

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

**GEOESTATÍSTICA DE MÚLTIPLOS PONTOS COMO
FERRAMENTA PARA A MODELAGEM GEOLÓGICA DE
DEPÓSITOS MINERAIS**

HÉLDER ABEL PASTI

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Porto Alegre

Maio de 2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

**GEOESTATÍSTICA DE MÚLTIPLOS PONTOS COMO
FERRAMENTA PARA A MODELAGEM GEOLÓGICA DE
DEPÓSITOS MINERAIS**

HÉLDER ABEL PASTI

Dissertação realizada no Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral.

Porto Alegre

Maio de 2012

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Comissão Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Joao Felipe Coimbra Leite Costa.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Eduardo Varella

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Prof. Dr. Vanessa Cerqueira Koppe

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGEM

O caos é uma ordem por decifrar

José Saramago

Dedico este trabalho à minha família:

meus pais, Chico Pasti e Isabel,

meus irmãos Bruno e Matheus,

à Rúbia, esposa, amiga,

companheira inseparável e incansável.

Agradecimentos

Ao Professor Dr. João Felipe C. L. Costa por apostar e depositar sua confiança em mim, dando oportunidade para fazer parte do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento mineiro (LPM).

Ao Dr. Alexandre Boucher, pelo incentivo e apoio incondicional para a realização deste trabalho.

Mais uma vez, agradeço ao Professor Dr. João Felipe C. L. Costa pela orientação na elaboração deste trabalho, pelos ensinamentos, discussões técnicas e pela amizade.

Aos bolsistas de iniciação científica Pablo Koury, o Pablito, e Marcel Bassani, pela dedicação e disponibilidade.

Ao amigo e colega de profissão Daniel Hilário, pelo suporte em informática, indo desde a montagem de computadores, passando pela instalação de sistemas operacionais, compilação de programas, até o aprendizado de linguagens de programação.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM).

A todos os colegas e do LPM que ajudam a manter em destaque o nome da instituição e deste Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN/UFRGS).

À Companhia Vale do Rio Doce, por disponibilizar o banco de dados para este trabalho.

À CAE Datamine Brasil Ltda, pela parceria com o LPM e todo suporte necessário na utilização do *Datamine Studio*.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

Lista de Figuras e Tabelas

- Figura 1.1. Representação dos nós considerados em cada grid múltiplo, visando captar padrões de larga escala ao redor do nó central em vermelho: (a) nós distantes 20 m entre si; (b) distâncias de 40 m entre cada nó e (c) distância de 80 m entre cada nó. 13
- Figura 2.1. Seção vertical esquemática do depósito estudado (fonte: MBR, 2005)..... 19
- Figura 2.2. Mapa de localização das amostras. Em vermelho, amostras de estéril. Em azul, minério (itabiritos e hematitas).....22
- Figura 2.3. Distribuição espacial das seções verticais utilizadas para condicionar as simulações (à esquerda). Seção vertical típica (à direita) contendo minério (azul) e estéril (vermelho), com blocos de tamanho 10x10 metros gerados por extrusão.23
- Figura 2.4. Modelo geológico de referência. Vista isométrica (no alto). Duas seções horizontais em dois níveis de Z: seção=1115 (centro) e Z=1335 (abaixo). Estéril está representado em azul claro e o minério em verde.24
- Figura 2.5. Menus e abas com os parâmetros do algoritmo Tetris, utilizado para gerar a *imagem-referência* (TI).27
- Figura 2.6. Configuração definitiva da *Imagem-referência* utilizada para as simulações. (a) TI 3D; (b) seção ao longo do eixo Z e (c) seção perpendicular ao eixo X.....28
- Figura 2.7. Imagem mostrando a *imagem-referência* (TI) utilizada para as simulações em cada grid lateral, isto é, para o setor esquerdo e setor direito.....29
- Figura 2.8. À esquerda estão as SV (do lado esquerdo da pg) e ZI (do lado direito) criado a partir daquele número de seções disponíveis.31
- Figura 2.9. À esquerda, blocos dentro de cada zona de incerteza (cenário com 40, 20 e 10 seções verticais); à direita, região considerada real fora das zonas de incerteza (ZI).32
- Figura 2.10. (a) Seção vertical construída com blocos de 2x2x2m, contendo itabiritos (azul), hematitas (amarelo) e estéril (vermelho); (b) seção vertical com blocos de

10x10x10m contendo minério (itabiritos e hematitas, em azul) e estéril, em vermelho.....	33
Figura 2.11. (a) Imagem em perspectiva das seções verticais fora das ZI junto com os furos de sonda utilizados como dados de condicionamento das simulações. Minério em verde e estéril e azul; (b) Imagem representando os dados da seção vertical fora da ZI juntamente com os furos de sonda naquela SV. Minério em verde e estéril em cinza.	34
Figura 2.12. Fluxograma com as principais etapas necessárias para executar o trabalho.....	35
Figura 3.1. Modelos 3D e seções de: (a) modelo de referência; e realização 31 para (b) cenário com 40 seções verticais; (c) cenário com 20 seções verticais; (d) cenário com 10 seções verticais.	38
Figura 3.2. Proporções globais de minério em cada realização para os três cenários avaliados: (a) 40 seções; (b) 20 seções e (c) 10 seções.	39
Figura 3.3. Mapa (<i>E-type map</i>) ilustrando a probabilidade de cada bloco ser considerado minério (azul) ou estéril (vermelho) para (a) cenário de simulação condicionada por 40 seções verticais, (b) condicionado por 20 seções verticais e (c) condicionado por 10 seções verticais.	41
Figura 3.4. Histograma dos mapas E-type para os três cenários avaliados (global, à direita e dentro das ZI, à esquerda).(a) cenário de simulação condicionada por 40 seções verticais, (b) condicionado por 20 seções verticais e (c) condicionado por 10 seções verticais.	42
Figura 3.5. Seção vertical do (a) modelo de referência e realização nº 25 das simulações para o cenário de condicionamento utilizando (b) 40 seções, (c) 20 seções e (d) 10 seções verticais. Estéril em vermelho escuro e minério em laranja. Em azul claro estão as amostras de minério e vermelho claro as amostras de estéril nos furos de sondagem.	43
Figura 3.6. Proporções, para cada cenário avaliado, entre a realização 25 e os dados de condicionamento. Em azul, estéril e em vermelho, minério.	44

Figura 3.7. Variação dos recursos disponíveis. Em azul, cenário utilizando 10 seções verticais; em verde, utilizando 20 seções e em vermelho utilizando 40 seções verticais.	45
Tabela 2.1. Parâmetros para a construção dos grids de simulação no SGeMS	26
Tabela 3.1. Tempo necessário para execução das principais etapas.	48

Lista de Abreviaturas e Glossário

3D = 3 (três) dimensões; tridimensional.

BD = Banco de Dados contendo furos de sondagem.

CPU = Unidade Central de Processamento (*Central Processing Unit*).

E-Type map = Mapa com a média dos valores simulados em cada ponto do grid.

Grid = volume (malha 3D) que delimita a região de estudo e/ou região simulada.

HD = *Hard Data* (conjunto de dados contendo todos os furos de sondagem acrescidos de pontos de seções verticais).

MG = Múltiplos *Grids* (*Multiple Grids*)

MGR = Modelo Geológico de Referência.

MPS = *multiple point simulation* (simulação por múltiplos pontos).

MW = *Moving Window* (algoritmo de janelas móveis).

RAM = Memória de Acesso Aleatório (*Random Memory Access*).

SGeMS = *Stanford Geostatistical Modeling Software*.

SNESIM = *Single Normal Equation Simulation*, algoritmo de MPS.

Search three = árvore de busca.

SV = Seções Verticais.

TI = *Training Image*, é uma imagem característica do depósito. Tradução livre: “imagem-referência”.

ZI – Zona de Incerteza (*uncertainty zone*).

RESUMO

A modelagem das geometrias de corpos mineralizados é fundamental na avaliação e engenharia de qualquer depósito mineral. A construção de geometrias tridimensionais é convencionalmente baseada na união de seções verticais e horizontais interpretadas por um geólogo ou outro especialista da mina. Em alguns casos mais avançados são utilizados métodos geoestatísticos, tais como krigagem e/ou simulação de indicadores, simulações truncadas Gaussiana ou Plurigaussiana, as quais permitem automatizar e refinar o processo de modelagem.

No entanto, estes métodos são probabilísticos e utilizam o variograma para representar a heterogeneidade geológica. A simulação geoestatística de múltiplos pontos (*multiple-point simulation* – MPS) é uma alternativa para a modelagem geoestatística tradicional baseada em variogramas, pois uma representação totalmente explícita dos padrões geológicos (uma *imagem-referência, training image* – TI) é usada no lugar dos variogramas. Embora seja hoje utilizada na modelagem de reservatórios de óleo e gás, existem poucos estudos mostrando a aplicação dessa técnica em depósitos minerais. A vantagem da abordagem MPS é fornecer representação mais realista da geologia através de uma parametrização mais acessível (a imagem-referência visual, ao invés do variograma analítico).

No início dos anos 2000 foi implementado no aplicativo *Stanford Geostatistical Modeling Software* – SGeMS, o algoritmo de MPS chamado SNESIM (*Single Normal Equation Simulation Algorithm*). Este algoritmo permite a obtenção das probabilidades condicionais dos pontos a partir das proporções obtidas pelo escaneamento da imagem-referência, não sendo necessário o uso de nenhum tipo de krigagem e nenhuma modelagem de variogramas. Ele faz a simulação estocástica de variáveis categóricas sem demandar muita CPU e RAM, combinando a flexibilidade e facilidade de condicionamento dos algoritmos baseados em pontos, com a habilidade que os algoritmos baseados em objetos têm para reproduzir formas.

A proposta deste trabalho foi aplicar a técnica de simulação geoestatística por múltiplos pontos, especificamente o algoritmo SNESIM, para modelar o envelope mineralizado de um depósito real de minério de ferro brasileiro localizado no Quadrilátero Ferrífero. As simulações foram condicionadas por furos de sondagem e algumas seções verticais

interpretadas por especialistas. Como forma de checar a sensibilidade do método, foram avaliados cenários com três conjuntos de dados, cada um deles com diferentes quantidades de seções verticais (SV) disponíveis para o condicionamento das simulações.

Os resultados obtidos permitem afirmar que esta técnica pode ser aplicada para construir modelos de corpos mineralizados durante os estágios preliminares de exploração sem demandar longos e exigentes processos de modelagem manual. Modelar com MPS minimiza o caráter determinista da modelagem tradicional, acrescentando uma interpretação probabilística (zona incerteza) sobre a forma e os contatos litológicos reais da jazida.

Também, pôde-se verificar que a simulação deste tipo de corpo de minério não exige uma grande quantidade de seções interpretadas. Algumas seções verticais combinadas com amostras de furos de sondagem foram suficientes para simular de forma satisfatória o envelope mineralizado do depósito. Ainda assim, é necessário que se tenha computadores com razoável capacidade de armazenamento, CPU e RAM. Para efetuar 50 realizações de simulação do contato minério/estéril e construir o envelope mineralizado de um depósito, considerando três diferentes cenários, o tempo total foi de aproximadamente 13 minutos. Outros 4 minutos foram necessários para o pós-processamento.

ABSTRACT

Orebody modeling is critical for the evaluation and engineering of mineral deposits. The construction of three-dimensional geometries is conventionally based on the union of vertical and horizontal sections interpreted by a mine geologist. In more advanced cases, some geostatistical methods are used such as indicator kriging and/or simulations, truncated Gaussian or Plurigaussian simulations, which allows to automate and refine the modeling process.

However, these methods are probabilistic and uses the variogram to represent the geological heterogeneity. The multiple-points geostatistical simulation (MPS) is an alternative to traditional variogram-based geostatistical modeling, whereas a fully explicit representation of the geological patterns (a training image – TI) is used in place of variograms. Although it is now used in modeling of oil and gas reservoirs, there are few studies showing application of this technique in mineral deposits. The advantage of the MPS approach are to provide a more realistic representation of geology through a more accessible parametrization (the visual training image instead of the analytic variogram).

The MPS algorithm called SNESIM was implemented in the Stanford Geostatistical Modeling Software – SGeMS in the beginning of 2000. Such algorithm allows to retrieve the conditional probabilities from proportions obtained by scanning the training image, it is not necessary to use any type of kriging and variogram model. The SNESIM algorithm combines the flexibility and ease of conditioning of pixel-based algorithms, with the capability of object-based algorithms have to reproduce complex shapes to performe stochastic simulation of categorical variables, without requiring much CPU and RAM.

The purpose of this study was to use the MPS technique, specifically the SNESIM algorithm, to model the mineralized envelope of a real Brazilian iron ore located in the *Quadrilátero Ferrífero*. The simulations were constrained by boreholes and some vertical sections interpreted by experts. In order to check the sensitivity of the method were evaluated three sets of data, each one with different amounts of available vertical sections (VS) for conditioning the simulations.

The results revealed that the technique can be applied to model the mineralized body during early stages of mine exploration, without demanding many manual modeling

processes. The MPS modeling process minimizes the deterministic character of traditional modeling approach, adding a probabilistic interpretation (uncertainty zones) about the actual shape and lithological contacts of the orebody.

Also, the simulation of this kind of orebody does not require a large amount of interpreted sections. A few vertical sections combined with boreholes samples were sufficient to simulate the mineralized envelop of the deposit. Nonetheless, it is necessary to have a computer with reasonable storage capacity, CPU and RAM. To make 50 simulation outputs of the ore/waste contact and build the mineralized envelop, considering three different scenarios, a total time of approximately 13 minutes was needed. Other 4 minutes were required for post processing the simulations outcomes.

Sumário

RESUMO	x
ABSTRACT	xii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Objetivos	5
1.2. Revisão Bibliográfica.	6
1.2.1. Estado da Arte.....	6
1.2.2. O algoritmo SNESIM (Single Normal Equation Simulation).....	8
1.2.3. Simulação com Múltiplos Grids (MG).	12
1.2.4. Fator Servosystem.....	14
1.3. Organização da Dissertação	17
Capítulo 2	19
Experimental.....	19
2.1. Recursos computacionais.....	20
2.2. Banco de Dados, Seções Verticais e Modelo Geológico de Referência	20
2.3. Grids de Simulação.....	25
2.4. Gerando a TI (training image – imagem-referência).....	26
2.5. Gerando as Zonas de Incerteza (Uncertainty Zones) (ZI) e Simulando	29
2.6. Metodologia	35
Capítulo 3	36
Geração de Modelos com a Geoestatística de Múltiplos Pontos.....	36
3.1. Resultados e Discussão.	36
3.1.1. Checagem Visual e de Proporções	36
3.1.2. Mapas e Histogramas E-type.....	40
3.1.3. Gráfico com a variação de recursos e reservas.....	44
3.2. Demanda Computacional.....	48
Capítulo 4	49
Conclusões.....	49
4.1. Recomendações para Desenvolvimento Futuro	51
Referências.....	53
ANEXOS	57

Capítulo 1

Introdução

A exploração de bens minerais é atividade essencial para o desenvolvimento econômico de qualquer país. O Brasil é hoje um dos maiores produtores e exportadores de diversos bens minerais, aparecendo com destaque ao lado de Estados Unidos, China e Rússia. O país é hoje o maior produtor e exportador de nióbio e segundo maior exportador de minério de ferro (IBRAM, 2010). A produção nacional de minério de ferro em 2009, cerca de 310 Mt, só foi menor que a da Austrália (394 Mt). Além de grande produtor e exportador, o Brasil também é detentor de grandes reservas deste minério, alcançando 29 bilhões de toneladas, cerca de 18% do total mundial (IBRAM, 2010).

Estes números impressionam, mas sabe-se que são necessários grandes volumes de investimentos para colocar os empreendimentos minerais em funcionamento e torná-los rentáveis a médio e longo prazo. Tais investimentos estão sempre associados a altos riscos devido a fatores diversos, desde políticas de governo, relação com trabalhadores e investidores, as características das jazidas, instabilidades do mercado, dentre outros. Nesse contexto, a modelagem das geometrias dos corpos mineralizados é fundamental na avaliação e engenharia de qualquer depósito mineral. Atualmente, o processo de avaliação de reservas minerais se inicia com a construção de modelos computacionais que permitem delinear a forma e extensão de fácies litológicas e/ou litoquímicas para em seguida estimar teores, trazendo assim subsídios que vão permitir a tomada de decisões nas etapas posteriores de planejamento e extração ao longo da vida da mina.

A avaliação criteriosa dos recursos minerais e reservas de minério, isto é, aquelas passíveis de extração de acordo com critérios técnico-econômicos, é extremamente importante desde as etapas iniciais. O problema da avaliação de reservas recuperáveis futuras é crucial na medida em que tais reservas condicionam tanto o investimento quanto a rentabilidade associada a qualquer empresa de mineração (Journel & Kyriakidis, 2004).

Entre as ferramentas mais amplamente empregadas na indústria mineral para estimar recursos minerais está a construção dos modelos de blocos, os quais são representações dos modelos dos depósitos na forma de pequenos cubos ou paralelepípedos, geralmente de tamanho regular. Estas formas geométricas fazem a discretização de um sólido maior do modelo tridimensional em unidades representativas do todo e suas dimensões tem relação direta com a malha de sondagem e os painéis de lavra.

Os modelos de corpos de minério que servirão de base para os modelos de blocos utilizados na indústria mineral estão predominantemente baseados na união de seções verticais e horizontais interpretadas por geólogos, ou outros especialistas da mina que fazem o delineamento dos contatos entre diferentes classes litológicas/litoquímicas para depois estudar a distribuição de teores dentro das massas de rochas.

No entanto, tem sido constatado com uma frequência cada vez maior que os resultados contidos nos modelos de blocos, estimados a partir de furos de sondagem de exploração ou desenvolvimento, quando comparados com a produção da mina, apresentam discrepâncias significativas. A pobre reconciliação por vezes observada está relacionada a problemas de amostragem, análise química de amostras, descrição litológica, controle do planejamento e execução da lavra e também com a incerteza na interpretação geológica e na estimativa de parâmetros.

Com relação às incertezas nas interpretações geológicas e processos de estimativa, algumas grandes empresas do setor mineral vêm tentando minimizar os efeitos através do uso da krigagem de indicadores (Journel, 1982) e, em casos mais refinados, da simulação sequencial de indicadores para auxiliar na geração dos modelos de corpos de minério que serão posteriormente utilizados para avaliação de recursos e reservas minerais e também para quantificar a incerteza associada aos processos de estimativa.

A simulação condicional surgiu nos anos 70, inicialmente não como forma de quantificação da incerteza, mas como uma alternativa para lidar com a grande suavização gerada na krigagem. Percebeu-se na época, que para muitas aplicações a reprodução de padrões de variabilidade espacial, refletida pelos dados que eram então modelados por variogramas, era mais importante do que a precisão local (Journel, 2005).

Gómez-Hernández (2005) afirma que a simulação estocástica é uma alternativa para a krigagem. Na simulação, o objetivo não é obter uma estimativa que minimiza localmente

alguma diferença quadrática, mas sim gerar realizações prováveis da distribuição espacial do atributo de uma forma consistente com os dados amostrais e com as propriedades estatísticas inferidas a partir deles e utilizadas para definir a função espacial aleatória.

De um modo geral, as técnicas de simulação geoestatística, assim como as técnicas de estimativa, têm como objetivo representar a distribuição espacial de uma variável. Ambos os resultados são gerados a partir dos mesmos dados, isto é, o número n de amostras disponíveis no momento das previsões. No entanto, elas diferem na forma de apresentação dos resultados. Por exemplo, a simulação objetiva reproduzir o histograma e o modelo variográfico inferido dos dados amostrais. Em relação a um atributo estimado, um atributo simulado é mais fiel na reprodução da variabilidade espacial e, conseqüentemente, das estruturas espaciais dos valores reais (Deutsch, 2002).

Desta forma, ao se construir modelos tridimensionais de depósitos minerais, e considerando os vultosos investimentos necessários para determinar a viabilidade econômica das minas, deve-se sempre levar em conta os diversos benefícios oriundos da utilização de técnicas geoestatísticas para auxiliar na construção de tais modelos. Com essas técnicas pode-se quantificar a incerteza dos processos de modelagem, além da possibilidade de se integrar dados primários e secundários.

Jazidas de minério de ferro como as do Quadrilátero Ferrífero, por exemplo, têm grande variedade na geologia e composição dos minérios, podendo ser encontrados na mesma região desde hematita pura (70% de teor de ferro) até itabiritos friáveis, mais pobres em ferro e ricos em sílica, cujo teor médio de ferro fica em torno de 50%. Já, os depósitos de Carajás são mais homogêneos, com teor médio de ferro de 60% e tendo a hematita como minério predominante (DNPM, 2011).

Para lidar com a variabilidade e complexidade de depósitos como aqueles do Quadrilátero Ferrífero é de grande importância para a indústria mineral gerar modelos 3D com alta escala de detalhes (alta resolução). Segundo Deutsch (2002), gerar modelos que sejam consistentes com os dados disponíveis pode parecer razão suficiente para considerar a modelagem geoestatística do reservatório (ou corpo de minério), mas reconciliar todos os dados primários e secundários disponíveis para gerar um modelo numérico tem muitos outros benefícios, entre os quais: i) a possibilidade de transferência de resultados entre diferentes áreas do conhecimento, ii) uma ferramenta para dar atenção a incógnitas cruciais, e iii) um

veículo para apresentar variações espaciais que podem encarecer ou impedir uma determinada estratégia de produção.

Outras razões elencadas por Deutsch (2002), para a geração de modelos 3D de alta resolução em reservatórios de óleo, utilizando simulação geoestatística podem ser utilizadas de forma análoga para trabalhos de modelagem voltados à outros tipos de depósitos minerais:

- Há necessidade de se ter estimativas confiáveis do volume/massa do depósito. Estes volumes *in situ* são importantes para determinar a viabilidade econômica de produção, distribuir os lucros entre os investidores, comparar os resultados econômicos para depósitos alternativos (diferentes realizações), determinar o tamanho apropriado das instalações de produção (investimento inicial), dentre outros;
- A localização da malha de sondagem deve ser ótima economicamente e robusta com relação às incertezas na descrição do depósito. Múltiplas realizações geoestatísticas tornam possível avaliar a incerteza ao redor de furos e permite a seleção de locações de furos de sondagem com melhoria do benefício da informação adicional;
- Muitas vezes há a necessidade de reconciliar a abundância de dados secundários com um número limitado de dados primários de furos de sonda. Os modelos geoestatísticos permitem que diferentes tipos de dados possam ser representados em um formato comum, por exemplo, dados sísmicos podem ser representados na escala e unidade dos dados primários.
- Decisões importantes devem ser tomadas na presença de incertezas significativas: quantos furos ou sondagens adicionais? Qual a localização dos furos?

Os argumentos apresentados ao longo das páginas anteriores ajudam a explicar, em parte, porque é cada vez mais frequente o uso de técnicas geoestatísticas nos trabalhos de pesquisa, modelagem, planejamento de lavra, avaliação de recursos e reservas, entre outras etapas dos empreendimentos de mineração. Esta tendência do setor mineral estimulou o desenvolvimento de uma grande variedade de algoritmos de estimativa e simulação, os quais vêm sendo implementados em diversos softwares, tanto os comerciais (**Isatis**[®], **Datamine Studio**[®], **Minesight**[®]), quanto os gratuitos (**GSLib** e **SGeMS**, por exemplo). Uma das consequências diretas é o aumento significativo da quantidade e qualidade dos modelos construídos durante diferentes fases dos empreendimentos.

Entre as técnicas geoestatísticas recentemente desenvolvidas e implementadas está a simulação geoestatística de múltiplos pontos (*multiple-point simulation* – MPS). Tal técnica é uma alternativa para a modelagem tradicional baseada em variogramas, pois utiliza uma representação totalmente explícita dos padrões geológicos (uma *imagem-referência* ou *training image* – TI) no lugar dos variogramas. A MPS apresenta bons resultados ao simular variáveis em depósitos complexos, mesmo a partir de dados escassos. Embora seja hoje utilizada na modelagem de alguns reservatórios de óleo e gás, existem poucos estudos voltados a outros tipos de depósitos, nos quais sua aplicação é promissora.

