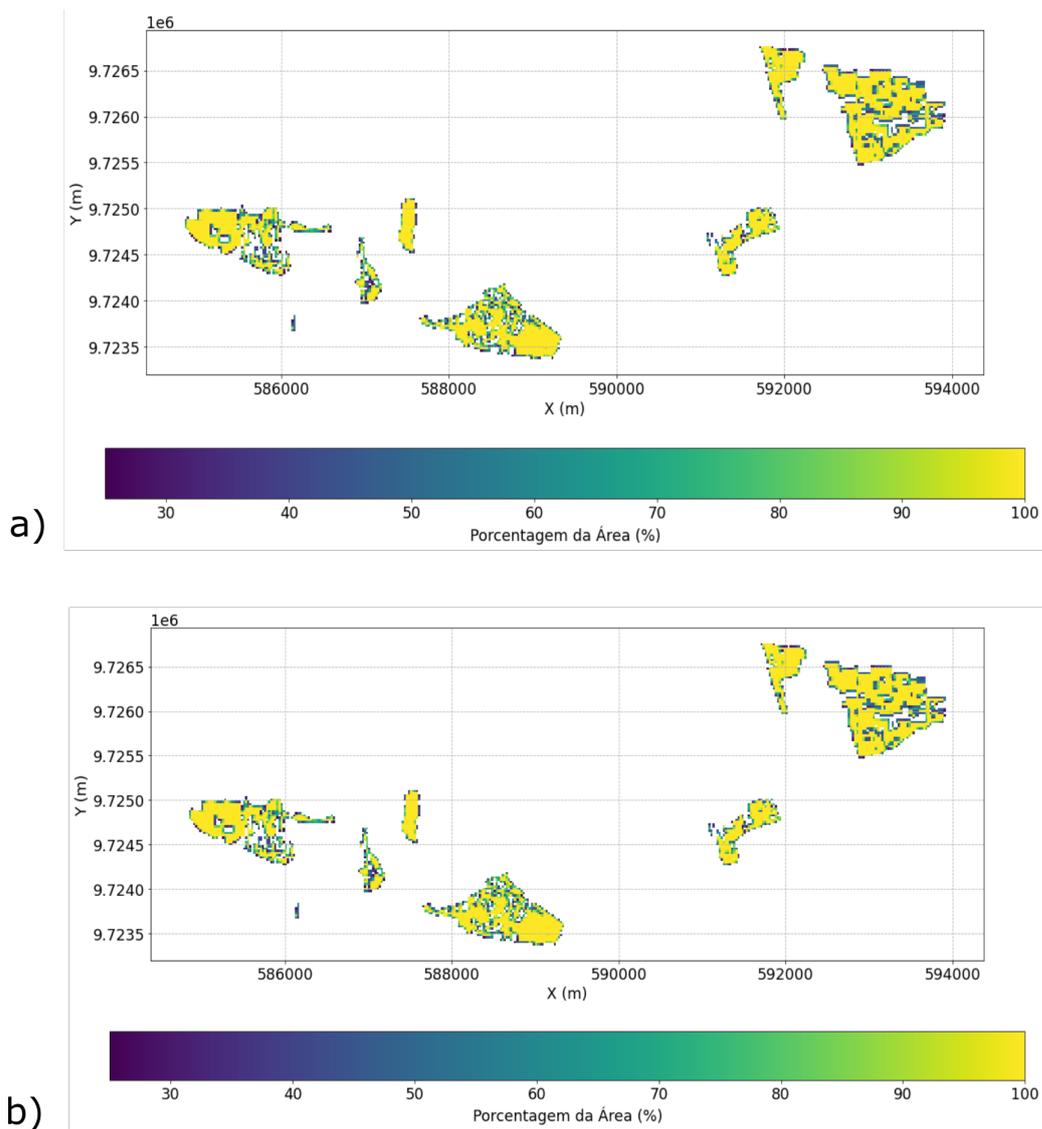
A seleção dos blocos foi realizada a partir da intersecção dos blocos no modelo com as linhas de escavação, onde na figura 5.20 são apresentados os blocos selecionados. Uma classificação dos blocos dentro das linhas de escavação foi realizada através do cálculo da porcentagem da área dos blocos dentro das linhas de escavação. O valor mínimo selecionado foi de 25% da porcentagem da área do bloco. A figura 5.21 apresenta a porcentagem dos blocos dentro das linhas de escavação.

Figura 5.20 – Blocos selecionados pelas linhas de escavação no modelo "Centroide"(a); Blocos selecionados pelas linhas de escavação no modelo "Porcentagem"(b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.21 – Blocos selecionados de acordo com suas porcentagens dentro das linhas de escavação no modelo "Centroide"(a); Blocos selecionados de acordo com suas porcentagens dentro das linhas de escavação no modelo "Porcentagem"(b).

