

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)

**DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA SIMULAR A
VARIABILIDADE DO MINÉRIO EM PILHAS DE HOMOGENEIZAÇÃO**

Diego Machado Marques

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, RS
2010

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)

**DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA SIMULAR A
VARIABILIDADE DO MINÉRIO EM PILHAS DE HOMOGENEIZAÇÃO**

Diego Machado Marques
Engenheiro de Minas

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, RS
2010

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa / Tecnologia Mineral, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Banca examinadora:

Geól. Dr. Diniz Tamantini Ribeiro (Vale)

Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza (CSTM/Unipampa)

Prof. Dr. Paulo Salvadoretti (DEMIN/UFRGS)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

"O bom estrategista, para vencer uma batalha, faz antes muitos cálculos no seu templo, pois sabe que eles são a chave que o conduzirá à vitória. É calculando e analisando que o estrategista vence previamente a guerra na simulação feita no templo. Portanto, fazer muitos cálculos conduz à vitória, e poucos, à derrota. Quando examino a questão dessa forma, o resultado da guerra torna-se evidente"

**Aos meus pais Clésia e José
Antonio e minha irmã Patrícia,
pelo apoio e dedicação.**

AGRADECIMENTO

Ao Prof. Dr. João Felipe C. L. Costa, pela orientação na elaboração desse trabalho, além das oportunidades de crescimento profissional e sua amizade.

Ao Eng. de Minas Igor Plein Bolzan e ao Geól. Dr. Diniz Tamantini Ribeiro, pelas suas valorosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os colegas e amigos do LPM que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

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

À Companhia Vale pela disponibilização dos dados para este estudo e as visitas técnicas, que permitiram gerar um cenário para a aplicação da metodologia desenvolvida. Além disso, o apoio técnico-financeiro recebido da empresa por meio do convênio de cooperação Vale/UFRGS e autorização para publicação dos resultados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida.

Índice

Lista de figuras	ix
Lista de Tabelas	xvi
Resumo	xviii
Abstract	xix
Capítulo 1	
Introdução	1
1.1 Meta desta dissertação.....	3
1.2 Objetivos específicos desta dissertação.....	3
1.3 Metodologia	4
1.4 Organização dessa dissertação	6
Capítulo 2	
Estimativa de incerteza por simulação geoestatística	7
2.1 Estimativa versus simulação	8
2.2 Espaço de incerteza	10
2.3 Simulação por bandas rotativas	11
2.4 Estudo de caso.....	14
2.4.1 Análise dos dados.....	14

2.4.2	Transformação Gaussiana.....	20
2.4.3	Continuidade espacial.....	22
2.4.4	Verificação de multinormalidade	25
2.4.5	Geração dos modelos simulados	28
2.4.6	Validação das simulações.....	30
2.5	Comentários finais.....	33

Capítulo 3

Princípios de Homogeneização.....	35
3.1 Variabilidade das características dos minérios.....	35
3.2 Homogeneidade e heterogeneidade	36
3.2.1 Material heterogêneo	36
3.2.2 Material homogêneo	37
3.3 Relação volume-variância	37
3.4 Estratégias de homogeneização	39
3.4.1 Blendagem e homogeneização.....	41
3.4.2 Blendagem na lavra	41
3.4.3 Homogeneização em pilhas.....	41
3.5 Simulação de pilhas longitudinais de homogeneização	47
3.5.1 Definições do algoritmo.....	48
3.5.2 Dados de entrada	49
3.5.3 Cálculo de variabilidade entre pilhas de diferentes massas.....	51
3.5.4 Pilhas de homogeneização como uma ferramenta no auxílio ao planejamento de lavra	58
3.5.5 Cálculo de variabilidade interna de pilhas de determinada massa	60
3.5.6 Resultados apresentados pelo algoritmo	73

3.6 Comentários finais.....	74
Capítulo 4	
Estratégia de homogeneização incorporando incerteza.....	75
4.1 Estudo de caso.....	75
4.1.1 Definições de lavra	77
4.1.2 Preparação dos dados simulados	82
4.2 Redução de variabilidade em função do aumento de massa	85
4.3 Pilhas de homogeneização associadas ao planejamento de lavra.....	88
4.4 Variabilidade interna da pilha	94
4.5 Comentários finais.....	100
Capítulo 5	
Conclusões e Recomendações.....	101
5.1 Conclusões.....	101
5.2 Recomendações.....	102
Referências Bibliográficas	104
Apêndice A - CD de distribuição do <i>software</i> desenvolvido	110

Lista de figuras

Figura 1.1 -	Seqüência metodológica adotada.....	5
Figura 2.1 -	Variograma da estimativa por (a) krigagem ordinária e (b) por simulação da variável Cd (pontos) com o modelo variográfico dos dados (linha contínua) (adaptado de Goovaerts (1997)).	9
Figura 2.2 -	Comparativo entre realidade, estimativa por krigagem e simulação condicional.....	10
Figura 2.3 -	Flutuações ergódicas (a) nos variogramas e (b) gráfico quantil-quantil resultantes de 12 realizações obtidas por simulação seqüencial (linhas azuis) em torno do modelo (linhas pretas).	11
Figura 2.4 -	Princípio de construção do método de bandas rotativas in 2D....	12
Figura 2.5 -	Fluxograma com os vários estágios de construção de uma simulação por bandas rotativas.	13
Figura 2.6 -	Vista em planta dos dados do Depósito Capitão do Mato.	16
Figura 2.7 -	Histograma da variável sílica global para os (a) dados originais e (b) desagrupados no domínio hematítico.....	17
Figura 2.8 -	Histograma da variável sílica global para os (a) dados originais e (b) desagrupados no domínio itabirítico.....	17
Figura 2.9 -	Vista em planta dos dados do Depósito Tamanduá.	18
Figura 2.10 -	Histograma da variável sílica global para os (a) dados originais e (b) desagrupados no domínio hematítico.....	19
Figura 2.11 -	Histograma da variável sílica global para os (a) dados originais e (b) desagrupados no domínio itabirítico.....	19

Figura 2.12 -	Processo gráfico de transformação da distribuição original (z-valores) em y-valores. Fonte: Goovaerts, 1997 – p. 268.	20
Figura 2.13 -	Histograma dos dados normalizados para (a) hematita e (b) itabirito do Depósito Capitão do Mato.	21
Figura 2.14 -	Histograma dos dados normalizados para (a) hematita e (b) itabirito do Depósito Tamanduá.	22
Figura 2.15 -	Variograma experimental (pontos) e modelado (linha contínua) na direção de máxima (azul) e intermediária (verde) e mínima (vermelho) continuidade espacial para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Capitão do Mato.	24
Figura 2.16 -	Variograma experimental (pontos) e modelado (linha contínua) na direção de máxima (azul), intermediária (verde) e mínima (vermelho) continuidade espacial para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Tamanduá.	25
Figura 2.17 -	Média das médias para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Capitão do Mato.	29
Figura 2.18 -	Variância das médias para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Capitão do Mato.	29
Figura 2.19 -	Média das médias para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Tamanduá.	30
Figura 2.20 -	Variância das médias para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Tamanduá.	30
Figura 2.21 -	Reprodutibilidade da estatística para as 50 realizações (linhas cinza), em função dos dados amostrais (linha vermelha) para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Capitão do Mato.	31
Figura 2.22 -	Reprodutibilidade da estatística para as 50 realizações (linhas cinza), em função dos dados amostrais (linha vermelha) para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Tamanduá. ..	31

Figura 2.23 - Variograma modelado e flutuações ergódicas para (a) direção de máxima, (b) intermediária e (c) mínima continuidade espacial para o domínio hematítico do Depósito Capitão do Mato.....	32
Figura 2.24 - Variograma modelado e flutuações ergódicas para (a) direção de máxima, (b) intermediária e (c) mínima continuidade espacial para o domínio itabirítico do Depósito Capitão do Mato.....	32
Figura 2.25 - Variograma modelado e flutuações ergódicas para (a) direção de máxima, (b) intermediária e (c) mínima continuidade espacial para o domínio hematítico do Depósito Tamanduá.	33
Figura 2.26 - Variograma modelado e flutuações ergódicas para (a) direção de máxima, (b) intermediária e (c) mínima continuidade espacial para o domínio itabirítico do Depósito Tamanduá.	33
Figura 3.1 - Relação de aumento/diminuição da variância com o aumento/diminuição do suporte (Pilger, 2000).	38
Figura 3.2 - (a) Contraste entre o espalhamento da distribuição dos blocos e dos dados amostrais e (b) histogramas de diferentes tamanhos de blocos para a mesma variável (Pilger, 2000).	38
Figura 3.3 - Comportamento esperado pela relação volume-variância.....	39
Figura 3.4 - Esquema de simplificado das estratégias de homogeneização presente no complexo Vargem Grande.	40
Figura 3.5 - Homogeneização em pilhas (Gambin, 2003).....	43
Figura 3.6 - Pilha do tipo circular (autor desconhecido, obtida em http://www.flsmidth.com).....	44
Figura 3.7 - Pilha do tipo longitudinal (autor desconhecido, obtida em http://www.flsmidth.com).....	45
Figura 3.8 - Pilhas longitudinais em linha.	45
Figura 3.9 - Pilhas paralelas com empilhadeira de torre giratória.	46

Figura 3.10 - Principais esquemas de empilhamento utilizados - (a) chevron (b) windrow (c) chevron-windrow	47
Figura 3.11 - Janela inicial do programa <i>BlendSim</i>	48
Figura 3.12 - Modelo teórico de pilha adotado.....	49
Figura 3.13 - Exemplo de arquivo de entrada do software.	50
Figura 3.14 - Janela contendo as informações dos dados de entrada do <i>BlendSim</i>	51
Figura 3.15 - Cenários equiprováveis para formação de pilhas hipotéticas.	52
Figura 3.16 - Redução de variabilidade para o aumento do volume em diversos cenários.....	53
Figura 3.17 - Janela de parâmetros do <i>BlendSim (Inter pile)</i>	54
Figura 3.18 - Curvas de redução de variabilidade considerando diversas massas de pilhas.	57
Figura 3.19 - Série temporal com os teores máximos e mínimos das pilhas de homogeneização simuladas, onde a linha vermelha representa o máximo teor e a azul o mínimo teor de cada pilha, obtido a partir de 5 simulações geoestatísticas.	58
Figura 3.20 - Janela de parâmetros do <i>BlendSim (Locate)</i>	59
Figura 3.21 - Deposição e retomada na pilha <i>chevron</i> (Schofield, 1980).	62
Figura 3.22 - Janela de parâmetros do <i>BlendSim (Intra pile)</i>	64
Figura 3.23 - Empilhamentos tipo <i>chevron</i> do exemplo.	66
Figura 3.24 - Empilhamento do material no método <i>chevron</i> do exemplo.	67
Figura 3.25 - Empilhamento tipo <i>windrow</i> do exemplo.	67
Figura 3.26 - Empilhamento do material no método <i>windrow</i> do exemplo.....	68
Figura 3.27 - Janela de parâmetros do <i>BlendSim (intra-pilhas)</i>	70
Figura 3.28 - Gráfico de redução de variabilidade com o aumento de camadas na pilha de homogeneização.	72

Figura 3.29 - Gráfico de redução de variabilidade para configurações de pilha com viabilidade de construção.	72
Figura 3.30 - Janela contendo as informações dos dados de saída do <i>BlendSim</i>	73
Figura 4.1 - Pátios para formação das pilhas de homogeneização.	76
Figura 4.2 - Recuperadora de roda de caçamba.	77
Figura 4.3 - Corte vertical (XZ) sobre as topografias inicial de 2004 e inicial de 2005, na Mina Capitão do Mato, paralelo a coordenada y = 810.	78
Figura 4.4 - Vista em planta dos blocos lavrados no ano de 2004 na mina Capitão do Mato.	81
Figura 4.5 - Vista em planta dos blocos lavrados no ano de 2004 na mina Tamanduá.	81
Figura 4.6 - Série temporal dos blocos seqüenciados na mina Capitão do Mato. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica, obtidos a partir de 50 cenários equiprováveis.	82
Figura 4.7 - Série temporal dos blocos seqüenciados na mina Tamanduá. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica, obtidos a partir de 50 cenários equiprováveis.	83
Figura 4.8 - Exemplo do seqüenciamento dos blocos com a união dos dados das minas em um único arquivo.	84
Figura 4.9 - Série temporal dos blocos seqüenciados. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica, obtidos a partir de 50 cenários equiprováveis.	85
Figura 4.10 - Gráfico de redução de variabilidade em função do incremento de massa, para 50 cenários equiprováveis.	86
Figura 4.11 - Série temporal das pilhas de 70.000 t. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis.	87

- Figura 4.12 - Série temporal das pilhas de 130.000 t. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis. 88
- Figura 4.13 - Série temporal das pilhas de 210.000 t. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis. 88
- Figura 4.14 - Pilhas de 210.000 t fora das especificações. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis. 91
- Figura 4.15 - Série temporal com a banda de incerteza dos blocos formadores da pilha 42. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis. 92
- Figura 4.16 - Série temporal com a banda de incerteza dos blocos formadores da pilha 100. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis. 92
- Figura 4.17 - Vista em planta da localização dos blocos no Depósito Capitão do Mato, onde os pontos cinza são os blocos lavrado em 2004, os pontos azuis são os blocos da pilha 42 e os pontos vermelhos são os blocos da pilha 100. 93
- Figura 4.18 - Vista em planta da localização dos blocos no Depósito Tamanduá, onde os pontos cinza são os blocos lavrado em 2004, os pontos azuis são os blocos da pilha 42 e os pontos vermelhos são os blocos da pilha 100. 93
- Figura 4.19 - Série temporal das pilhas de 210.000 t com o planejamento de lavra alterado (blocos formadores das pilhas 42 e 100 removidos). 94
- Figura 4.20 - Gráfico de redução de variabilidade em função do número de camadas para pilhas geradas com vazão do material de 2 m³/m. 96

- Figura 4.21 - Gráfico de redução de variabilidade em função do número de camadas para pilhas geradas com vazão do material de 4,5 m³/m. 98
- Figura 4.22 - Gráfico de redução de variabilidade em função do número de camadas para pilhas geradas com vazão do material de 2 m³/m, entre as camadas 35 e 65. 100

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 -	Resultados do teste de bigaussianidade baseado na Equação 2.8 para a variável Si (%) no domínio hematítico do Depósito Capitão do Mato.	26
Tabela 2.2 -	Resultados do teste de bigaussianidade baseado na Equação 2.8 para a variável Si (%) no domínio itabiritico do Depósito Capitão do Mato.	27
Tabela 2.3 -	Resultados do teste de bigaussianidade baseado na Equação 2.8 para a variável Si (%) no domínio hematítico do Depósito Tamanduá.	27
Tabela 2.4 -	Resultados do teste de bigaussianidade baseado na Equação 2.8 para a variável Si (%) no domínio itabiritico do Depósito Tamanduá.	28
Tabela 3.1 -	Resultados do exemplo hipotético	53
Tabela 3.2 -	Arquivo de saída da rotina <i>Inter Piles</i>	56
Tabela 3.3 -	Arquivo produzido pela rotina <i>Locate</i>	60
Tabela 3.4 -	Lotes utilizados para compor as pilhas de homogeneização hipotéticas.	65
Tabela 3.5 -	Resultado da rotina <i>Intra pile</i>	71
Tabela 4.1 -	Produção do ano de 2004 na Mina Capitão do Mato.....	79
Tabela 4.2 -	Produção do ano de 2004 na Mina Tamanduá.....	79
Tabela 4.3 -	Descrição das litologias consideradas estéril na mina Capitão do Mato.....	80

Tabela 4.4 -	Descrição das litologias consideradas estéril na mina Tamanduá.	80
Tabela 4.5 -	Resultados na redução de variabilidade no cenário com maior redução de variabilidade (26) e o de menor redução de variabilidade (49) para pilhas de 210.000 t.	87
Tabela 4.6 -	Resultado da rotina Locate.	90
Tabela 4.7 -	Comprimento médio das pilhas de homogeneização para diferentes números de camadas (vazão de 2 m ³ /m).	97
Tabela 4.8 -	Comprimento médio das pilhas de homogeneização para diferentes números de camadas (vazão do material de 4,5 m ³ /m).	99

Resumo

Pilhas de homogeneização são amplamente utilizados na indústria mineira para a redução da variabilidade nos teores de alimentação das plantas de beneficiamento. Vários métodos são encontrados para projetar pilhas de homogeneização e a maioria deixa de incorporar a variabilidade *in situ* intrínseca do depósito mineral. A metodologia proposta combina pilhas longitudinais e simulação geoestatística para emular a variabilidade dos teores *in situ* e da pilha retomada. A redução da variabilidade em pilhas de homogeneização é baseada na relação volume-variância, ou seja, quanto maior for o suporte, menor será a variabilidade. Baseado em uma seqüência de lavra pré-definida para selecionar os blocos que formarão cada pilha para cada modelo de blocos simulado, as flutuações dos teores derivadas das pilhas reais podem ser simuladas. Estas pilhas são caracterizadas por sua forma, tamanho (comprimento e altura) e o número de camadas. Usando esta metodologia pode-se avaliar, dentro de um determinado período de tempo, a variação de teores esperada para vários tamanhos de pilhas e também a variabilidade interna dos teores quando dada pilha for retomada. Resultados de um estudo de caso em duas grandes minas de ferro operadas pela Vale mostraram a adequação e a funcionalidade do método. É demonstrada a taxa de redução de variabilidade com o aumento do tamanho da pilha e também a relação entre a variabilidade interna de teores de um dado tamanho de pilha, com diferentes números de camadas usadas.

Abstract

Homogenization piles are largely used in the mining industry for variability reduction in the head grades feeding the processing plants. Various methods are applied for homogenization piles design and most fail to incorporate the *in situ* grade variability of a mineral deposit. The methodology proposed combines longitudinal piles and geostatistical simulation to emulate the *in situ* and the reclaimed grade variability. Variability reduction in large piles is based on the volume-variance relationship, i.e. the larger is the support the smaller is the variability. Based on a pre-defined mining sequence to select the blocks that will form each pile for each simulated block model, the statistical fluctuation of the grades derived from real piles can be simulated. These piles are characterized by their form, size (length and height) and number of layers. Using this methodology, one can evaluate within a certain time period the expected grade variability for various pile size and also the internal grade variability when a given pile is reclaimed. Results from a case study at two large iron mines operated by Vale proved the adequacy and functionality of the method. It is demonstrated the rate of variability decrease as the pile size increases and also the relation between the internal grade variability to a given pile size, as different number of layers are used.