1.1. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento de novas técnicas de modelagem da geometria de depósitos, avaliando o uso da Simulação Geoestatística de Múltiplos Pontos (*multiple-point simulation* – MPS) como ferramenta para construção de modelos tridimensionais de depósitos minerais.

Para alcançar tal meta, foram traçados objetivos específicos, listados abaixo:

- Investigar a aplicabilidade da MPS para a modelagem geológica 3D de um depósito de minério de ferro brasileiro;
- Identificar possíveis dificuldades em termos de preparação e uso do banco de dados, recursos computacionais necessários, tempo para efetuar as simulações e tempo necessário para o pós-processamento dos resultados;
- Desenvolver uma sequência de etapas para utilizar a MPS na modelagem da geometria de depósitos minerais;
- Comparar os resultados gerados com a MPS com aqueles gerados através da modelagem tradicional, que utiliza interpretações e desenhos feitos por especialistas.

1.2.Revisão Bibliográfica.

1.2.1. Estado da Arte.

Muitos estudos publicados nos últimos anos vêm mostrando as mais variadas aplicações para a simulação geoestatística condicional. Tais técnicas têm sido utilizadas para auxiliar a modelagem tridimensional de reservatórios de óleo (Deutsch, 2002; Strebelle, 2000a, 2002) e na avaliação e classificação de recursos e reservas minerais (Journel & Kyriakidis, 2004). No Brasil, recentemente a simulação condicional tem sido aplicada para auxiliar na modelagem 3D de depósitos minerais (Souza, 2007); em análises de sensibilidade no sequenciamento de lavra (Peroni, 2002); na avaliação da variabilidade in situ de parâmetros físicos e químicos de minérios (Gambin, 2003); na otimização para locação de furos de sondagem em campanhas prospectivas (Koppe, 2009); para quantificar a incerteza das estimativas e auxiliar no dimensionamento de pilhas de homogeneização (Gambin *et al*, 2005; Abichequer *et al*, 2011); no estudo e redução da variabilidade de teores das pilhas e aperfeiçoamento de estratégias de homogeneização de pilhas (Beretta, 2010; Costa et al, 2008; Marques, 2010).

No entanto, embora as técnicas geoestatísticas sejam suficientes para resolver grande parte dos problemas de modelagem de litologias e teores, elas são pobres para caracterizar depósitos com escassez de dados amostrais. Essas técnicas também não produzem bons resultados em depósitos com grande variabilidade ou com alto grau de complexidade na sua formação, pois são baseadas em dados de furos de sonda, informações sobre a geologia local e variogramas, todos mesclados às interpretações feitas por especialistas, ou seja, estão baseadas essencialmente em estatísticas de pares de amostras.

Torna-se então necessário ultrapassar as barreiras que limitam a qualidade e variedade dos atuais modelos 3D. Isso pode ser alcançado com a utilização de ferramentas que integram, de forma eficiente e simultânea, os dados de furos de sonda e análises químicas (dados primários) com as informações complementares (dados secundários) a respeito da área pesquisada, indo além dos modelos gerados por estatísticas de pares de amostras, e considerem múltiplos pontos simultaneamente, aumentando de forma significativa a confiabilidade nos resultados. A simulação geoestatística de múltiplos pontos (MPS) permite a integração de dados múltiplos e a análise simultânea da semelhança (ou diferença) de diversas amostras.

As informações secundárias (complementares) podem ser obtidas através de qualquer fonte que permita aumentar o conhecimento geológico da área estudada, desde a sísmica, a perfilação geofísica, mapas de probabilidade, entre outros. O benefício alcançado será maior se dados secundários (*soft data*) forem considerados simultaneamente aos dados primários (*hard data*).

De acordo com (Remy et al, 2009), antes da introdução da geoestatística de múltiplos pontos existiam dois conjuntos de algoritmos de simulação para a modelagem de fácies: os baseados em pixels¹ (*pixel-based*) e os baseados em objetos (*object-based*). Os algoritmos baseados em pixels constroem as realizações simuladas um pixel por vez, desta forma apresentam grande flexibilidade para o condicionamento com dados de diversos suportes e de diferentes tipos, no entanto podem ser lentos e têm dificuldades em reproduzir formas geométricas complexas, principalmente se a simulação deste pixel é condicionada por estatísticas bipontuais. Por outro lado, algoritmos baseados em objetos constroem as realizações inserindo, no grid de simulação, um objeto ou padrão de cada vez. Desta forma, eles são rápidos e fiéis à geometria do objeto, no entanto tais algoritmos têm dificuldade de condicionar a dados locais de diferentes suportes, principalmente se os dados são densos, como no caso de dados sísmicos.

Basicamente, a MPS visa substituir a construção de um sistema de krigagem observando-se uma distribuição condicional extraída de uma imagem representativa da área sob estudo. Ou seja, os algoritmos MPS emprestam as estatísticas de alta ordem de um modelo explícito visualmente e estatisticamente, uma imagem-referência (Journel & Zhang, 2006).

O primeiro conceito de um algoritmo de simulação geoestatística de múltiplos pontos foi apresentado por Guardiano & Srivastava (1993), que propuseram a abordagem da equação normal única (*single normal equation*) para simular sequencialmente os nós dentro de uma malha (*grid*), simultaneamente condicionados às informações ao redor de locais informados.

Strebelle (2000a, 2000b, 2002) explica que o algoritmo proposto por Guardiano & Srivastava (1993) consiste na simulação de indicadores onde todas as probabilidades

¹ Pixel: aglutinação de *P*icture e *E*lement. É o menor elemento num dispositivo de exibição (como por exemplo um monitor), ao qual é possível atribuir-se uma cor. De uma forma mais simples, um pixel é o menor ponto que forma uma imagem digital, sendo que o conjunto de milhares de pixels forma a imagem inteira. Extraído de: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Pixel>.

condicionais necessárias são obtidas de proporções correspondentes lidas da *imagem-referência*. No entanto, a alta demanda computacional (RAM e CPU) foi o fator limitante para a implementação e ampliação dos trabalhos nos anos 90.

De acordo com Ortiz (2008), em linhas gerais, para se gerar modelos geológicos utilizando técnicas que consideram a geoestatística de múltiplos pontos é necessária a existência de dados de condicionamento (imagens-referência, por exemplo). A partir desses serão calculadas estatísticas relevantes, combinadas a um algoritmo de simulação para impor as estatísticas vinculadas aos dados de condicionamento. Por último, deve-se utilizar ferramentas de validação para garantir que os modelos compartilhem a aparência e também propriedades estatísticas solicitadas posteriormente.

Journel (2005) afirma que uma das grandes vantagens do uso de imagens de treinamento é o fato de o especialista poder facilmente refutá-la ou aceitá-la; o mesmo não se pode dizer em relação a modelos variográficos sem significado geológico. Inferir um variograma a partir de uma nuvem de pontos esparsos e então aceitar incondicionalmente as estatísticas de alta ordem implícitas para, digamos, um modelo de função Gaussiana Aleatória, não é algo mais objetivo do que inferir as mesmas estatísticas de alta ordem a partir de uma Imagem-referência visualmente explícita.

Foi a partir dos estudos do início dos anos 90, que Strebelle (2000, 2002) apresentou um algoritmo para simulação estocástica de variáveis categóricas que, sem demandar muita CPU e RAM, combinando a flexibilidade e facilidade de condicionamento dos algoritmos baseados em pontos, com a habilidade que os algoritmos baseados em objetos têm para reproduzir formas. O autor afirma que, idealmente, um algoritmo deste tipo deve ser baseado em pixels, incluir estatísticas de múltiplos pontos para permitir a reprodução de formas, ser rápido (portanto não-iterativo) e ser geral, de modo que um novo programa não precisa ser escrito para acomodar qualquer nova geometria aleatória.

1.2.2. O algoritmo SNESIM (Single Normal Equation Simulation)

O algoritmo proposto por Strebelle permite a obtenção das probabilidades condicionais dos pontos a partir das proporções obtidas pelo escaneamento da imagem-referência, não sendo necessário o uso de nenhum tipo de krigagem e nenhuma modelagem de variogramas. Ele faz uma busca de padrões na TI, considerando que o nó central do elipsoide de busca é

desconhecido. Para cada ponto visitado, ele armazena as informações de valor e posição espacial dos pontos vizinhos. O processo é executado em toda a TI e o número de vezes que cada padrão ocorre é armazenado para se calcular a frequência de cada padrão. A varredura da TI se faz apenas uma vez e os padrões ficam armazenados em uma estrutura dinâmica chamada pelo autor de *search three*, ou *árvore de busca*. A partir dos padrões, se constrói a curva de distribuição de probabilidades, obtendo de forma direta um modelo estocástico que representa a continuidade espacial do corpo de minério. A implementação completa do programa é apresentada abaixo (traduzido e adaptado de Strebelle, 2000a, 2000b, 2002):

Considere um atributo S , tendo K possíveis estados $\{s_k, k = 1 \dots K\}$. S é uma propriedade categórica. Um evento de dados d_n de tamanho n centrado no local \mathbf{u} é definido por:

- A geometria da localização dos n dados, definida por n vetores $\{h_\alpha, \alpha = 1, \dots, n\}$;
- Os n valores dos dados $\{s(u + h_\alpha), \alpha = 1 \dots n\}$.

Um modelo de dados com o padrão geométrico τ_n abrange apenas a geometria dos dados anteriores. O evento de dados d_n é dito “associado” com o padrão geométrico τ_n .

Em seus trabalhos, Strebelle (2000a, 2000b, 2002) explica que o princípio deste algoritmo de simulação é o mesmo da simulação sequencial de indicadores, SISIM (Alabert, 1987; Deutsch & Journel, 1998): os pontos da área são visitados de forma aleatória e depois de simulados eles são considerados um referencial verdadeiro e que vai condicionar, em uma mesma realização, a simulação dos demais pontos do grid.

De acordo com Strebelle (2000a, 2000b, 2002), as abordagens baseadas em variogramas fazem a krigagem em cada nó \mathbf{u} desconhecido, para então construir a função de distribuição acumulada de probabilidades (cpdf – *cumulative probability distribution function*) naquele local e extrair um valor da curva para atribuir uma fácies categórica a \mathbf{u} . A probabilidade condicional de ocorrência do estado s_k em \mathbf{u} pode ser indicada por $Prob\{S(\mathbf{u}) = s_k \mid s(u_\alpha), \alpha = 1 \dots n\}$, ou $Prob\{S(\mathbf{u}) = s_k \mid d_n\}$. Na krigagem, o condicionamento para o evento global de dados d_n é aproximado por uma combinação linear dos n condicionantes de $S(\mathbf{u})$ em cada datum $s(u_\alpha)$, tomado um de cada vez. Tal característica impede que técnicas baseadas em variogramas modelem características não lineares ou de longo alcance. A

geoestatística de múltiplos pontos contorna esse problema ao fazer uso de uma *imagem-referência* (*training image* – TI) daquele depósito e estimar diretamente a exata distribuição de probabilidades condicionadas a d_n , como definido pela relação de Bayes:

$$Prob\{S(u) = s_k | d_n\} = \frac{Prob\{S(u) = s_k \text{ and } d_n\}}{Prob\{d_n\}}$$

Onde:

- $Prob\{d_n\}$ é inferida pelo escaneamento da *imagem-referência* e contando o número total $c(d_n)$ de réplicas de formação (*training replicates*) do evento de condicionamento de dados d_n (mesma configuração geométrica e mesmos valores de dados de d_n).
- De forma similar, $Prob\{S(u) = s_k \text{ and } d_n\}$ é inferida pela contagem do número $c_k(d_n)$ de réplicas de formação associadas ao valor $S(u)$ igual a s_k que foram encontradas entre todas as réplicas $c(d_n)$ anteriores.

A distribuição de probabilidades condicionada a d_n é então identificada para a proporção de fácies obtidas a partir dos valores centrais das d_n -réplicas da formação:

$$Prob\{S(u) = s_k | d_n\} = \frac{c_k(d_n)}{c(d_n)} \quad (1)$$

A grande contribuição de Strebelle em relação à proposta de Guardiano & Srivastava (1993) foi o uso da *árvore de busca*, o que diminuiu de forma expressiva o tempo de processamento, já que a *imagem-referência* é varrida (escaneada) uma única vez.

Primeiro, define-se uma janela de dados W , a qual tipicamente é um elipsoide com dimensões e direções de anisotropia que consideram características geométricas gerais dos padrões das fácies da formação. Apenas as amostras de dados originais e os nós previamente simulados que estejam dentro desta janela centrada em \mathbf{u} , serão considerados para condicionar a simulação em \mathbf{u} . Dado o padrão de dados τ_n , que cobre todos nós localizados nessa janela de busca, uma *árvore de busca* sequencialmente estruturada é construída armazenando os números $c(d_n)$ de ocorrências de qualquer evento de dados associado com τ_n , que pode ser realmente encontrado na *imagem-referência*, bem como os correspondentes números $c_k(d_n)$ de ocorrência de d_n associados ao valor central igual a s_k . Durante a simulação, a *imagem-*

referência não precisa ser escaneada novamente: as cpdf locais são obtidas diretamente da *árvore de busca*.

Nos trabalhos iniciais de Strebelle (2000a, 2000b, 2002), bem como em Remy *et al* (2006), pode-se obter discussões mais detalhadas sobre o funcionamento da *árvore de busca*.

Em grande detalhe, o algoritmo SNESIM proposto por Strebelle (2000b) procede da seguinte forma:

1. Define uma janela W de busca de dados, e constrói a *search tree* correspondente ao modelo de dados τ_n que abrange aquela vizinhança;
2. Atribuir os dados dos *hard data* para os nós mais próximos do grid. Define um caminho aleatório visitando apenas uma vez cada nó \mathbf{u} não amostrado;
3. Em cada local \mathbf{u} não amostrado, considere os dados de condicionamento realmente presentes no modelo τ_n centrado em \mathbf{u} . Seja $n' < n$ o número desses dados de condicionamento, e $d_{n'}$ o evento de dados correspondente. Obtém-se, a partir da *search tree*, a distribuição de probabilidade condicional para $d_{n'}$. Se nenhuma réplica de $d_{n'}$ foi armazenada na *árvore de busca*, ou seja, nenhuma réplica $d_{n'}$ pode ser encontrada na *imagem-referência*, então o ponto de referência mais distante é descartado, reduzindo o número de dados de condicionamento para $(n' - 1)$; as proporções condicionadas a este evento de dados menor $d_{n'-1}$ são novamente extraídas a partir da *árvore de busca*, e assim por diante. Se o número de dados cai para $n' = 1$, e nenhuma réplica de $d_{n'}$ foi encontrada, a probabilidade condicional $Prob \{S(\mathbf{u}) = s_k | d_n\}$ é substituída pela probabilidade marginal p_k da categoria k .
4. Extraí-se um valor simulado para o nó \mathbf{u} a partir da cpdf anterior. Este valor simulado é então adicionado aos s -dados que serão utilizados para condicionar a simulação em todos os demais nós subsequentes.
5. Move para o próximo nó ao longo do caminho aleatório e repete o terceiro e o quarto passo.

6. Repetir o procedimento até que todos os nós do grid sejam simulados. Uma imagem estocástica é então gerada. Reinicia-se o processo inicial a partir do passo 2 com um caminho aleatório diferente para gerar uma outra realização.

A partir do detalhamento apresentado acima, o processo de simulação implementado através do SNESIM permite obter uma imagem estocástica que representa o corpo de minério a partir da busca de padrões geométricos contidos em uma *imagem-referência*. Entretanto, uma única *árvore de busca* não é capaz de contemplar todos os possíveis padrões e características geológicas da TI, já que pode haver estruturas de maior ou menor escala e/ou formatos não lineares. Strebelle utilizou a abordagem de simulação por múltiplos *grids* (*multiple grid simulation*) apresentada por Tran (1994) para dar flexibilidade ao algoritmo durante a construção da(s) *árvore(s) de busca* e assim conseguir captar padrões mais complexos.

1.2.3. Simulação com Múltiplos Grids (MG)

O uso de múltiplos *grids* é um artifício para garantir a reprodução dos padrões de grande escala/dimensão, mas utilizando um número razoável de nós durante a simulação. A partir da janela de busca definida para a busca por padrões e armazenamento na *árvore de busca*, pode-se definir novos *grids* (múltiplos do *grid* original) para que o algoritmo busque por padrões em escalas maiores.

Cada *multigrid* gera um novo *grid* com um subconjunto de nós (células/blocos) do *grid* original. Em cada MG se faz uma subamostragem do *grid* anterior, em um fator de 2 ao longo de cada direção. Considerando que o *grid* original G^1 tem um número j de nós, o MG imediatamente posterior será composto por nós com o dobro do espaçamento entre si, ou seja, haverá menos blocos compondo o G^2 . Por exemplo: se originalmente a distância entre nós é de 10 metros, no primeiro MG ela aumenta para 20 m; no segundo, será 40 m; no terceiro será de 80 m, e assim por diante.

Embora o número de nós de cada MG diminua em relação ao *grid* original, as elipses de busca dos MG continuam com o mesmo número de nós da elipse original, o que implica em um aumento de suas dimensões, permitindo a captura de estruturas de maior escala sem aumentar o tamanho da *árvore de busca*. Em cada MG, os dados primários são realocados para o nó mais próximo antes de iniciar a varredura do *grid*. A Figura 1.1 ilustra, de forma

aproximada, a configuração de nós de grid para os elipsóides de busca de três MG consecutivos, considerando um *grid* qualquer.

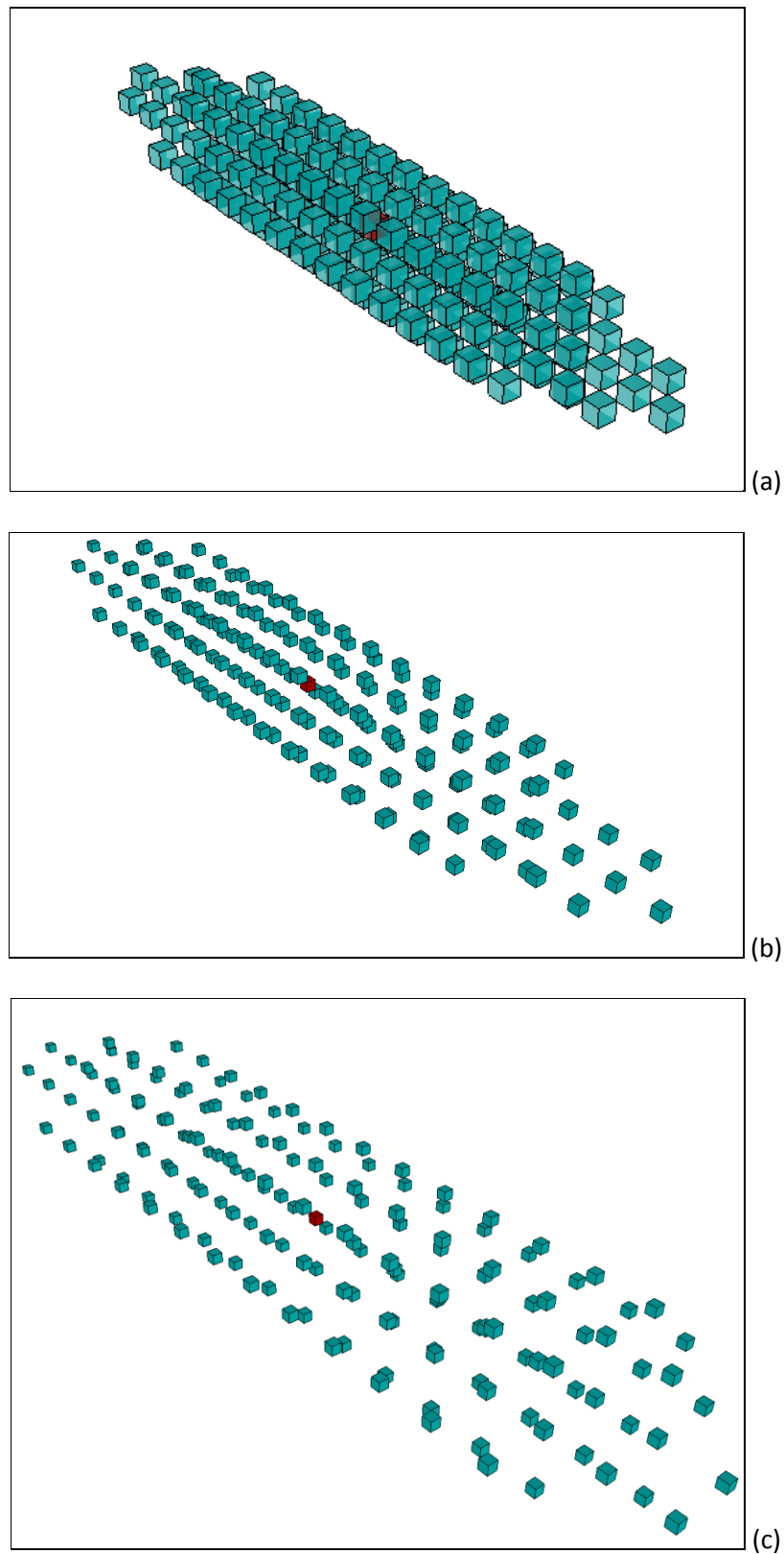


Figura 1.1. Representação dos nós considerados em cada grid múltiplo, visando captar padrões de larga escala ao redor do nó central em vermelho: (a) nós distantes 20 m entre si; (b) distâncias de 40 m entre cada nó e (c) distância de 80 m entre cada nó.

Definido o número total de MG desejados, o algoritmo executa a varredura do *grid* de maior escala; armazena-se os padrões na árvore de busca desse MG; simula o valor dos nós para essa configuração de *grid* e elipse de busca e congela os valores simulados. Em seguida, se readicionam os nós do MG imediatamente inferior e se inicia a varredura para este *grid* menor usando uma janela de busca menor; nova árvore de busca e nova simulação; mais alguns valores são simulados e congelados; nova re-adição de nós considerando o MG imediatamente inferior e assim se procede até que todos os múltiplos *grids* tenham sido varridos e os nós simulados. Termina-se a primeira realização da simulação e então o processo é reiniciado.

1.2.4. Fator Servosystem

Além do uso de múltiplos grids para garantir um resultado satisfatório, outro importante parâmetro é o fator *servosystem* (*servosystem factor*): este parâmetro de simulação permite corrigir/alterar a proporção das variáveis de acordo com a liberdade dada. Tenta-se aproximar as proporções simuladas às proporções marginais informadas ou então à proporção dos HD, ou mesmo ajustar à proporção da TI. Dessa forma, o parâmetro permite certa flexibilidade na reprodução das estatísticas presentes nos histogramas dos dados, permitindo a geração de uma variedade maior de resultados, se for esse o desejo do modelador.

Embora haja grande variedade de parâmetros e utilidades para se trabalhar com a simulação de múltiplos pontos na versão do SNESIM implementada no **SGeMS**, nem todos esses parâmetros serão detalhados neste trabalho, apenas os essenciais para a execução do algoritmo. Maiores detalhes podem ser obtidos nas páginas 169 a 191, na seção de algoritmos de múltiplos pontos do livro-guia de uso da **versão 2.1 do SGeMS** (Remy et al., 2009).