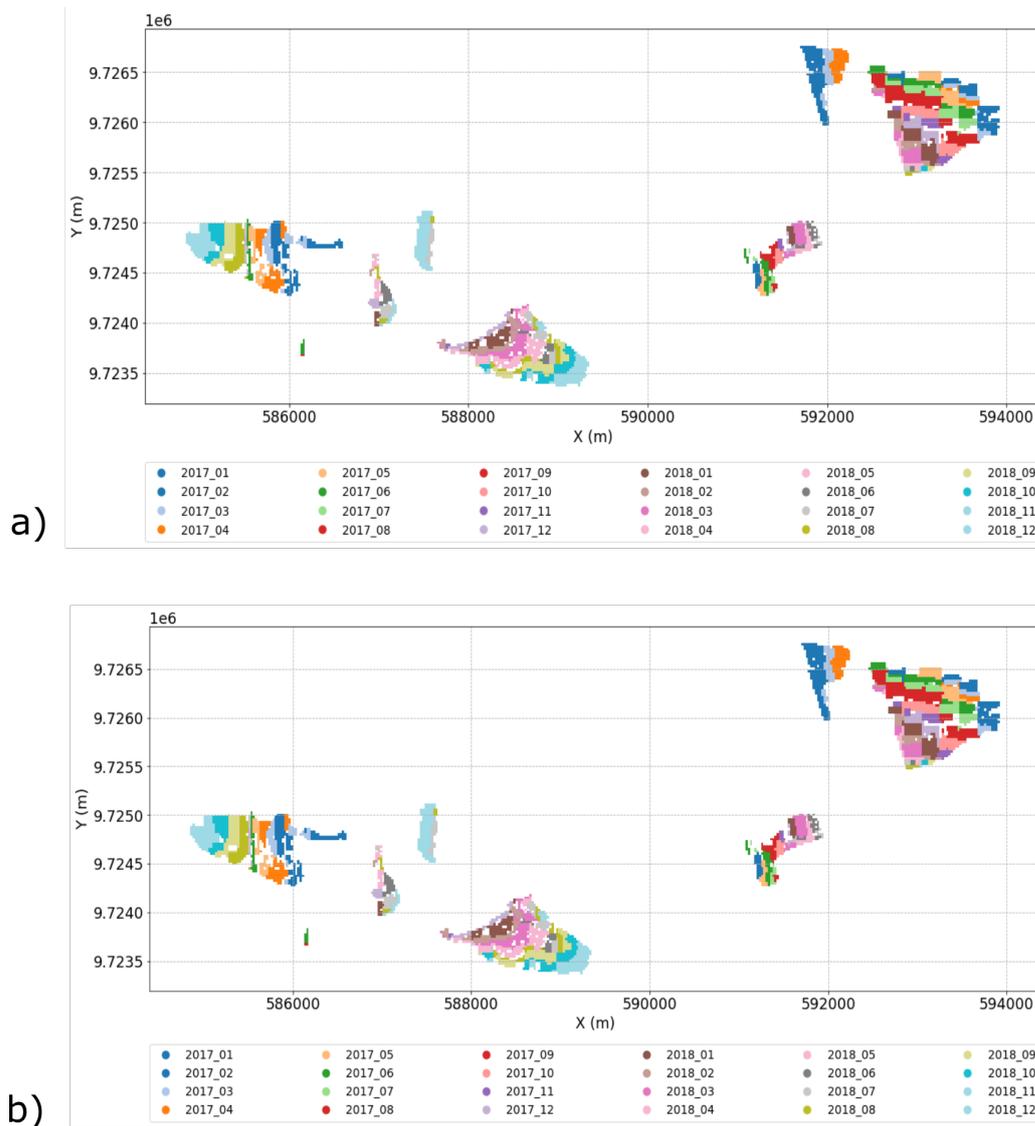


Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram calculados o teor médio de Alumina Recuperável (AA), o volume total e tonelagem de acordo com o mês e ano das linhas de escavação. Para a abordagem "Centroide", foram considerados o volume total do bloco ($312,50 \text{ m}^3$). Na abordagem "Porcentagem", considerou-se o volume proporcional de cada bloco dentro do horizonte mineralizado.

Ambos os volumes foram calculados utilizando as porcentagens do bloco dentro da linha de escavação. O volume dentro da linha de escavação é o volume do bloco multiplicado pela porcentagem da área dentro da linha de escavação. A tonelagem foi calculada através de um valor fixo de $2,5 \text{ t.m}^{-3}$. A figura 5.22 apresenta os blocos selecionados em relação aos seus meses e anos. A tabela 5.2 apresenta os resultados de teor médio, volume e tonelagem para cada mês e ano para a abordagem "Centroide" e a tabela 5.3 apresenta os resultados para a abordagem "Porcentagem".

Figura 5.22 – Blocos do modelo "Centroide" selecionados pelas porcentagens dentro das linhas de escavação filtrados por seus meses e anos (a); Blocos do modelo "Porcentagem" selecionados pelas porcentagens dentro das linhas de escavação filtrados por seus meses e anos (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5.2 – Resultados de teor médio, volume total e tonelagem no planejamento de curto prazo com *grid* regular Cartesiano na abordagem "Centroide".

Mês e Ano	Teor médio de AA (%)	Volume Total (m^3)	Tonelagem (t)
jan/17	49,11	331365,65	828414,13
fev/17	49,23	405330,43	1013326,07
mar/17	49,72	347781,1	869452,74
abr/17	49,74	271704,47	679261,18
mai/17	48,61	288900,44	722251,11
jun/17	48,21	308663,59	771658,96
jul/17	47,64	253309,34	633273,34
ago/17	47,74	206743,11	516857,78
set/17	47,96	257480,86	643702,16
out/17	48,53	163321,12	408302,81
nov/17	48,96	87225,16	218062,89
dez/17	47,99	279382,27	698455,67
jan/18	47,7	405119,86	1012799,65
fev/18	46,47	405119,86	883019,05
mar/18	46,95	507964,1	1269910,26
abr/18	47,71	281587,14	703967,84
mai/18	47,46	241464,9	603662,26
jun/18	46,28	177164,41	442911,02
jul/18	46,88	290367,92	725919,81
ago/18	47,82	343388,46	858471,15
set/18	47,28	385793,6	964484
out/18	46,98	318266,89	795667,21
nov/18	47,45	393155,35	982888,38
dez/18	48,13	372828,87	932072,17
Média	47,94	305142,87	757449,65

Tabela 5.3 – Resultados de teor médio, volume total e tonelage m no planejamento de curto prazo com *grid* regular Cartesiano na abordagem "Porcentagem".