Capítulo 1

Introdução

Apesar do aumento contínuo da quantidade de minério de ferro exigido pela indústria siderúrgica, as restrições em termos de contaminantes têm sido cada vez mais severas. Por isso, é fundamental reduzir a variabilidade desses teores para a otimização das unidades de beneficiamento. Uma possibilidade para a redução dessa variabilidade consiste na alteração da seqüência de lavra, combinando minério de distintas frentes com vistas a manter o teor o mais constante possível. Através dessa combinação, é possível realizar uma blendagem, minerando materiais, que por si só não poderiam ser alimentados isoladamente em uma planta de beneficiamento.

A outra possibilidade passa pela construção de unidades de homogeneização. A unidade de homogeneização mais simples e mais utilizada é a pilha de homogeneização. O sistema de homogeneização em pilhas, utilizado pela primeira vez em 1905, consiste em depositar o material sobre um eixo alongado, formando uma configuração retangular e com a seção vertical triangular, além de semi-cone em cada extremo da pilha formada. Atualmente, outros tipos de pilhas também são usadas, incluindo pilhas circulares contínuas, onde a construção e a retomada são realizadas simultaneamente (Gerstel, 1996).

Nos últimos anos, a capacidade de atenuar as variações na qualidade do minério vem fazendo com que a utilização de pilhas de homogeneização seja um processo essencial em algumas atividades de mineração. Quando projetada e operada adequadamente, as pilhas servem como unidade de armazenamento de

material, em adição à sua capacidade e potencialidade de homogeneizar o material ROM. Hustrulid & Huchta (1995) afirmam que as pilhas de minério podem ser utilizadas na tarefa de homogeneização a fim de assegurar um teor quase constante do minério alimentado à usina.

Entretanto, as pilhas de homogeneização se caracterizam pelos elevados custos de implementação. Sendo assim, a utilização de técnicas de previsão da variabilidade do minério *in situ* para utilização no dimensionamento das mesmas apresenta-se como uma solução adequada a esse problema. Desse modo, a caracterização do depósito mineral, a partir de um modelo geológico e numérico robusto, torna-se essencial para análise da qualidade do material *in situ* e no cálculo de tonelagens com respectivos teores.

A aplicação de técnicas geoestatísticas permite a construção de modelos estimados de variáveis selecionadas, interpoladas por meio de krigagem ordinária ou qualquer outra técnica derivada da mesma. No entanto, esse procedimento não pode incorporar a incerteza associada ao valor interpolado de forma satisfatória, sendo a variância dos valores estimados menor que a variância dos dados originais. Há, também, limitações associadas ao uso da variância de krigagem como uma medida da incerteza, sendo este tópico discutido extensivamente dentro da literatura (David, 1977; Isaaks & Srivastava, 1989). Sendo assim, a simulação geoestatística condicional (Journel, 1974) foi utilizada neste trabalho, pois ao contrário da krigagem, visa reproduzir a variabilidade *in situ* e a continuidade espacial do conjunto de dados e, combinando múltiplos modelos igualmente prováveis, permite uma avaliação da incerteza associada aos teores.

Estes modelos reproduzem a estrutura espacial e o conjunto de dados como um todo, em lugar de apenas prover estimativas locais de um atributo. O modelo é condicionalmente simulado se reproduzir as características de dispersão do conjunto original de dados, dadas pelo seu histograma e pela sua continuidade espacial representada pelo seu semi-variograma, além de reproduzir os dados em locais simulados que coincidam com as coordenadas dos mesmos. Em um modelo condicionalmente simulado é possível endereçar perguntas que recorrem à dispersão dos teores durante a mineração ou processamento, desde

que as características de dispersão dos dados originais sejam mantidas. Quanto melhor a continuidade espacial e a variabilidade do depósito puderem ser descritas, mais adequado numericamente será o modelo.

Esta dissertação aborda um estudo da estratégia de homogeneização baseada em técnicas geoestatísticas, levando em consideração os parâmetros econômicos, geométricos e estatísticos do minério a ser homogeneizado. Além disso, incorpora a ferramenta de simulação condicional na estratégia de homogeneização de forma a medir a variabilidade associada a diversos tamanhos de pilhas (lotes de massas), além de estudar o impacto dos diferentes arranjos espaciais que esse material pode ser disposto em seu leito de formação.

1.1 Meta desta dissertação

A partir dos tópicos abordados anteriormente sobre a homogeneização de minérios, a presente dissertação tem como meta o aperfeiçoamento da estratégia de homogeneização de minérios, baseando-se em técnicas geoestatísticas. Utilizando técnicas de simulação geoestatística, procura-se quantificar a variabilidade *in situ* de parâmetros químicos do minério, possibilitando a análise do impacto do tamanho da pilha de homogeneização, bem como o arranjo interno da mesma na variabilidade do material que alimentará a planta de beneficiamento.

1.2 Objetivos específicos desta dissertação

Por meio de um estudo de caso com dois depósitos de ferro localizados no estado de Minas Gerais, esta dissertação propõe atingir a sua meta cumprindo os seguintes objetivos específicos:

- aplicar simulação geoestatística para acessar a variabilidade *in situ* das variáveis de interesse;
- relacionar essa variabilidade com a estratégia de homogeneização, pela análise de diferentes tamanhos de pilhas longitudinais, a fim de reduzir as flutuações das características do minério;

- analisar o impacto do arranjo de formação da pilha na variabilidade de alimentação da planta de beneficiamento, levando em consideração as limitações físicas na formação da mesma.

1.3 Metodologia

A fim de atender as necessidades do mercado consumidor e garantir a viabilidade do empreendimento de mineração, a incorporação de simulação estocástica na estratégia de homogeneização por técnicas geoestatísticas visa prever as flutuações na qualidade do minério *in situ* como forma de controlar as oscilações na qualidade do produto final.

Para atingir os objetivos propostos nesta dissertação foi adotada a seguinte metodologia de trabalho, representada na Figura 1.1.

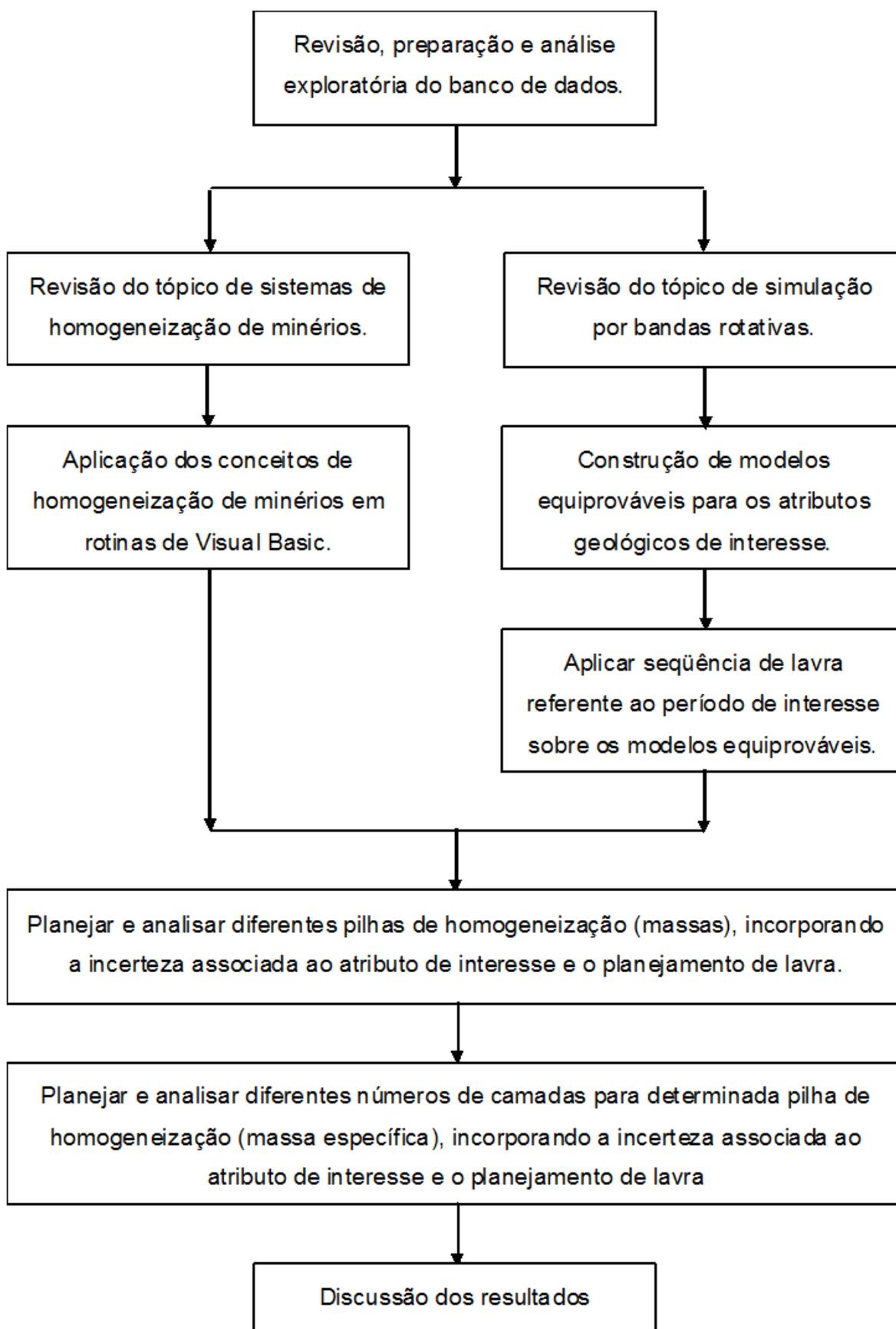


Figura 1.1 - Seqüência metodológica adotada.

1.4 Organização dessa dissertação

Os capítulos seguintes dessa dissertação estão organizados da seguinte maneira:

O Capítulo 2 revisa brevemente os princípios de simulação geoestatística, bem como apresenta os resultados da análise de incerteza nos dois depósitos do estudo de caso.

O Capítulo 3 revisa brevemente os princípios de homogeneização de minérios. É mostrada a implementação da metodologia para construção de pilhas de homogeneizações em algoritmos computacionais.

O Capítulo 4 apresenta o pós-processamento dos modelos simulados gerados e a aplicação de estratégia de homogeneização através do algoritmo criado, incorporando a incerteza associada ao valor estimado para os atributos de estudo, tanto nos diferentes tamanhos de massa, bem como no arranjo interno das pilhas de homogeneização.

O Capítulo 5 inclui conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estimativa de incerteza por simulação geoestatística

A maioria das técnicas de estimativa fornece um modelo de blocos com valores estimados usando métodos de krigagem (Matheron, 1963). Este modelo de blocos é impróprio para acessar a incerteza associada às estimativas, ou seja, este procedimento é falho na previsão de flutuações de teores. A krigagem gera a melhor estimativa local possível, mas sempre irá existir um erro associado. Segundo Souza (2002), muitos fatores podem contribuir para o erro associado as estimativa, tais como, o efeito da mudança de suporte, a insuficiência de amostras, a má amostragem ou técnica de preparação, erros de interpolação na geração do modelo de blocos, efeito de suavização dos interpoladores, incerteza na interpretação geológica, etc.. Assim, modelos de blocos gerados por estimativas sempre terão um erro associado, sendo essa uma das principais razões para problemas de reconciliação por vezes observada.

Já, distintamente da krigagem, a simulação geoestatística tem como objetivo reproduzir a variabilidade *in situ*, incluindo a reprodução da continuidade espacial do conjunto de dados de entrada. O depósito simulado possui a vantagem de ter uma realização do atributo de interesse em todos os pontos e não apenas os pontos amostrais. Isto auxilia na análise de questões financeiras ou relacionadas ao planejamento de lavra, ajudando a avaliar os potenciais riscos durante o processo de decisão. Estes depósitos simulados são também chamados de modelos numéricos do depósito real (Journel & Huijbregts, 1978).

As primeiras aplicações de simulação geoestatística em mineração remontam os anos 70 e início dos 80 (David, 1973; David *et al.*, 1974; Clark & White, 1976; Journel & Huijbregts, 1978; Dagbert, 1981; Chilès, 1984; Deraisme *et al.*, 1984) (Souza, 2007). A simulação geoestatística possui uma variedade de aplicações na indústria (Blackwell & Sinclair, 2002), incluindo:

- estudo de continuidade espacial de teores (Nowak *et al.*, 1993);
- otimização de locação amostral para a exploração avançada (Pilger, 2000);
- avaliações de recursos e reservas (Souza *et al.*, 2004);
- planejamento de lavra (Blackwell *et al.*, 1999; Bonato *et al.*, 2000; Gambin *et al.*, 2005);
- análise de risco financeiro (Ravenscroft, 1992; Rossi, 1999);
- qualquer combinação dos citados acima.

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma metodologia que permite quantificar a incerteza associada ao fenômeno, evitando efeitos de suavização que ocorrem em métodos de estimativa tradicionais. Serão revisados brevemente alguns conceitos básicos de simulação geoestatística e os principais aspectos do algoritmo de simulação utilizado.

2.1 Estimativa versus simulação

A estimativa de teores tem como objetivo fornecer, a cada nó de *grid* (x), um valor de teor $z^*(x)$ que seja o mais próximo possível do teor real no local $z_0(x)$. Os critérios para avaliar a qualidade de uma estimativa são a ausência de viés e erro médio quadrático mínimo, ou de forma equivalente a mínima variância da estimativa $E\{[z(x)-z^*(x)]^2\}$ (Journel & Huijbregts, 1978). Entretanto, não há razões para que os estimadores reproduzam a variabilidade espacial dos teores reais $\{z_0(x)\}$. O que se observa são os efeitos de suavização, onde os valores baixos são superestimados, enquanto que os valores altos são subestimados. Outro inconveniente é que a suavização não é uniforme, mostrando-se mínima próxima aos dados e aumentando com o afastamento como pode ser visto na Figura 2.1 (a) (Goovaerts, 1997).

Já, a simulação geoestatística $\{z_s(x)\}$ visa respeitar as características dos dados reais $\{z_0(x)\}$, reproduzindo suas características de dispersão, como pode ser visto na Figura 2.1(b). O modelo simulado é dito ser condicionalmente simulado ($z_{sc}^*(x)$) se honrar os dados amostrais, enquanto reproduz as características de dispersão e de continuidade espacial do mesmo conjunto de dados, ou seja, a média, variância e covariância, gerando representações igualmente prováveis do depósito real. Ao contrário da estimativa, a cada nó de *grid* (x), o valor de $z_s(x)$ não é o melhor valor possível $z_0(x)$.

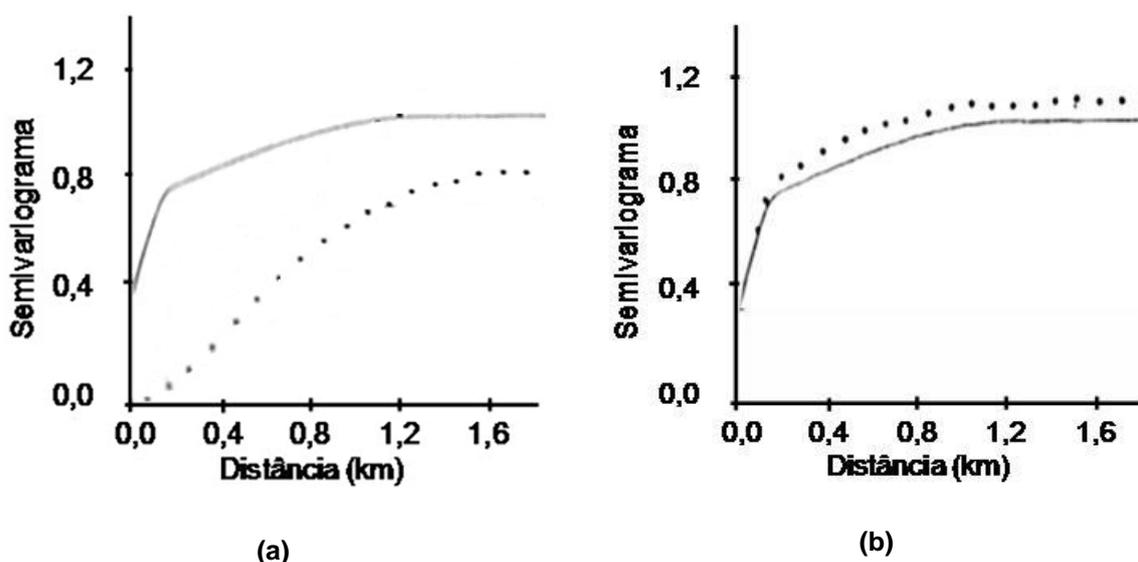


Figura 2.1 - Variograma da estimativa por (a) krigagem ordinária e (b) por simulação da variável Cd (pontos) com o modelo variográfico dos dados (linha contínua) (adaptado de Goovaerts (1997)).

Os objetivos da simulação e da estimativa são, normalmente, incompatíveis. Como mostra a Figura 2.2, mesmo que a curva dos valores estimados $z^*(x)$ é, em média, mais próxima da curva real $z_0(x)$, a curva de valores simulados $z_{sc}^*(x)$ é a melhor reprodução das flutuações da curva real. A curva dos valores estimados é preferível para locação e estimativa de recursos, enquanto que a curva de simulação é preferível para estudo da dispersão das características destes, considerando que a curva real só é conhecida realmente nos pontos amostrados x_a (Journel & Huijbregts, 1978).

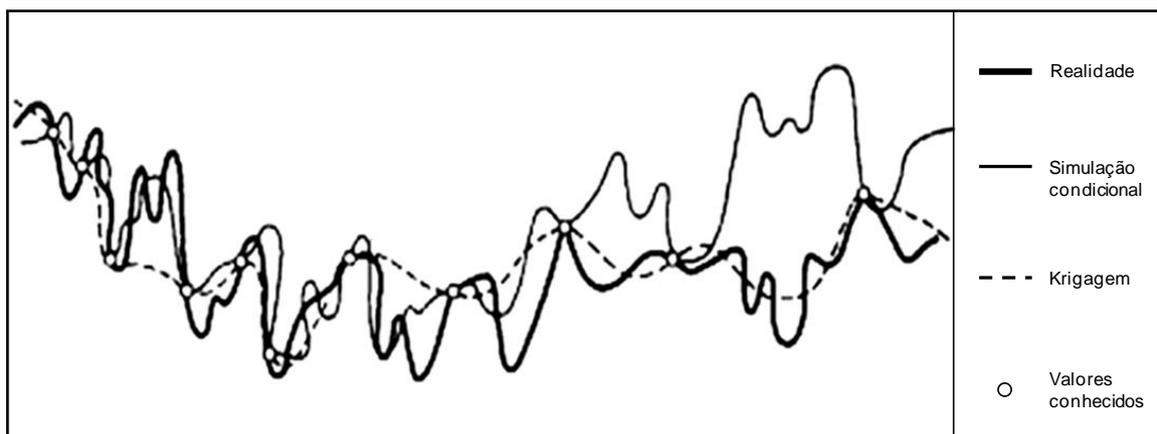


Figura 2.2 - Comparativo entre realidade, estimativa por krigagem e simulação condicional.