A partir do trabalho pioneiro de Strebelle, uma serie de estudos vem sendo publicados mostrando aplicações, limitações e inovações da MPS. Abaixo, são listados alguns desses trabalhos, ordenados por ano de publicação:

2000 – Sebastien Strebelle (2000a, 2000b) defende sua Tese de Doutorado, e divulga os resultados do desenvolvendo o SNESIM, mostrando sua aplicação para a modelagem de reservatórios de óleo e gás;

2001 – Jef Caers (2001) propõe o uso de ferramentas-padrão de reconhecimento, como as redes neurais, para se “emprestar” estruturas geológicas de imagens-referência (*training*

images) na forma de estatísticas de múltiplos pontos (análise da imagem, extração de padrões e reconhecimento de padrões);

2002 – Deutsch (2002) publica livro tratando da modelagem geoestatística de reservatórios de óleo e gás; Sinclair & Blackwell (2002) publicam o livro em que evidenciam o uso da geoestatística para consolidar a Estimativa de Inventários Minerais; Strebelle publica os resultados da sua Tese em artigo da *Mathematical Geology*;

2003 – Krishnan & Journel (2003) publicam artigo na *Mathematical Geology* mostrando recentes desenvolvimentos na geoestatística, comparando medidas de conectividade espacial (variogramas e múltiplos pontos);

2004 – Neste ano Journel & Kyriakidis (2004) publicam livro mostrando a aplicação da simulação geoestatística como ferramenta para avaliação de reservas minerais; No mesmo ano, ocorre o Congresso Internacional de Geoestatística em Banff, Canadá; Ortiz & Deutsch (2004) publicam trabalho no periódico *Mathematical Geology* falando da simulação de indicadores considerando estatísticas de múltiplos pontos;

2005 – Começam a ser publicados diversos trabalhos apresentados durante o Congresso de Geoestatística de 2004: Journel (2005) discute o advento da MPS; Liu *et al.*, (2005) apresentam um fluxograma para aplicação da MPS; Harding *et al.* (2005), descrevem de forma sucinta o que é uma *imagem-referência* e apresentam um fluxograma operacional e alguns avanços do uso da técnica para modelagem de fácies deposicionais em depósitos de óleo; Okabe & Blunt (2005) constroem um mapa 3D de porosidade utilizando MPS; Maharaja (2005) aplica a MPS para gerar modelos simulados do delta de um rio; Strebelle & Zhang (2005) apresentam modelos não estacionários de MPS; Arpat & Caers (2005) apresentam um novo algoritmo de MPS para reprodução de padrões; Strebelle & Remy (2005) discutem o pós-processamento de modelos de múltiplos pontos para melhorar a reprodução de padrões;

2006 – Boogaart (2006) discute algumas teorias sobre MPS; Journel & Zhang (2006) falam da necessidade de se utilizar um modelo prévio de múltiplos pontos; Liu (2006) apresenta aplicação prática do algoritmo SNESIM para fazer simulação geoestatística;

2007 – Ortiz *et. al* (2007) apresentam um sistema interativo de escalonamento da TI para adequar suas estatísticas a proporções univariadas de fácies; Souza (2007), compara

resultados da modelagem de corpos mineralizados utilizando métodos tradicionais e simulação geoestatística;

2008 – Boucher & Stright (2008), apresentam um novo algoritmo que redimensiona a TI para que ela fique no mesmo suporte de outros dados utilizados na simulação com o SNESIM. Os autores também introduzem o conceito de particionamento da *árvore de busca* (*search tree partitioning*); Boisvert *et. al* (2008), apresentaram uma metodologia para construção de TIs em depósitos de veios;

2009 – Huysmans & Dassargues (2009) aplica o conceito de MPS para modelar o fluxo subterrâneo;

2010 – neste ano acontece o congresso internacional MININ 2010, no Chile. Parra & Ortiz (2010) apresentam a MPS condicional unilateral para variáveis categóricas; Hurtado & Ortiz (2010) fazem a quantificação de incertezas na tonelagem de recursos, considerando MPS;

2011 – Hajizadeh *et. al* (2011) propuseram um algoritmo MPS para reconstruir modelos 3D de espaço poroso a partir de imagens 2D.

Os trabalhos listados acima, embora não abramjam a totalidade dos trabalhos relacionados a MPS, mostram a rápida aceitação da técnica por especialistas do setor. No entanto, nota-se que as aplicações, na maioria das vezes, estão focadas a estudos teóricos, com banco de dados de cunho didático, e quase sempre voltadas à indústria do petróleo. Não existem, até onde conseguimos apurar, trabalhos voltados à aplicação da técnica de MPS em depósitos minerais distintos do petróleo, ou mesmo trabalhos que utilizem bancos de dados reais, daí a necessidade de estudos que apliquem a MPS para modelar o envelope mineralizado de depósitos minerais reais.

1.3. Organização da Dissertação

Esta dissertação está dividida em capítulos e ao final são apresentados também alguns dados através de Anexos. Abaixo, de forma sucinta, é apresentado o conteúdo de cada capítulo:

O Capítulo 1, O presente capítulo faz uma breve contextualização do problema e justificativa para o trabalho; em seguida, são apresentados as metas e objetivos do trabalho; finalmente, é feita uma breve revisão bibliográfica (estado da arte) sobre a utilização da simulação geoestatística na modelagem de geometrias 3D para em seguida focar no uso da técnica de simulação geoestatística de múltiplos pontos, detalhando o algoritmo desenvolvido por Strebelle;

O Capítulo 2 apresenta a parte experimental do trabalho. Neste capítulo, o banco de dados e o modelo geológico de referência são apresentados. Também é detalhada a metodologia desenvolvida para o trabalho, desde o preparo e verificação dos dados, *grids* para as simulações, formas de obtenção da *imagem-referência (training image – TI)* e geração das zonas de incerteza (ZI).

O Capítulo 3 apresenta e discute os resultados obtidos no trabalho, identificando os benefícios de se gerar modelos utilizando MPS, entre eles o menor gasto de tempo, possibilidade de se avaliar a incerteza da modelagem, estudos de variação nos recursos disponíveis, além de algumas comparações com o MGR. Neste capítulo também são salientadas algumas dificuldades para aplicação da técnica, o esforço computacional exigido.

O Capítulo 4 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros baseados no tema desta Dissertação.

Visando auxiliar na difusão do tema abordado e disseminar o conhecimento adquirido em relação à técnica aplicada, no último tópico do trabalho, após as referências, são disponibilizados alguns *scripts* em linguagem Python utilizados para automatizar os procedimentos, listados abaixo:

- ✓ *Script Python* para importar as seções verticais para o **SGeMS** e copiar o valor dos pontos de cada arquivo importado para o grid de simulação;

- ✓ *Script* para criar as propriedades com 20 e 10 seções verticais apenas (a de 40 seções já é o *default*)
- ✓ *Script* para criar as *uncertainty zones* em cada grupo de seções verticais, copiando os resultados para os grids laterais;
- ✓ *Script* para criar arquivos de hard data composto pelos furos de sonda e pontos das seções verticais que caem fora das *uncertainty zones* (criar e exportar a informação para arquivos com valores separados por vírgulas (*comma separated value – csv*), em seguida importar o arquivo na forma de *pointset*);
- ✓ *Script* para gerar a TI utilizada;
- ✓ *Script* para simulação e *postsim* (*snesim* rodando separado em cada grid lateral e o resultado é copiado para o grid maior, em seguida, os dados do modelo de referencia são copiados para os pontos não simulados e se faz o *postsim*);
- ✓ *Script* para gerar os *thresholds* das curvas de classificação de recursos.

Capítulo 2

Experimental

O depósito mineral objeto de estudo neste trabalho trata-se de um depósito de minério de ferro localizado no Quadrilátero Ferrífero (MG), na borda oeste da Sinclinal Moeda. Nesta região, os depósitos são compostos basicamente por formações ferríferas bandadas (BIFs – *Banded Iron Formations*) de itabiritos enriquecidos, oxidados, metamorfizados e heterogeneamente deformados (MBR, 2005). O itabirito quartizítico é a rocha predominante nesta região. O ferro está presente, principalmente, na forma de hematita, magnetita e martita.

A geometria de depósito é controlada pela presença de dobras de segunda ordem da Sinclinal Moeda, com direção NE-SW. Falhas transversas à direção de maior continuidade demarcam os diferentes corpos que compõem o complexo mineral na região estudada (Figura 2.1).

Embora a empresa que forneceu os dados tenha identificado mais de 30 tipologias de minério, para este trabalho os elementos estruturais foram simplificados, como será detalhado mais adiante.

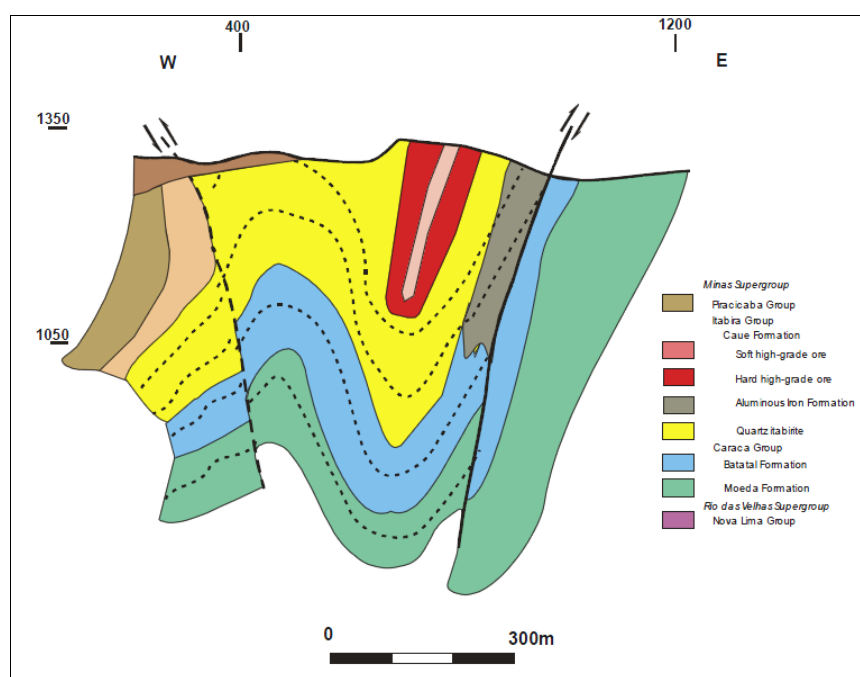


Figura 2.1. Seção vertical esquemática do depósito estudado (fonte: MBR, 2005).

2.1. Recursos computacionais.

Como o processo de construção da *árvore de busca* do algoritmo SNESIM armazena a estrutura de dados na memória RAM, quanto mais nós de grid existirem no grid, mais memória e tempo serão necessários para construir a estrutura dinâmica de dados e efetivamente simular. Inicialmente se optou por trabalhar com um grid de simulação contendo mais de 150 milhões de blocos de dimensão 2x2x2 metros, por isso os testes iniciais exigiram máquinas muito potentes, alcançando 24 GB de RAM e processador com 8 núcleos (Intel® Core i7 com 3.90 GHz), executando o **SGeMS** em sistema operacional **Windows® 7** ou **Ubuntu® 10.04**, ambos em plataforma 64 bits. Ainda assim, o tempo de execução das simulações e o tamanho final dos arquivos eram proibitivos, exigindo que se buscassem novas alternativas.

Dentre as ações para solucionar tal problema, optou-se por utilizar um grid de simulação com blocos de tamanho mais próximo ao que se tem de fato na mina, isto é, 10x10x10 metros, totalizando cerca de 1,2 milhões de blocos. Essas mudanças permitiram realizar o trabalho em máquinas com preços e configurações mais acessíveis, e não um supercomputador. Todos os resultados apresentados aqui foram gerados em um computador portátil (*notebook*) com 6 GB de memória RAM DDR3 1066 MHz, Processador Intel® Core i5-2410M 2.30 GHz (velocidade turbo de 2.90 GHz), com 4 *Threads*, 3 MB de *Smart Cache*; sistema operacional **Windows® 7 Professional 64 bits**. As simulações foram executadas em versão 64 bits do **SGeMS** desenvolvida para **Windows**.

2.2. Banco de Dados, Seções Verticais e Modelo Geológico de Referência

O banco de dados (BD) utilizado contém dados de descrição tipológica e análise química de 2176 amostras contidas em 195 furos de sondagem perfurados entre 1975 e 2004. Ele contém os seguintes campos:

- Identificação do Furo;
- Número da Amostra;
- Ano de Coleta;
- Tipo de Coleta;

- Coordenadas locais do centro de cada amostra nas direções X, Y e Z;
- Tipologia a que pertence cada amostra (mais de 30 tipos, entre itabiritos, hematitas e materiais estéreis);
- Análise Química em três frações granulométricas para os elementos químicos Fe, Al, Mn, P, e Si, e Perda por Calcinação (PPC) em cada fração.

Além do arquivo contendo dados *collar*, *assay* e *geology*, foram fornecidos 40 arquivos do tipo *string* oriundos do programa **Datamine Studio**[®]. Tais arquivos se referem à interpretação geológica da Mina do Sapecado, representada em seções verticais (SV) espaçadas regularmente de 50 metros. Cada seção é composta por diversas linhas que delimitam uma ou mais tipologias presentes. A área está referenciada em coordenadas locais e as seções verticais interpretadas estão localizadas entre as posições -5550 metros e -7500 metros ao longo do eixo X.

O terceiro conjunto de dados fornecido trata-se do modelo geológico da mina estudada. Este arquivo é um modelo de blocos do ano de 2005 que contém dados de geologia e estimativa de teores em um total de aproximadamente 695 mil blocos de tamanho 10x10x10 metros. Tal modelo foi referendado por auditores externos e utilizado pela mineradora para o planejamento de lavra e avaliação de recursos e reservas minerais. Ou seja, trata-se de um modelo geológico válido, construído de forma tradicional, e que será utilizado como modelo geológico de referência (MGR) para comparação e discussão dos resultados quando possível.

Como já citado anteriormente, este trabalho visa gerar modelos geológicos tridimensionais. Mais especificamente, visa definir a região do provável contato entre minério e estéril, isto é, modelar o envelope mineralizado. Desta forma, as informações de análises químicas das amostras (teores) não foram utilizadas. Apenas os dados de coordenadas, identificação de furos e descrição das tipologias de minério foram selecionados e armazenados em um novo arquivo. Um total de 17 amostras que não continham descrição das litologias foram removidas do BD.

Os estudos deste trabalho foram conduzidos aplicando a implementação do algoritmo SNESIM disponível no programa *Stanford Geostatistical Modeling Software* – **SGeMS** (versão 2.5 beta). Para que pudesse ser importado no **SGeMS**, o BD sofreu uma adequação, onde os dados alfanuméricos de descrição litológica foram transformados em códigos

numéricos. As diversas tipologias foram rearranjadas em dois grandes grupos: minério (composto por itabiritos e hematitas, receberam o indicador numérico = 0) e estéril (indicador numérico = 1), como pode-se observar no mapa de localização dos furos (Figura 2.2).

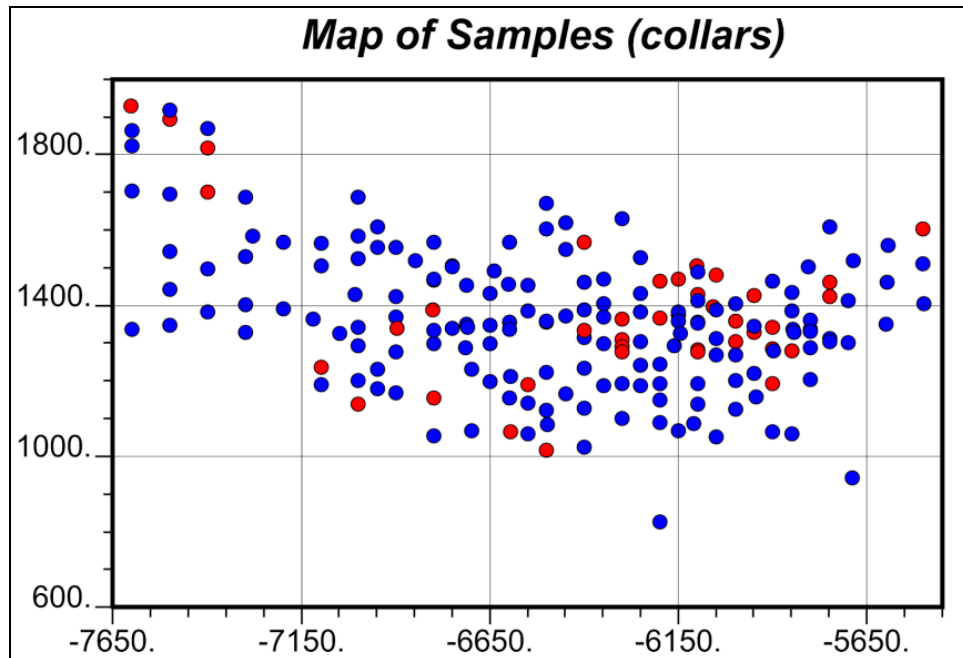


Figura 2.2. Mapa de localização das amostras em seção paralela ao plano horizontal. Em vermelho, amostras de estéril. Em azul, minério (itabiritos e hematitas).

O mesmo aconteceu com as seções verticais disponibilizadas para o estudo. Ainda dentro do **Datamine Studio**[®] (versão 3.20), elas foram ajustadas para agrupar itabiritos e hematitas no grupo minério e os diversos materiais estéreis na categoria estéril. Esse ajuste permitiu gerar, por extrusão, sólidos ao redor do centro de cada seção, totalizando 40 pequenos corpos com espessura de 10 metros (dimensão ao longo do eixo X).

A partir dos sólidos gerados por extrusão, fez-se um modelo de blocos para armazenar as informações de cada seção. Os blocos também tem tamanho 10x10x10 metros. Ao final do processo, tem-se 40 pequenos modelos de blocos, um para cada seção vertical, cada um deles com espessura total de 1 bloco e centro geométrico dos blocos coincidindo com a coordenada X da seção. Estes modelos foram importados no **SGeMS** (Figura 2.3) na forma de arquivos de pontos (*pointset*) para que pudessem ser utilizados no condicionamento das simulações.

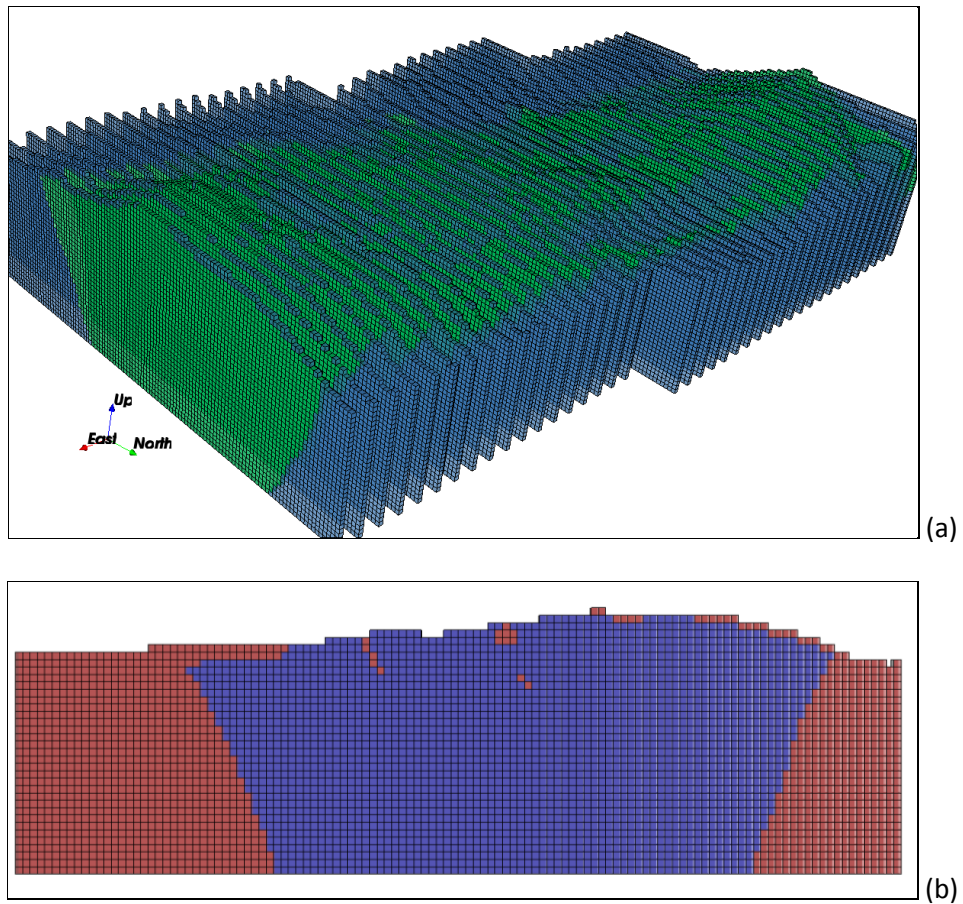


Figura 2.3. Distribuição espacial das seções verticais utilizadas para condicionar as simulações (a). Seção vertical típica (b) contendo minério (azul) e estéril (vermelho), com blocos de tamanho 10x10 metros gerados por extrusão.

O modelo de referência, MGR, também sofreu os mesmos ajustes efetuados nas SV e BD, ou seja, as diversas tipologias armazenadas foram agrupadas em minério (indicador 0) e estéril (indicador 1), como mostra a Figura 2.4. As informações de estimativa de teores e densidade não foram utilizadas.

Os trabalhos de verificação e preparo do banco de dados fornecido foram executados no **Microsoft Excel 2010**[®] e também no **SGeMS**. Já, as seções verticais e o modelo de referência foram, inicialmente, ajustados no **Datamine Studio**[®] e então importados no **SGeMS**.

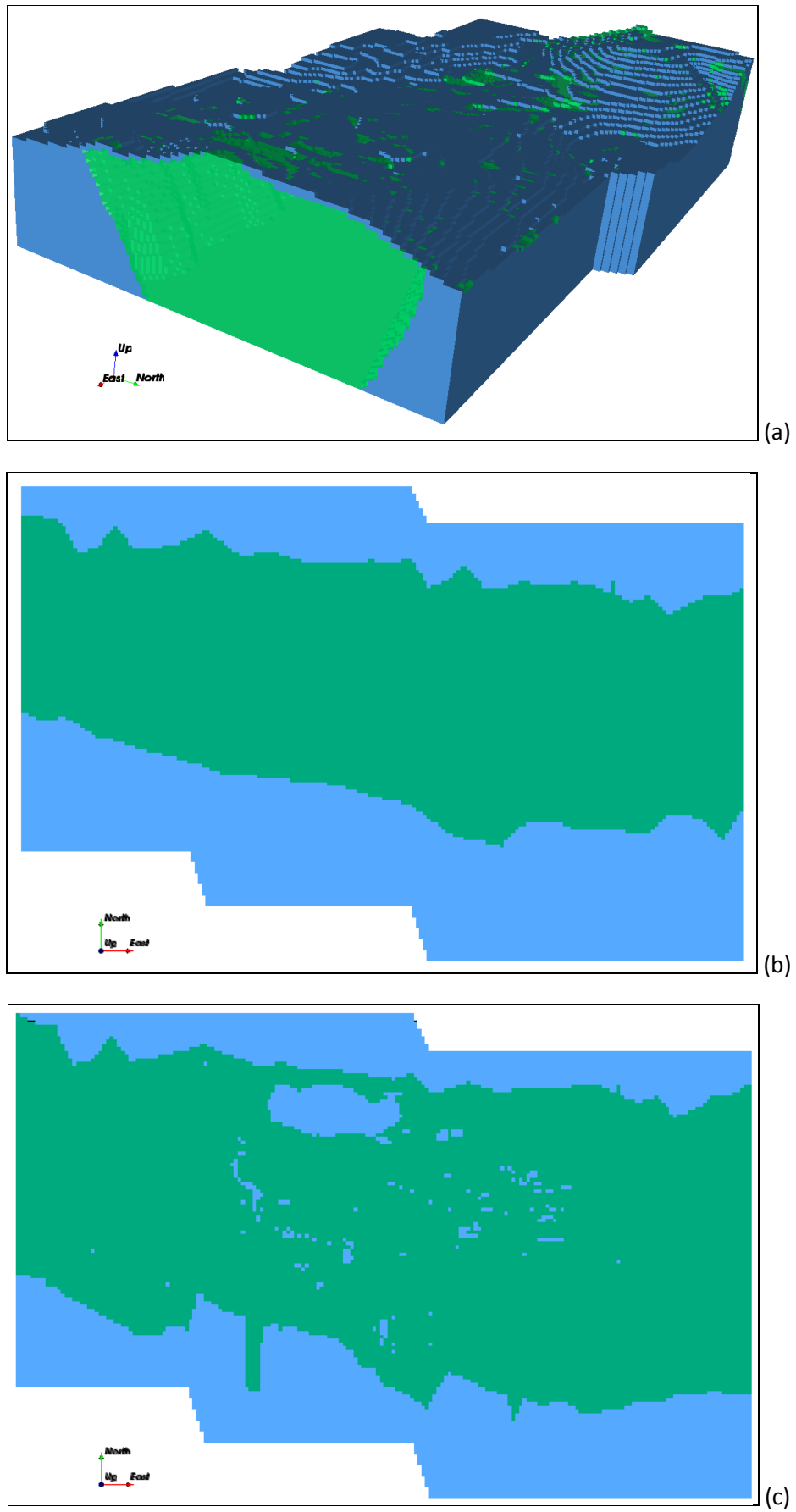


Figura 2.4. Modelo geológico de referência. Vista isométrica (a). Duas seções horizontais em dois níveis de Z: seção=1115 (b) e Z=1335 (c). Estéril está representado em azul claro e o minério em verde.