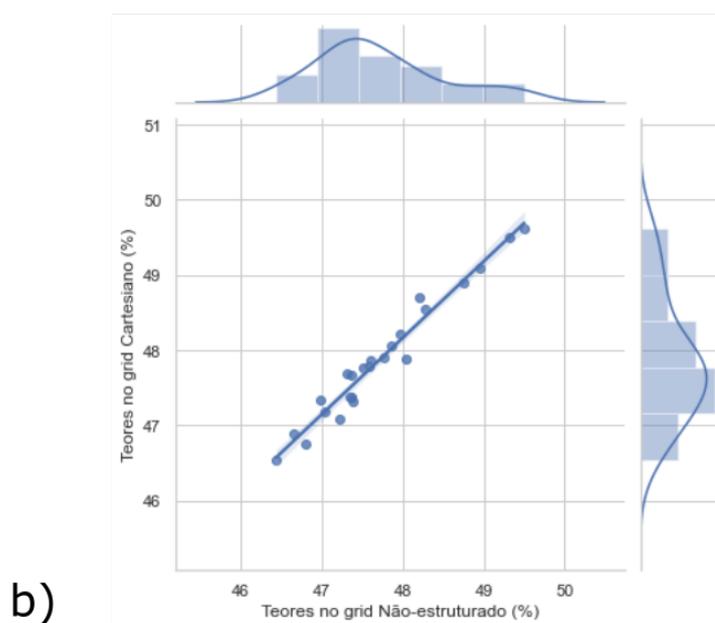
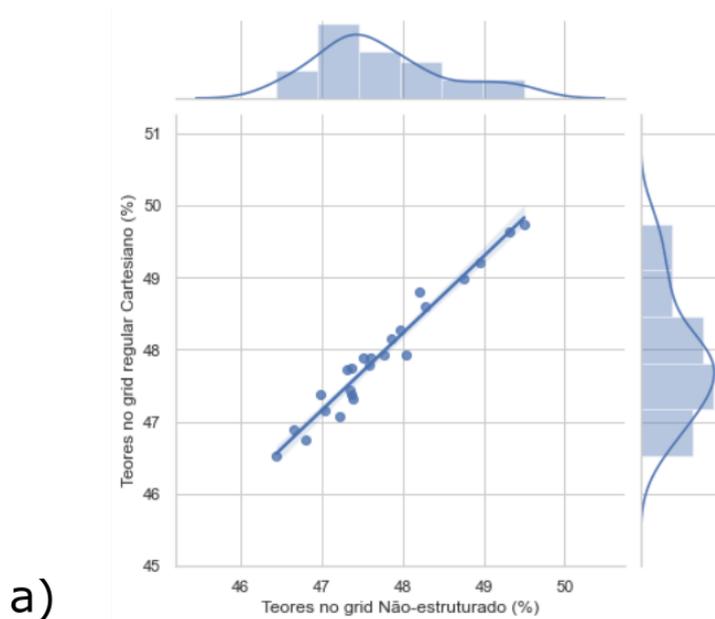
Mês e Ano	Teor médio de AA (%)	Volume Total (m^3)	Tonelage m (t)
jan/17	48,89	328091,68	820229,21
fev/17	49,09	404528,94	1011322,35
mar/17	49,50	351267,34	878168,36
abr/17	49,62	271928,91	679822,29
mai/17	48,54	287726,21	719315,52
jun/17	48,05	306483,43	766208,58
jul/17	47,69	253568,07	633920,16
ago/17	47,66	210818,43	527046,07
set/17	47,76	255763,83	639409,58
out/17	48,21	167880,30	419700,75
nov/17	48,71	88993,43	222483,58
dez/17	47,90	276136,93	690342,32
jan/18	47,78	399793,00	999482,50
fev/18	46,76	353401,29	883503,22
mar/18	47,09	506173,40	1265433,50
abr/18	47,31	284341,47	710853,68
mai/18	47,38	238631,35	596578,38
jun/18	46,54	175044,41	437611,02
jul/18	47,18	289187,07	722967,68
ago/18	47,87	343975,73	859939,32
set/18	47,34	386840,59	967101,46
out/18	46,88	321543,07	803857,69
nov/18	47,37	392068,54	980171,34
dez/18	47,88	370971,55	927428,86
Média	47,88	302714,96	756787,39

5.3 Comparativo entre o planejamento de curto prazo com *grid* não-estruturado e regular Cartesiano

É proposto um comparativo entre o planejamento de curto prazo utilizando o *grid* não-estruturado e o regular Cartesiano. Serão comparados os resultados apresentados nas seções anteriores a fim de evidenciar as diferenças quando usados diferentes *grids* e seus blocos no planejamento. Para o *grid* regular Cartesiano, serão utilizadas as abordagens Centroide e Porcentagem.