A partir da Figura 2.2, também pode-se constatar que a simulação não pode ser usada para substituir a amostragem, a qual é sempre necessária para uma boa estimativa do depósito. De qualquer modo, quanto melhor conhecido for o depósito, melhor será a avaliação do mesmo e, conseqüentemente, melhor serão os resultados das estimativas e/ou simulações.

2.2 Espaço de incerteza

Mesmo em depósito minerais densamente amostrados, não existem informação suficiente para permitir a utilização de modelos determinísticos na estimativa de atributos em locais não amostrados. Sendo assim, sempre existe incerteza sobre como o fenômeno geológico se comporta entre os pontos amostrais. Por essas razões, os fenômenos devem ser descritos por meio de modelos probabilísticos, os quais consideram essas incertezas fundamentais. Esses modelos proporcionam ferramentas para estimar a incerteza associada a locais não amostrados utilizando funções randômicas estacionárias e variáveis randômicas.

A simulação geoestatística reproduz as características de dispersão dos histogramas e variogramas utilizados para sua realização de modo ligeiramente diferente a cada execução. Um conjunto de realizações fornece uma medida da incerteza, resultante do nosso conhecimento imperfeito sobre a distribuição no espaço do parâmetro ou variável de trabalho. Essa distribuição é o espaço de incerteza. As discrepâncias entre as realizações e o modelo estatístico adotado

são conhecidas como flutuações ergódicas. A Figura 2.3 mostra as flutuações dos variogramas e gráfico quantil-quantil de 12 realizações em relação ao modelo de referência (Deutsch & Journel, 1998).

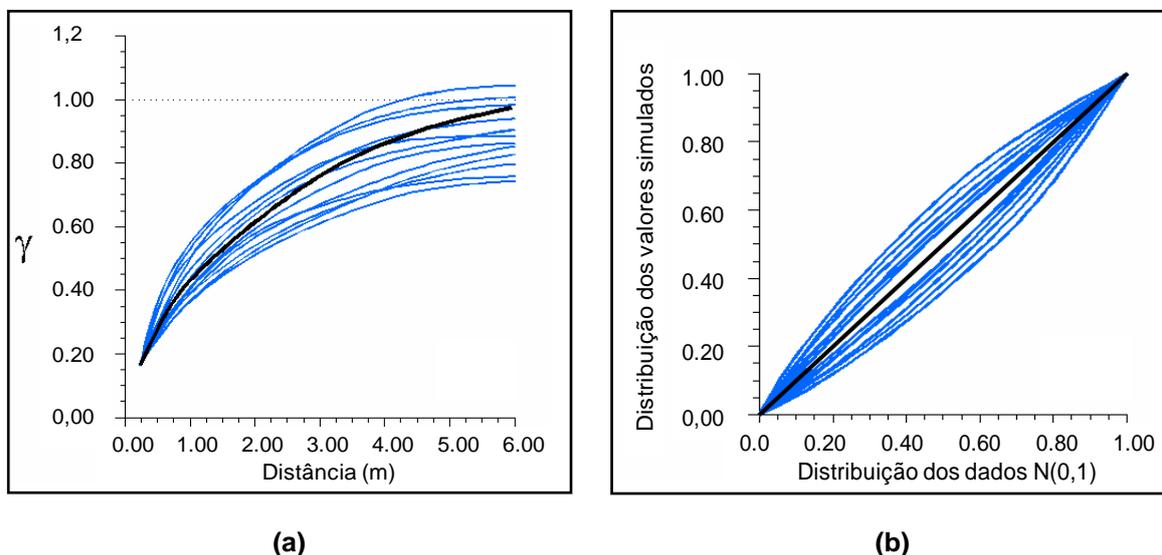


Figura 2.3 - Flutuações ergódicas (a) nos variogramas e (b) gráfico quantil-quantil resultantes de 12 realizações obtidas por simulação seqüencial (linhas azuis) em torno do modelo (linhas pretas).

Nesse capítulo, é analisada a influência do espaço de incerteza obtido pelo algoritmo conhecido como bandas rotativas.

2.3 Simulação por bandas rotativas

Alguns modelos de covariância podem ser utilizados para reproduzir covariâncias simuladas diretamente no espaço \mathbb{R}^n . Muitas vezes, é mais simples usar o método de bandas rotativas, que permite a construção de simulações no espaço a partir de simulações em linhas (\mathbb{R}^1). O método de bandas rotativas foi usado pela primeira vez por Chentsov (1957), em um caso especial de funções brownianas aleatórias. Seu desenvolvimento para uso em simulação geoestatística foi realizado por Matheron (1973).

O método de simulação por bandas rotativas pode ser realizado de maneira não-condicional (reproduzindo o modelo de covariância) e de maneira condicional (reproduzindo os dados amostrais nas suas localizações). Para a realização da simulação condicional são necessárias duas etapas. Na primeira etapa, os

valores obtidos em cada local de interesse ou nó de *grid*, reproduzem o modelo de covariância dos dados amostrados. Já, na segunda etapa, os valores obtidos são então condicionados aos dados.

O princípio do método consiste em adicionar um grande número de simulações independentes definido na linha de varredura do plano (Figura 2.4). Segundo Chilès & Delfiner (1999), o valor a ser simulado no ponto $x(x,y)$ em um plano, é a soma dos valores obtidos da projeção do ponto x até a linha simulada em uma dimensão, conforme a Equação 2.1.

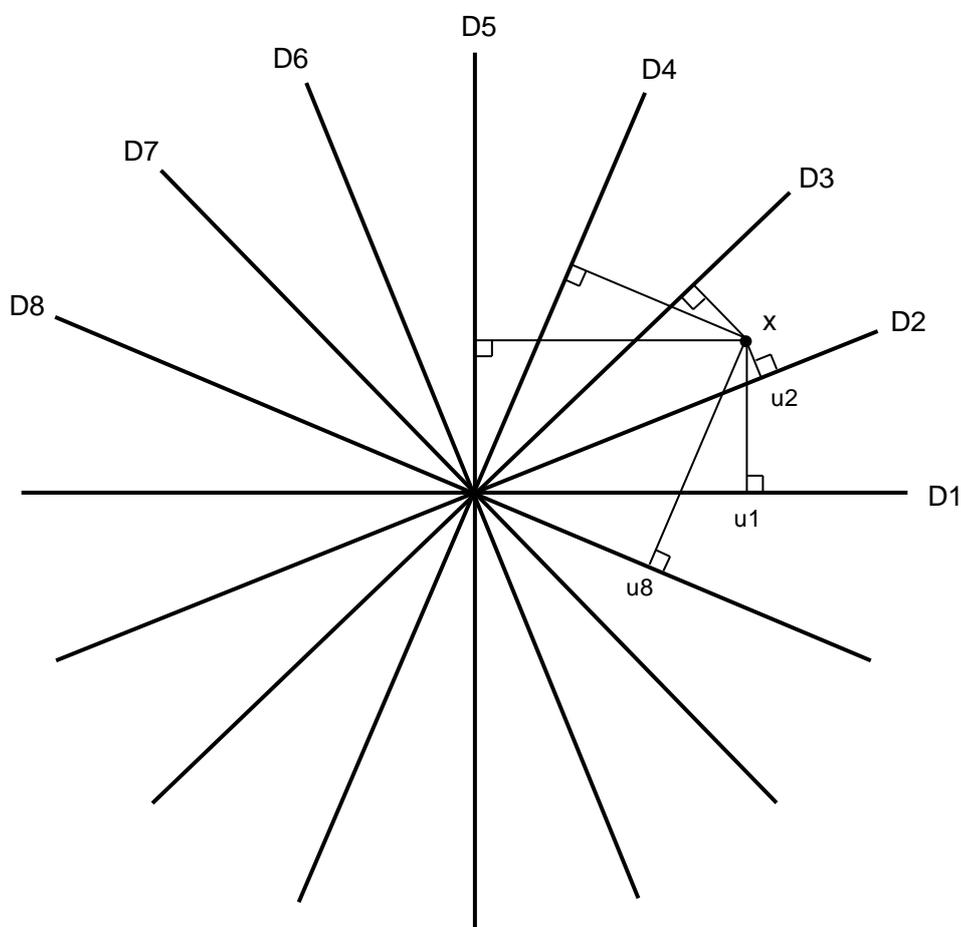


Figura 2.4 - Princípio de construção do método de bandas rotativas in 2D.

$$z^*(x) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{1}^N z_{1,n}(x_{1,n}) \quad (2.1)$$

Onde:

$z^*(x)$: valor simulado em um ponto x ;

N : número de linhas que dividem o plano;

$z_{1,n}$: valor simulado no local $x_{1,n}$;

$x_{1,n}$: local da projeção x_1 na n -ésima linha que divide o plano.

Os procedimentos envolvidos na geração de cenários equiprováveis para um depósito mineral qualquer por bandas rotativas, encontram-se discriminados na Figura 2.5.

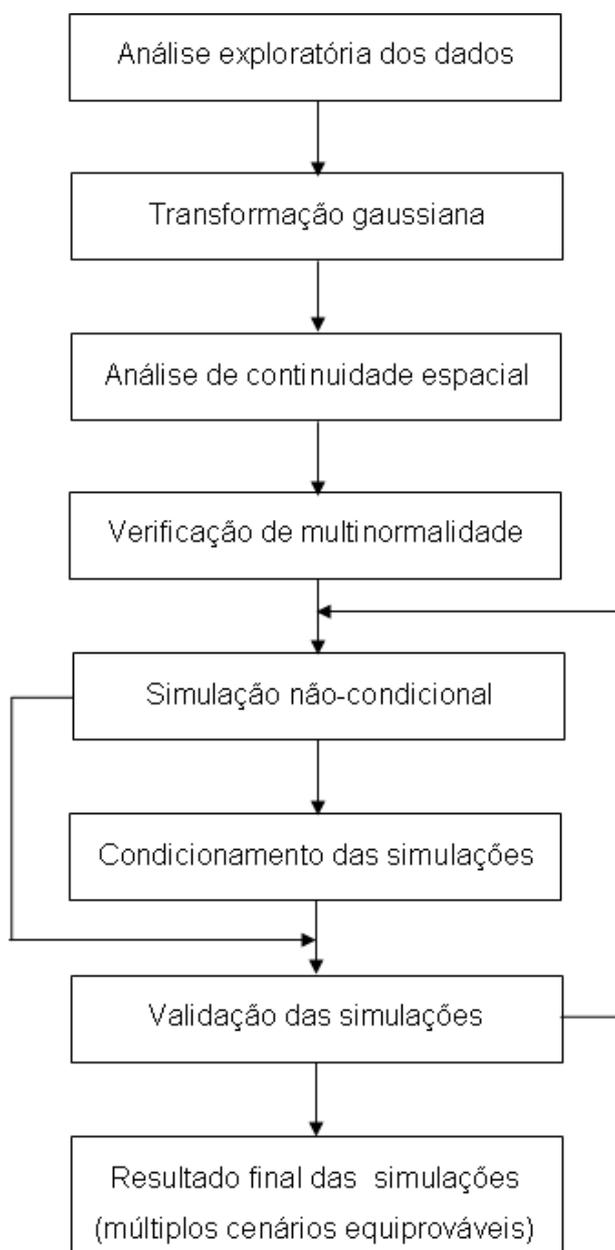


Figura 2.5 - Fluxograma com os vários estágios de construção de uma simulação por bandas rotativas.

2.4 Estudo de caso

O estudo de caso desta dissertação foi realizado com os dados provenientes dos depósitos Tamanduá e Capitão do Mato, localizados no Quadrilátero Ferrífero. Os depósitos são parte do complexo Vargem Grande e pertencem à companhia Vale.

O Depósito Capitão do Mato possui 4500 m de comprimento, com profundidade máxima de 250 m. Já, o Depósito Tamanduá possui cerca de 2.800 m de comprimento e cerca de 500 m de profundidade na área central.

A planta de beneficiamento de Vargem Grande possui dois pátios para formação de pilhas de homogeneização. Desse modo, a utilização de dois depósitos acima citados neste estudo é interessante, já que minério é transportado de ambos os depósitos (minas) até a planta de beneficiamento e estocado nas pilhas de homogeneização para alimentação da usina de beneficiamento. Utilizando os dados dos depósitos que compõem esse sistema, será possível estabelecer parâmetros de comparação para análises futuras, confrontando os modelos com dados reais, caso seja necessário.

2.4.1 Análise dos dados

O minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero foi formado pelo enriquecimento de BIF's (*banded iron formation*). Geralmente, são classificados, de acordo com o teor de ferro, em minérios de alto grau e os de baixo grau de enriquecimento. Minérios de alto grau têm teor de ferro superior a 64% e índices muito baixos de contaminantes SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , etc.. Já, os minérios de baixo grau apresentam um teor de ferro que varia de 32% para 64%, com diferentes quantidades de contaminantes.

O banco de dados foi dividido em dois grandes grupos para a análise e realização das simulações, sendo eles hematitas (alto grau) e itabiritos (baixo grau). Para compor o banco de dados a ser utilizado, foram retidas apenas as informações da variável sílica global (SI), por tratar-se de um contaminante com coeficiente de variação muito alto, mostrando-se bastante errática nesse tipo de

mineralização. As amostras no banco de dados estão regularizadas em 10 m de comprimento.

Para evitar a possível interferência de qualquer agrupamento na análise estatística dos dados, utilizaram-se os pesos de krigagem para obter histogramas desagrupados. Esse procedimento é utilizado na tentativa de remover uma possível tendência relacionada ao plano de amostragem, principalmente em relação à média da distribuição amostral. A idéia desse método é armazenar os pesos de krigagem e utilizá-los como pesos de desagrupamento.

Tem como vantagens:

- não requerer parâmetros de dimensões de uma janela móvel, apenas os parâmetros de krigagem;
- não adicionar trabalho extra para um procedimento padrão de krigagem;
- coerência entre a média das estimativas (krigagem) e a média desagrupada é mais provável;
- o cálculo leva em consideração a continuidade espacial.

Tem como desvantagens:

- requerer uma definição de domínio (neste caso, hematitita e itabirito);
- o tempo necessário para a obtenção dos resultados pode ser elevado (depende do número de blocos a serem estimados);
- a solução depende do domínio geológico, o modelo de variograma e a definição de busca para a realização da estimativa.

Para obtenção dos pesos, foi realizada uma krigagem ordinária em cada domínio de cada depósito.

Para o tipo de depósito deste estudo de caso, é esperado que os possíveis agrupamentos preferências tenham ocorridos em regiões com alto teor de ferro. Como a sílica é inversamente proporcional ao ferro (coeficiente de correlação próximo a -1), o agrupamento preferencial pode ter levado a um teor médio inferior ao teor médio desagrupado.

2.4.1.1 Análise dos dados do Depósito Capitão do Mato

O Depósito Capitão do Mato está localizado no município de Nova Lima, 26 km a sudoeste da cidade de Belo Horizonte.

Do banco de dados original fornecido pela Vale, foram utilizados apenas 400 furos de sondagem, com um total de 2353 amostra. O filtro para a seleção desses furos de sondagem foi geográfico, ou seja, foram utilizados apenas os furos que se encontravam nas proximidades da mina atual. A disposição da malha amostral pode ser vista na Figura 2.6.

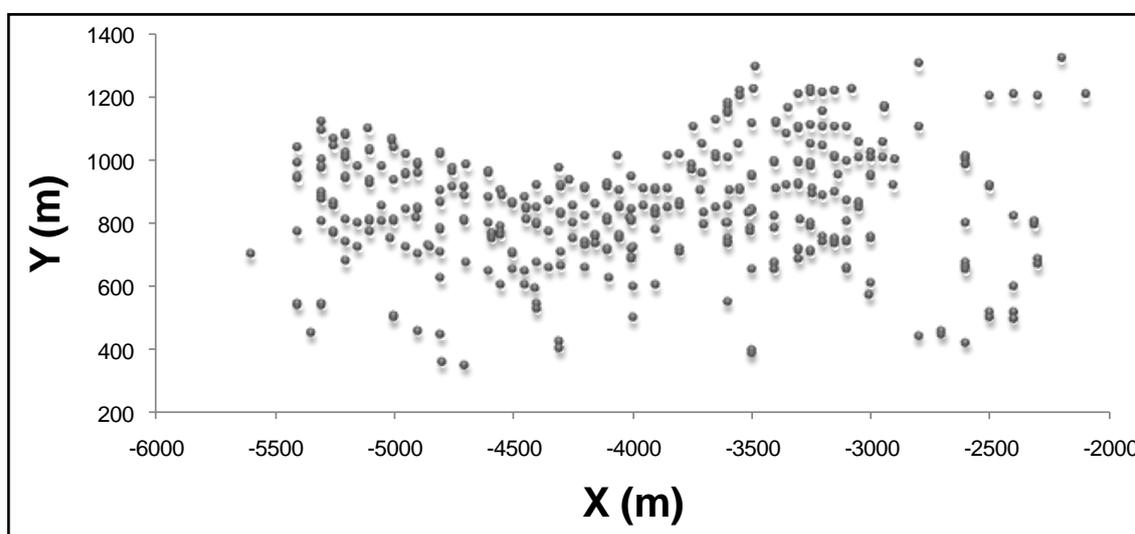


Figura 2.6 - Vista em planta dos dados do Depósito Capitão do Mato.

Como pode ser visto, a amostragem não ocorreu de maneira uniforme em todo o depósito, mostrando alguns pequenos agrupamentos em determinadas áreas, sendo necessário realizar um desagrupamento dos dados.

A Figura 2.7 e a Figura 2.8 apresentam os histogramas de frequências e as estatísticas dos dados originais (a) e dos dados desagrupados (b).