Como se verifica no modelo de blocos mostrado acima, o minério é, simplificadaamente, um corpo maciço ligeiramente curvo, quase alinhado com o eixo X (*East*), cuja largura é praticamente constante. Ao longo do plano YZ, pode-se dizer que este corpo maciço tem a forma de um trapézio, com a base maior recortada pela superfície do solo, acrescido de algumas inserções de rocha estéril.

A abordagem adotada aqui assume que, em um modelo de corpo de minério construído de forma tradicional, a incerteza está na definição do contato entre as litologias. Especificamente para este estudo de caso, trata-se do contato entre minério e estéril, sem diferenciações entre tipologias.

Desta forma, para modelar o provável envelope mineralizado e, conseqüentemente, gerar o modelo 3D do corpo de minério, torna-se necessário modelar apenas o contato entre minério e estéril, não sendo necessário modelar a forma de todo o corpo de minério.

2.3. Grids de Simulação

Completada a etapa de adequação dos arquivos necessários ao trabalho, procedeu-se às etapas de preparo dos cenários de simulação.

A fim de permitir os trabalhos de modelagem do envelope mineralizado foi criado um *grid* para executar as simulações, nomeado “*large_coarse_grid*”. Considerando as características do depósito, este *grid* foi segmentado em dois outros *grids* menores paralelos ao longo do eixo X, chamados “*left_coarse_grid*” e “*right_coarse_grid*”, os quais foram utilizados para simular separadamente os contatos do depósito. Ao final do processo, os resultados de simulação em cada *grid* foram mesclados e copiados para o *grid* inicial, de forma a reconstruir a provável geometria do depósito.

A Tabela 2.1 mostra os principais parâmetros para a construção dos *grids*. É importante ressaltar que na versão utilizada o **SGeMS** solicita a coordenada do centro geométrico da célula mais à esquerda do *grid*, diferente do **Datamine Studio**®, que solicita a coordenada do vértice inferior esquerdo do *grid*.

Tabela 2.1. Parâmetros para a construção dos grids de simulação no **SGeMS**.

	Dimensão do bloco X / Y / Z (m)	O _x / O _y / O _z	nº de Blocos X / Y / Z
coarse_large_grid	10 / 10 / 10	-7610 / 595 / 1095	211 / 140 / 43
left_coarse_grid	10 / 10 / 10	-7610 / 805 / 1095	211 / 56 / 43
right_coarse_grid	10 / 10 / 10	-7610 / 1365 / 1095	211 / 56 / 43

2.4. Gerando a TI (*training image* – imagem-referência)

De acordo com Harding et al. (2005), desde que a *imagem-referência* seja suficientemente rica, com um bom conhecimento da geologia representado corretamente, uma única TI pode ser utilizada e múltiplos cenários de probabilidade de facies podem ser incorporados a ela. Considerando este argumento, apenas uma TI foi utilizada neste trabalho.

A TI foi gerada utilizando um algoritmo gerador de TIs, o Tetris, ferramenta presente em uma das versões beta do **SGeMS** disponibilizada para os trabalhos desta dissertação. Trata-se de um algoritmo de simulação baseado em objetos. O Tetris simula a interação entre formas geométricas predefinidas com o intuito de criar uma imagem que seja representativa do depósito a ser estudado. Informalmente, pode-se dizer que, a partir de informações sobre a forma geométrica, dimensão e proporção de ocorrência de cada forma, o algoritmo constrói um pseudo-depósito tridimensional da área.

A TI utilizada tem a forma senoidal ao longo do eixo X e um meio círculo ao longo do plano YZ, visando imitar a forma geral do corpo de minério do depósito estudado. Esta TI foi construída no mesmo suporte do grid de simulação, isto é, com blocos de tamanho 10x10x10m e representa características geológicas gerais do depósito a ser reproduzido. É importante ressaltar que a TI não precisa estar georreferenciada às coordenadas do depósito e pode, inclusive, ter dimensões diferentes dele, no entanto, a ela deve ser construída no mesmo suporte do depósito. Na Figura 2.5, são apresentados os parâmetros do algoritmo utilizados para gerar a TI utilizada neste trabalho. Por conveniência (maior praticidade e fácil visualização), a TI foi gerada no mesmo *grid* onde foram executadas as simulações do contato minério/estéril. Assim, foi possível ajustar a parte superior da TI para que ela tivesse a mesma forma da topografia do depósito e também os mesmos limites laterais do MGR (Figura 2.6).

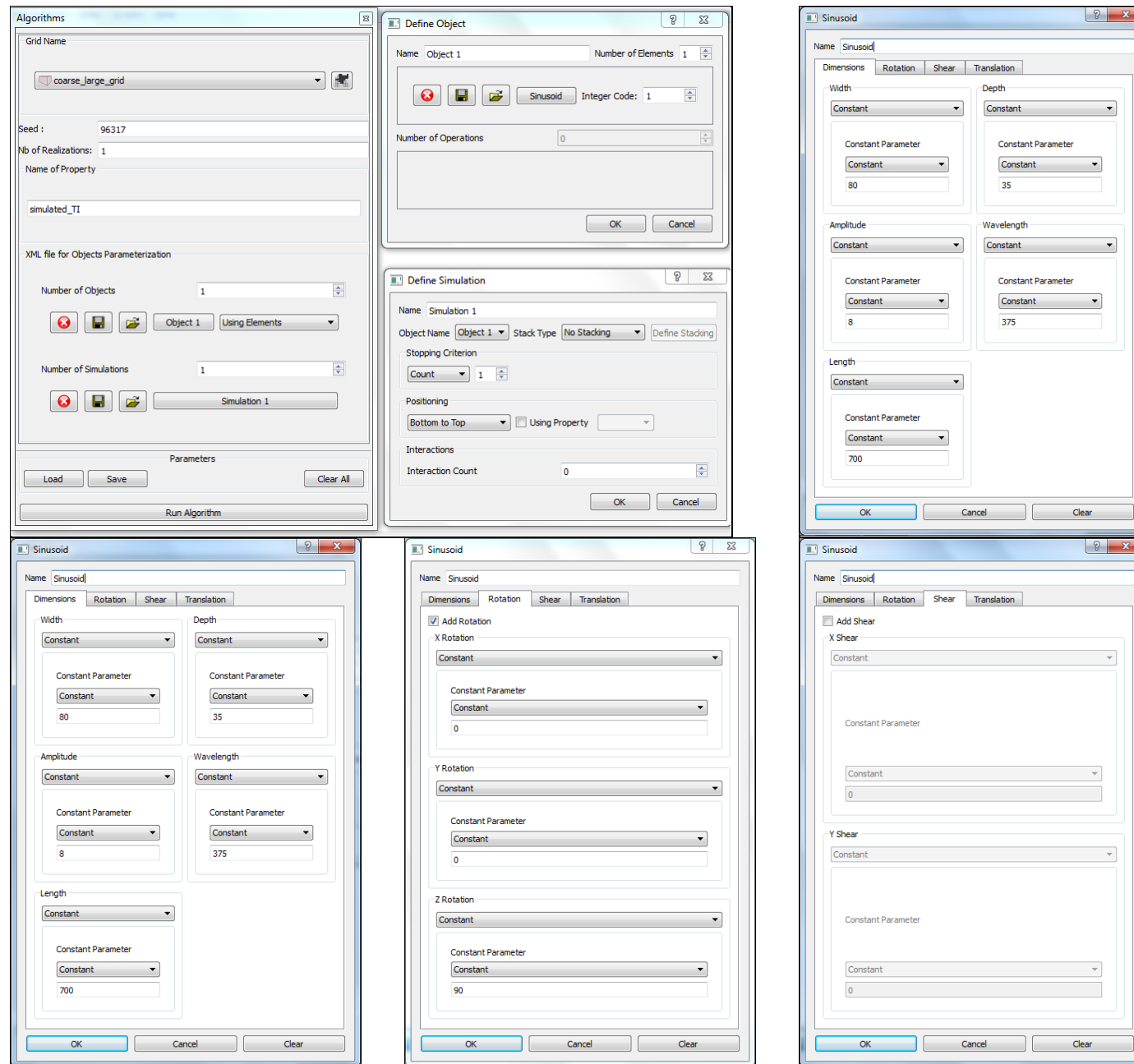


Figura 2.5. Menus e abas com os parâmetros do algoritmo Tetris, utilizado para gerar a *imagem-referência* (TI).

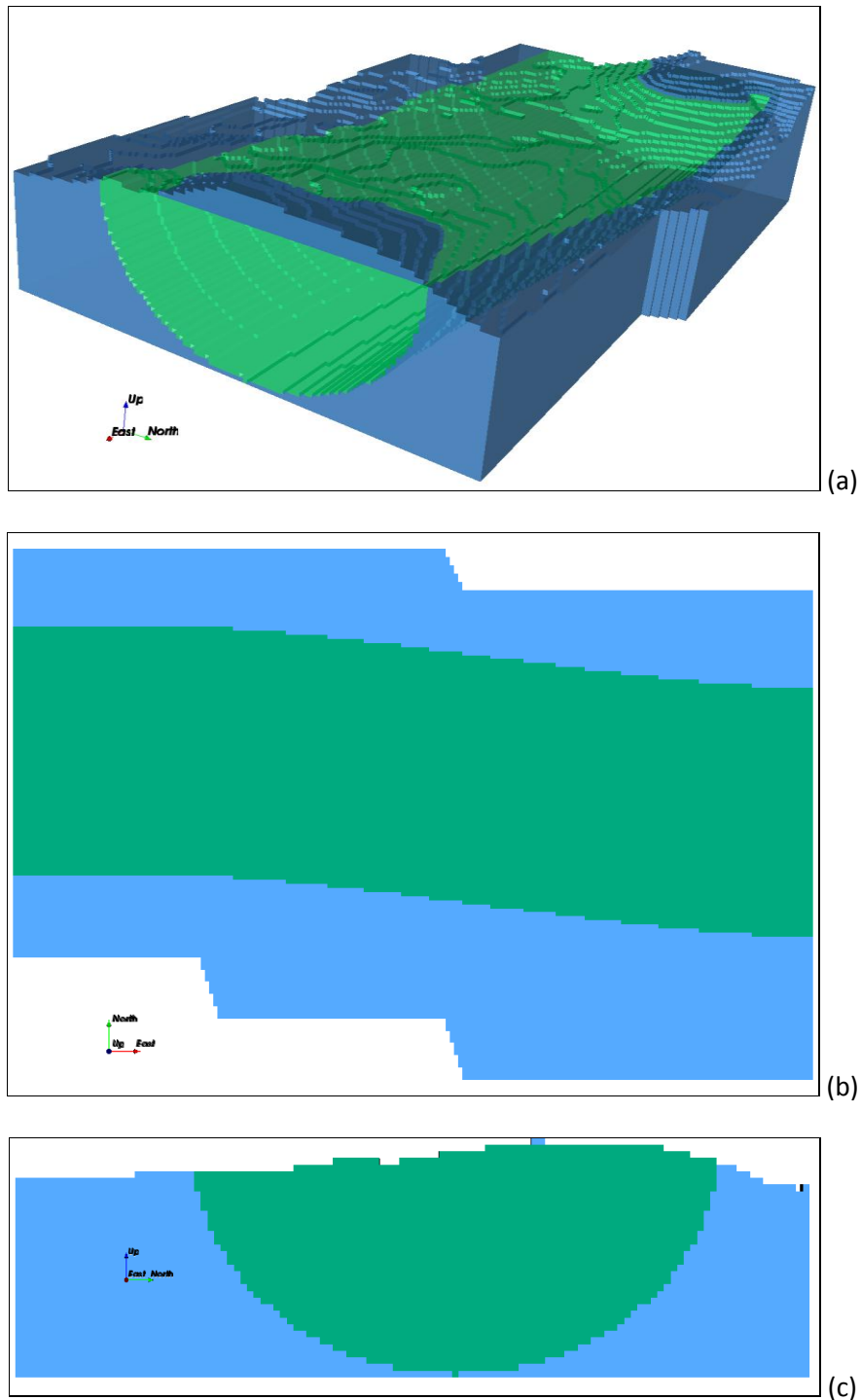


Figura 2.6. Configuração definitiva da *Imagem-referência* utilizada para as simulações. (a) TI 3D; (b) seção ao longo do eixo Z e (c) seção perpendicular ao eixo X.

A TI gerada tem uma evidente repetição de padrões. Trata-se de uma grande massa contínua de minério na parte central, circundada por grandes massas contínuas de estéril. Posto isso, não há necessidade de utilizar toda a TI, pode-se selecionar uma parte menor de todo o corpo. Fez-se essa seleção isolando uma parte da TI representativa do contato minério/estéril do lado esquerdo e outra para o contato do lado direito da seção no plano YZ.

Essa decisão tornou o processo de simulação mais fácil e mais rápido, uma vez que o algoritmo vai precisar varrer (*scan*) um volume menor para obter as informações necessárias à construção da *árvore de busca* (Figura 2.7).

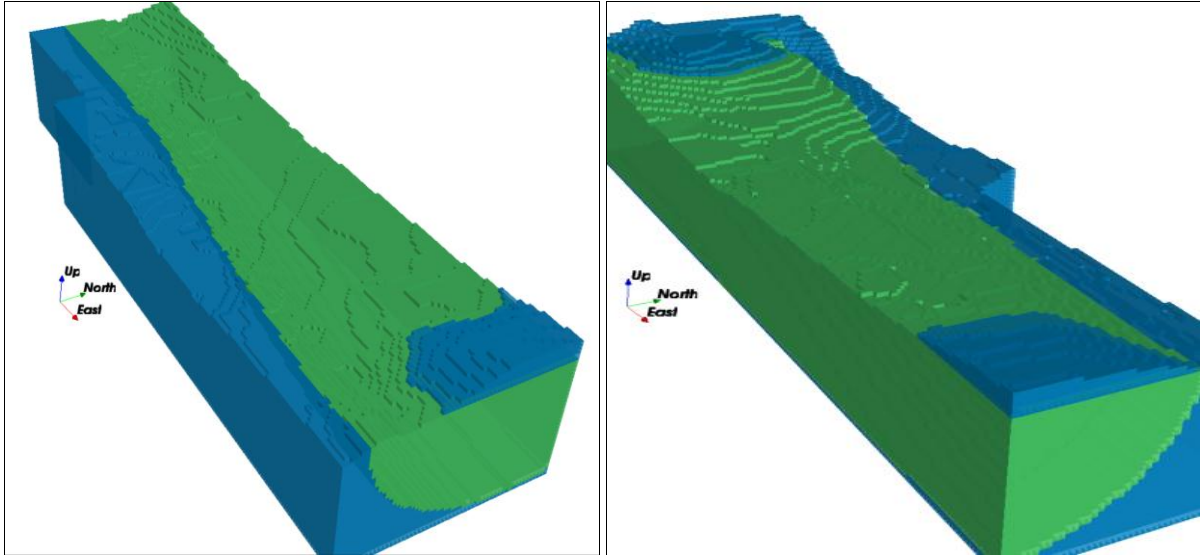


Figura 2.7. Imagem mostrando a *imagem-referência* (TI) utilizada para as simulações em cada grid lateral, isto é, para o setor esquerdo e setor direito.

2.5. Gerando as Zonas de Incerteza (Uncertainty Zones) (ZI) e Simulando

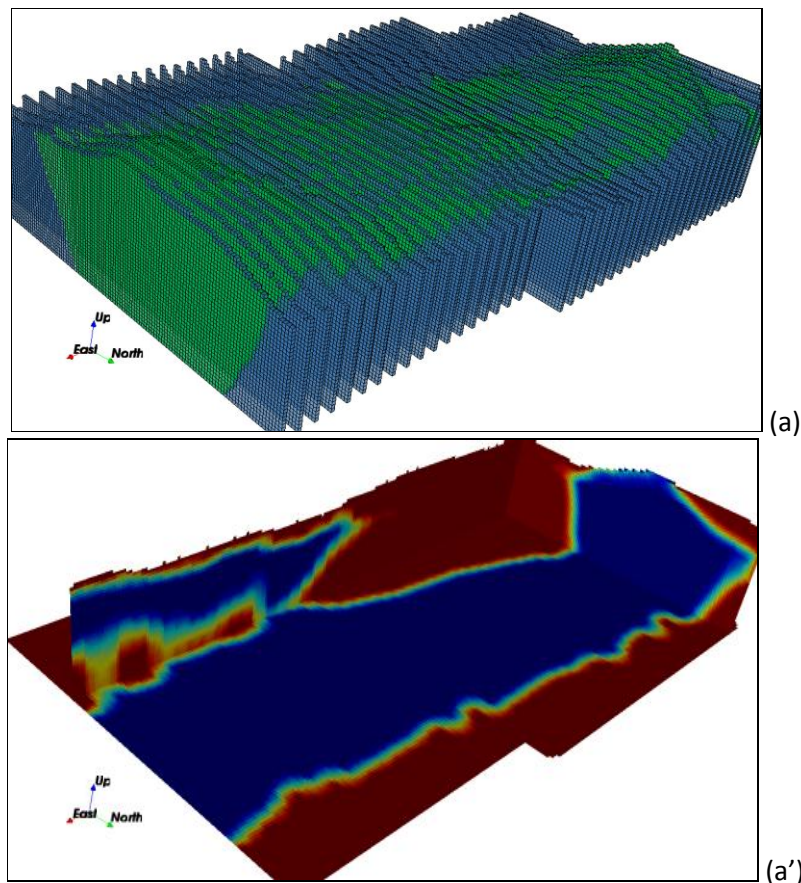
Como este trabalho visou modelar o contato minério/estéril, foi necessário delimitar a região da provável localização deste contato. Assim, a primeira resposta que se procura é para a seguinte pergunta: qual o tamanho (volume, dimensões) da região onde está o provável contato minério/estéril? Para respondê-la assumiu-se inicialmente que:

- i. A porção central (minério) e as bordas (estéril) do modelo geológico tradicional estão corretas, e não necessitam ser modeladas/avaliadas;
- ii. A partir do contato minério/estéril em cada lado do “trapézio” do MGR e SV, uma faixa inicial de 50 m foi arbitrariamente definida como zona de incerteza.

A simulação dos blocos de minério e estéril foi restrita às porções do depósito consideradas incertas, isto é, ao longo da zona do contato minério/estéril. Essa zona de incerteza (ZI – *uncertainty zone*, em inglês) foi determinada pela execução do algoritmo de janelas móveis (*moving window*) entre seções verticais consecutivas. Em cada ponto visitado, se a janela continha tanto blocos de minério quanto estéril, os pixels (blocos/células) dentro da janela eram definidos como incertos e posteriormente simulados. Quando os pixels das seções

eram todos minério (ou estéril), então os pixels da janela também eram considerados minério (ou estéril) e não precisavam ser simulados.

Visando checar a sensibilidade do método, três conjuntos diferentes de seções verticais foram utilizados: 40, 20 e 10 seções, regularmente espaçadas em 50, 100 e 200 m, respectivamente (Figura 2.8). É importante ressaltar que cada conjunto de SV gerou um diferente domínio de simulação. A janela de busca utilizada no algoritmo foi um elipsoide com *azimute* 90° , *rake* e *dip* 0° , 30 m de comprimento para o eixo menor e 50 m para o intermediário, formando uma elipse, e eixo maior com tamanho variável, de acordo com o número de SV disponíveis: 60 m para seções regularmente espaçadas em 50 m; 110 m para seções espaçadas em 100 m e 210 m para seções espaçadas em 200 metros.



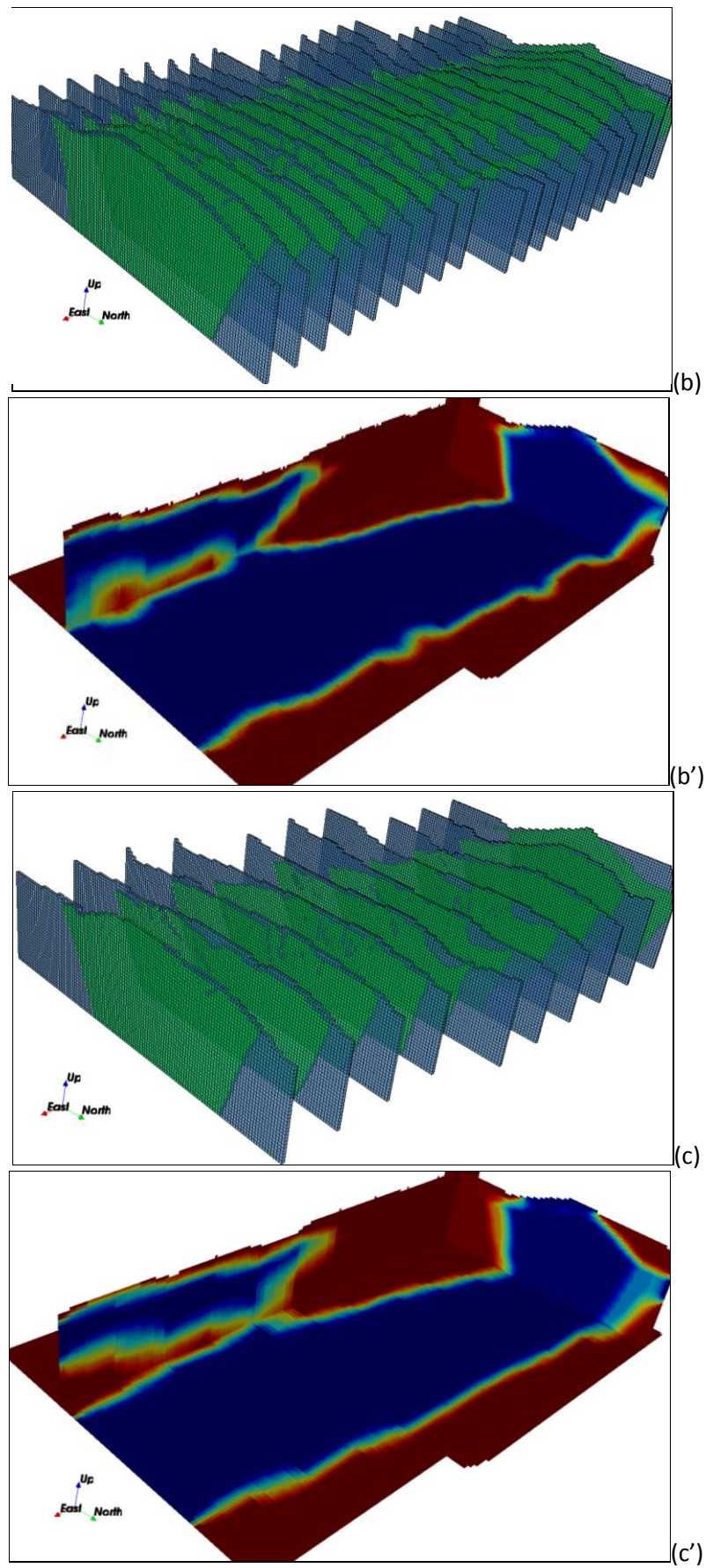


Figura 2.8. As imagens identificadas com (a), (b) e (c) referen-se às SV. As zonas de incerteza – ZI criadas a partir de cada número específico de seções verticais disponíveis estão identificadas por (a'), (b'), e (c').

Os volumes resultantes que caracterizam as zonas de incerteza do contato minério/estéril são mostrados em perspectivas na Figura 2.9. Estes três cenários permitem também investigar o efeito causado pelo aumento da quantidade de informação disponível para condicionar os modelos simulados.