A primeira comparação realizada foi em relação aos teores médios nas linhas de escavação. Na figura 5.23, observa-se os diagramas de dispersão entre o teores. É possível notar como a dispersão dos valores se apresentam bem próximas a curva $y = x$, diferença entre os resultados é pequena.

Figura 5.23 – Diagrama de dispersão entre os teores médios do *grid* não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Centroide"(a); Diagrama de dispersão entre os teores médios do *grid* não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Porcentagem"(b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 5.4 apresenta a diferença absoluta e relativa entre os *grids* não-estruturados e regular Cartesiano. Como observado nos diagramas de dispersão, houve uma ligeira diferença nos teores, uma diferença relativa de 0,43 % entre os teores na abordagem Centroide e 0,33% na abordagem Porcentagem. Os hexaedros irregulares por conseguirem acessar somente a área de interesse, o minério, fornece a ideia dos valores reais do bloco. Com isso, ao criar-se blocos além da superfície, podem ser observados um aumento da massa em relação ao real. Na abordagem considerando as porcentagens dos blocos, os valores dos teores se aproximaram bastante, demonstrando a influência do tamanho e forma dos blocos sobre os resultados.

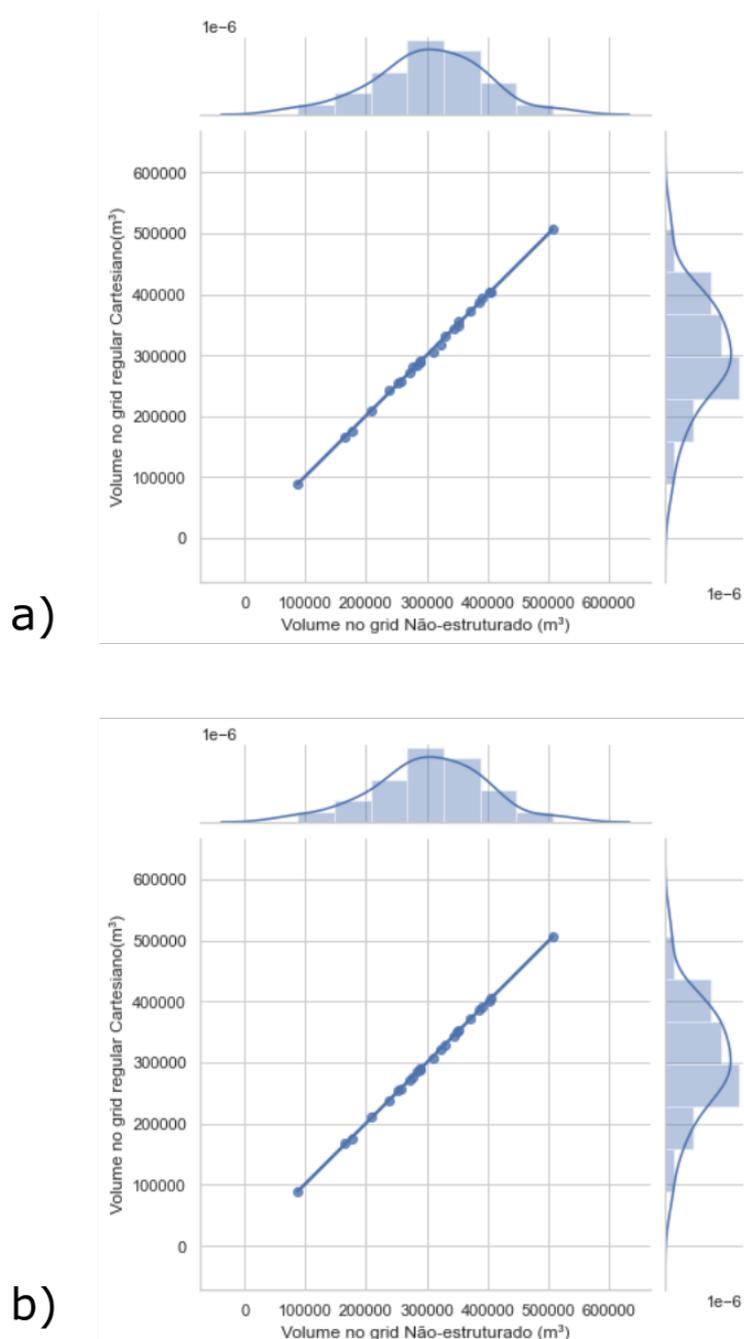
Tabela 5.4 – Comparativo do teor médio de Alumina Recuperável entre o grid não-estruturado e regular Cartesiano.

Teor Médio de AA (%)				
Centroide			Porcentagem	
Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)		Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
0,23	0,47		0,13	0,27
0,24	0,49		0,13	0,27
0,32	0,65		0,19	0,39
0,24	0,48		0,12	0,24
0,33	0,68		0,27	0,56
0,30	0,63		0,20	0,42
0,42	0,89		0,38	0,80
0,37	0,78		0,29	0,61
0,38	0,80		0,25	0,53
0,30	0,63		0,24	0,50
0,59	1,22		0,50	1,04
0,17	0,36		0,14	0,29
0,20	0,42		0,20	0,42
-0,06	-0,13		-0,04	-0,09
-0,15	-0,32		-0,13	-0,28
-0,06	-0,13		-0,07	-0,15
0,02	0,04		0,02	0,04
0,08	0,17		0,10	0,22
0,11	0,23		0,14	0,30
0,28	0,59		0,27	0,57
0,38	0,81		0,35	0,74
0,23	0,49		0,22	0,47
0,09	0,19		0,03	0,06
-0,12	-0,25		-0,16	-0,33
Média	0,20	0,43	0,16	0,33

Os volumes nas linhas de escavação utilizando o *grid* não-estruturado e regular Cartesiano foram comparados. A figura 5.24 apresenta o diagrama de dispersão entre os resultados de volume nas linhas de escavação. Devido a grandeza dos resultados e uma diferença relativa muito pequena, os valores se encontraram praticamente alinhados a

curva $y = x$, demonstrando uma similaridade muito grande entre os resultados de volume.