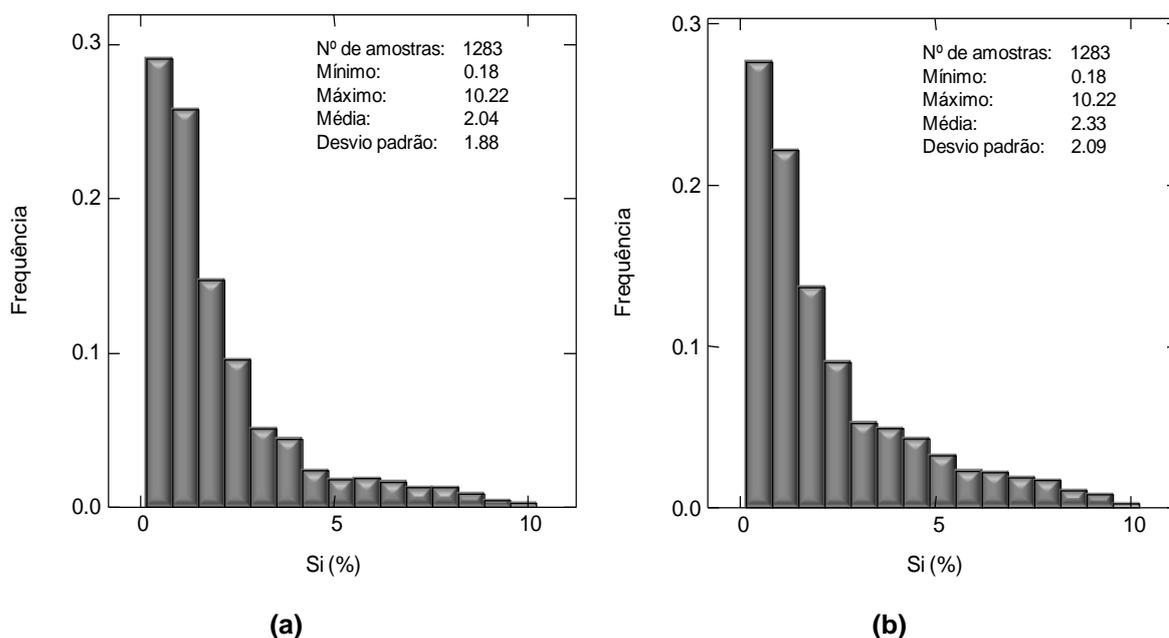


Figura 2.7 - Histograma da variável sílica global para os (a) dados originais e (b) desagrupados no domínio hematítico.

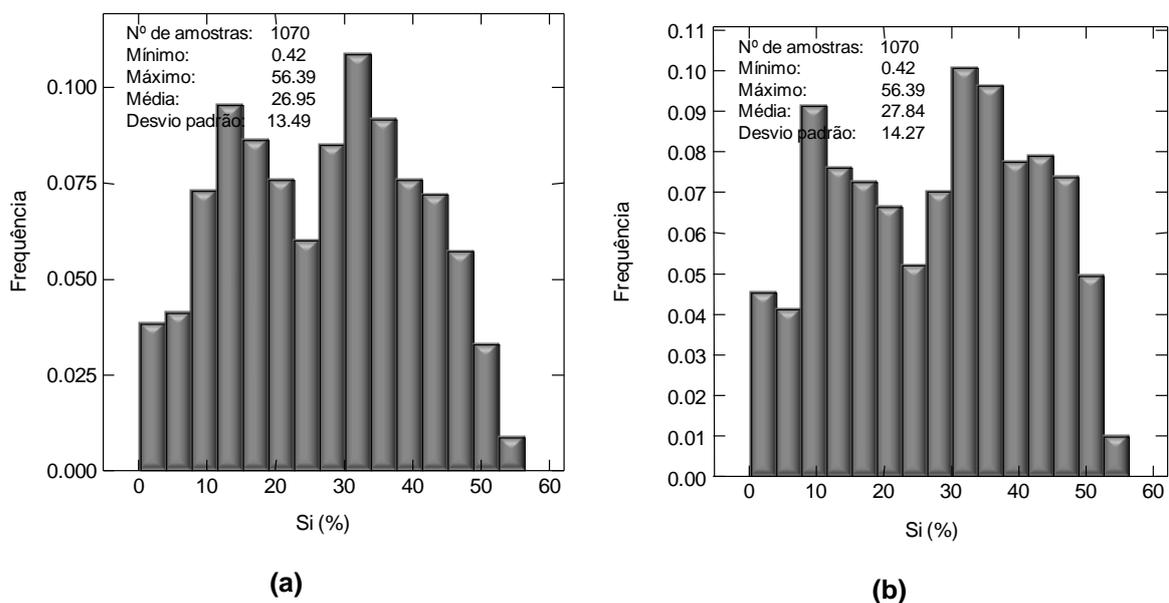


Figura 2.8 - Histograma da variável sílica global para os (a) dados originais e (b) desagrupados no domínio itabirítico.

Como citado anteriormente, o teor desagrupado da variável sílica é superior ao teor médio dos dados originais.

O domínio itabirito apresenta a presença de duas populações, mas não foi possível a separação em dois domínios, devido a disposição espacial das amostras presentes em cada população.

2.4.1.2 Análise dos dados do Depósito Tamanduá

O Depósito Tamanduá está localizado no município de Nova Lima, 23 km ao sul da cidade de Belo Horizonte.

Do banco de dados original fornecido pela Vale, foram utilizados apenas 337 furos de sondagem, com um total de 2582 amostra, sendo o critério de seleção dos furos de sondagem o mesmo citado para o Depósito Capitão do Mato. A disposição da malha amostral pode ser vista na Figura 2.9.

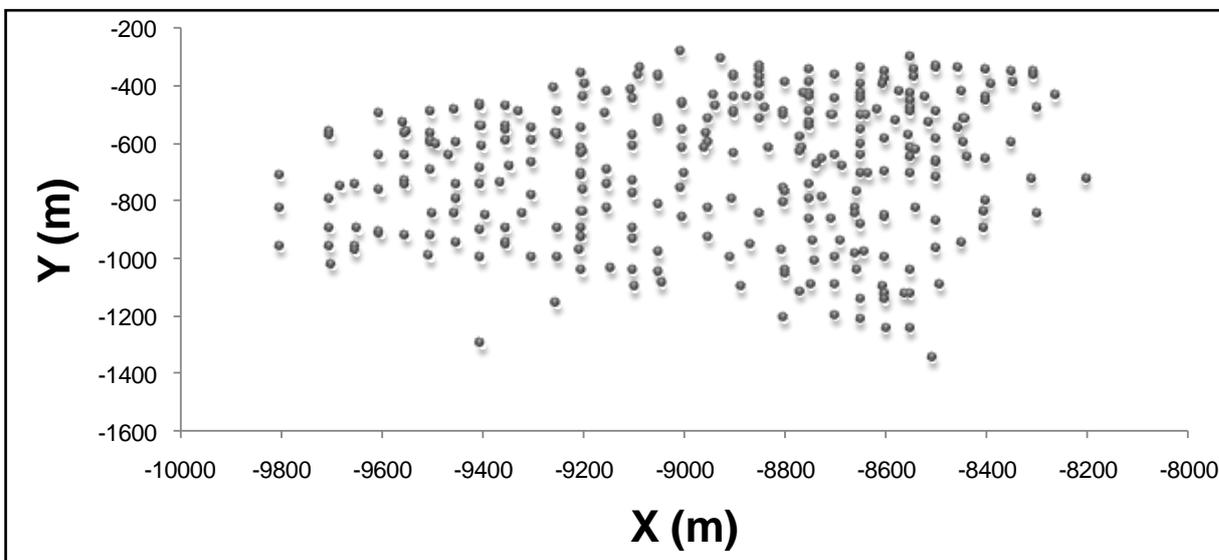


Figura 2.9 - Vista em planta dos dados do Depósito Tamanduá.

Do mesmo modo que o Depósito Capitão do Mato, a amostragem não ocorreu de maneira uniforme em todo o depósito, mostrando alguns pequenos agrupamentos em determinadas áreas, sendo necessário realizar um desagrupamento dos dados.

A Figura 2.10 e a Figura 2.11 apresentam os histogramas de freqüências dos dados originais (a) e dos dados desagrupados (b).

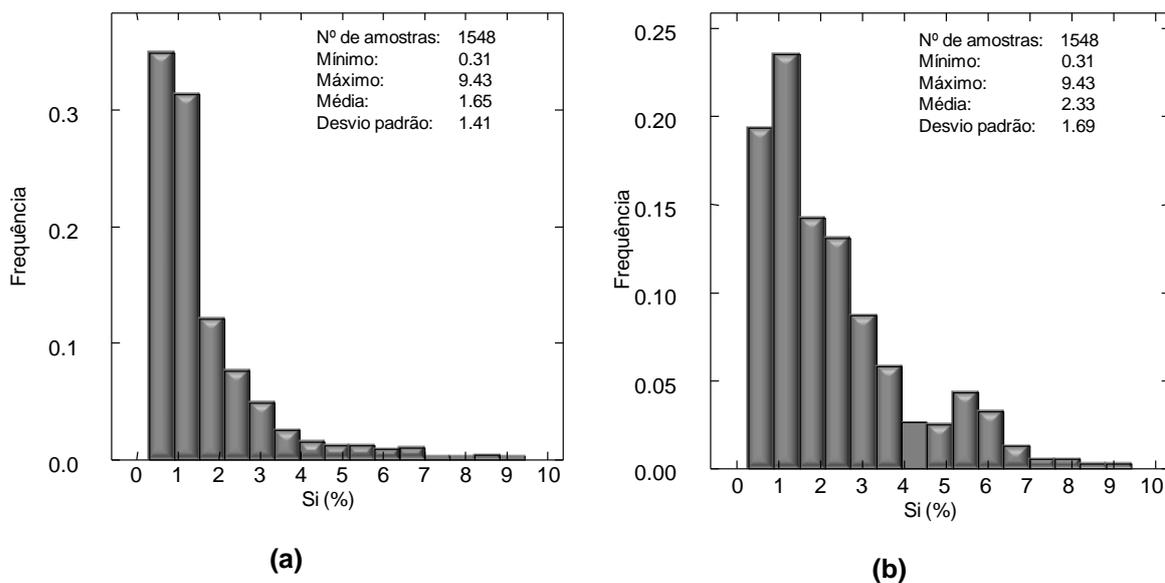


Figura 2.10 - Histograma da variável sílica global para os (a) dados originais e (b) desagrupados no domínio hematítico.

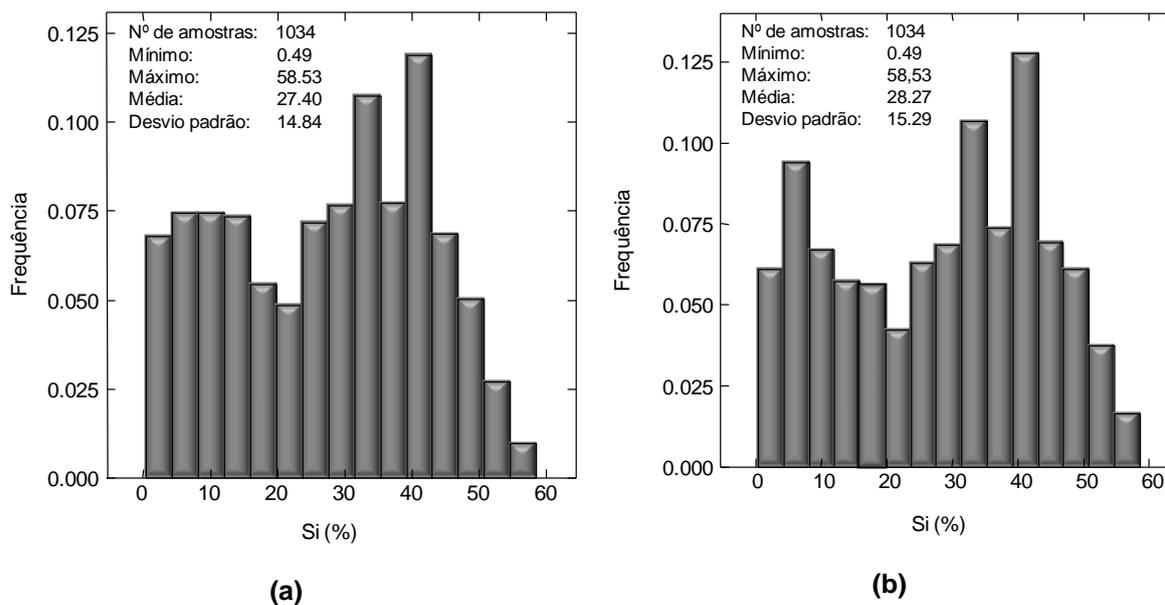


Figura 2.11 - Histograma da variável sílica global para os (a) dados originais e (b) desagrupados no domínio itabirítico.

Como citado anteriormente, o teor desagrupado da variável sílica é superior ao teor médio dos dados originais.

O domínio itabirito apresenta a presença de duas populações, mas não foi possível a separação em dois domínios, devido a disposição espacial das amostras presentes em cada população.

2.4.2 Transformação Gaussiana

Na simulação por bandas rotativas, a idéia é derivar um valor de uma distribuição baseada na teoria associada às funções randômicas multigaussianas. No caso de distribuições Gaussianas, a distribuição condicional de freqüência acumulada local é estimada por meio da krigagem simples, a qual define a média e a variância da distribuição. Uma vez que existe uma distribuição condicional estimada por krigagem simples, pode-se amostrar randomicamente um valor dessa distribuição e, assim, gerar teores simulados para o bloco correspondente.

A inconveniência desse método é a exigência de que os dados apresentem uma distribuição Gaussiana, sendo que isso raramente acontece. Muitas variáveis nas Ciências da Terra mostram distribuição assimétrica com alguns valores extremos (assimetria positiva). Dessa forma, existe a necessidade de se recorrer à transformação dos dados originais para o espaço normal (Goovaerts, 1997).

O processo de normalização da distribuição amostral é realizado com auxílio de uma transformação gerada a partir de uma função monotônica crescente, $\Phi(\cdot)$, que pode ser derivada graficamente como mostra Figura 2.12 e descrita pela Equação 2.2. Nessa figura, os valores que correspondem aos p-quantis da distribuição cumulativa dos dados são correlacionados com os valores normais correspondentes de mesma probabilidade. Os dados originais, z-valores, são transformados em y-valores: $y(u_\alpha) = \Phi[z(u_\alpha)]$, $\alpha = 1 \dots n$ (Journel e Huijbregts, 1978; Goovaerts, 1997).

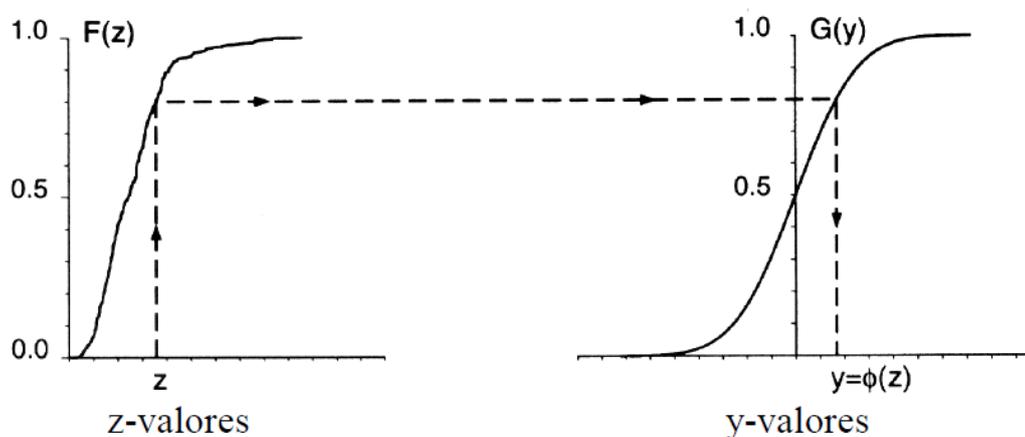


Figura 2.12 - Processo gráfico de transformação da distribuição original (z-valores) em y-valores. Fonte: Goovaerts, 1997 – p. 268.

$$Y(u) = \Phi(z(u)) = G^{-1}[F(z(u))] \quad (2.2)$$

Onde:

$Y(u)$: variável regionalizada que representa os y-valores;

Φ : função de transformação;

$z(u)$: variável randômica que representa os z-valores;

G^{-1} : distribuição Gaussiana inversa da função randômica $Y(u)$.

Assim, na maioria dos casos, uma transformação gaussiana precede os passos da simulação condicional. A Figura 2.13 apresenta os histogramas dos dados normalizados para os domínios hematíticos e itabiríticos do Depósito Capitão do Mato. A Figura 2.14 apresenta os histogramas dos dados normalizados para os domínios hematíticos e itabiríticos do Depósito Tamanduá. Note que a normalização dos dados garante que a distribuição normal apresente média igual a zero e variância igual a um.

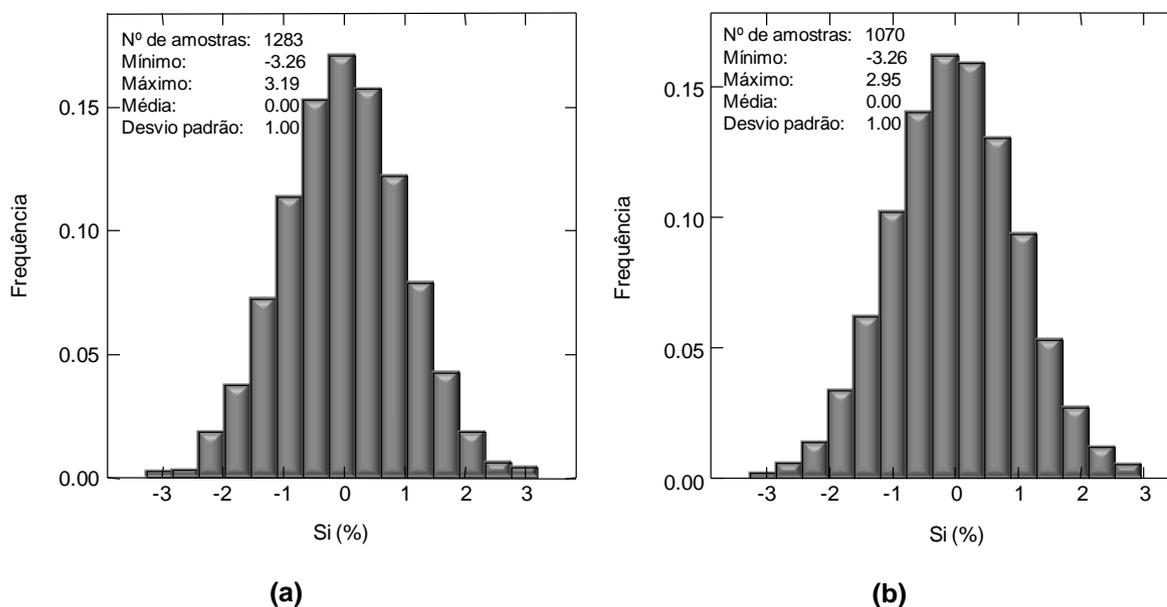


Figura 2.13 - Histograma dos dados normalizados para (a) hematita e (b) itabirite do Depósito Capitão do Mato.