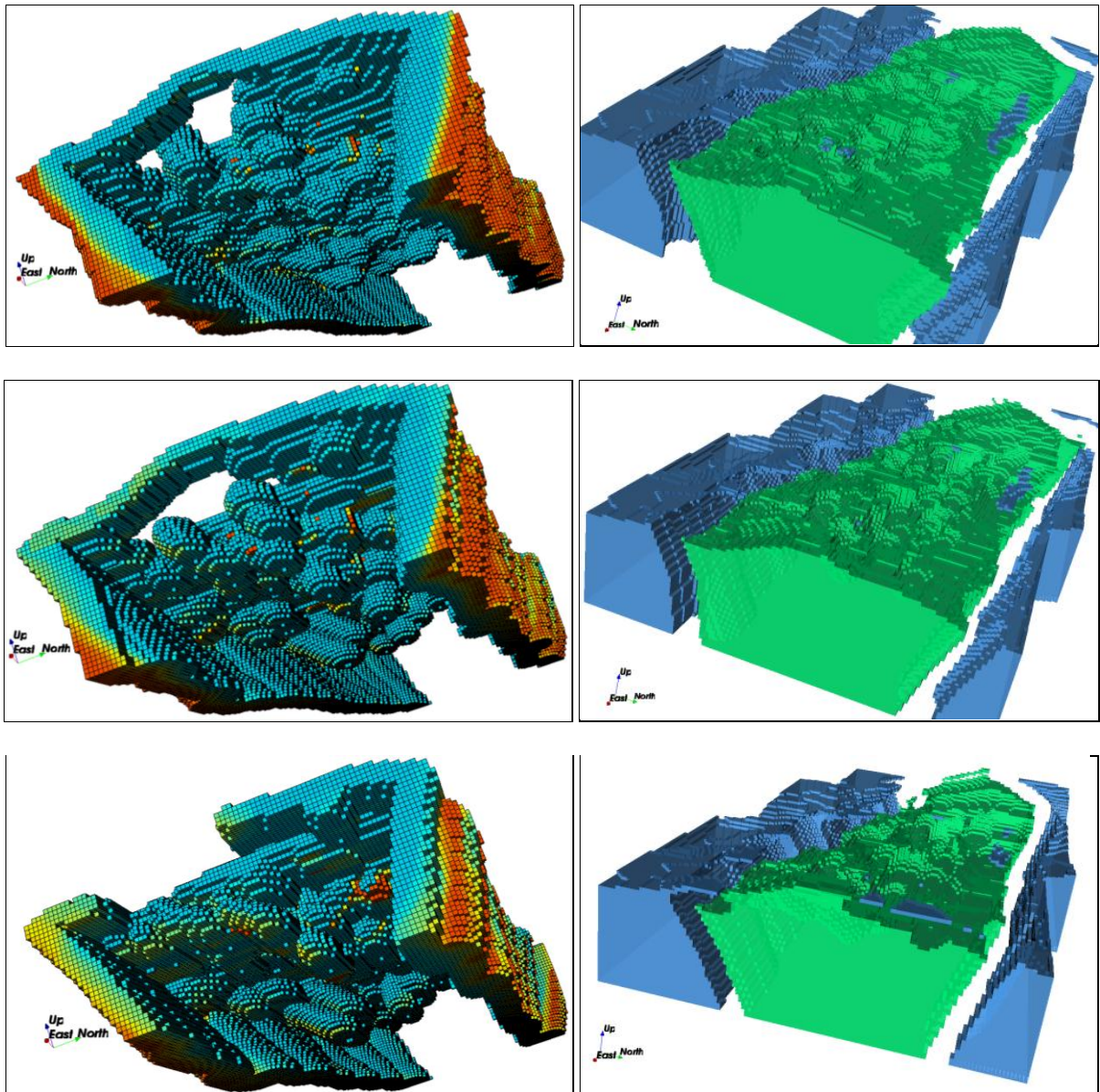


Figura 2.9. À esquerda, blocos dentro de cada zona de incerteza (cenário com 40, 20 e 10 seções verticais); à direita, região considerada real fora das zonas de incerteza (ZI).

Para condicionar as simulações, foram utilizadas as amostras dos furos de sondagem e também as 40 seções verticais interpretadas. Outra opção seria integrar as SV como um mapa de probabilidades no condicionamento das simulações, no entanto esta opção não foi avaliada. Embora seja preferível usar um modelo de resolução muito alta (blocos de 2x2x2 metros, por exemplo) para reproduzir com maior precisão o contato entre as litologias, a decisão foi de

construir, a partir das SV, um modelo com suporte mais “grosseiro”, que preencheu o volume a ser modelado com células de tamanho 10x10x10 metros. Tal suporte está mais próximo daquele adotado para a modelagem usando interpretação geológica empregado na área estudada (Figura 2.10).

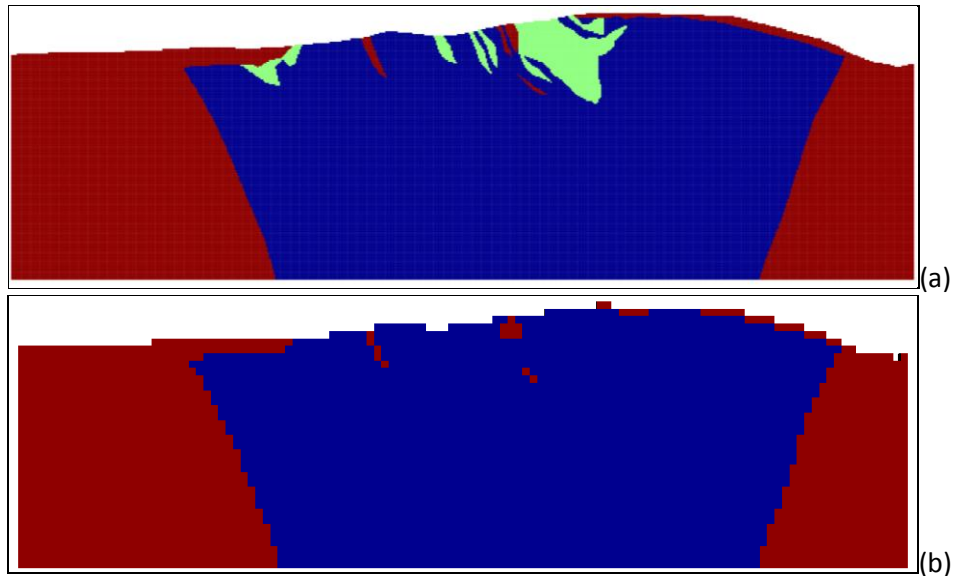


Figura 2.10. (a) Seção vertical construída com blocos de 2x2x2m, contendo itabiritos (azul), hematitas (amarelo) e estéril (vermelho); (b) seção vertical com blocos de 10x10x10m contendo minério (itabiritos e hematitas, em azul) e estéril, em vermelho.

É importante frisar que, dentro das zonas de incerteza, apenas as amostras de furos de sonda foram utilizadas para condicionar as simulações. Em cada cenário avaliado, os blocos das SV que estavam localizados dentro das ZI foram removidos, sendo considerados como dados reais apenas os valores dos blocos que estavam fora de cada uma das ZI geradas. Estes blocos considerados reais serviram para manter a continuidade espacial do corpo de minério nos blocos localizados entre as seções e também para delinear a geometria potencial do contato minério/estéril dentro das ZI nestes locais em que havia SV disponível (Figura 2.11).

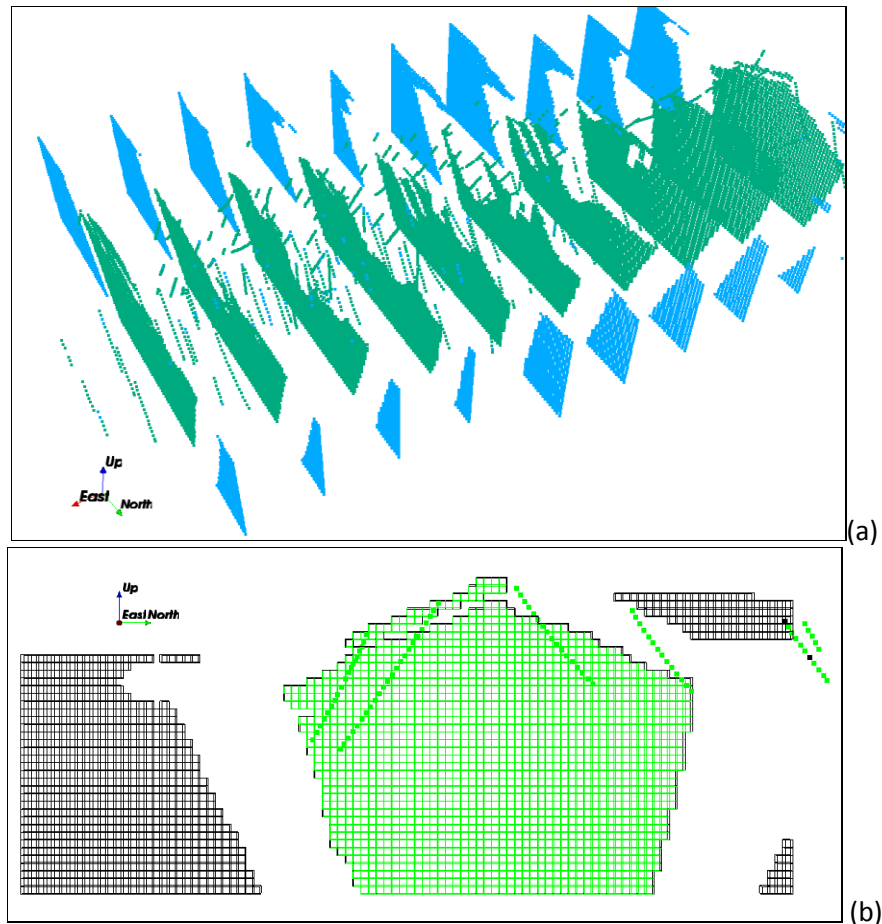


Figura 2.11. (a) Imagem em perspectiva das seções verticais fora das ZI junto com os furos de sonda utilizados como dados de condicionamento das simulações. Minério em verde e estéril em azul; (b) Imagem representando os dados da seção vertical fora da ZI juntamente com os furos de sonda naquela SV. Minério em verde e estéril em cinza.

Considerando que as simulações foram feitas de forma separada para o contato do lado direito e esquerdo, os dados de condicionamento também foram devidamente adequados, ou seja, apenas dados dentro dos limites de cada *grid* (*left* e *right_side_grid*) foram fornecidos ao algoritmo para condicionar as simulações efetuadas em cada setor.

Completada a etapa de simulação, os resultados obtidos em cada *grid* lateral foram copiados para o *grid* maior e então se pôde fazer o pós-processamento, finalizando a forma geométrica dos modelos 3D, construindo mapas *E-type* e as curvas de variação dos recursos minerais. Os resultados finais foram confrontados com o modelo geológico de referência construído de forma tradicional.

2.6. Metodologia

A metodologia deste trabalho seguiu a sequência de ações descrita abaixo e pode ser resumida e ilustrada, de forma simplificada, no fluxograma da Figura 2.12:

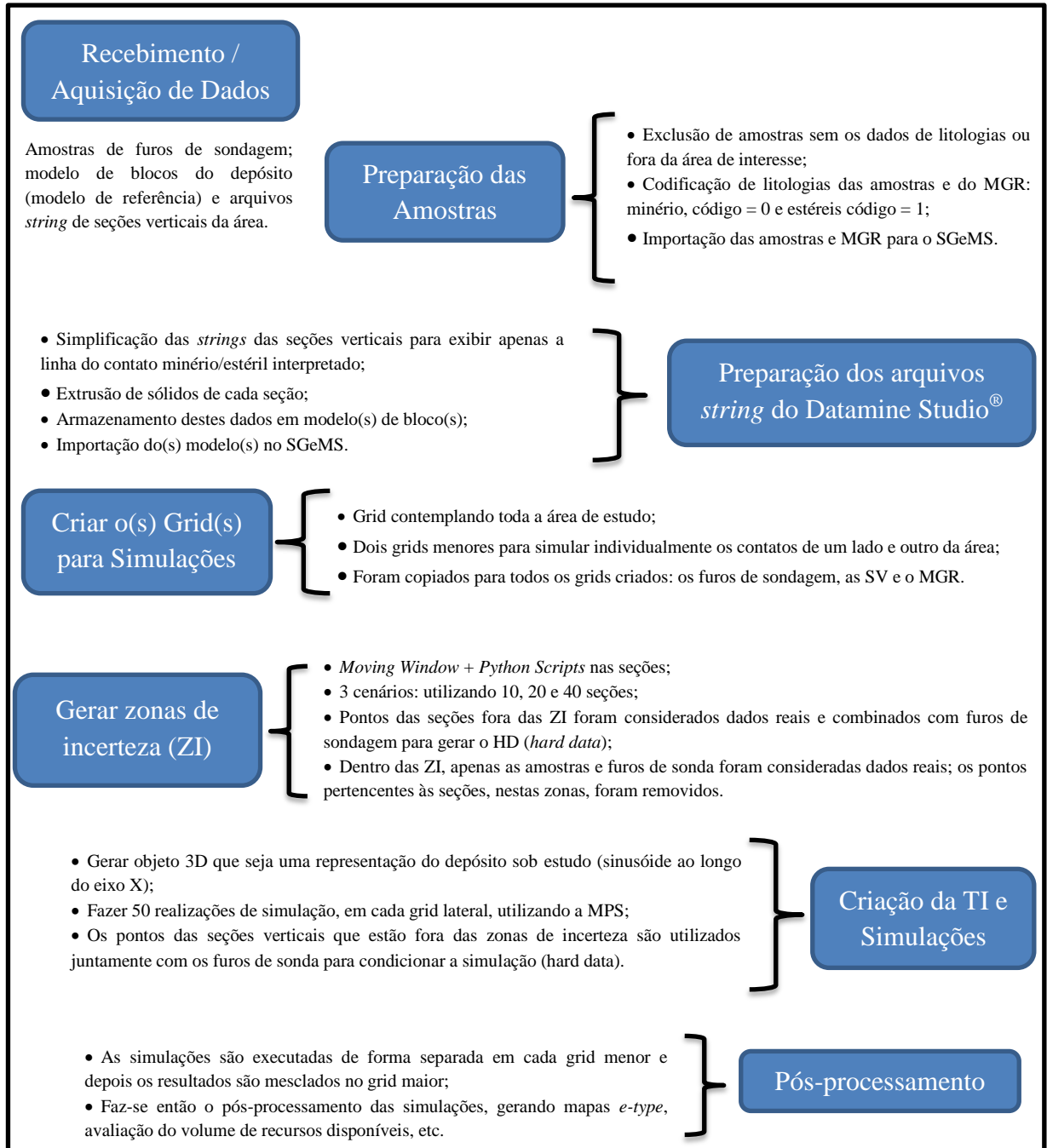


Figura 2.12. Fluxograma com as principais etapas necessárias para executar o trabalho.

Capítulo 3

Geração de Modelos com a Geoestatística de Múltiplos Pontos.

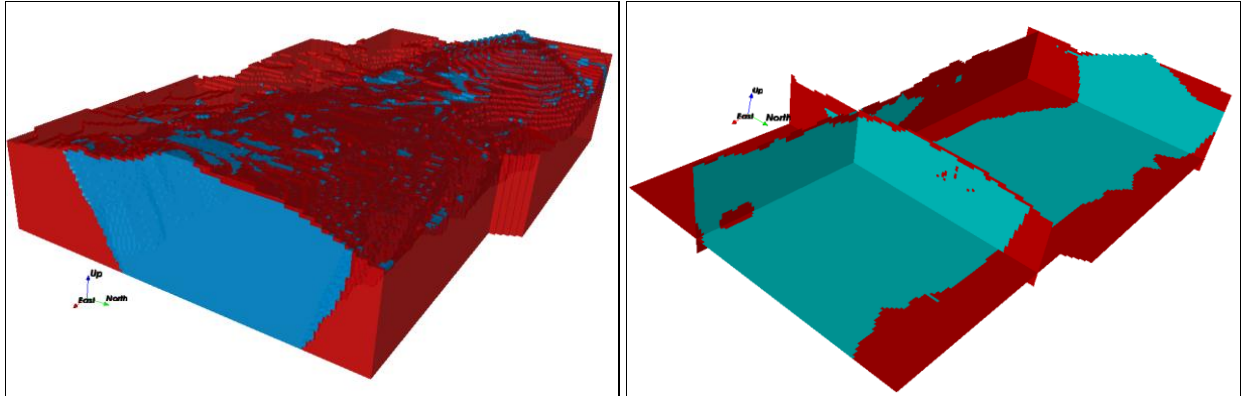
3.1. Resultados e Discussão.

Os modelos simulados foram confrontados com o modelo geológico de referência (MGR) através de histogramas para verificar as proporções minério/estéril e inspeções visuais de seções e modelos 3D para analisar configurações equiprováveis da distribuição espacial dos blocos de minério (ou estéril).

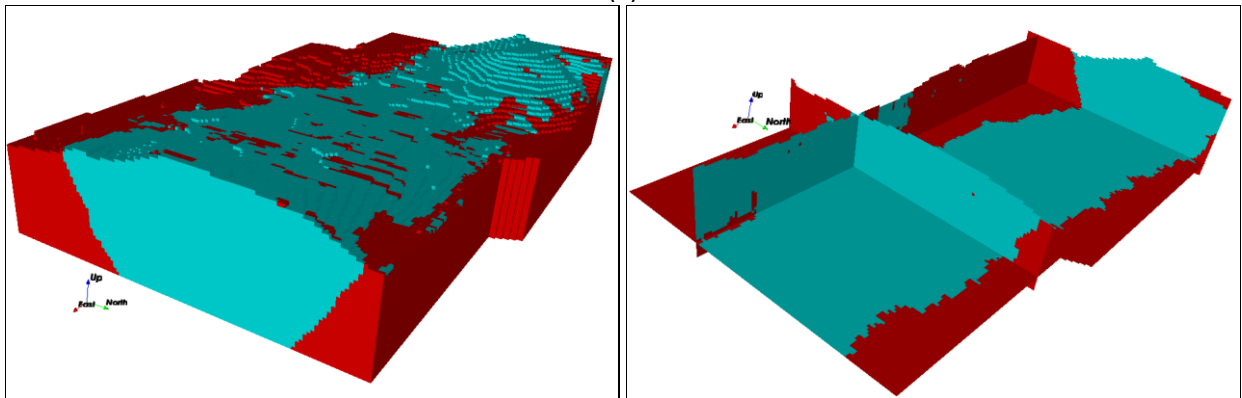
Além de comparações com o MGR, os resultados obtidos em cada cenário foram comparados entre si, a fim de avaliar e embasar as discussões sobre a influência exercida pela quantidade de dados utilizados para condicionar as simulações.

3.1.1. Checagem Visual e de Proporções

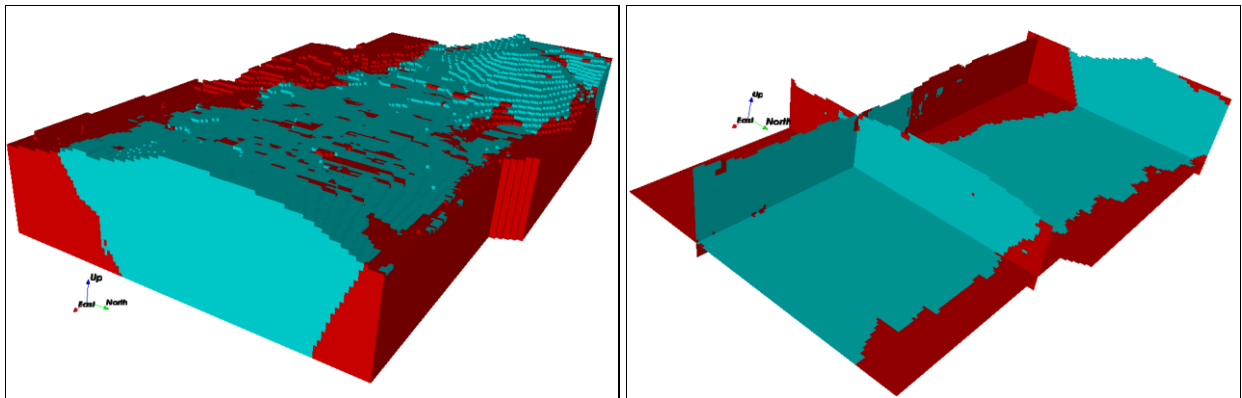
Através da comparação visual entre modelos simulados e MGR, pode-se notar que as características gerais de forma do envelope mineralizado e do contato entre as litologias foram reproduzidas satisfatoriamente. A Figura 3.1 mostra algumas vistas em perspectiva e seções de modelos simulados e também do MGR. Os modelos simulados referem-se à realização número 31 de cada um dos cenários avaliados. Verifica-se que há maior variabilidade no contato minério/estéril dos modelos simulados se comparados ao MGR, mas é possível identificar a presença dos padrões que definem este envelope mineralizado.



(a)



(b)



(c)

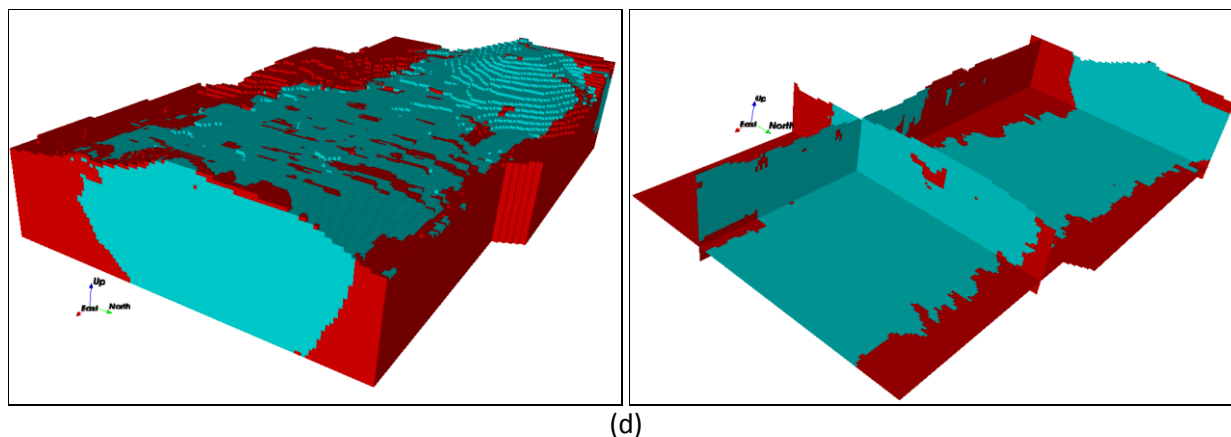
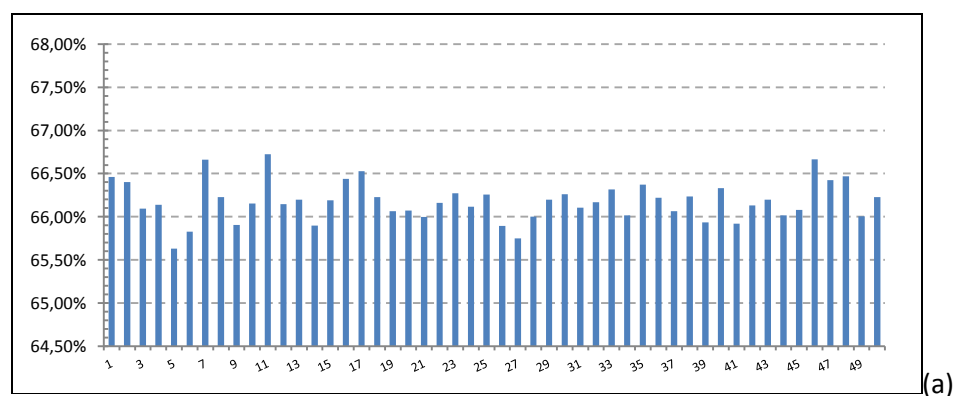


Figura 3.1. Modelos 3D e seções de: (a) modelo de referência; e realização 31 para (b) cenário com 40 seções verticais; (c) cenário com 20 seções verticais; (d) cenário com 10 seções verticais.