Figura 5.24 – Diagrama de dispersão entre os volumes do *grid* não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Centroide"(a); Diagrama de dispersão entre os volumes do *grid* não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Porcentagem"(b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 5.5 apresenta a diferença absoluta e relativa nas abordagens elencadas. Foi observada na abordagem "centroide" um ganho de $3278,76 \text{ m}^3$ em relação ao não-estruturado. Um dos motivos é que a seleção dos blocos a partir dos seus centroides gera um provável volume irreal nas linhas de escavação, pois partes dos blocos selecionados não

estariam entre as superfícies do horizonte mineralizado.

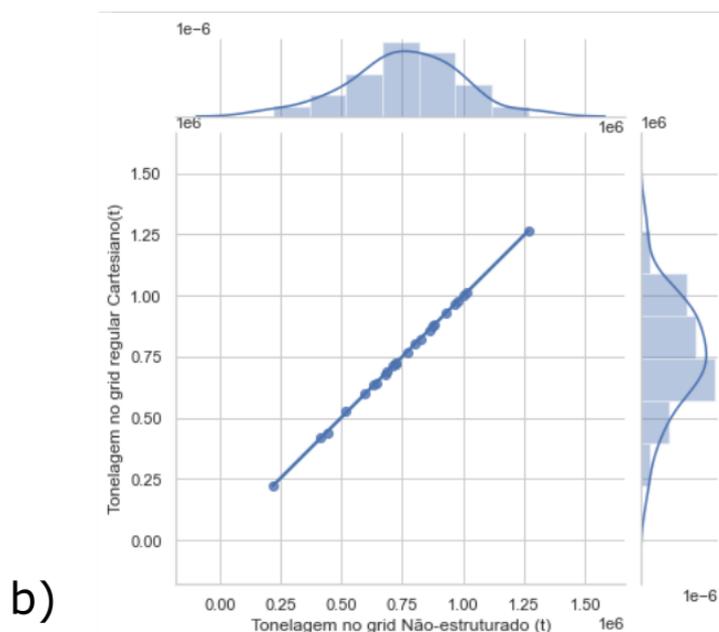
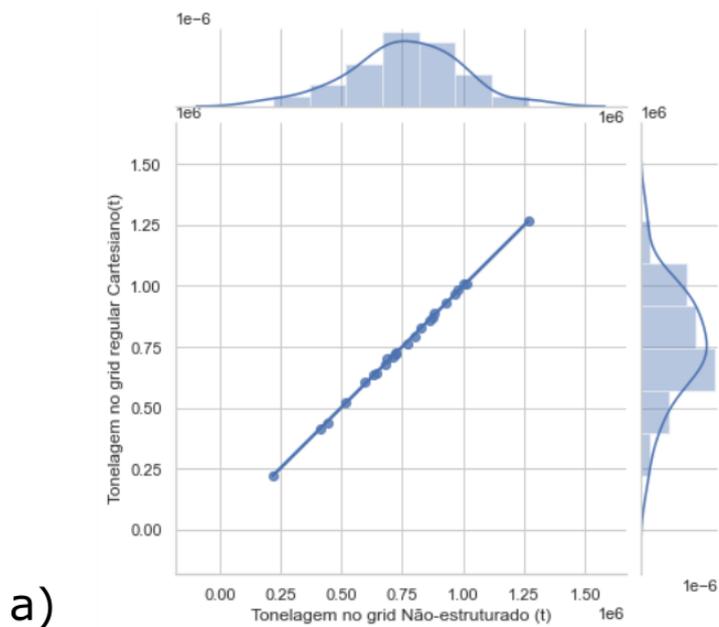
Em relação a abordagem "porcentagem", observou-se uma diferença total de -1562,11 m^3 . Esse valor de diferença pode estar associado ao cálculo de volume do hexaedro irregular e o limite imposto para a resolução mínima em Z (0,5 m). Em contrapartida, a abordagem porcentagem possui blocos muitos pequenos, com uma porcentagem mínima imposta (1%), gerando blocos com volume por volta de 4 m^3 . Com isso, alguns blocos selecionados podem possuir valores reduzidos em relação ao *grid* não-estruturado, evidenciando essa diferença.

Tabela 5.5 – Comparativo do volume entre o grid não-estruturado e regular Cartesiano.