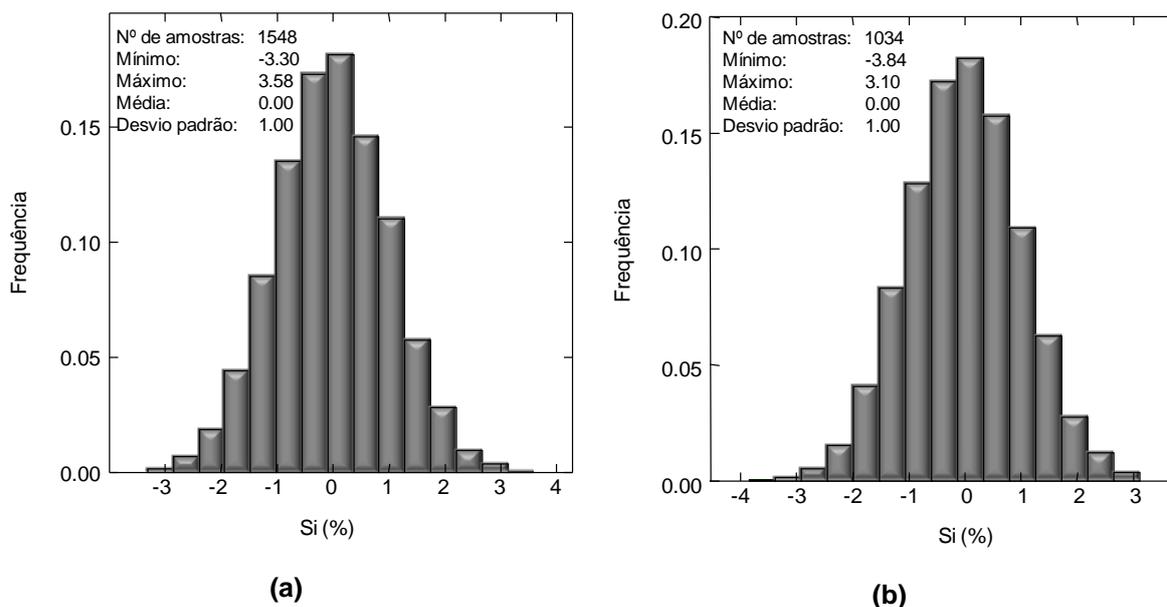


Figura 2.14 - Histograma dos dados normalizados para (a) hematita e (b) itabirite do Depósito Tamanduá.

Os dados normalizados foram utilizados nas simulações realizadas, resultando em valores simulados no espaço gaussiano que foram posteriormente retro-transformados para o espaço original, utilizando as mesmas leis de correlação da normalização inicial, porém no sentido inverso.

2.4.3 Continuidade espacial

Após a normalização dos dados, a etapa seguinte consiste da análise da continuidade espacial dos mesmos através de variogramas. O variograma mede a média das diferenças quadráticas de pares de valores separados de certa distância h e em certa direção. Matheron (1963) foi o primeiro a utilizar esses conceitos em geociências. Clark (1979) e David (1988) descrevem com detalhe o conceito de variograma e os ajustes matemáticos para continuidade espacial (Souza, 2007). Existem outras funções para medir a continuidade espacial, as quais não serão consideradas neste estudo.

Baseado na hipótese intrínseca da geoestatística (estacionaridade) pode-se descrever a continuidade espacial de uma variável por meio do variograma experimental constituído a partir dos valores amostrados. Na Equação 2.3, $n(h)$ é o número de pares para a distância h (*lag*) a certa direção e $z_i(u)$ e $z_i(u+h)$ são os

pares de valores separados de h . A unidade do variograma é a mesma da variável z ao quadrado (Souza, 2007).

$$\gamma^*(x) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z_i(u) - z_i(u+h)]^2 \quad (2.3)$$

O estudo da continuidade espacial teve início com o cálculo do variograma ao longo do furo, no qual obtém-se o efeito pepita que será usado no resto da modelagem variográfica. Foi utilizado este tipo de variograma para obtenção do efeito pepita, pois, através dele podemos medir as diferenças quadráticas médias entre amostras em distâncias muito pequenas (10 metros).

Com o objetivo de construir um modelo que capture as principais características espaciais do atributo em estudo, parte-se para a determinação dos variogramas direcionais. Através da modelagem variográfica, podemos determinar o comportamento espacial do fenômeno com as direções de maior, intermediária e menor continuidade espacial.

Os resultados da modelagem variográfica podem ser verificados na Equações 2.4, e 2.5 e Figura 2.15 para o Depósito Capitão do Mato e na Equações 2.6 e 2.7 e Figura 2.16 para o Depósito Tamanduá.

Modelo variográfico para o domínio hematítico do Depósito Capitão do Mato:

$$\gamma(h) = 0.2 + 0.4 \times \text{Sph}\left(\frac{N90^\circ}{100} + \frac{vert}{70} + \frac{N0^\circ}{35}\right) + 0.4 \times \text{Sph}\left(\frac{N90^\circ}{550} + \frac{vert}{150} + \frac{N0^\circ}{150}\right) \quad (2.4)$$

Modelo variográfico para o domínio itabirítico do Depósito Capitão do Mato:

$$\gamma(h) = 0.2 + 0.4 \times \text{Sph}\left(\frac{N0^\circ}{50} + \frac{N90^\circ}{50} + \frac{vert}{50}\right) + 0.4 \times \text{Sph}\left(\frac{N0^\circ}{1000} + \frac{N90^\circ}{650} + \frac{vert}{80}\right) \quad (2.5)$$

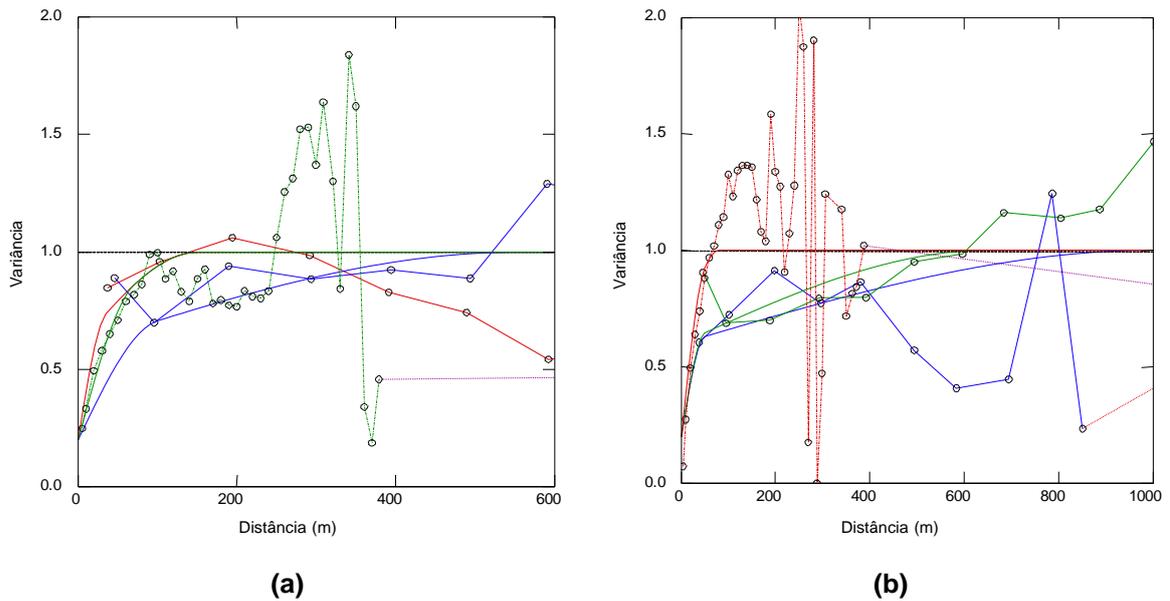


Figura 2.15 - Variograma experimental (pontos) e modelado (linha contínua) na direção de máxima (azul) e intermediária (verde) e mínima (vermelho) continuidade espacial para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Capitão do Mato.

Modelo variográfico para o domínio hematítico do Depósito Tamandua:

$$\gamma(h) = 0.2 + 0.4 \times \text{Sph}\left(\frac{N113^\circ}{120} + \frac{\text{vert}}{60} + \frac{N23^\circ}{60}\right) + 0.4 \times \text{Sph}\left(\frac{N113^\circ}{850} + \frac{\text{vert}}{350} + \frac{N23^\circ}{200}\right) \quad (2.6)$$

Modelo variográfico para o domínio itabirítico do Depósito Tamandua:

$$\gamma(h) = 0.2 + 0.4 \times \text{Sph}\left(\frac{N68^\circ}{120} + \frac{\text{vert}}{120} + \frac{N158^\circ}{120}\right) + 0.4 \times \text{Sph}\left(\frac{N68^\circ}{1200} + \frac{\text{vert}}{220} + \frac{N158^\circ}{150}\right) \quad (2.7)$$

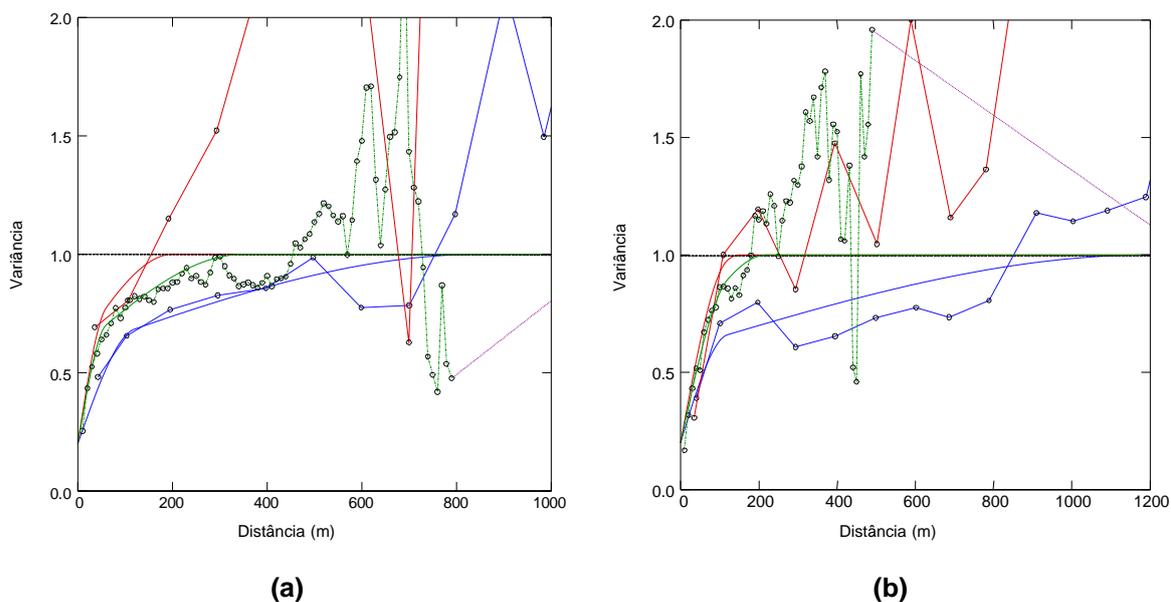


Figura 2.16 - Variograma experimental (pontos) e modelado (linha contínua) na direção de máxima (azul), intermediária (verde) e mínima (vermelho) continuidade espacial para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Tamanduá.

2.4.4 Verificação de multinormalidade

A simples normalização da distribuição amostral não garante que o modelo de função randômica seja multinormal. Esse procedimento garante apenas a normalidade bivariada da distribuição condicional local de probabilidade (dclp). Assim, faz-se necessária a verificação de normalidade nas demais dimensões da dclp.

Na prática, é possível apenas verificar até o nível bivariado (distribuição bigaussiana). Sendo assim, se for validada a hipótese bigaussiana, o formalismo multigaussiano é assumido. Pode-se realizar o teste de binormalidade que considera a relação madograma/variograma. Essa relação pode ser vista na Equação 2.8 deve se aproximar à constante 0,564 (Matheron, 1982) e deve ser verificada para diversas distâncias h (lags).

$$\frac{\gamma_1(h)}{\sqrt{\gamma_2(h)}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} = 0,564 \quad (2.8)$$

Onde:

$$2\gamma(h) = E\{| Y(x+h) - Y(x) |\}$$

$$2\gamma_2(h) = E\{| Y(x+h) - Y(x) |\}^2$$

A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 apresentam os resultados do teste para Depósito Capitão do Mato. A Tabela 2.3 e a Tabela 2.4 apresentam os resultados do teste para Depósito Tamanduá. A relação foi realizada a partir dos variogramas omnidirecionais, utilizando distâncias h (*lags*) de 100 metros.

Tabela 2.1 - Resultados do teste de bigaussianidade baseado na Equação 2.8 para a variável Si (%) no domínio hematítico do Depósito Capitão do Mato.

Distancia h (m)	Número de pares	Madograma experimental	Variograma experimental	Razão Madograma/Variograma
100	4041	0,3980	0,5549	0,534
200	39741	0,5277	0,8936	0,558
300	62717	0,5593	0,9886	0,563
400	68348	0,5432	0,9327	0,562
500	65158	0,5392	0,9260	0,560
600	57355	0,5544	0,9678	0,564
700	54197	0,5714	1,0236	0,565
800	51233	0,5713	1,0265	0,564
900	50779	0,5719	1,0258	0,565
1000	49739	0,5679	1,0077	0,566
1100	45747	0,5888	1,0809	0,566
1200	41325	0,5939	1,1074	0,564

Tabela 2.2 - Resultados do teste de bigaussianidade baseado na Equação 2.8 para a variável Si (%) no domínio itabirítico do Depósito Capitão do Mato.

Distancia h (m)	Número de pares	Madograma experimental	Variograma experimental	Razão Madograma/Variograma
100	2718	0,4077	0,5579	0,546
200	15682	0,5120	0,8413	0,558
300	28321	0,5275	0,8833	0,561
400	33418	0,5431	0,9277	0,564
500	33843	0,5435	0,9240	0,565
600	35437	0,5666	0,9925	0,569
700	33371	0,5665	1,0010	0,566
800	31312	0,5625	0,9945	0,564
900	29905	0,5545	0,9562	0,567
1000	27886	0,5661	1,0024	0,565
1100	26892	0,5812	1,0617	0,564
1200	23366	0,5786	1,0492	0,565

Tabela 2.3 - Resultados do teste de bigaussianidade baseado na Equação 2.8 para a variável Si (%) no domínio hematítico do Depósito Tamanduá.

Distancia h (m)	Número de pares	Madograma experimental	Variograma experimental	Razão Madograma/Variograma
100	6711	0,3774	0,5101	0,528
200	83254	0,4846	0,7600	0,556
300	169058	0,5270	0,8731	0,564
400	192804	0,5519	0,9556	0,565
500	158896	0,5560	0,9687	0,565
600	118528	0,5798	1,0530	0,565
700	93460	0,5919	1,0907	0,567
800	90044	0,6087	1,1436	0,569
900	83205	0,5962	1,1018	0,568
1000	65510	0,5916	1,0738	0,571
1100	52216	0,5703	1,0138	0,566
1200	36988	0,5736	1,0394	0,563

Tabela 2.4 - Resultados do teste de bigaussianidade baseado na Equação 2.8 para a variável Si (%) no domínio itabirítico do Depósito Tamanduá.

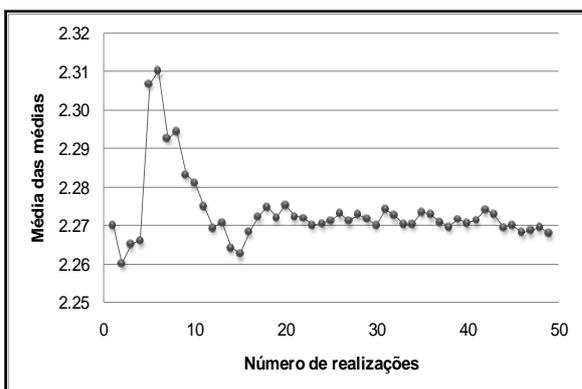
Distancia h (m)	Número de pares	Madograma experimental	Variograma experimental	Razão Madograma/Variograma
100	3119	0,3075	0,3593	0,513
200	22730	0,4954	0,8057	0,552
300	45631	0,5389	0,9264	0,560
400	56141	0,5533	0,9781	0,559
500	63940	0,5624	1,0094	0,560
600	66767	0,5459	0,9431	0,562
700	58549	0,5571	0,9721	0,565
800	50216	0,5628	0,9811	0,568
900	44089	0,5751	1,0126	0,572
1000	41247	0,5688	0,9779	0,575
1100	29760	0,6027	1,1063	0,573
1200	23942	0,6132	1,1391	0,575

2.4.5 Geração dos modelos simulados

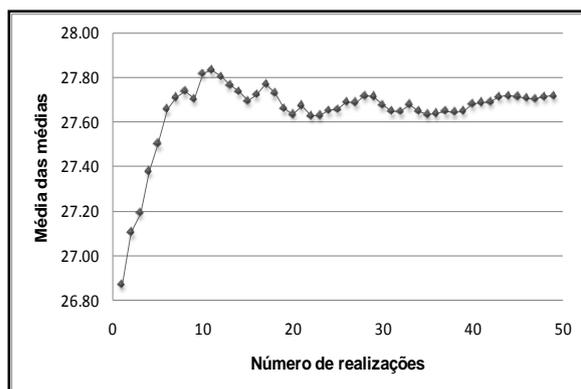
As etapas de geração dos cenários simulados, validação e análise dos modelos foram desenvolvidas no *software* ISATIS® (Bleines *et al.*, 2001).

Para este estudo, foram realizadas 50 simulações através do algoritmo de bandas rotativas em cada domínio (hematítico e itabirito) para cada depósito (Capitão do Mato e Tamanduá). Como o número de simulações a serem utilizadas depende de seu uso e da estrutura do fenômeno analisado, é necessário verificar se esse número é suficiente para mapear a incerteza associada. Baseando-se na metodologia proposta em Costa (1997) e Bonato (2000) para decidir o número necessário de cenários a serem gerados, analisou-se as flutuações na variância das médias das realizações. Sabe-se que estes parâmetros apresentam oscilação conforme aumenta-se o número de modelos até atingir um determinado patamar limite, sendo o número ideal aquele que

garanta que esse patamar tenha sido atingido (Souza, 2007). A Figura 2.17 e a Figura 2.18 apresentam a média das médias e a variância das médias, respectivamente para o Depósito Capitão do Mato. Já, a Figura 2.19 e a Figura 2.20 apresentam a média das médias e a variância das médias, respectivamente para o Depósito Tamanduá.