A Figura 3.2 mostra a flutuação da proporção global de minério para os três cenários avaliados. Esta proporção flutua aproximadamente entre 65,5% e 67,5%. Os modelos simulados apresentam maior percentual de minério do que o MGR (em torno de 62% de minério). Estas diferenças entre MGR e modelos simulados podem estar ligadas ao fato de haver maior proporção de amostras de minério tanto nos dados de condicionamento quanto na *imagem-referência*. Uma vez que o fator *servosystem* não foi utilizado, a proporção final das simulações vai se aproximar da proporção dos dados primários (HD), que é composto por pontos de SV e também furos de sondagem. Caso o objetivo fosse reproduzir fielmente as características do MGR, as discrepâncias encontradas poderiam ser minimizadas ao utilizar um valor positivo para o fator *servosystem*, ou mesmo alterando a forma e proporção mineiro/estéril da *imagem-referência*, por exemplo.



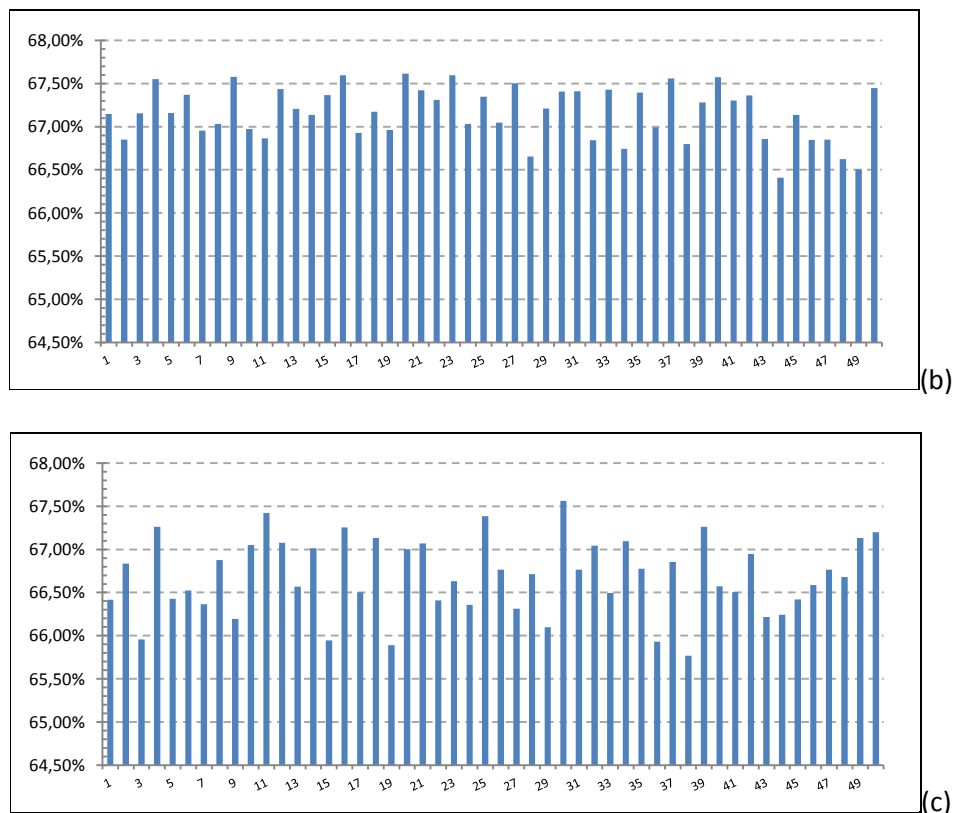


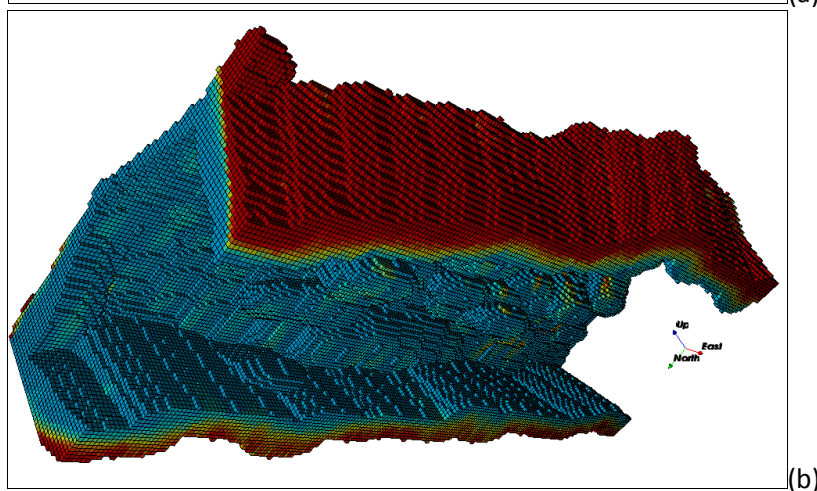
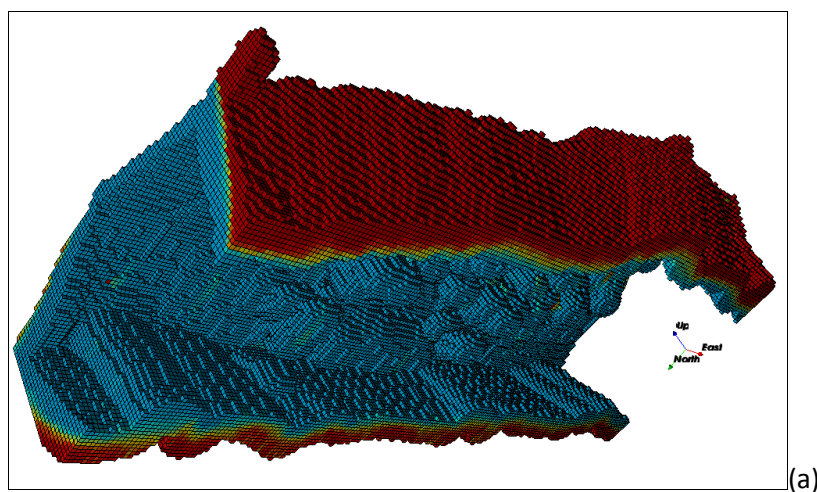
Figura 3.2. Proporções globais de minério em cada realização para os três cenários avaliados: (a) 40 seções; (b) 20 seções e (c) 10 seções.

Pode-se notar na Figura 3.2 que as flutuações entre os modelos são maiores na medida em que se diminui o número total de SV disponíveis para o condicionamento. Além disso, a proporção máxima e mínima é diferente em cada cenário avaliado.

No entanto, é importante ressaltar que o MGR foi obtido de forma tradicional, ou seja, baseado principalmente na interpretação de seções verticais/horizontais, por isso ele não deve ser visto como uma representação real ou uma referência verdadeira como a que se obtém de dados exaustivos. Assim, uma interpretação possível para as diferenças encontradas pode estar relacionada ao fato de o MGR subestimar o volume de minério durante o seu processo construtivo. Se necessário, as simulações poderiam ser repetidas com outras TIs, cujas proporções minério/estéril fossem diferentes da apresentada, para quantificar melhor o volume de incerteza do corpo de minério e variações na forma do contato entre as litologias.

3.1.2. Mapas e Histogramas E-type

Para cada cenário avaliado, foi construído um mapa de probabilidades (mapa *E-type*) a partir da média, em cada ponto, do conjunto das 50 realizações. A Figura 3.3 mostra, para cada cenário estudado, o mapa com a probabilidade que cada bloco tem para ser denominado minério/estéril. Vê-se, que o volume da zona de incerteza, derivada das seções, foi suficiente para incluir a zona de transição entre os dois litotipos, principalmente para os cenários com 20 e 40 seções verticais. Isso pode ser observado pela clara definição de zonas em ciano e vermelho dentro do volume de transição, em blocos onde não há incerteza. Os blocos que tem algum nível de incerteza estão na faixa de transição entre minério e estéril, por isso receberam cores intermediárias na escala mostrada. Pode-se afirmar que as informações de padrão da TI combinadas com os furos de sonda e SV reduziram aquela zona de incerteza inicialmente modelada com o algoritmo de janelas móveis.



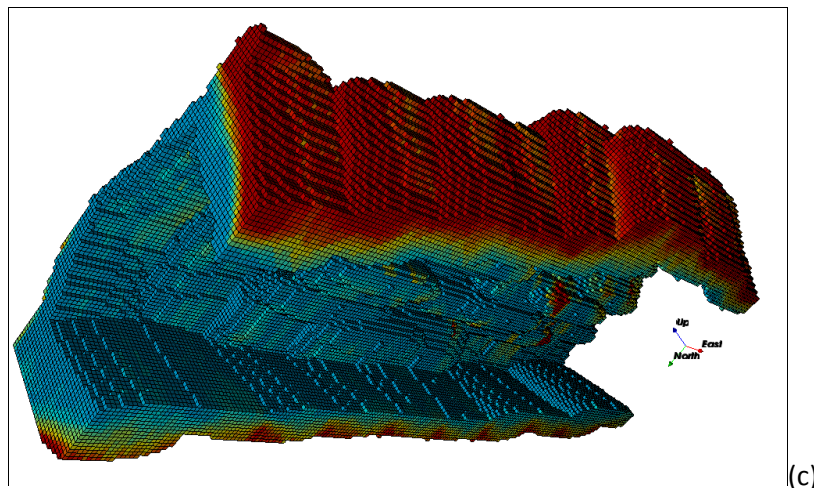
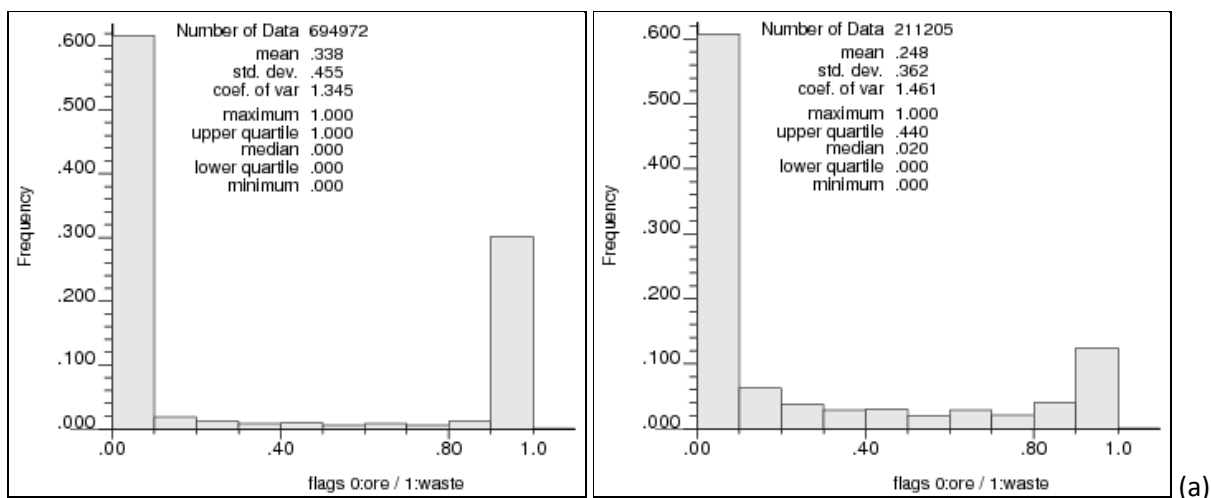


Figura 3.3. Mapa (*E-type map*) ilustrando a probabilidade de cada bloco ser considerado minério (azul) ou estéril (vermelho) para (a) cenário de simulação condicionada por 40 seções verticais, (b) condicionado por 20 seções verticais e (c) condicionado por 10 seções verticais.

Na medida em que o número de SV utilizadas para gerar a ZI aumenta, há também um controle mais rígido sobre a geometria final da zona de incerteza e, conseqüentemente, do contato minério/estéril, resultando em muitas células com probabilidade 0 ou 1 de serem considerada minério, conforme mostram os histogramas dos mapas de probabilidades da Figura 3.4.



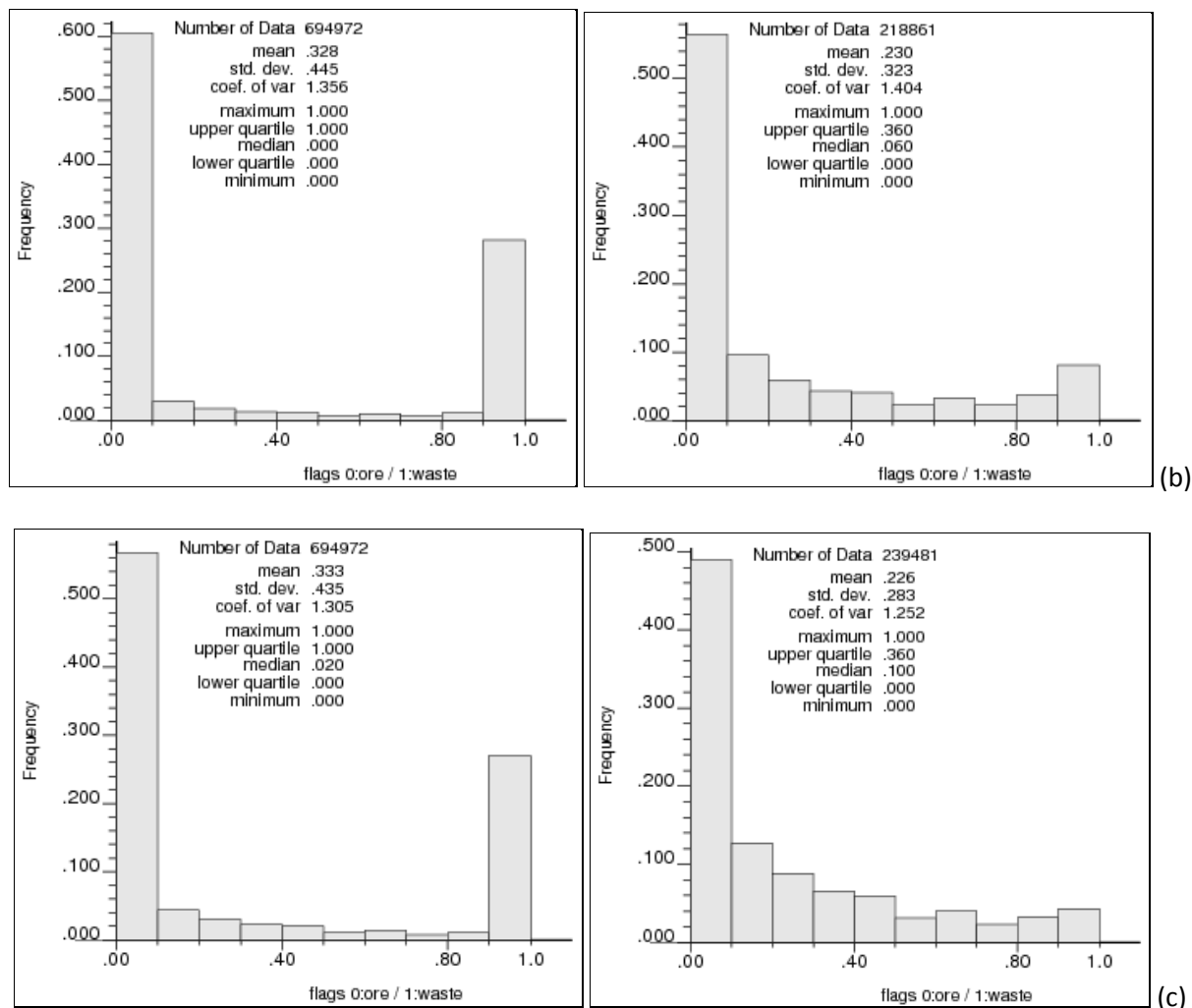


Figura 3.4. Histograma dos mapas E-type para os três cenários avaliados (global, à direita e dentro das ZI, à esquerda). (a) cenário de simulação condicionada por 40 seções verticais, (b) condicionado por 20 seções verticais e (c) condicionado por 10 seções verticais.

As simulações reproduziram de forma satisfatória os principais padrões do envelope mineralizado. A Figura 3.5 apresenta seção vertical na posição $X = -6310$ do modelo de referência e também da realização número 25 de cada um dos cenários analisados. As amostras de minério dos furos de sondagem presentes nesta região foram representadas pelos pontos em ciano (azul claro), enquanto as amostras de estéril estão em vermelho claro. Os furos de sondagem mostrados estão na posição $X = -6300$ para permitir que fossem visualizados simultaneamente às SV.

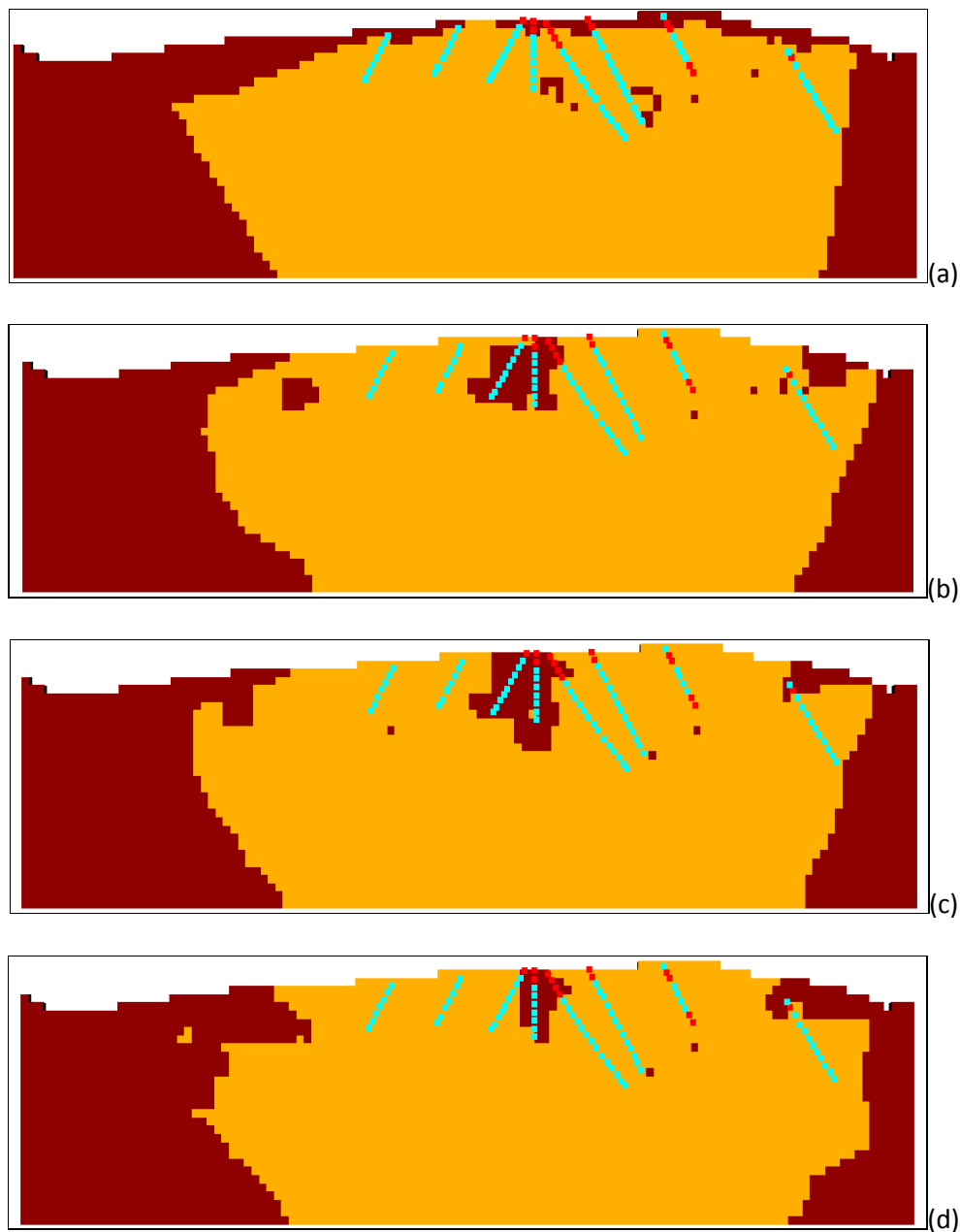


Figura 3.5. Seção vertical do (a) modelo de referência e realização n° 25 das simulações para o cenário de condicionamento utilizando (b) 40 seções, (c) 20 seções e (d) 10 seções verticais. Estéril em vermelho escuro e minério em laranja. Em azul claro estão as amostras de minério e vermelho claro as amostras de estéril nos furos de sondagem.

Pode-se perceber que as simulações mostram um contato arredondado e pouco regular (Figura 3.5 *b, c e d*), diferente do modelo de referência, cujo contato minério/estéril é uma linha com ângulo constante (Figura 3.5 *a*), onde se pode identificar claramente o formato trapezoidal com base maior recortada pela superfície topográfica.

Além da checagem visual comparando MGR e modelos simulados, as proporções minério/estéril entre dados de condicionamento e os modelos também foi checada. Pode-se notar que tais proporções foram reproduzidas de forma satisfatória, como mostra a Figura 3.6

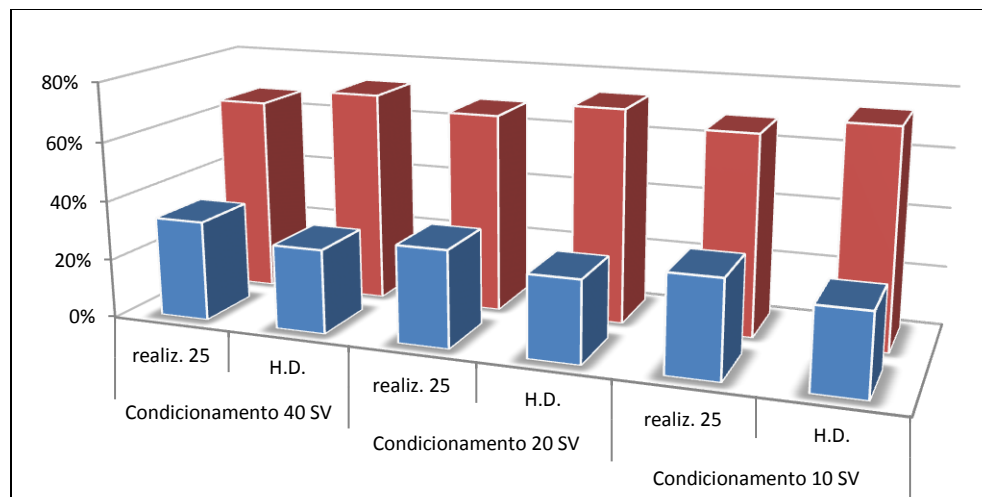


Figura 3.6. Proporções, para cada cenário avaliado, entre a realização 25 e os dados de condicionamento. Em azul, estéril e em vermelho, minério.

3.1.3. Gráfico com a variação de recursos e reservas

As variações no volume de minério entre os cenários avaliados também foi comparada. Para isso, fez-se a variação do critério de classificação de cada bloco, em cada cenário. A cada modelo de probabilidade (*E-type map*) foram aplicados diferentes valores mínimos de chance (*threshold*) para atribuir a categoria minério ao bloco. Por exemplo, um valor de referência de 0,50 indica que todos os blocos com pelo menos 50% de probabilidade de ser minério serão considerados como minério. Um valor de referência de 0,10 forneceria uma massa de minério bastante otimista, enquanto um valor de referência de 0,90 seria mais pessimista. Figura 3.7 mostra tais resultados para todos os cenários estudados (com 40 seções, 20 seções e 10 seções, espaçadas em 50 metros, 100 metros e 200 metros, respectivamente).

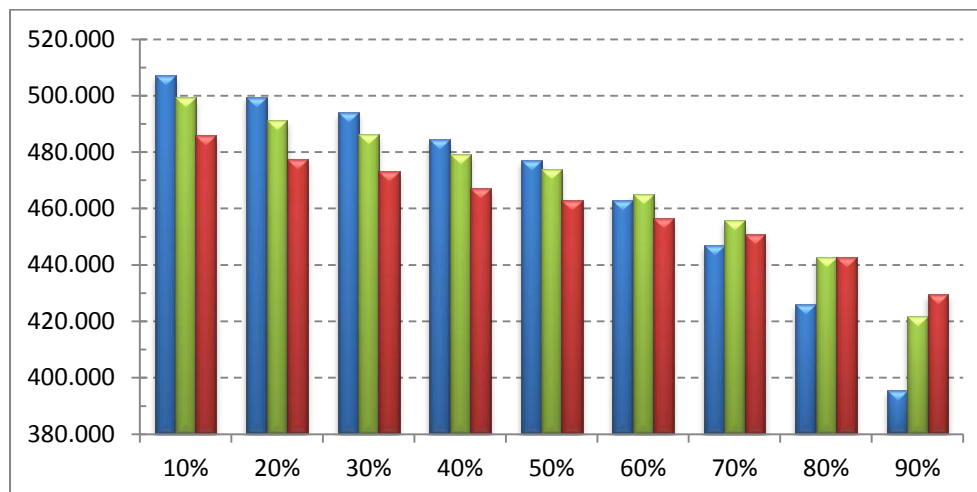


Figura 3.7. Variação dos recursos disponíveis. Em azul, cenário utilizando 10 seções verticais; em verde, utilizando 20 seções e em vermelho utilizando 40 seções verticais.