Volume total (m^3)				
Centroide			Porcentagem	
	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
	1274,620	0,387	-1168,840	-0,355
	-1562,010	-0,385	-1089,950	-0,269
	-1961,450	-0,560	771,880	0,220
	-1848,050	-0,677	-861,320	-0,316
	-583,390	-0,202	-903,230	-0,313
	-3388,470	-1,096	-2797,470	-0,905
	686,600	0,271	666,670	0,264
	1930,930	0,929	3053,900	1,470
	379,770	0,148	-639,470	-0,249
	-310,170	-0,187	2021,920	1,219
	1624,160	1,858	1577,380	1,804
	4145,070	1,503	421,700	0,153
	1732,910	0,431	-1841,530	-0,459
	3699,090	1,053	2090,170	0,595
	-395,970	-0,078	-982,180	-0,194
	-1521,160	-0,536	663,950	0,234
	2740,460	1,148	-10,860	-0,005
	-577,570	-0,327	-1404,400	-0,796
	405,770	0,140	-422,330	-0,146
	-1615,680	-0,469	-579,280	-0,168
	-1101,130	-0,285	-54,750	-0,014
	-3627,250	-1,127	-186,900	-0,058
	2537,820	0,648	700,490	0,179
	613,860	0,165	-587,660	-0,158
Média	136,61	0,11	-65,09	0,07

Ao comparar as tonelagens, obtidas através da multiplicação do volume do bloco, usou-se uma densidade arbitrária (no caso, o valor escolhido foi de 2,5 $t.m^{-3}$). Na figura 5.25, os diagramas de dispersão apontam os valores de tonelagem próximos a curva $y = x$. Esse resultado apresenta uma similaridade entre as abordagens, evidenciando para o volume e tonelagem uma diferença não tão evidente entre os *grids*.

Figura 5.25 – Diagrama de dispersão entre as toneladas do *grid* não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Centroide"(a); Diagrama de dispersão entre as toneladas do *grid* não-estruturado e regular Cartesiano da abordagem "Porcentagem"(b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados das diferenças relativas entre os *grids* apresentados na tabela 5.6 demonstram valores próximos aos resultados do volume. Esse fato pode ilustrar a necessidade de utilizar os *grids* não-estruturados em outros depósitos, com maior complexidade na forma dos contatos, a fim de verificar melhorias no cálculo de teores sem diluição.

Tabela 5.6 – Comparativo da tonelagem entre o grid não-estruturado e regular Cartesiano.

Tonelagem (t)			
Centroide		Porcentagem	
Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
3186,560	0,387	-2922,080	-0,355
-3905,020	-0,385	-2724,880	-0,269
-4903,610	-0,560	1929,720	0,220
-4620,130	-0,677	-2153,290	-0,316
-1458,480	-0,202	-2258,090	-0,313
-8471,190	-1,096	-6993,680	-0,905
1716,490	0,271	1666,660	0,264
4827,350	0,929	7634,760	1,470
949,420	0,148	-1598,670	-0,249
-775,430	-0,187	5054,800	1,219
4060,400	1,858	3943,440	1,804
10362,690	1,503	1054,250	0,153
4332,270	0,431	-4603,820	-0,459
9247,730	1,053	5225,410	0,595
-989,930	-0,078	-2455,450	-0,194
-3802,900	-0,536	1659,880	0,234
6851,150	1,148	-27,150	-0,005
-1443,930	-0,327	-3511,000	-0,796
1014,420	0,140	-1055,820	-0,146
-4039,190	-0,469	-1448,200	-0,168
-2752,810	-0,285	-136,880	-0,014
-9068,140	-1,127	-467,240	-0,058
6344,550	0,648	1751,220	0,179
1534,650	0,165	-1469,160	-0,158
Média	341,54	-162,72	0,07

6 Conclusão

Tradicionalmente, na geoestatística e no planejamento mineiro são utilizados *grids* regulares Cartesianos, onde todos seus blocos possuem formas e volumes iguais. Contudo, modelos 3D são de difícil ajuste ao sólido geológico de depósitos tabulares. Uma alternativa, seria a utilização de um *grid* não-estruturado, que possui blocos de diferentes formas e volumes, buscando uma melhor aderência as superfícies do horizonte mineralizado. Como meta desta dissertação, foi investigado o uso de *grids* não-estruturados no planejamento de curto prazo.

Um *grid* não-estruturado foi utilizado na estimativa de teores e no planejamento de lavra de curto prazo de um depósito de bauxita. Seus resultados foram comparados com uma abordagem tradicional, utilizando um *grid* regular Cartesiano. Para realizar o controle de teores, foi desenvolvido um fluxo de trabalho em *Python*, pois a maioria dos softwares de planejamento de lavra não estão aptos para a utilização de um *grid* não-estruturado.

Foram comparados os teores médios nas linhas de escavação (*dig lines*) entre os *grids*. Foi observado uma pequena diferença dos teores no *grid* regular Cartesiano em relação ao *grid* não-estruturado, uma diferença relativa de 0,4%. Ao criar blocos um pouco além da superfície há um aumento na massa de minério em relação ao real. Em contrapartida, caso sejam criados blocos de tamanho superior ou inferior as superfícies de topo e base, teremos diluição e perda de minério. O *grid* não-estruturado, em razão de acessar somente a área de interesse (minério), serve como uma referência ao real (caso a lavra for seletiva e não houver diluição), auxiliando na previsão dos teores de minério.

Em relação ao volume dos *grids*, foram realizadas duas comparações. Uma verificando o volume na extensão do depósito (global) e outra nas linhas de escavação. O *grid* não-estruturado foi comparado com um *grid* regular Cartesiano e o volume entre as superfícies de topo e base do horizonte mineralizado (referência). O *grid* não-estruturado reproduziu melhor formas curvilineares do sólido geológico em relação ao *grid* regular Cartesiano. O comparativo entre o volume global demonstrou uma pequena diferença entre a referência e os *grids*, no valor de 0,1%.