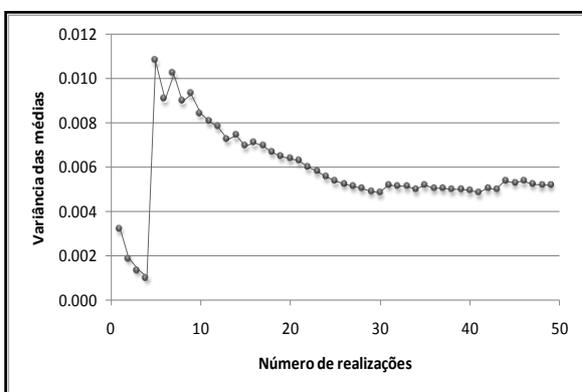


(a)

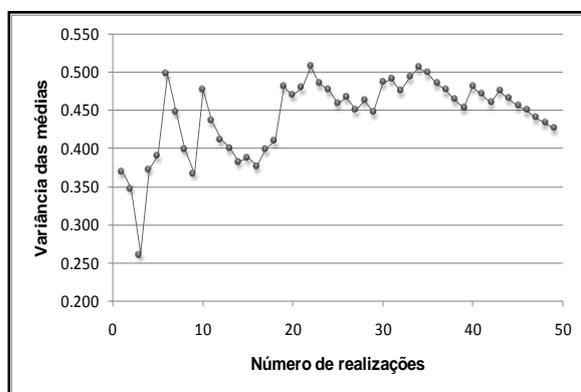


(b)

Figura 2.17 - Média das médias para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Capitão do Mato.



(a)



(b)

Figura 2.18 - Variância das médias para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Capitão do Mato.

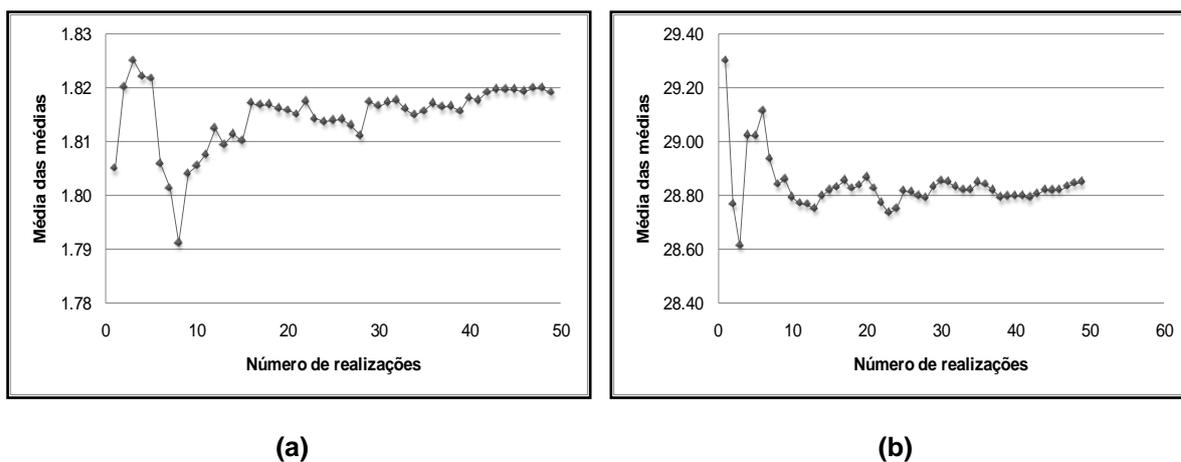


Figura 2.19 - Média das médias para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Tamanduá.

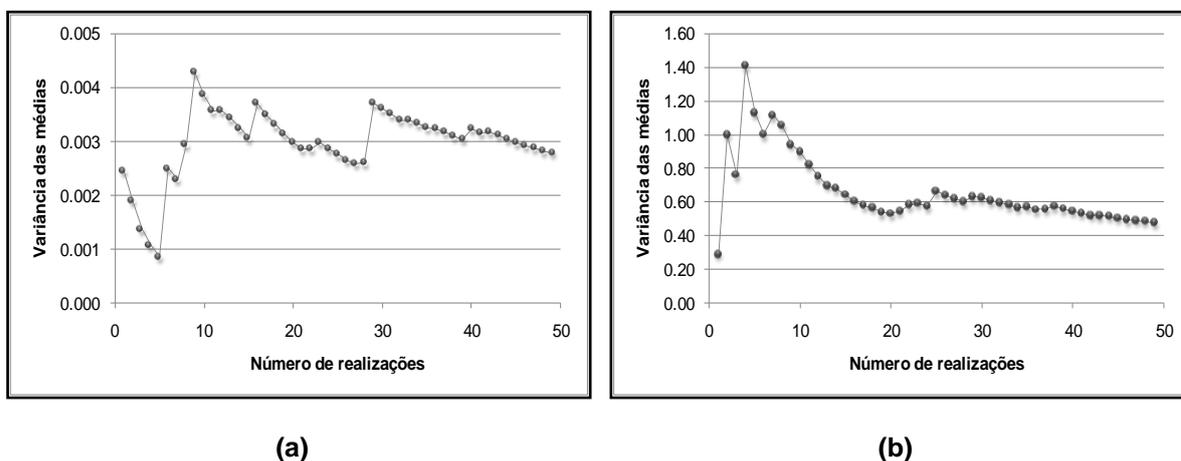


Figura 2.20 - Variância das médias para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Tamanduá.

Pela análise das figuras, pode-se observar que o intervalo de incerteza ou variabilidade representado pelas oscilações torna-se pouco significativo a partir de 30 realizações. Sendo assim, o número de realizações geradas foi considerado suficientemente para mapear a incerteza associada à estimativa do atributo geológico.

2.4.6 Validação das simulações

Após a obtenção dos modelos simulados, mas antes de se prosseguir com o uso dos mesmos para estimar a incerteza associada à redução de variabilidade com pilhas de homogeneização, foi executada a validação das simulações geradas, para verificar a reprodutibilidade do variograma e histograma.

A Figura 2.21 apresenta um gráfico comparativo entre os histogramas acumulados obtidos pelo algoritmo de simulação com os dados amostrais normalizados para o Depósito Capitão do Mato. A Figura 2.22 apresenta o mesmo gráfico comparativo para o Depósito Tamanduá. Nota-se, que em ambos os casos, ocorreu uma boa reprodutibilidade dos modelos no espaço normal.

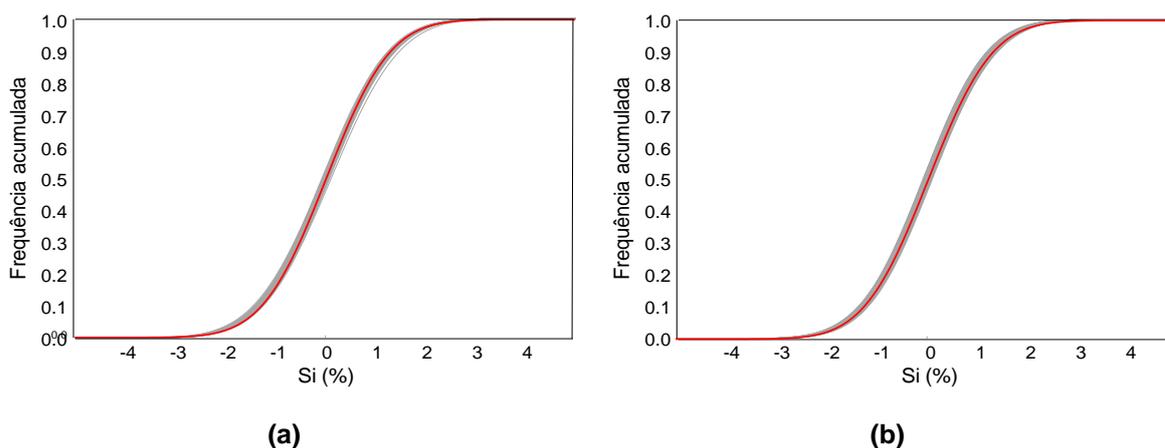


Figura 2.21 - Reprodutibilidade da estatística para as 50 realizações (linhas cinza), em função dos dados amostrais (linha vermelha) para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Capitão do Mato.

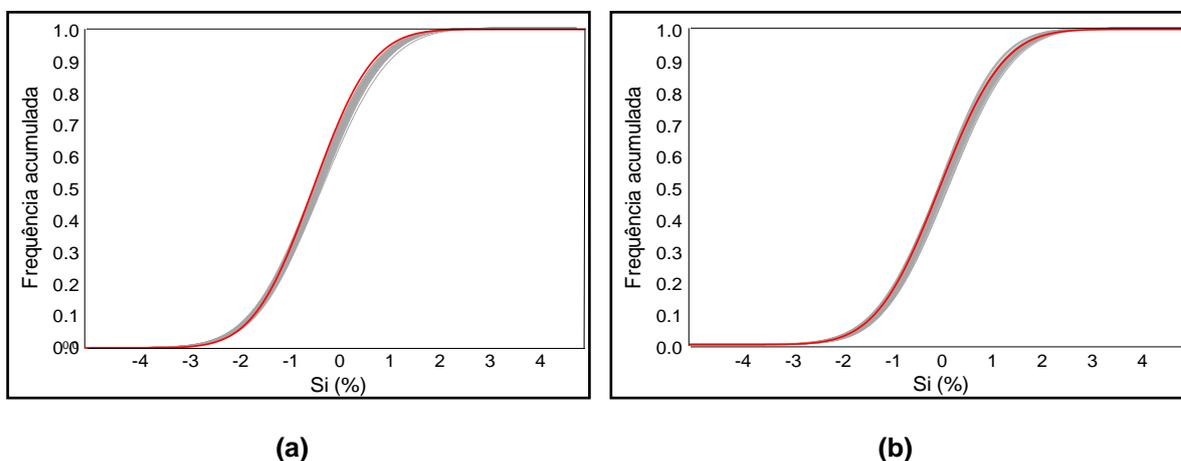


Figura 2.22 - Reprodutibilidade da estatística para as 50 realizações (linhas cinza), em função dos dados amostrais (linha vermelha) para o (a) domínio hematítico e (b) itabirítico do Depósito Tamanduá.

Na Figura 2.23 e na Figura 2.24, são apresentados os variogramas experimentais dos dados simulados comparados com os modelos de continuidade espacial baseados nos dados gaussianos (transformados) para o Depósito Capitão do Mato. Na Figura 2.25 e na Figura 2.26, são apresentados os

variogramas experimentais dos dados simulados comparados com os modelos de continuidade espacial baseados nos dados gaussianos (transformados) para o Depósito Tamanduá.

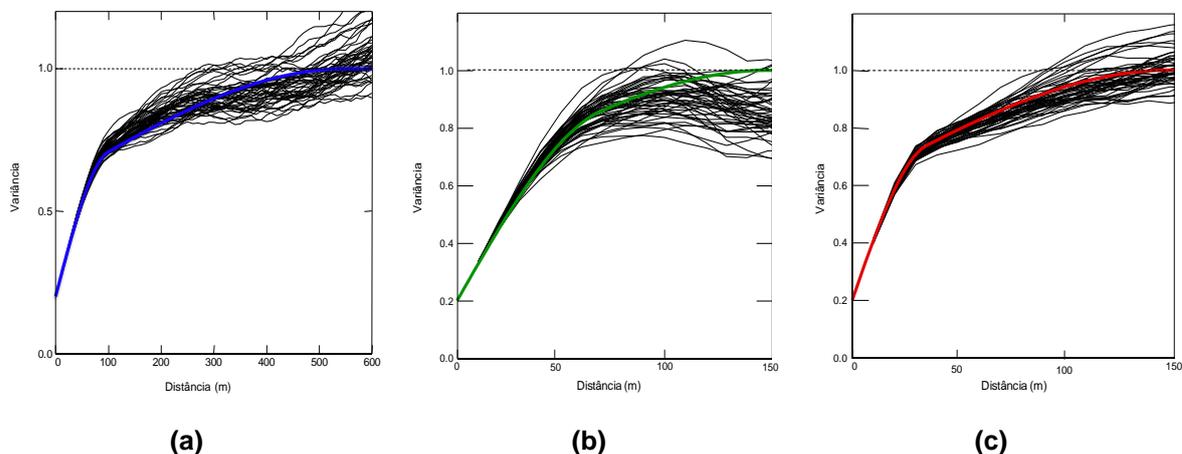


Figura 2.23 - Variograma modelado e flutuações ergódicas para (a) direção de máxima, (b) intermediária e (c) mínima continuidade espacial para o domínio hematítico do Depósito Capitão do Mato.

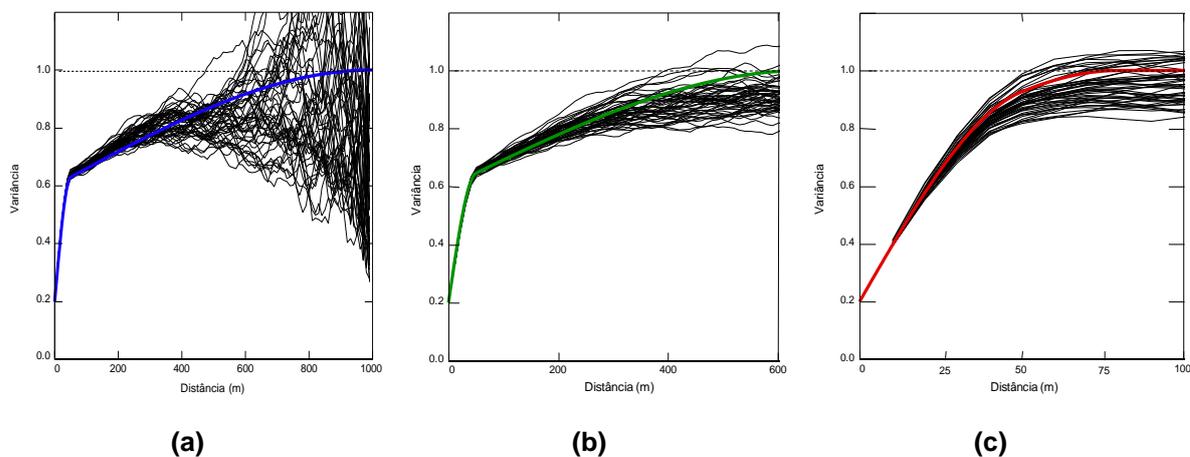


Figura 2.24 - Variograma modelado e flutuações ergódicas para (a) direção de máxima, (b) intermediária e (c) mínima continuidade espacial para o domínio itabirítico do Depósito Capitão do Mato.

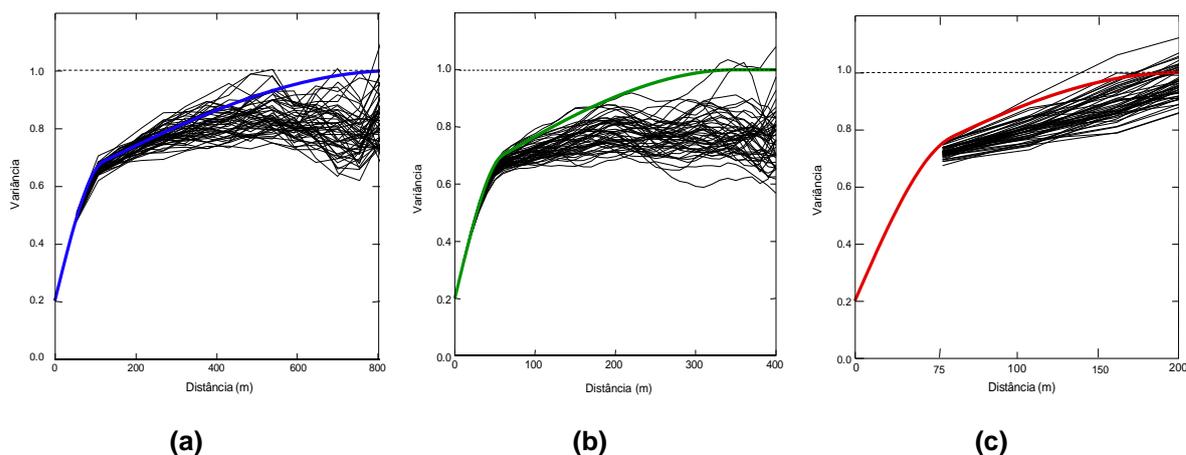


Figura 2.25 - Variograma modelado e flutuações ergódicas para (a) direção de máxima, (b) intermediária e (c) mínima continuidade espacial para o domínio hematítico do Depósito Tamandua.

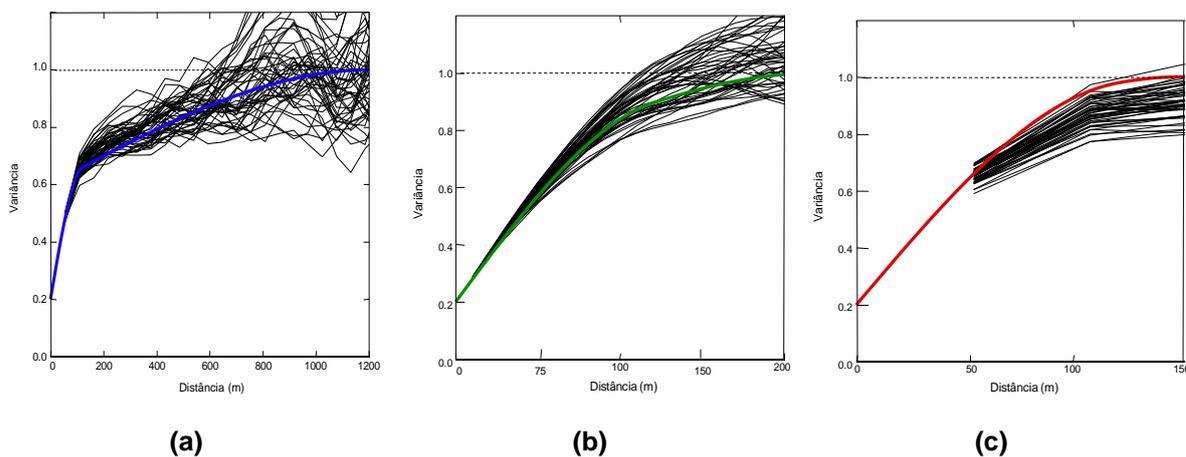


Figura 2.26 - Variograma modelado e flutuações ergódicas para (a) direção de máxima, (b) intermediária e (c) mínima continuidade espacial para o domínio itabirítico do Depósito Tamandua.

Do mesmo modo que ocorreu com os histogramas, os variogramas do espaço normal simulados honraram os variogramas dos dados amostrais normalizados.