O gráfico da variação de recursos apresentado acima mostra que entre o critério mais rigoroso e o mais otimista (menos rigoroso), a massa total de minério do envelope mineralizado pode diminuir em aproximadamente 20% (considerando o cenário com 10 seções verticais apenas).

As diferenças entre cada cenário mostram que quanto menos dados disponíveis e quanto menor for o nível de rigor para classificar o bloco, maior será a quantidade de minério, ou seja, se há menos dados condicionando os resultados, os modelos simulados tendem a superestimar as massas de minério.

Para os critérios de classificação de recursos menos rigorosos (abaixo de 50% de probabilidade), as diferenças de massa entre cada cenário avaliado mostram que: se há menos dados condicionando os resultados, os modelos simulados tendem a superestimar as massas de minério. Isso acontece porque, geralmente, se tem mais informações sobre minério nos furos de sondagem, uma vez que o alvo da pesquisa é o minério, não o estéril. O algoritmo sempre tenta reproduzir a proporção dos dados primários informados e como há menos informações sobre estéril nesses dados, ele será mal representado nos modelos simulados. À medida em que se acrescentam mais seções verticais, se passa a ter mais informações sobre o estéril (proporção geral, proporção local e distribuição espacial), e a quantidade total de minério (e estéril) é redistribuída nos dados e consequentemente nos modelos simulados.

Ainda assim, para o critério mais otimista (chamar de minério blocos com ao menos 10% de probabilidade de ser minério), as diferenças entre o cenário com 40 seções e o cenário com 10 seções verticais fica no entorno de 4%. É uma diferença muito pequena. Dependendo da fase do empreendimento e do nível de rigor na classificação dos recursos, não é necessário utilizar um grande número de seções verticais para condicionar as simulações, diminuindo substancialmente o tempo despendido com a modelagem e interpretação de seções verticais.

As diferenças de massa entre os cenários tende a ficar menos significativa na medida em que o critério de classificação se torna mais rigoroso. Considerando a situação em que blocos com ao menos 60% de chance de ser minério serão classificados como minério, quase não há diferença de massa entre os três cenários avaliados. Apenas para os critérios mais rigorosos (70%, 80% e 90% de probabilidade) o cenário com 10 seções tem massa menor de minério que os demais. As maiores diferenças ocorrem para o critério mais rigoroso de classificação: aproximadamente 8% e 6% menos massa que os cenários com 40 e 20 seções, respectivamente.

Se ao comparar os cenários com 10 e 40 seções é possível notar apenas uma pequena diferença na massa total de minério, ao comparar o cenário de 20 seções com o de 40 seções, essas diferenças praticamente não existem.

Isso significa que bastaria utilizar um conjunto de 20 seções interpretadas, espaçadas regularmente em 100 metros entre si, além de furos de sondagem dispostos em malha aproximadamente regular de 100 x 100 metros para se chegar a modelos satisfatórios do corpo de minério utilizando a geoestatística de múltiplos pontos. Esses modelos, construídos durante as fases iniciais de exploração e estudos de viabilidade econômica, demandam menos tempo gasto para interpretar e modelar seções verticais, eliminam a necessidade de modelagem de variogramas, podem evitar gastos excessivos com campanhas de sondagem e auxiliam de forma indireta na alocação de novos furos, já que os mapas E-type fornecem uma medida da extensão e forma das zonas de maior ou menor incerteza a respeito de cada litologia.

Ainda que um dos objetivos iniciais deste trabalho fosse comparar o MGR com as simulações por MPS, ao longo do desenvolvimento dessa dissertação foi possível perceber que esta comparação deve ser feita com cuidado. Os modelos são construídos com metodologias diferentes, o que exige, em cada caso, uma preparação peculiar dos dados a serem utilizados, de

forma que eles sejam capazes de evidenciar as informações necessárias para o processo de modelagem.

Nesse sentido, o contato minério/estéril desenhado próximo à superfície topográfica é mais preciso do que aquele desenhado a 200 metros de profundidade, já que há maior certeza sobre a geologia das litologias aflorantes se comparada à geologia de rochas em subsuperfície. Assim, as ZI geradas de forma artificial deveriam captar este gradiente ao longo do eixo Z, sendo menores (mais estreitas) na superfície e mais largas na base.

Da mesma forma, deve-se estar atento à configuração dos furos de sondagem que contém amostras dentro das zonas de incerteza e sua influência na simulação dentro dessas ZI. Geralmente, os furos tem comprimento associado à espessura do corpo mineralizado. Assim que ultrapassam o contato entre duas litologias, a perfuração é interrompida. Entretanto, ao gerar as ZI a partir das seções interpretadas, surge um espaço vazio (valor incerto dos blocos) entre a última amostra do furo de sondagem e o limite externo da zona de incerteza, como ilustrado na Figura 2.11, mostrada no capítulo anterior.

Durante os processos de simulação, estas amostras localizadas no final do furo acabam influenciando o valor dos blocos ao seu redor, ainda que se saiba de antemão que os blocos abaixo da última composta pertencem a outra litologia. Ao utilizar esta configuração tendenciosa no condicionamento das simulações, o resultado pode ter um viés e acabar gerando mais minério(ou estéril), caso haja um grande número de compostas dos furos de sondagem localizados dentro das ZI. Para lidar de maneira adequada com este inconveniente, é importante que os próximos estudos considerem prolongar de forma artificial os furos até que alcancem o limite externo da ZI, atribuindo o valor adequado de litologia a essas novas compostas artificiais, isto é, atribuir ao bloco a mesma litologia encontrada nos blocos do limite externo da ZI naquele local onde está o furo.

3.2.Demanda Computacional.

Em relação à demanda computacional, há grande exigência de RAM e processamento para a execução dos trabalhos. A pasta de projeto do SGeMS contendo todos os resultados de simulações, os arquivos iniciais e de pós-processamento, possui cerca de 2,5 GB, sem considerar os arquivos exportados para programas como o Microsoft Excel[®], GSLIB[®] (Deutsch & Journel, 1998), Datamine Studio[®] ou qualquer outra plataforma que se queira utilizar para visualização, checagem e apresentação dos resultados.

Para efetuar 50 realizações em cada um dos três cenários avaliados, em um grid com aproximadamente 1,2 milhões de blocos, foi preciso utilizar um computador com 6 GB de memória RAM e processador de dois núcleos com velocidade de 2.30 GHz. O tempo necessário para executar as principais etapas, considerando os três cenários avaliados, está sumarizado na Tabela 3.1:

Tabela 3.1. Tempo necessário para execução das principais etapas.

	Tempo (s)
Gerar ZI	95
Criar TI	8
Carregar o projeto	230
Simulações*	675
Pós-processamento*	220
Salvar arquivos do projeto	290

* tempo total para os três cenários avaliados (50 realizações em cada).

Capítulo 4

Conclusões

Com este estudo foi possível mostrar que a simulação geoestatística de múltiplos pontos (MPS) pode ser aplicada para construir modelos de corpos mineralizados durante os estágios preliminares de exploração sem demandar longos e exigentes processos de modelagem manual. Os modelos simulados exigem menor esforço (em tempo e custo) do que abordagem tradicional.

Esta técnica tem grande potencial de aplicação na indústria mineral, pois já vem sendo aplicada com sucesso na indústria do petróleo. No entanto, é preciso levar em conta que a escassez de dados primários é muito mais severa na indústria petrolífera. Sendo assim, as imagens-referência têm papel importante no processo de simulação e podem interferir substancialmente nos resultados, por isso é corriqueiro gerar diversas TIs para um mesmo reservatório, criando uma gama maior de modelos para embasar as decisões e quantificar a incerteza associada à modelagem geológica dos reservatórios de óleo e gás.

Por outro lado, ainda que se tenham poucos dados disponíveis, na maior parte dos depósitos minerais essa quantidade de dados é sempre maior que os disponíveis na modelagem de reservatórios. Assim, a TI tem influência menor, enquanto os dados primários e dados secundários utilizados no condicionamento tem papel muito mais decisivo no resultado final da modelagem dos corpos mineralizados durante as fases iniciais de exploração.

Quando as ZI são geradas a partir de seções verticais interpretadas, é importante que se façam estudos sobre as variações na espessura dessas ZIs ao longo do eixo Z (mais estreitas próximo à superfície e mais largas conforme aumenta a profundidade), buscando representar o nível de conhecimento a respeito da geologia, que varia de acordo com a profundidade.

A metodologia apresentada foi aplicada a um depósito de minério de ferro em 3D e permitiu avaliar a incerteza sobre os volumes para cada fácies modelada. Tal processo minimiza o caráter determinista da modelagem tradicional, acrescentando uma interpretação probabilística

(zona incerteza) sobre a forma e os contatos litológicos reais da jazida. Se houver incerteza significativa em relação à potencial forma do corpo de minério, vários cenários podem ser criados usando diferentes *imagens-referência* (training images).

Também, foi possível constatar que a simulação deste tipo de corpo de minério não exige uma grande quantidade de seções interpretadas. Algumas seções verticais combinadas com amostras de furos de sondagem foram suficientes para simular de forma satisfatória o envelope mineralizado do depósito. De uma perspectiva mais ampla, o número de seções necessárias para um depósito particular vai depender da complexidade geométrica dos padrões de contato, da densidade de furos e do nível aceitável de tolerância ao risco, dada a fase de desenvolvimento do depósito (exploração inicial versus *quasi* produção).

Embora resulte em poucas diferenças ao final das simulações, a integração de mais seções para o delineamento inicial da zona de incerteza claramente diminui a incerteza sobre a geometria do corpo mineralizado. Isto é, ao aumentar a quantidade de seções utilizadas para gerar a ZI, a forma desta ZI se aproxima mais da forma e dimensão real do contato minério/estéril.

Em termos computacionais, o algoritmo SNESIM tornou possível a aplicação dos conceitos de MPS, mas ainda assim há grande exigência de RAM e processadores para a execução dos trabalhos. É necessário o uso de máquinas com requisitos específicos, acima do que comumente se encontra em computadores domésticos. Para efetuar a simulação do envelope mineralizado (contato minério/estéril) de um depósito real em um grid com aproximadamente 1,2 milhões de blocos, foram necessários ao menos 6 GB de memória RAM, processador de dois núcleos com 2.30 GHz e cerca de 10 GB de espaço no disco rígido para armazenar os resultados. Considerando que todos os *scripts* de simulação já tenham sido escritos e os dados estejam preparados (grids prontos, BD e SV ajustadas, HD pronto), o tempo total para efetuar 50 realizações nos três cenários estudados foi de aproximadamente 13 minutos. Outros 4 minutos foram necessários para executar os *scripts* de pós-processamento que permitiram gerar mapas de probabilidades (*E-type*) e fazer a classificação de recursos disponíveis.

Neste trabalho, a simulação, e conseqüentemente a varredura de padrões executada pelo SNESIM, ocorreu em cerca de 1/3 do total de blocos, pois o volume das zonas de incerteza é

menor que o volume total do depósito. Assim, embora este pareça ser um tempo pequeno para a execução dos *scripts* e obtenção de resultados, é importante estar atento ao fato de que esses números vão se alterar na medida em que o modelo de depósito se torne mais complexo, com mais litologias sendo representadas, ou com o aumento do número de blocos simulados.

Outro importante ponto a ser destacado está relacionado às etapas de preparo dos dados para execução do algoritmo. Deve-se ressaltar que, para a atual versão do **SGeMS**, disponível gratuitamente², é necessário que os dados de condicionamento informados pela opção *Hard Data*, sejam arquivos de ponto (*pointset*); a propriedade da TI precisa estar armazenada na forma de um *grid*; os mapas de probabilidade, quando utilizados, precisam conter valores de probabilidade de ocorrência de cada uma das litologias no mesmo ponto, sempre com soma das frações igual a um, e devem ser informados para todos os nós do grid de simulação; o programa não exporta os resultados automaticamente com informações de coordenadas de cada ponto, por isso é necessário criar *scripts* em linguagem Python para realizar esta tarefa de alguma forma.

Com isso, outra contribuição deste trabalho foi estabelecer uma sequência de etapas necessárias para trabalhos com MPS, apresentando em detalhes os passos para o preparo e adequação dos dados que serão utilizados no **SGeMS**.

Como complemento do trabalho foram gerados diversos *scripts* em linguagem de programação Python que permitem automatizar as principais rotinas, desde a importação de dados e geração das zonas de incerteza, até as simulações e pós-processamento, tornando as atividades menos tediosas e mais rápidas.

4.1.Recomendações para Desenvolvimento Futuro

Por não ter sido possível avaliar todas as possibilidades do algoritmo SNESIM e todas as funcionalidades do aplicativo **SGeMS**, os estudos e aplicações desta técnica em depósitos minerais reais não devem se encerrar com este trabalho.

Os próximos passos deste projeto envolvem considerar simultaneamente mais litotipos, conduzindo a uma maior complexidade da geometria do corpo de minério, bem como aumentar a

² www.sourceforge.com/sgems

complexidade e até o número de TIs, além de avaliar a integração de outros tipos de dados de condicionamento, como por exemplo mapas de probabilidades e informações sobre proporções verticais das litologias.

Referências

- Abichequer, L. a., Costa, J. F. C. L., Pasti, H. a., & Koppe, J. C. (2011). Design of blending piles by geostatistically simulated models — A real case reconciliation. *International Journal of Mineral Processing*, 99(1-4), 21-26. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.minpro.2011.02.002
- Alabert, F. G. (1987). *Stochastic Imaging of Spatial Distribution Using Hard and Soft Information*. Stanford University.
- Arpat, G. B., & Caers, J. (2005). A MULTIPLE-SCALE, PATTERN-BASED APPROACH TO SEQUENTIAL SIMULATION. In O. Leuangthong and C. V. Deutsch (Ed.), *Geostats Banff 2004* (pp. 255-264). Springer.
- Beretta, F. S. (2010). *Redução da variabilidade da qualidade do carvão entre pilhas de homogeneização utilizando simulação geoestatística*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Retrieved from <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/25073/000749995.pdf?sequence=1>
- Boisvert, J. B., Leuangthong, O., Ortiz, J. M., & Deutsch, C. V. (2008). A methodology to construct training images for vein-type deposits. *Computers & Geosciences*, 34, 491-502. doi:10.1016/j.cageo.2007.04.007
- Boogaart, K. G. V. D. (2006). Some theory for Multiple Point Statistics : Fitting , checking and optimally exploiting the training image. *International Association for Mathematical Geology* (pp. 3-6). Liege.
- Boucher, A., & Stright, L. (2008). Downscaling with training image and search tree partitioning. In J. M. Ortiz & X. Emery (Eds.), *Geostats* (p. 10). Santiago, Chile: Springer Netherlands.
- Caers, J. (2001). Geostatistical reservoir modelling using statistical pattern recognition. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 29(3-4), 177-188. doi:10.1016/S0920-4105(01)00088-2
- Costa, J. F. C. L., Pilger, G. G., Marques, D. M., & Koppe, J. C. (2008). Aperfeiçoamento da estratégia de homogeneização em pilhas chevron utilizando simulação geoestatística. *Revista Escola de Minas*, 61(3), 291-296. Retrieved from <http://www.scielo.br/pdf/rem/v61n3/a05.pdf>
- DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral). (2011). *Sumario Mineral 2011* (pp. 1-105). Brasília, Brazil. Retrieved from https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=6350
- Deutsch, C. V. (2002). *Geostatistical Reservoir Modeling* (p. 376). New York: Oxford University Press.

- Deutsch, C. V., & Journel, A. G. (1998). *Geostatistical Software Library and User's Guide* (2nd ed., p. 369). New York: Oxford University Press.
- Gambin, F. (2003). *Aperfeiçoamento da Estratégia de Homogeneização de Minérios Utilizando Simulação Geoestatística*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Gambin, F., Costa, J. F. C. L., & Koppe, J. C. (2005). Estratégia de controle de qualidade de minérios na lavra utilizando simulação geoestatística, *58*(3), 193-200.
- Guardiano, F. B., & Srivastava, R. M. (1993). Multivariate Geostatistics: Beyond Biivariate Moments. In A. Soares (Ed.), *Geostatistics Troia '92* (pp. 133-144).
- Gómez-Hernández, J. J. (2005). geostatistics. In Y. RUBIN & S. S. HUBBARD (Eds.), *Water Science and Technology Library Series* (Vol. 50, pp. 59-83). Springer Netherlands.
- Hajizadeh, A., Safekordi, A., & Farhadpour, F. a. (2011). A multiple-point statistics algorithm for 3D pore space reconstruction from 2D images. *Advances in Water Resources*, *34*(10), 1256-1267. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.advwatres.2011.06.003
- Harding, A., Strebelle, S., Levy, M., Thorne, J., Xie, D., Leigh, S., & Preece, R. (2005). Reservoir facies modelling: new advances in mps. In O. Leuangthong & C. V. Deutsch (Eds.), *Geostats Banff 2004* (pp. 559-568). Springer Netherlands.
- Hurtado, S., & Ortiz, J. M. (2010). Quantifying Uncertainty in Resources Tonnage Using Multiple Point Geostatistical Simulation. *MININ* (p. 9). Santiago, Chile.
- Huysmans, M., & Dassargues, A. (2009). Application of multiple-point geostatistics on modelling groundwater flow and transport in a cross-bedded aquifer (Belgium). *Hydrogeology Journal*, *17*(8), 1901-1911. doi:10.1007/s10040-009-0495-2
- IBRAM. (2010). *Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira - 5ª Edição*. (p. 28). Brasília, Brazil. Retrieved from <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001157.pdf>
- Journel, A. G. (1982). The Indicator Approach to Estimation of Spatial Distributions. In SME-AIME (Ed.), *17th APCOM (International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industry)* (pp. 793-806). Golden, Colorado, USA.
- Journel, A. G. (2005). Beyond covariance: the advent of multiple-point geostatistics. *Geostats Banff 2004* (pp. 225-233). Santiago, Chile: Springer Netherlands.
- Journel, A. G., & Kyriakidis, P. C. (2004). *Evaluation of mineral reserves : a simulation approach* (p. 216). New York: Oxford University Press.
- Journel, A. G., & Zhang, T. (2006). The Necessity of a Multiple-Point Prior Model. *Mathematical Geology*, *38*(5), 591-610. doi:10.1007/s11004-006-9031-2

- Koppe, V. C. (2009). *Metodologia para Comparar a Eficiência de Alternativas para a Disposição de Amostras*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Krishnan, S., & Journel, A. G. (2003). Spatial Connectivity : From Variograms to Multiple-Point Measures 1. *Mathematical Geology*, 35(8), 915-925.
- Liu, Y. (2006). Using the Snesim program for multiple-point statistical simulation. *Computers & Geosciences*, 32, 1544-1563. doi:10.1016/j.cageo.2006.02.008
- Liu, Y., Harding, A., Gilbert, R., & Journel, A. G. (2005). A workflow for multiple-point geostatistical simulation. *Geostats Banff 2004*, 245-254.
- Maharaja, A. (2005). Stochastic modeling of the rhine-meuse delta using multiple-point geostatistics. In O. Leuangthong & C. V. Deutsch (Eds.), *Geostats Banff 2004* (Vol. 1, pp. 653-659). Santiago, Chile: Springer Netherlands.
- Marques, D. M. (2010). *Desenvolvimento de um Algoritmo para Simular a Variabilidade do Minério em Pilhas de Homogeneização*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Okabe, H., & Blunt, M. (2005). MULTIPLE-POINT STATISTICS TO GENERATE PORE SPACE IMAGES. In O. Leuangthong & C. V. Deutsch (Eds.), *Earth Science* (pp. 763-768). Springer.
- Ortiz, J. M. (2008). An overview of the challenges of multiple-point geostatistics. In J. M. Ortiz & X. Emery (Eds.), *Geostats* (p. 10). Santiago, Chile: Springer Netherlands.
- Ortiz, J. M., & Deutsch, C. V. (2004). Indicator Simulation Accounting for Multiple-Point Statistics. *Mathematical Geology*, 36(5), 545-565. doi:10.1023/B:MATG.0000037736.00489.b5
- Ortiz, J. M., Lyster, S., & Deutsch, C. V. (2007). Scaling multiple-point statistics to different univariate proportions. *Computers & Geosciences*, 33(2), 191-201. doi:10.1016/j.cageo.2006.06.009
- Parra, A., & Ortiz, J. M. (2010). Multiple – Point Conditional Unilateral Simulation for Categorical Variables. *MININ* (pp. 413-421). Santiago, Chile.
- Peroni, R. (2002). *Análise da sensibilidade do seqüenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Remy, N., Boucher, A., & Wu, J. (2006). SGeMS User ' s Guide Chapter 1 General Overview.
- Remy, N., Boucher, A., & Wu, J. (2009). *Applied Geostatistics with SGeMS - A User's Guide* (First., p. 264). New York: Cambridge University Press.
- Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. (2002). *Applied Mineral Inventory Estimation* (pp. 1-381). Cambridge: Cambridge University Press.

- Souza, F. S. de. (2007). *Uso de Métodos Geoestatísticos no Auxílio à Modelagem Geológica*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Strebel, S. (2000a). *Sequential Simulation Drawing Structures from Training Images*. UMI. Stanford.
- Strebel, S. (2000b). *New multiple-point statistics simulation implementation to reduce memory and cpu-time demand*. *Training* (p. 6). San Ramon.
- Strebel, S. (2002). Conditional Simulation of Complex Geological Structures Using Multiple-Point Statistics. *Mathematical Geology*, 34(1), 1-21.
- Strebel, S., & Remy, N. (2005). Post-processing of multiple-point geostatistical models to improve reproduction of training patterns. In O. Leuangthong & C. V. Deutsch (Eds.), *Geostats Banff 2004* (pp. 979-988). Springer Netherlands.
- Strebel, S., & Zhang, T. (2005). Non-stationary multiple-point geostatistical models. In O. Leuangthong & C. V. Deutsch (Eds.), *Geostats Banff 2004* (pp. 235-244). Santiago, Chile: Springer Netherlands.
- Tran, T. T. (1994). Improving variogram reproduction on dense simulation grids. *Computers & Geosciences*, 20(7-8), 1161-1168. doi:10.1016/0098-3004(94)90069-8

ANEXOS

1) Importação das seções verticais para o SGeMS.

```
# after preparing the Data in the properly format and when the
destination SGeMS grid is ready, than it is possible to import the
dataset and/or sections files to the SGeMS project.

import sgems
# import the vertical sections in ascii/gslib format to sgems
for i in range(40): # times to repeat the Load command (i starts in 0
and ends in 39)
    temp = 5550+50*I # 50 is the default offset distance between
consecutive sections
    print temp
# the full path of files location
    filename =
"D:/Helder/Documents/POS/TRABALHO_PRATICO/Sapecado/sapecado_datamine/s
ecoes_e_modelos_blocos10m/secao"+str(temp)+"_10m.dat"
    print filename # use this command to visualize the file name during
the import process
    sgems.execute("LoadObjectFromFile "+filename+"::csv") # load the
object and set manually each needed information (type of importation;
sgems new property name)
# the new property name was set to: secaoNNNN_10m. The NNNN means the
section position along the X axis (from coordinates -5550 to -7500).
print "done importing process" # a warning when the load process ends

# than, all imported data are copied to the simulation grid into a
new one property which contain all vertical sections information.

for i in range(40):
    temp = 5550+50*i
    #print temp
    sgems.execute("CopyProperty
secao"+str(temp)+"_10m::ZONE::coarse_large_grid::data-section::0::0")
print "done pointsets coping"
```

Com esse *script* se faz a importação, no formato *pointset*, de cada arquivo de texto com os dados das seções verticais e então os dados são copiados para o *grid* geral de simulação.