Nas linhas de escavação, a seleção dos blocos do *grid* regular Cartesiano a partir dos seus centroides apresentou um ganho de volume em relação ao *grid* não-estruturado. Esse volume pode ser considerado irreal, pois partes dos blocos selecionados não estariam entre as superfícies do horizonte mineralizado. Pela abordagem das porcentagens dos blocos dentro do horizonte mineralizado, observou-se uma pequena diferença. Essa diferença pode estar associada ao cálculo de volume do hexaedro irregular e o limite imposto para a resolução mínima em Z .

Em termos de espessura, a espessura do *grid* não-estruturado é mais próxima da referência comparada ao *grid* regular Cartesiano. A espessura do *grid* não-estruturado é praticamente igual à espessura da referência em todas áreas consideradas. Em contrapartida, a espessura do *grid* regular Cartesiano difere para a espessura da referência em alguns pontos. A diferença máxima corresponde ao tamanho vertical dos blocos no *grid* regular Cartesiano.

O *grid* não-estruturado busca definir melhor a seletividade vertical dos blocos, ao considerar uma resolução mínima na coordenada Z (não gerando blocos de menor valor da resolução), e também uma flexibilidade em delinear-se com as feições das superfícies do horizonte mineralizado. Dessa forma, é uma boa opção para o cálculo de teores e também na definição do tamanho de bloco que produz menor diluição. Não obstante, o fato de serem observados resultados similares entre os *grids* não-estruturado e regular Cartesiano, necessita-se a utilização dos *grids* não-estruturados em outros depósitos, com maior complexidade na forma dos contatos, a fim de verificar o aumento nas melhorias no cálculo de teores.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Como recomendações para trabalhos futuros:

- Utilizar o *grid* não-estruturado em outros depósitos com dobramento mais expressivos, maior complexidade na forma dos contatos, a fim de observar o aumento nas melhorias no cálculo de teores.
- Avaliar o esforço computacional comparando o uso de um *grid* não-estruturado e modelos regulares, sub-blocos e com Z variável.
- Avaliar o impacto econômico na estimativa dos teores e/ou a diluição e perda, comparando o uso de *grids* não-estruturados aos métodos tradicionalmente utilizados na indústria.

Referências

- ABZALOV, M. Z.; MENZEL, B.; WLASENKO, M.; PHILLIPS, J. Optimisation of the grade control procedures at the Yandi iron-ore mine, Western Australia: Geostatistical approach. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science*, v. 119, n. 3, p. 132–142, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 35.
- ARAÚJO, C. P.; BASSANI, M. A.; COSTA, J. F. C. L. Low-Quality Secondary Data in Short-Term Mining Planning : Use or Discard Them ? *Proceedings of the 37th International Symposium- Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM)*, p. 641–646, 2015. Citado na página 35.
- BASSANI, M.; ARAÚJO, C.; COSTA, J. Grade estimation in a tabular deposit using unstructured grids. In: *Mining Goes Digital*. CRC Press, 2019. p. 177–183. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9781000398229/chapters/10.1201/9780429320774-20>>. Citado 6 vezes nas páginas 21, 23, 28, 37, 39 e 46.
- BERTOLI, O.; JOB, M.; VANN, J.; DUNHAM, S. and a Case Study from the 1A Shoot Nickel Deposit, Leinster, Western Australia. n. November, p. 17–19, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 27.
- CARVALHO, A.; BOULANGÉ, B.; MELFI, A.; LUCAS, Y. *Brazilian Bauxites*. 1. ed. [S.l.]: NUPEGEL. Departamento de Geologia Geral - Universidade de São Paulo, 1997. Citado na página 28.
- CAUMON, G.; GROSSE, O.; MALLET, J.-l. High Resolution Geostatistics on Coarse Unstructured Flow Grids. In: . [s.n.], 2005. p. 703–712. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-3610-1_71>. Citado na página 27.
- CAUMON, G.; LÉVY, B.; CASTANIÉ, L.; PAUL, J. C. Visualization of grids conforming to geological structures: A topological approach. *Computers and Geosciences*, v. 31, n. 6, p. 671–680, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 26.
- COUZENS, T. R. Aspects of production planning: Operating layout and phase plans. In: CRAWFORD, J.; HUSTRULID, W. (Ed.). *Open Pit Mine Planning and Design*. New York: SME-AIME, 1979. p. 219–231. Citado na página 34.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. *GSLIB : Geostatistical Software Library and User ' s Guide Second Edition Preface to the Second Edition*. 2 ed. ed. New York: Oxford University Press, 1998. 366 p. Citado 3 vezes nas páginas 26, 31 e 37.
- GODOY, M.; DIMITRAKOPOULOS, R.; COSTA, J. F. Economic functions and geostatistical simulation applied to grade control. In: EDWARDS, A. C. (Ed.). *Mineral resource and ore reserve estimation — The AusIMM guide to good practice*. [S.l.]: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 35.
- GOOVAERTS, P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. [S.l.]: Oxford University Press, 1997. 483 p. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 45.