2.5 Comentários finais

Neste capítulo, foi apresentada a técnica de banda rotativas e sua aplicação em dois depósitos de minério de ferro, tomando como base a variável sílica (muito errática nesse tipo de depósito). Após a geração dos modelos simulados, os mesmos foram validados de forma a garantir a reprodução das características dos

dados originais pelos modelos. No capítulo 4, será feito uso dos resultados obtidos pelas simulações, aplicando os parâmetros de lavra (identificando minério e estéril), para aperfeiçoamento da estratégia de homogeneização em pilhas.

Capítulo 3

Princípios de Homogeneização

Neste capítulo, são revisados os conceitos de heterogeneidade, variabilidade das características dos minérios, além de algumas das principais estratégias de homogeneização. Também, é apresentado um algoritmo implementado em Visual Basic® para emular pilhas de homogeneização do tipo longitudinal, a partir de simulações geoestatísticas.

3.1 Variabilidade das características dos minérios

Os depósitos minerais são feitos de uma combinação de minério e rocha estéril ou de baixo teor. Sendo assim, o ROM proveniente da lavra pode apresentar variações nas suas características, devido às heterogeneidades dos materiais que o compõem. Além disso, a heterogeneidade do material pode ser afetada pelos métodos de carregamento e transporte e pelos tipos de procedimentos empregados na manipulação e preparação do minério. Segundo Schofield (1980), as etapas de carregamento, transporte, britagem, moagem, armazenamento e manipulação contribuem de alguma forma na variabilidade do material, já que introduzem certa quantidade de reestruturação da distribuição espacial da mineralização natural.

Para estabelecer a qualidade de um minério, é necessário, primeiramente, realizar uma amostragem onde a variabilidade observada deve ser associada ao tamanho da amostra utilizado. A amostragem de um depósito mineral origina-se da possibilidade teórica de dividir um todo em pequenas porções que serão

analisadas separadamente (Gambin, 2003). Este conceito permite uma descrição qualitativa e quantitativa da variabilidade para um determinado tamanho de amostra baseada na teoria da amostragem (Gy, 1998).

3.2 Homogeneidade e heterogeneidade

A dualidade entre a homogeneidade e heterogeneidade não é simples, e não pode ser comparada com o tipo simples da dualidade que costuma-se observar entre preto e branco (Pitard, 1993). De uma maneira simplista, pode-se descrever o conceito de heterogeneidade como uma função escalar, onde a homogeneidade equivale à zero. Portanto, a homogeneidade é um caso limite.

3.2.1 Material heterogêneo

Heterogeneidade é uma propriedade estrutural primária de toda a matéria, ou seja, todos os sólidos particulados, secos, molhados, em suspensão na água ou no ar são heterogêneos. Segundo Gy (1998), quando as porções formadoras de um material não forem estritamente idênticas, esse material é tido como heterogêneo.

A heterogeneidade pode ser analisada sob dois aspectos diferentes, sendo eles referentes à constituição e a distribuição do material.

A heterogeneidade de constituição refere-se às características intrínsecas do material, ou seja, consiste nas diferenças que se verificam entre as partículas ou fragmentos constituintes de um lote L, quando é efetuada a comparação de uma determinada propriedade. A mistura ou homogeneização das partículas constituintes do lote não apresenta nenhuma influência sobre a heterogeneidade de constituição. Esta heterogeneidade é responsável pela ocorrência do Erro Fundamental da Amostragem.

A heterogeneidade de distribuição, depende da heterogeneidade de constituição e também, como o próprio nome sugere, depende da distribuição espacial das unidades dentro do volume ocupado pelo lote. Esse tipo de heterogeneidade pode ser observado quando olhamos para os vários grupos de unidades vizinhas, tais como fragmentos dentro do domínio de um determinado

lote de material. Logo que o material consolidado é extraído e cominuído, estes minerais se tornam parcial ou totalmente livres, dependendo do seu grau de liberação. Por conseguinte, estes minerais podem sempre mudar de lugar, em busca de uma configuração mais estável, quando submetido às forças gravitacionais ou outras forças que se destinem a promover a segregação ou homogeneização no processamento mineral.

3.2.2 Material homogêneo

Podemos afirmar que uma grande quantidade de material tem uma distribuição homogênea, quando todos os grupos de um determinado tamanho que podem ser selecionadas dentro do domínio do lote têm uma composição média rigorosamente idêntica, ou seja, cada amostra do lote representa o todo, não sendo necessária aleatoriedade na escolha.

Como citado anteriormente, todos os materiais minerais presentes na indústria mineira são essencialmente heterogêneos. Dessa maneira, a prevenção de perdas é o problema mais grave presente em plantas de beneficiamento. Para manter o processo em excelente produtividade em quantidade e qualidade, as equipes que lidam com esse problema possuem duas estratégias diferentes ao seu dispor:

- a aceitação da heterogeneidade, dependendo do tipo de mineralização;
- utilização de algum processo de homogeneização, como a utilização de pilhas de homogeneização.

Os processos de homogeneização são usados na tentativa de reduzir a heterogeneidade dos materiais, mas nunca irão conseguir gerar um material completamente homogêneo.

3.3 Relação volume-variância

A relação volume-variância é uma relação fundamental da geoestatística, a qual permite o calculo da dispersão da variância (medida da dispersão dos dados) de teores para diversos volumes, usando apenas os dados amostrais e o conhecimento do variograma. Espera-se que o aumento no suporte amostral

reduza a variabilidade dos minérios analisados (Parker, 1979), conforme a Figura 3.1.

Suporte	Variância
↑	↓
↓	↑

Figura 3.1 - Relação de aumento/diminuição da variância com o aumento/diminuição do suporte (Pilger, 2000).

Na Figura 3.2 (a), pode-se observar uma menor dispersão da distribuição quando o suporte amostral é aumentado. O aumento do suporte afeta os valores extremos e a variância. Outro fenômeno pode ocorrer juntamente com a redução da variância, denominado simetrização (Myers, 1996). Esse efeito se refere à redução da assimetria da distribuição após a mudança de suporte, aproximando-se de uma distribuição normal, mas não afetando a média, conforme pode ser visto na Figura 3.2 (b).

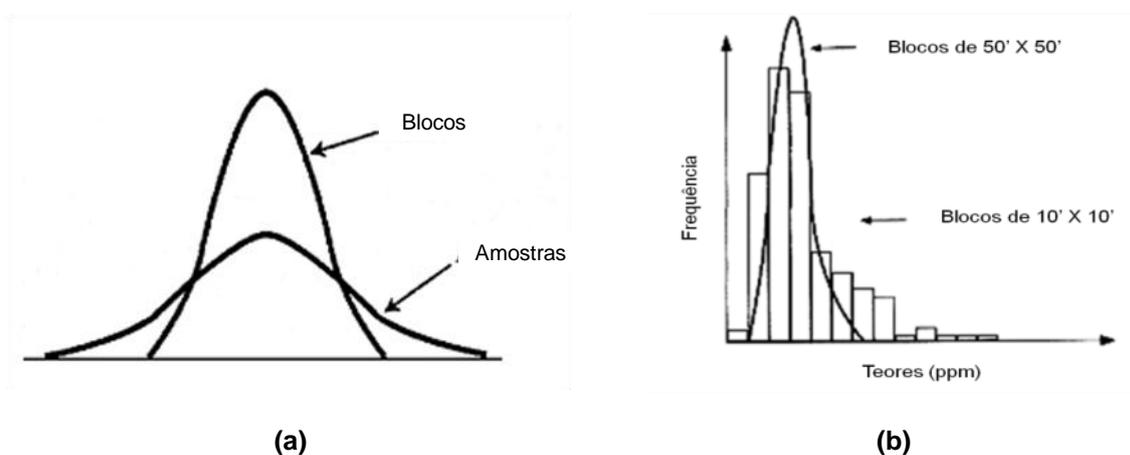


Figura 3.2 - (a) Contraste entre o espalhamento da distribuição dos blocos e dos dados amostrais e (b) histogramas de diferentes tamanhos de blocos para a mesma variável (Pilger, 2000).

O aumento do volume do bloco considerado resulta na diminuição da variância de dispersão. Um impacto direto dessa influência do volume do bloco, é que numa lavra seletiva um bloco de maior volume resultará em menores flutuações das características do minério reduzindo a variância dos teores

minerados (Figura 3.3). Sendo assim, o aproveitamento de um minério em qualquer tipo de lavra é função do volume do bloco considerado (Gambin, 2003).

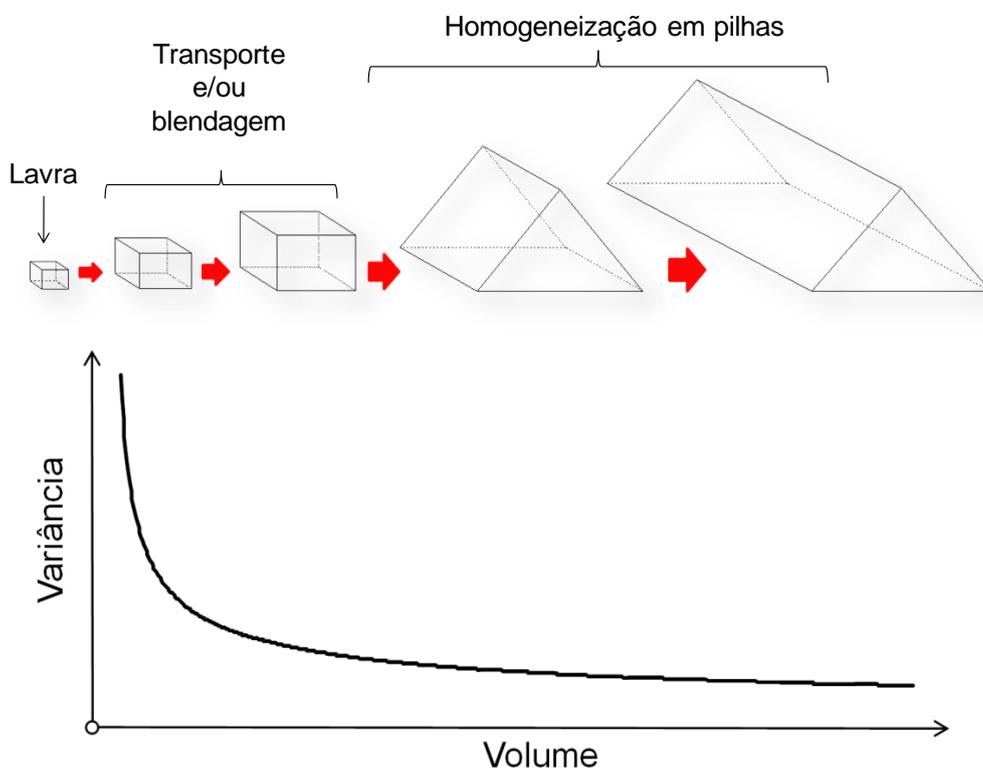


Figura 3.3 - Comportamento esperado pela relação volume-variância.

3.4 Estratégias de homogeneização

Na atividade de mineração, existem pelo menos três áreas principais para a redução de variabilidade dos minérios, sendo elas:

- lavra seletiva;
- pilha de homogeneização;
- processos de beneficiamento.

As técnicas envolvidas na atividade de lavra de minérios, baseadas no conhecimento do depósito mineral, possibilitam uma homogeneização inicial capaz de reduzir significativamente as flutuações em torno de um atributo de qualidade qualquer na etapa de extração (Gambin, 2003).

As pilhas de homogeneização podem assumir um duplo propósito, atuar simplesmente como uma pilha de estocagem, ou uma pilha pulmão, com o objetivo de fornecer material a uma usina de beneficiamento, ou ainda, atuar como um filtro da variabilidade da qualidade do minério através do empilhamento cuidadoso e da adequada recuperação do material (Gambin, 2003).

A homogeneização de minérios no beneficiamento se dá através dos processos existentes em uma usina de beneficiamento, desde sistemas de classificação até processos gravimétricos, hidrometalúrgicos, flotação e processos de aglomeração de minérios.

A Figura 3.4 apresenta um esquema simplificado de uma planta de beneficiamento alimentada após algumas etapas de redução de variabilidade. Nota-se que o material proveniente da lavra, possui grandes flutuações de teores. Após sua passagem pelas pilhas de homogeneização, essas flutuações ficam significativamente reduzidas, considerando um mesmo suporte.

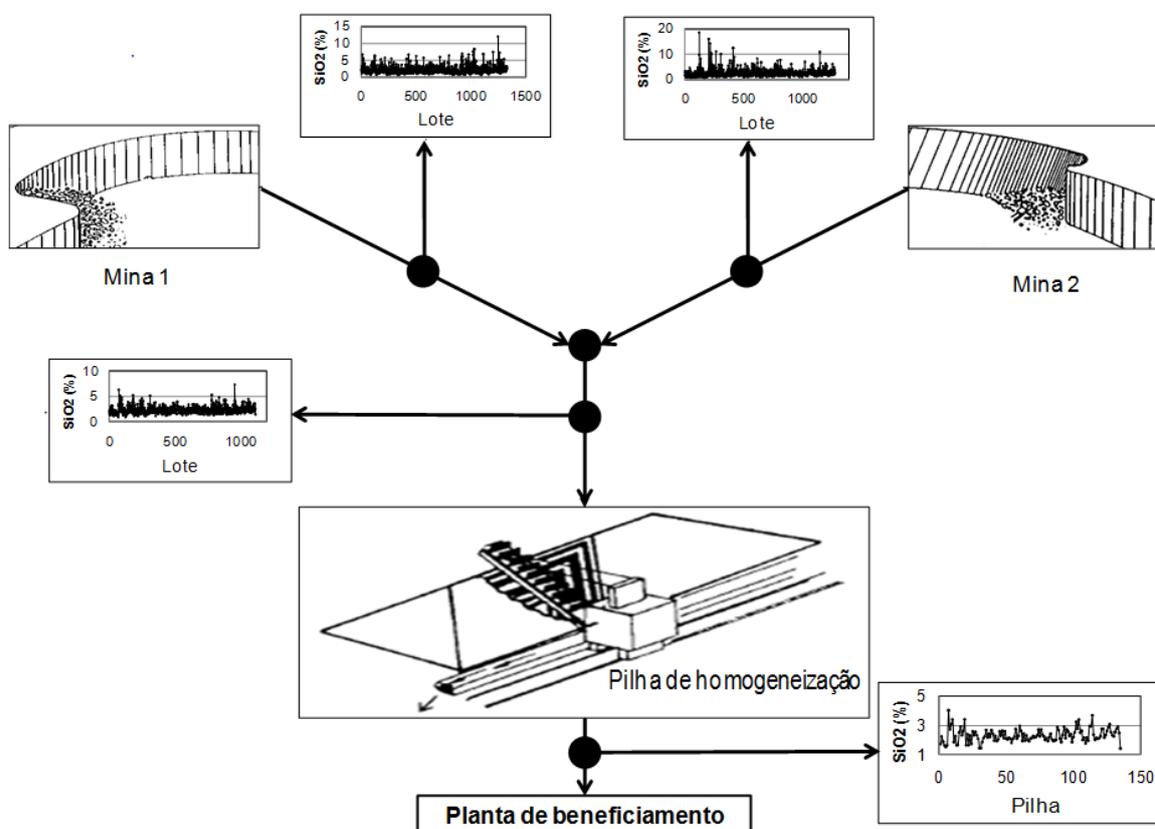


Figura 3.4 - Esquema de simplificado das estratégias de homogeneização presente no complexo Vargem Grande.

3.4.1 Blendagem e homogeneização

Blendagem refere-se a uma mistura, em proporções controladas de matérias-primas diferentes, a fim de se obter um material com características específicas, como no caso de pilhas pulmões.

Homogeneização implica na manipulação da matéria-prima, levando em consideração a disposição espacial do material, com o objetivo de tornar suas características uniformes e constantes, sendo esse o objetivo das pilhas de homogeneização.

3.4.2 Blendagem na lavra

A lavra seletiva, baseada no conhecimento do depósito mineral, possibilita uma redução de variabilidade inicial significativa de um atributo qualquer na etapa de extração. Essa redução de variabilidade é ainda incrementado por meio da blendagem do material de diferentes frentes de lavra e/ou minas.

O problema de utilizar esse método no controle da variabilidade é o controle sobre o ritmo de produção. Para manter o minério dentro de determinada especificação, é necessário uma interação imediata entre as diferentes fontes de minério que compõem o sistema. Também, é necessária uma excelente caracterização dos teores ao longo do corpo de minério

As técnicas geoestatísticas fornecem uma ferramenta poderosa a ser utilizada na etapa de extração possibilitando descrever a variabilidade encontrada em um depósito mineral, permitindo o controle sobre a qualidade média de curto prazo do material fornecido à etapa seguinte do processo (Schofield, 1980).

3.4.3 Homogeneização em pilhas

Por melhor e mais eficiente que seja a estacionarização dos teores na lavra, o material que constitui o ROM apresentará algumas variações e/ou flutuações em termos de algum (ou alguns) parâmetro de qualidade. Essas variações devem ser atenuadas de forma que a alimentação na usina apresente a homogeneidade necessária (Valente, 1982).

Segundo Schofield (1980), os seguintes pontos são favoráveis à utilização das pilhas como uma unidade de armazenamento intermediária:

- as atividades de extração e produção não necessitam uma interação instantânea para atenuar oscilações de teores;
- garante ao processo de beneficiamento uma fonte constante de minério ROM relativamente homogêneo;
- facilidade na manipulação do minério;
- reduz a demanda por automatização complexa das etapas subseqüentes.

Os seguintes pontos são favoráveis à utilização da pilha como unidade homogeneizadora de materiais ROM:

- a redução da variabilidade do material de entrada para o material de saída da pilha pode ser conseguida com o correto planejamento da pilha;
- materiais provenientes de depósitos com minério de baixa qualidade e alta heterogeneidade podem ser utilizados;
- o crescimento de exigência do controle da qualidade do material fornecido pode ser satisfeito.

As pilhas de homogeneização podem ser usadas como parte de um sistema de controle de qualidade, visando reduzir a variabilidade de teores na alimentação da planta de beneficiamento. Para que este sistema funcione adequadamente, é necessário medir a qualidade do material que alimenta a pilha, uma vez que esse deve ser empilhado de forma a manter um teor de saída com a menor variabilidade de acordo com parâmetros técnicos e/ou econômicos pré-estabelecidos. Um dos métodos mais simples para suavizar a variabilidade de determinada propriedade de um minério é a construção de pilhas longitudinais de homogeneização pelo descarregamento do minério em longas camadas elementares ao longo do eixo longitudinal da pilha ou em pilhas elementares, uma subseqüente à outra (Ferreira *et al.*, 1992).