2) Gerar as propriedades com número reduzido de seções verticais.

```
import sgems
grid = "coarse_large_grid"
data = sgems.get_property(grid, "data-section_each50m")
xdata = sgems.get_property(grid, "_X_")
nan = sgems.nan()
newprop1 = "data-section_each100m"
newprop2 = "data-section_each200m"
for i in range(21):
    temp = -7550+100*i
    print temp
    for j in range(len(data)):
        if xdata[j] == temp:
            data[j] = nan
sgems.set_property(grid, newprop1, data)
for k in range(10):
    temp_0 = -7500+200*k
    temp_1 = -7500+200*(k+1)
    print temp_0
    print temp_1
    for m in range(len(data)):
        if temp_0 < xdata[m] < temp_1:
            data[m] = nan
sgems.set_property(grid, newprop2, data)
print "done"
```

- 3) Gerar as zonas de incerteza no *grid* maior e copiar os resultados para os *grids* laterais.

```

import sgems
import time

startall = time.time() # this command is used to get the real time
startl = startall
nan = sgems.nan() #sgems not available data (not a number notation)
coarse = "coarse_large_grid"
refer = "refer_model_geobody"
left = "left_coarse_grid"
right = "right_coarse_grid"

offsets = 3 # number of scenarios (offset distances between
consecutive considered sections) to be evaluated

buffersize = 1 # number of tested different sizes of the ellipsoid
along the median axis

data = sgems.get_property(coarse,refer)

# reference distances and name of properties that will be created
props = { '50m' : '50m_sections_buffer',
          '100m' : '100m_sections_buffer',
          '200m' : '200m_sections_buffer'      }

#step to run moving window algorithm for all offsets (50, 100 and
200m) and for all buffers which the offsets were applied
for j in range(buffersize):
    buf = 50 - 20*(j)

    for i in range (offsets):
        dist = int(50*2**i)
        position = dist+10

        print position

        sgems.execute('RunGeostatAlgorithm
moving_window::/GeostatParamUtils/XML::<parameters>
name="moving_window" />      <Input_data   grid="'+coarse+'" region=""
property="data-section_each'+str(dist)+'m" />      <prefix_out
value="'+str(dist)+'m_sections_buffer'+str(buf)+'_' />
<filter_type   value="Moving Average" />      <is_neigh_rect   value="0"
/>      <is_neigh_ellipsoid   value="1" />      <size_x   value="" />
<size_y   value="" />      <size_z   value="" />      <neigh_ellipsoid
value="'+str(position)+' '+str(buf)+' 30 90 0 0" />
<filter_filename   value="" />      <Sobel_orientation   value="XY" />
<sigma   value="" />      <Filtsim_def_size_x   value="" />
<Filtsim_def_size_y   value="" />      <Filtsim_def_size_z   value="" />
</parameters>  ')

        print "done buffer of "+str(buf)+"m using "+str(dist)+"m sections
offset"
print "ok moving window algorithm"

endl = time.time()

```

```

elapsed1 = end1 - start1
min1 = elapsed1/60
print "Your stuff took", elapsed1, "seconds to run the MW algorithm,
which is the same as", min1, "minutes"

#make adjusts in the average_property (generated from moving window)
to clear cells above surface and out lateral limits of the reference
model

start2 = time.time()
for r in range(bufferize):
    buf = 50 - 20*r
    for dist, name in props.items():
        buffprop = ""+name+""+str(buf)+"_Moving_average" #get the average
property for each offset of each chosen buffer
        print buffprop
        buffer = sgems.get_property(coarse,buffprop)
        for m in range(len(data)): #scan all points inside the reference
model property
            if data[m] == nan : buffer[m] = nan # make a test: if the
reference is nan, then the average property will be too.
            sgems.set_property(coarse, ""+name+""+str(buf)+"_final", buffer)
#store results in the average property and loop
# get each moving window property generated by the algorithm and copy
it to the side grids (left and right grids)
# then, set regions inside buffers, create a mask grid from that
region and create a trend property into this "region test" grid

        sgems.execute("CopyProperty
"+str(coarse)+": "+name+""+str(buf)+"_final::"+str(left)+": "+name+""+
str(buf)+"_final::1::1")

        sgems.execute("CopyProperty
"+str(coarse)+": "+name+""+str(buf)+"_final::"+str(right)+": "+name+""+
str(buf)+"_final::1::1")

        sgems.execute("SetRegionFromPropertyIf
"+coarse+": "+name+""+str(buf)+": "+name+""+str(buf)+"_final::0.001::0
.999")

        sgems.execute("SetRegionFromComplement
"+coarse+": "+name+""+str(buf)+": complement_"+dist+"_buffer"+str(buf)
+"")

        sgems.execute("CreateMgridFromCgrid
"+coarse+": gridtest_"+dist+"_"+str(buf)+": "+name+""+str(buf)+"")
        sgems.execute("CreateTrend gridtest_"+dist+"_"+str(buf)+": X")

        sgems.execute("SetRegionFromPropertyIf
"+left+": "+name+""+str(buf)+": "+name+""+str(buf)+"_final::0.001::0.9
99")

        sgems.execute("CreateMgridFromCgrid
"+left+": left_gridtest_"+dist+"_"+str(buf)+": "+name+""+str(buf)+"")

```

```

    sgems.execute("CreateTrend
left_gridtest_"+dist+"_"+str(buf)+"::X")

    sgems.execute("SetRegionFromPropertyIf
"+right+"::"+name+""+str(buf)+"::"+name+""+str(buf)+"_final::0.001::0.
999")

    sgems.execute("CreateMgridFromCgrid
"+right+"::right_gridtest_"+dist+"_"+str(buf)+"::"+name+""+str(buf)+"
")

    sgems.execute("CreateTrend
right_gridtest_"+dist+"_"+str(buf)+"::X")

    print "final buffer-zone properties using", buf,"m width were
completed"

    print "regions with buffer of", buf, "m were done"

end2 = time.time()
elapsed2 = end2 - start2
min2 = elapsed2/60
print "took", elapsed2, "seconds, which is the same as", min2,
"minutes to make adjusts in the uncertainty zones and create the UZ
regions"

# if all average properties was correctly created, then the regions
were too.

# And, consequently, the test grids and his trend property were
correctly generated too.

# So, we can delete these grid objects

#If some problem occurs during one of these above steps, the program
can crash or an error message will be show.

for a in range(offsets):
    b = 50*2**a
    print b,"m"
    for c in range(bufferysize):
        d = 50 - 20*c
        print d
        sgems.execute("DeleteObjects gridtest_"+str(b)+"m_"+str(d)+"")
        sgems.execute("DeleteObjects
left_gridtest_"+str(b)+"m_"+str(d)+"")
        sgems.execute("DeleteObjects
right_gridtest_"+str(b)+"m_"+str(d)+"")

print "gridtests objects created and deleted"
print "algorithm finished"

endall = time.time()
elapsed = endall - startall
print "total time took is",elapsed , "seconds"

```

- 4) Criar arquivos de *Hard Data* composto pelos furos de sonda e pontos das seções verticais que caem fora das ZI.

```

import sgems
import time
start = time.time()
gridname = "coarse_large_grid"
dataset = "dataset_geral"
nan = sgems.nan()
path = "D:/Helder/Documents/POS/TRABALHO_PRATICO/Sapecado/sapecado_Sgems/simulations_coarse_grids/" # a destination folder where our resulting files will be saved
#get information from dataset (pointset file of boreholes)
Xdset = sgems.get_property(dataset, "_X_") #this information will not be used in the script
Ydset = sgems.get_property(dataset, "_Y_") #this information will not be used in the script
Zdset = sgems.get_property(dataset, "_Z_") #this information will not be used in the script
dset = sgems.get_property(dataset, "new_codes")
#copy data from pointset file to the simulation grid
sgems.execute("CopyProperty
"+dataset+":new_codes:"+gridname+":boreholes:0:0")
print "done copy of "+str(dset)+" from dataset to "+str(gridname)+"
#get information from the new property of grid
for i in range(1):
    buffer = 50 - 20*i #we need get properties information for each buffer used
    x = sgems.get_property(gridname, "_X_")
    y = sgems.get_property(gridname, "_Y_")
    z = sgems.get_property(gridname, "_Z_")
    ymax = max(y)
    ymin = min(y)
    data = sgems.get_property(gridname, "boreholes")
    for j in range(3):
        lag = 50*2**j
        print lag
        region = ""+str(lag)+"m_sections_buffer"+str(buffer)+"
        print "inside region", region
        contact = sgems.get_region(gridname, region)
        filename = "data_inside_b"+str(buffer)+"_e"+str(lag)+"_allbh.dat"
#create a file name were we will store (write) data
        file = open(""+path+filename+", "w") #create the file

```

```

file.write("data_inside_b"+str(buffer)+"_e"+str(lag)+"_allbh.dat\n")
#write a description line
file.write("4\nX\nY\nZ\nallbh_inside_b"+str(buffer)+"_e"+str(lag)+"\n"
) #write a gslib format header (4 lines with their properties names)
# create the complete file (with all boreholes data)
#write in the file the vertical sections values that are "true" (i.e.,
outside buffer zone and inside lateral limits)

    for n in range(len(z)):
        if data[n] <> nan and contact[n]:
            xx = x[n]
            yy = y[n]
            zz = z[n]
            tt = data[n]

            file.write(str(xx)+" "+str(yy)+" "+str(zz)+" "+str(tt)+"\n")

file.close()

print "write the "+str(filename)+" and "+str(filename2)+" file"
# at this point, a gslib file was created in the specified file of
computer and now we can to Load the files as new pointset objects into
the project folder.
print "loading files as pointset..."
#load the created files to import it into SGeMS as pointset object
for j in range(3):
    lag = 50*2**j
    for i in range(1):
        buffer = 50 - 20*i
        filename = "data_inside_b"+str(buffer)+"_e"+str(lag)+"_allbh.dat"
        sgems.execute("LoadObjectFromFile
"+str(path)+" "+str(filename)+"::gslib")
        print "file", filename, "was loaded"
#when importing the files to SGeMS, is needed to set a property name
(we used the same name of .dat files)
#after correct importation, the new pointset file (composed by
boreholes and information from Vertical Sections outside buffers) can
be copied to the simulation grid.

        sgems.execute("CopyProperty
data_inside_b"+str(buffer)+"_e"+str(lag)+"_allbh::allbh_inside_b"+str(
buffer)+"_e"+str(lag)+"::"+gridname+"::allbh_inside_b"+str(buffer)+"_e
"+str(lag)+"::1:1")

        print "done copies"
print "done"

```

Este *script* exporta a informação desejada para arquivos csv, em seguida os mesmos são importados novamente para o SGeMS na forma de arquivos de pontos (*pointset*).

5) Gerar a TI utilizada.

```

import sgems
import time
startall = time.time()
start1 = startall
nan = sgems.nan()
coarse = "coarse_large_grid"
refer = "refer_model_geobody"
left = "left_coarse_ti"
right = "right_coarse_ti"
ti = "sim_TI"
data = sgems.get_property(coarse,refer)

# creating the sinusoid that will be used as the Training Image for
mimic iron ore deposit features.

sgems.execute('RunGeostatAlgorithm
TetrisTiGen::/GeostatParamUtils/XML::<parameters>          <algorithm
name="TetrisTiGen" />          <Grid value="'+coarse+'" region="" />
<Seed value="96317" />          <Nb_Realizations value="1" />
<Property value="'+ti+'" />          <XmlFile>          <Tetris>          <Objects
numObjects="1">          <ObjectManager numElements="1" numOperations="0"
type="Element" name="Object 1">          <Element value="1"
name="Sinusoid">          <ShapeManager type="Sinusoid" name="Sinusoid"
code="1">          <Dimension>          <width>          <CDF
name="Constant">          <mean>          <Params value="80"
name="Constant"/>          </mean>          </CDF>          </width>
<thick>          <CDF name="Constant">          <mean>
<Params value="35" name="Constant"/>          </mean>          </CDF>
</thick>          <amplitude>          <CDF name="Constant">
<mean>          <Params value="8" name="Constant"/>          </mean>
</CDF>          </amplitude>          <wavelength>          <CDF
name="Constant">          <mean>          <Params value="375"
name="Constant"/>          </mean>          </CDF>          </wavelength>
<length>          <CDF name="Constant">          <mean>
<Params value="700" name="Constant"/>          </mean>          </CDF>
</length>          </Dimension>          <Rotation>          <ax>          <CDF
name="Constant">          <mean>          <Params value="0"
name="Constant"/>          </mean>          </CDF>          </ax>
<ay>          <CDF name="Constant">          <mean>          <Params
value="0" name="Constant"/>          </mean>          </CDF>
</ay>          <az>          <CDF name="Constant">          <mean>
<Params value="90" name="Constant"/>          </mean>          </CDF>
</az>          </Rotation>          <Translation>          <dx>          <CDF
name="Constant">          <mean>          <Params value="-30"
name="Constant"/>          </mean>          </CDF>          </dx>
<dy>          <CDF name="Constant">          <mean>          <Params
value="-15" name="Constant"/>          </mean>          </CDF>
</dy>          <dz>          <CDF name="Constant">          <mean>
<Params value="35" name="Constant"/>          </mean>          </CDF>
</dz>          </Translation>          </ShapeManager>          </Element>
</ObjectManager>          </Objects>          <Simulations numSimulations="1">
<Simulation name="Simulation 1">          <ObjectSimulated type="No
Stacking" name="Object 1"/>          <Stop target="1" type="count"/>
<positioning type="Bottom to Top"/>          </Simulation>          </Simulations>

```



```

</Tetris> </XmlFile> </parameters> ')
#inverting values to assign 0 for ore and 1 for waste cells
image = sgems.get_property(coarse,""+str(ti)+"_real0") # by default,
SGEMS set the suffix identifying the number of outcome from
simulations: _real##
for i in range(len(image)):
    if image[i] == 0: image[i] = 1
    else: image[i] = 0
sgems.set_property(coarse,""+str(ti)+"_real0_", image)
#adjust the final object-based TI to lateral and surface limits, i.e,
assing sgems,nan() to cells out of the reference model limits
image2 = sgems.get_property(coarse,""+str(ti)+"_real0_")
for v in range(len(data)):
    if data[v] == nan : image2[v] = nan
sgems.set_property(coarse, ""+str(ti)+"_final", image2)
end1 = time.time()
elapsed1 = end1 - start1
min1 = elapsed1/60
print "took", elapsed1, "seconds to make the final TI in the grid
called", str(coarse)
#copy the final TI property to the lateral grids (left and right side
grids)
sgems.execute("CopyProperty
"+coarse+"::"+str(ti)+"_final::"+left+"::"+str(ti)+"_final::1::1")
sgems.execute("CopyProperty
"+coarse+"::"+str(ti)+"_final::"+right+"::"+str(ti)+"_final::1::1")
end2 = time.time()
elapsed2 = end2 - start1
min2 = elapsed2/60
print "Your stuff to run TI construction, adjusts and copies to minor
grids took", elapsed2, "seconds, which is the same as", min2,
"minutes"

```

6) Simulação e pós-processamento.

```

import sgems
import time
nan = sgems.nan()
start = time.time()
gridname = {      'right' : 'right_coarse_grid',
                  'left'  : 'left_coarse_grid'   }
targetgrid = "coarse_large_grid"
refermodel = "refer_model_geobody"
realiz = 50
offsets = 1
buffersize = 1
distance = {      'd1' : '50m',
                  'd2' : '100m',
                  'd3' : '200m'   }

for l,g in gridname.items():
# test if the simulation grid is the left or right then use the
correct hard data proportion
    if str(l) == "right":
        ore = 0.78
        waste = 0.22
    else:
        ore = 0.66
        waste = 0.34
    for p,n in distance.items():
        for i in range(buffersize):
            a = 50 - 20*i

            sgems.execute('RunGeostatAlgorithm
snesim_std::/GeostatParamUtils/XML::<parameters>          <algorithm
name="snesim_std"      />          <Cmin          value="1"      />
<Constraint_Marginal_ADVANCED          value="0"      />
<resimulation_criterion value="-1" />          <resimulation_iteration_nb
value="1" />          <Nb_Multigrids_ADVANCED          value="3" />
<Debug_Level          value="0" />          <Subgrid_choice          value="1" />
<Previously_simulated          value="4" />          <expand_isotropic          value="1"
/>          <expand_anisotropic          value="0" />          <aniso_factor          value="
" />          <Use_Affinity          value="0" />          <Use_Rotation          value="0" />
<Hard_Data
grid="'+str(l)+'_allbh_vs_e'+str(n.strip("m"))+'_b'+str(a)+'"
region="" property="code" />          <use_pre_simulated_gridded_data
value="0" />          <Use_ProbField          value="0" />
<ProbField properties count="0"          value="" />          <TauModelObject
value="1 1" />          <use_vertical_proportion          value="0" />
<GridSelector_Sim          value="'+str(g)+'"
region="'+str(n)+'_sections_buffer'+str(a)+'" />
<Property_Name_Sim          value="simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'" />

```

```

<Nb_Realizations value="'+str(realiz)+'" /> <Seed value="211175"
/> <PropertySelector_Training grid="'+str(l)+'_coarse_ti"
region="sim_TI_buffer'+str(a)+'m" property="sim_TI_final" />
<Nb_Facies value="2" /> <Marginal_Cdf value="'+str(ore)+'
'+str(waste)+'" /> <Max_Cond value="80" /> <Search_Ellipsoid
value="30 20 15 0 0 90" /> </parameters> ')

    print "simulation done"

# copy the simulation outcomes from each grid (left and right) to the
large grid

    for j in range(realiz):

        print "J value is", j

        outcome =
"simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real'+str(j)+"

        print outcome

        sgems.execute("CopyProperty
"+str(g)+"::"+str(outcome)+"::"+str(targetgrid)+"::"+str(outcome)+"::0
::0")

        print "outcome copies are done for the grid named", g," the
distance of", n,"and the buffer of", a

simulation = time.time()

##-----##-----

#make postsim after copy outcomes from left and right grids to the
large grid.

postin = time.time()

for p,n in distance.items():

    for i in range(buffer_size):

        a = 50 - 20*i

        sgems.execute('RunGeostatAlgorithm
Postsim::/GeostatParamUtils/XML::<parameters> <algorithm
name="Postsim" /> <Hard_Data value="'+targetgrid+' region="" />
<props count="'+str(realiz)+'"
value="simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real0;simul_allbh_b'+st
r(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real1;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__r
eal10;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real11;simul_allbh_b'+st
r(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real12;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__
real13;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real14;simul_allbh_b'+s
tr(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real15;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'_
__real16;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real17;simul_allbh_b'+
str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real18;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'
__real19;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real20;simul_allbh_b'+
str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real21;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'
__real22;simul_allbh_b'+
str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real23;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+
'__real24;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real25;simul_allbh_b
'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real26;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)
+'__real27;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real28;simul_allbh
_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real29;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)
)+'__real30;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real31;simul_allbh
_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real32;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)
)+'__real33;simul_allbh
_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real34;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(
n)+'__real35;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real36;simul_allb
h_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real37;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str

```

```

(n)+'__real38;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real39;simul_all
bh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real40;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str
(n)+'__real41;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real42;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str
(n)+'__real43;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real44;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str
(n)+'__real45;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real46;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str
(n)+'__real47;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real48;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str
(n)+'__real49;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real50;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str
(n)+'__real51;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real52;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str
(n)+'__real53;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real54;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str
(n)+'__real55;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real56;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str
(n)+'__real57;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)+'__real58;simul_allbh_b'+str(a)+'_vs_e'+str
(n)+'__real59" /> <etype value="1" />
<etype_prop value="mean_allbh_50realiz_b'+str(a)+'_vs_e'+str(n)'" />
<cond_var value="0" /> <iqr value="0" /> <quantile
value="0" /> <prob_below value="0" /> <prob_above
value="0" /> <mean_above value="0" /> <mean_below
value="0" /> </parameters> ')

    print "e-type mean for buffer", a, "meters and sections offset of",
n, " are finished"

##-----##-----

#make adjusts (fill cells out buffer zone) in the resulting e-type
objects and simulations outcomes

adj = time.time()

print "starting ajust in the resulting maps and outcomes"

for b in range(offsets):

    lag = 50*2**b

    print "B values is", b

    for s in range(buffer_size):

        a = 50 - 20*s

        print "A value is", a

        data = sgems.get_property(targetgrid, refermodel)

        z = sgems.get_property(targetgrid, "_Z_")

        region = "complement_"+str(lag)+"m_buffer"+str(a)+"

        #print "the region (buffer zone) is", region

        contact = sgems.get_region(targetgrid, region)

        mean = sgems.get_property(targetgrid,
"mean_allbh_50realiz_b'+str(a)+'_vs_e"+str(lag)+"m")

        for i in range(len(z)):

            if z[i] <= 1095: mean[i] = nan

            elif contact[i]:

                mean[i] = data[i]

            elif mean[i] == nan:

                mean[i] = data[i]

        sgems.set_property(targetgrid,
"mean_allbh_50realiz_b'+str(a)+'_vs_e"+str(lag)+"m",mean)

        print "done ajust in mean map"

```

```

for j in range(realiz):
    print "the J value is", j
    propname = "simul_allbh_b"+str(a)+"_vs_e"+str(lag)+"m__real"+str(j)+""
    prop = sgems.get_property(targetgrid, propname)
    print "the region (buufer zone) is", region
    for i in range(len(z)):
        if z[i] <= 1095: prop[i] = nan
        elif contact[i]:
            prop[i] = data[i]
        elif prop[i] == nan:
            prop[i] = data[i]
    sgems.set_property(targetgrid, "simul_allbh_b"+str(a)+"_vs_e"+str(lag)+"m__real"+str(j)+"", prop)
    print "done ajust in", propname
postend = time.time()
#-----##-----
#deleting properties to save disk space
for l, g in gridname.items():
    for p, n in distance.items():
        for j in range(bufferize):
            a = 50 - 20*j
            #deleting properties
            print "deleting simulation outcomes for RAM optimization"
            for i in range(realiz):
                sgems.execute("DeleteObjectProperties
"+str(g)+"::simul_allbh_b"+str(a)+"_vs_e"+str(n)+"__real"+str(i)+"")
                sgems.execute("DeleteObjectProperties
"+str(g)+"::mean_allbh_50realiz_b"+str(a)+"_vs_e"+str(n)+"")
            print "simulated objects and mean maps of "+str(g)+" were
deleted"
#-----##-----
final = time.time()
sim = simulation - start
postsim = postend-postin
ajust = final - adj
total = final - start
print "the time took to run simulatios is", sim, "seconds"
print "the time took to run the post process simulation is", postsim,
"seconds"
print "the time took to run simulatios adjusts is", ajust, "seconds"
print "the total time took to run script with all boreholes", total,

```

```
"seconds"  
print "process completed using all boreholes"
```

Este *script* executa o algoritmo SNESIM de forma separada em cada *grid* lateral e o resultado é copiado para o *grid* maior, em seguida, os dados do modelo de referência são copiados para os pontos não simulados e se faz o pós-processamento.

7) Gerar os *thresholds* das curvas de classificação de recursos.

```

import sgems
nan = sgems.nan()
gridname = "coarse_large_grid"
offsets = 3
buffersize = 1
for l in range(offsets):
    lag = 50*2**l
    #print lag
    for m in range(buffersize):
        r = 50 - 20*m
        #print r
        a = 0
        for b in range(9): # number of thresholds
            a+=0.1
            print a
            allbh = "mean_allbh_50realiz_b"+str(r)+"_vs_e"+str(lag)+"m"
            data = sgems.get_property(gridname, allbh)
            region = sgems.get_region(gridname,
            ""+str(lag)+"m_sections_buffer"+str(r)+"")
            for i in range(len(data)):
                if region[i]:
                    if data[i] <= a: data[i] = 0 # verify if cell value has xx% or
                    less of chance (probability) to be assigned ore (code 0). If it's true, the
                    cell value is 0 (zero), else it's a waste cell and his value is 1 (one).
                    else: data[i] = 1
                sgems.set_property(gridname,
                "model_allbh_b"+str(r)+"_e"+str(lag)+"m_"+str(int(10*(9-
                b)))+"%prob_ore",data)
print "done"

```