- GRANDY, J. Efficient Computation of Volume of Hexahedral Cells. 1997. Citado na página 48.
- HOULDING, S. Direct volume estimation - a geostatistical technique for mine planning and grade control. *Computers and Geosciences*, v. 25, n. 10, p. 1113–1123, 1999. Citado na página 22.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. 1 ed. ed. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 45.
- JOURNAL, A.; HUIJBREGTS, C. *Mining Geostatistics*. [S.l.]: Academic Press Limited, 1978. Citado na página 33.
- KOPPE, V. C.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. C. Coordenadas cartesianas x coordenadas geológicas em geoestatística: aplicação à variável vagarosidade obtida por perfilagem acústica. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 59, n. 1, p. 11–20, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672006000100004&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- LISEIKIN, V. D. *Grid Generation Methods*. 3. ed. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017. (Scientific Computation). Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- MALLET, J.-L. *Geomodeling*. New York: Oxford University Press, 2002. 612 p. Citado na página 29.
- MALLET, J. L. Space-time mathematical framework for sedimentary geology. *Mathematical Geology*, v. 36, n. 1, p. 1–32, 2004. Citado na página 29.
- MANCHUK, J.; LEUANGTHONG, O.; DEUTSCH, C. V. Direct geostatistical simulation on unstructured grids. In: LEUANGTHONG, O.; DEUTSCH, C. V. (Ed.). *Geostatistics Banff 2004*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005. p. 85–94. Citado na página 27.
- MANCHUK, J. G. An Interim Format and Tools to Visualize Unstructured Grids. *Center for Computational Geostatistics Annual Report Papers*, n. 8, p. 1–6, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.
- MANCHUK, J. G. *Geostatistical Modeling of Unstructured Grids for Flow Simulation*. 216 p. Tese (Doutorado) — University of Alberta, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 21, 26, 28 e 29.
- MANCHUK, J. G.; DEUTSCH, C. V. Fast SGS for Unstructured Grids. p. 1–11, 2006. Disponível em: <<http://www.ccgaberta.com>>. Citado na página 27.
- MANCHUK, J. G.; DEUTSCH, C. V. Modeling Scalar Variables on Unstructured Grids. *Centre for Computational Geostatistics*, p. 1–8, 2008. Disponível em: <<http://www.ccgaberta.com/resources/reports/>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- MANCHUK, J. G.; DEUTSCH, C. V. The Structure of Unstructured Grids. p. 1–10, 2008. Disponível em: <<http://www.ccgaberta.com>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- MANCHUK, J. G.; DEUTSCH, C. V. Algorithms for Unstructured Grids. v. 2009, p. 1–8, 2009. Disponível em: <<http://www.ccgaberta.com>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

- MANCHUK, J. G.; DEUTSCH, C. V. Prerequisites for Geostatistics on Unstructured Grids. v. 2009, p. 1–10, 2009. Disponível em: <<http://www.ccgalberta.com>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- MANCHUK, J. G.; DEUTSCH, C. V. Unstructured Grid Generation Considering Reservoir Properties. v. 2009, p. 1–14, 2009. Disponível em: <<http://www.ccgalberta.com>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, n. 8, p. 1246–1266, 12 1963. Citado na página 31.
- OZ, B.; DEUTSCH, C. V. Cross Validation for Selection of Variogram Model and Kriging Type: Application to IP Data from West Virginia. *Center for Computational Geostatistics Annual Report Papers*, p. 1–13, 2000. Citado na página 45.
- PERONI, R. L. *Análise de Sensibilidade do Sequenciamento de Lavra em Função da Incerteza do Modelo Geológico*. 143 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. Citado na página 34.
- PYRCZ, M. J. A Short Note on the Generation of Geologically Realistic Stochastic Models. *Center for Computational Geostatistics Annual Report Papers*, p. 1–3, 2002. Citado na página 27.
- PYRCZ, M. J.; DEUTSCH, C. V. Building blocks for direct sequential simulation on unstructured grids. *Center for Computational Geostatistics Annual Report Papers*, p. 1–22, 2002. Citado na página 27.
- PYRCZ, M. J.; DEUTSCH, C. V. Assignment of Permeability on Unstructured Grids with Reduced Correlation Across Faults. *Center for Computational Geostatistics Annual Report Papers*, p. 1–11, 2003. Citado na página 27.
- PYRCZ, M. J.; DEUTSCH, C. V. *Geostatistical Reservoir Modeling, 2nd Edn.* [S.l.]: Oxford University Press, 2014. 448 p. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 37.
- RASERA, L. G. *Geoestatística de Múltiplos Pontos Aplicada à Simulação de Modelos Geológicos em Grids Estratigráficos*. 91 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. Citado na página 28.
- ROSSI, M. E.; DEUTSCH, C. V. *Mineral Resource Estimation*. Springer Netherlands, 2014. 1–332 p. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-5717-5>>. Citado 7 vezes nas páginas 21, 22, 25, 26, 31, 34 e 35.
- RUBIO, R. H.; KOPPE, V. C.; COSTA, J. F. C. L.; CHERCHENEVSKI, P. K. How the use of stratigraphic coordinates improves grade estimation. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 68, n. 4, p. 471–477, 12 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672015000400471&lng=en&tlng=en>. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- VASYLCHUK, Y. V.; DEUTSCH, C. V. Improved grade control in open pit mines. *Mining Technology*, Taylor & Francis, v. 127, n. 2, p. 84–91, 4 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14749009.2017.1363991><https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14749009.2017.1363991>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 35.

VERLY, G. Grade control classification of ore and waste: A critical review of estimation and simulation based procedures. *Mathematical Geology*, v. 37, n. 5, p. 451–475, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 35.

XIE, Y. L.; DEUTSCH, C. V.; TRAN, T. T. Preliminary Research Toward Direct Geostatistical Simulation of Unstructured Grids. *Center for Computational Geostatistics Annual Report Papers*, n. 3, p. 1–19, 2001. Citado na página 27.