A Figura 3.5 apresenta, esquematicamente, a função esperada de uma pilha de homogeneização, atendendo o controle das variações dos parâmetros físicos e químicos do minério

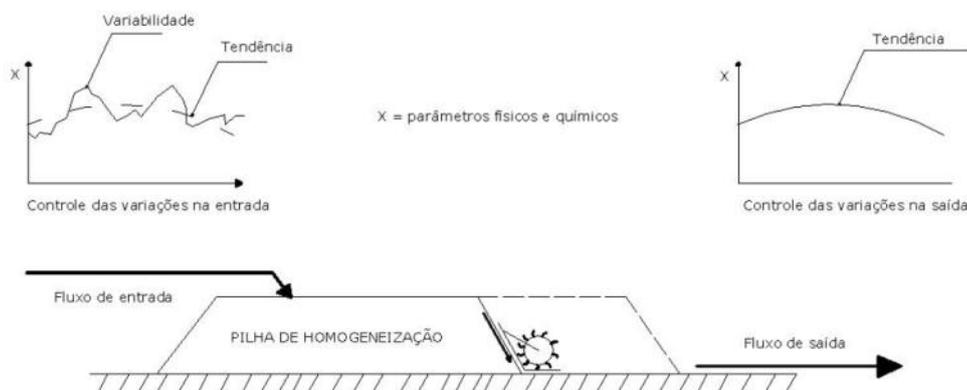


Figura 3.5 - Homogeneização em pilhas (Gambin, 2003).

Segundo Ferreira (1989), dois aspectos básicos devem ser considerados no tamanho das instalações de homogeneização em pilhas:

- econômicos: é desejável que os equipamentos utilizados no empilhamento e na retomada tenham, no seu conjunto, o menor investimento possível;
- de processo: o material retomado da pilha deve ter um desvio padrão nos valores dos teores compatível com aquele requerido pelo processo posterior.

Satisfazendo estas duas condições, pode-se afirmar que o sistema de homogeneização em pilhas é satisfatório.

3.4.3.1 Pilhas circulares

Em pilhas de homogeneização do tipo circular (Figura 3.6), a empilhadeira e o retomador são montados sobre a coluna central. A empilhadeira tem rotação em ambos os sentidos, simultaneamente com o movimento vertical do braço. Sua altura acima do topo da pilha é mantido em uma altura mínima para reduzir a emissão poeira.

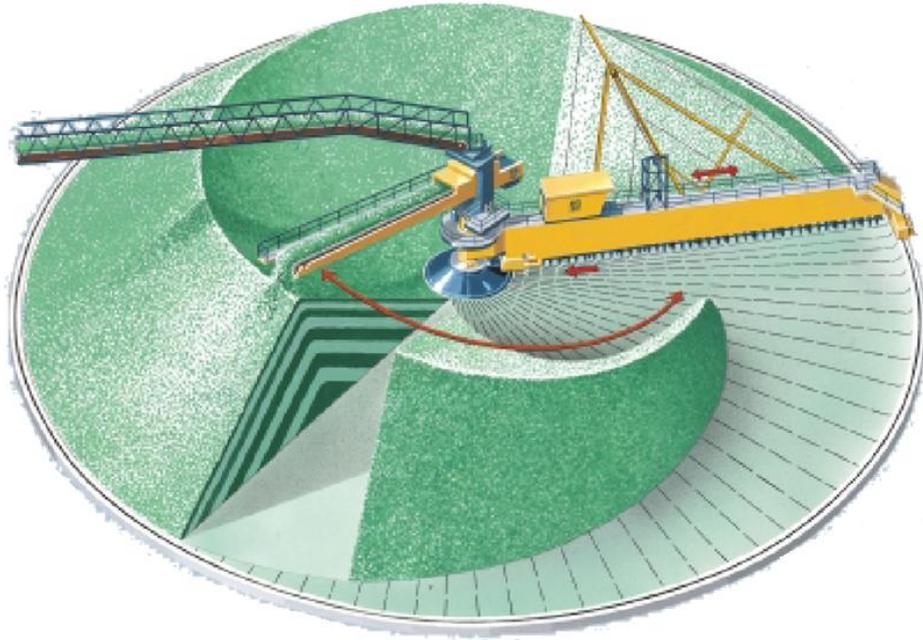


Figura 3.6 - Pilha do tipo circular (autor desconhecido, obtida em <http://www.flsmidth.com>).

Esse tipo de pilha apresenta como vantagens:

- correias transportadoras com menor extensão;
- equipamentos com baixa exigência de energia;
- flexibilidade no arranjo físico da pilha.

Entretanto, possuem baixa eficiência de homogeneização, se comparada às pilhas do tipo longitudinal e, deste modo, esse tipo de pilha não será considerada nesta dissertação.

3.4.3.2 Pilhas longitudinais

A construção de pilhas longitudinais é realizada distribuindo-se o material, ao longo de um eixo, através de sucessivos movimentos da empilhadeira. Esse tipo de pilha apresenta forma triangular (relacionado ao ângulo de repouso do material empilhado), conforme pode ser visto na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Pilha do tipo longitudinal (autor desconhecido, obtida em <http://www.flsmidth.com>).

O sistema de homogeneização longitudinal deve ser sempre feito com pelo menos duas pilhas, enquanto uma está em formação a outra está sendo retomada. Por isso mesmo, em média, uma pilha está sendo consumida pela metade, enquanto a outra está formada pela metade, sendo, portanto a capacidade efetiva de estoque igual a 50% da capacidade total de estocagem do sistema. Tal relação pode ser aumentada em instalações com três ou quatro pilhas (Ferreira, 1989).

As pilhas longitudinais podem ser dispostas em uma variedade de combinações, mas, basicamente, pode ser resumido em linha (Figura 3.8) ou em paralelo (Figura 3.9).

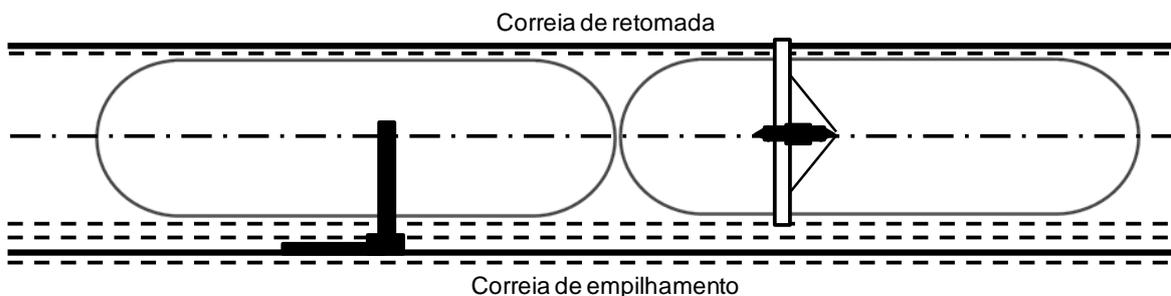


Figura 3.8 - Pilhas longitudinais em linha.

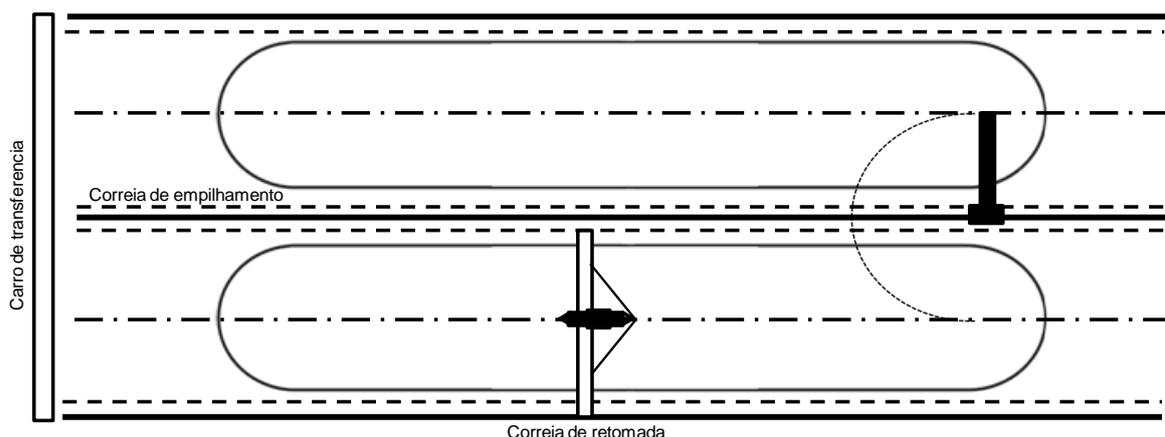


Figura 3.9 - Pilhas paralelas com empilhadeira de torre giratória.

Os métodos mais comumente usados são empilhamento *chevron* e *windrow*. Basicamente, estes métodos consistem em um grande número de camadas empilhadas, no sentido longitudinal da pilha. A Figura 3.10 apresenta seções transversais idealizadas desses métodos.

O método *chevron* (Figura 3.10 (a)) consiste no empilhamento de camadas do material a ser homogeneizado, sobre a linha central da pilha. Esse é o método mais comumente empregado na indústria, tendo as seguintes vantagens:

- permite uma manipulação de forma mais direta, podendo utilizar materiais que atenuem a variabilidade em qualquer momento da formação da pilhas, de forma a deixar o produto dentro das especificações de qualidade requeridas pelo sistema.
- a empilhadeira pode ser com torre fixa, com sua lança tendo menor comprimento, resultando numa empilhadeira de peso relativamente menor, e com um custo total de instalação mais baixo (Ferreira, 1989).
- a automação dos movimentos do equipamento utilizado no empilhamento é mais simples.

O método tem como desvantagem a segregação do material com partículas finas na parte central da pilha e partículas grossas na superfície e no fundo da pilha. Para assegurar a mistura adequada de uma pilha *chevron*, deve-se retomar o material da pilha a partir da face, trabalhando em toda a seção transversal.

No método *windrow* (Figura 3.10 (b)), o material é depositado em uma série de leitos (cordões) paralelos em toda a largura da pilha, ou sobre aqueles já

empilhados. Com essa configuração, é assegurada uma distribuição mais uniforme de partículas finas e grossas em toda a pilha, evitando a segregação do material. A desvantagem desse método é a necessidade de equipamentos mais complexos, como empilhadeiras de lança telescópica ou giratória, resultando em maiores investimentos, além dos movimentos de formação serem mais complexos, necessitando uma maior automação.

O método *chevron-windrow* (Figura 3.10 (c)) é configuração intermediária entre as duas citadas anteriormente, sendo ele composto pelo empilhamento de pequenas pilhas *chevron*. Apresenta como vantagens a necessidade de movimentos de formação menos complexos que os do método *windrow* e uma segregação menor do material em relação o método *chevron*.

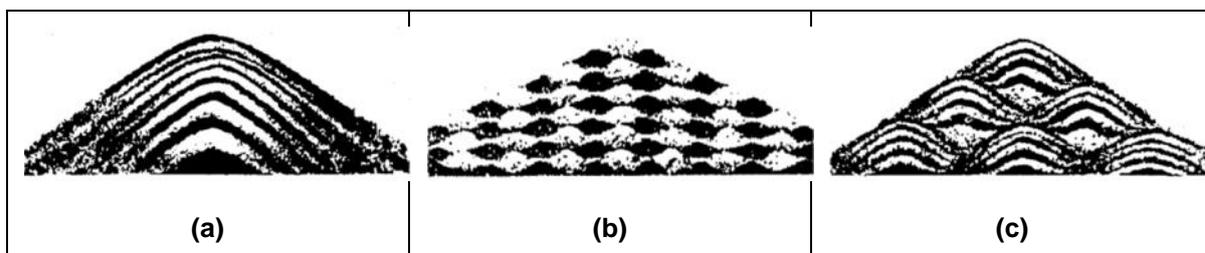


Figura 3.10 - Principais esquemas de empilhamento utilizados - (a) chevron (b) windrow (c) chevron-windrow

3.5 Simulação de pilhas longitudinais de homogeneização

Quanto mais eficiente o processo de homogeneização, menor será o tamanho do pátio necessário para construção da pilha para uma determinada redução da variabilidade, reduzindo assim o custo do capital envolvido. Desse modo, foi criado um algoritmo baseado na metodologia de redução de variabilidade com o aumento do suporte, através de pilhas longitudinais. Esse algoritmo foi implementado computacionalmente na rotina que se convencionou chamar de *BlendSim* (*Blending Simulation*) (Figura 3.11).

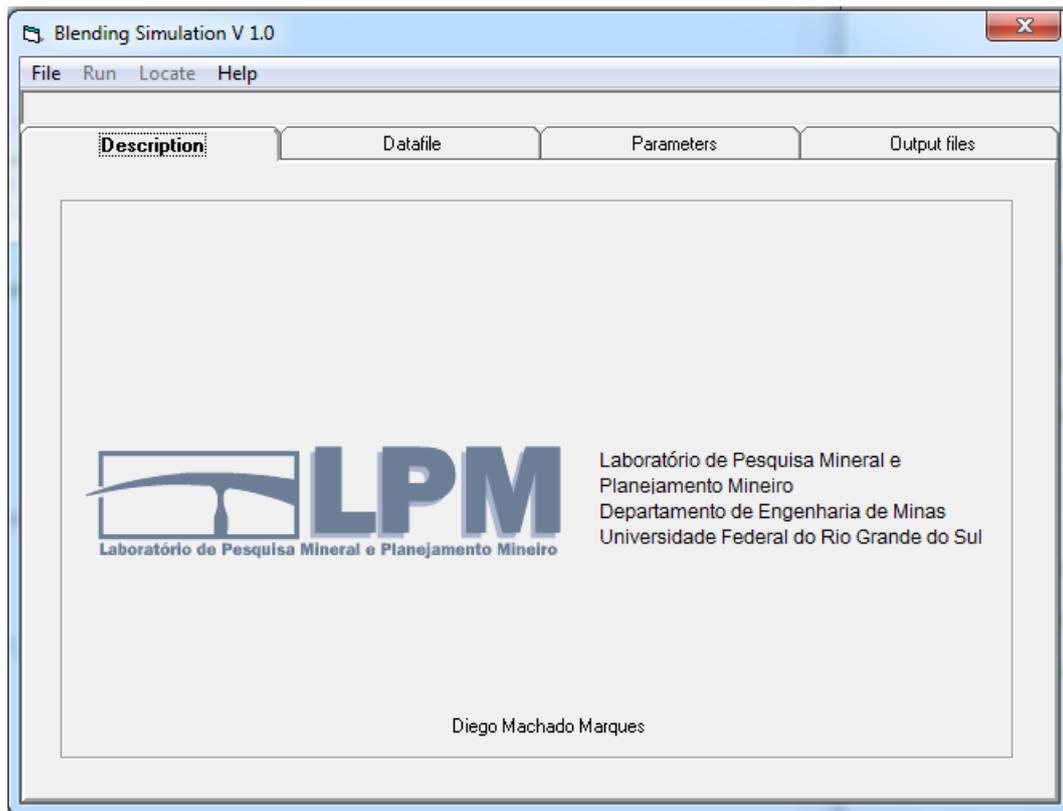


Figura 3.11 - Janela inicial do programa *BlendSim*

O *BlendSim* emula pilhas longitudinais de homogeneização a partir de múltiplos cenários equiprováveis do depósito mineral, obtidos através de simulação geoestatística.

3.5.1 Definições do algoritmo

Para a implementação do algoritmo, algumas considerações são necessárias:

- i. o modelo se baseia em configurações de pilhas longitudinais;
- ii. a geometria dos cones nas extremidades das pilhas não é considerada;
- iii. o empilhamento do material é realizado nos dois sentidos de movimento da empilhadeira;
- iv. a empilhadeira despeja uma quantidade de material constante durante seu movimento;
- v. a recuperação do material é realizada de forma perpendicular ao solo;
- vi. a pilha é recuperada em fatias de um metro;
- vii. a segregação do material foi desconsiderada;

viii.as partículas que compõem o bloco/lote são infinitamente pequenas se comparadas à massa do bloco/lote.

De acordo com a afirmação (i), o algoritmo foi desenvolvido para emular os três tipos de pilhas longitudinais apresentados na Figura 3.10. Por simplificação, o cálculo de volume é realizado com base em um prisma triangular, conforme Figura 3.12.

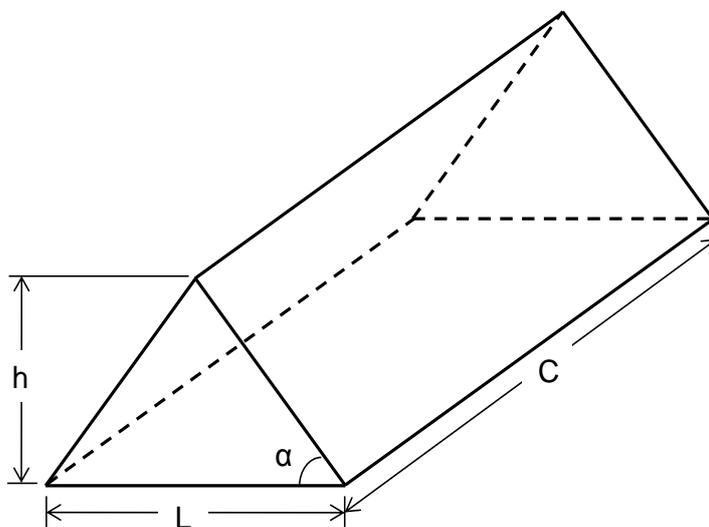


Figura 3.12 - Modelo teórico de pilha adotado.

As simplificações realizadas na definição do algoritmo não afetam de forma significativa o cálculo. Isso se deve ao fato da relação volume-variância não ser afetada pela heterogeneidade de distribuição.

3.5.2 Dados de entrada

Os dados a serem utilizados no *BlendSim* devem estar em arquivos tipo *ascii*, formato inicialmente utilizado pelo programa GEO-EAS, e posteriormente adotado por muitos softwares de geoestatística. A Figura 3.13 apresenta um exemplo de como os dados de entrada do software devem estar dispostos.

```

Exemplo
7
Massa_do_bloco(t)
Volume_do_bloco(m3)
Sit_Total[00001]_(%)
Sit_Total[00002]_(%)
Sit_Total[00003]_(%)
Sit_Total[00004]_(%)
Sit_Total[00005]_(%)
2900    1000    7.59    1.24    3.89    1.57    4.48
2900    1000    0.79    0.85    0.49    0.65    1.27
2900    1000    5.88    2.01    1.99    0.68    1.52
.
.
.
2900    1000    9.15    0.93    1.36    2.45    2.92
2900    1000    6.43    3.39    8.59    1.56    1.18
2900    1000    0.73    1.55    7.85    2.21    3.17

```

Figura 3.13 - Exemplo de arquivo de entrada do software.

O arquivo deve conter os dados do modelo de blocos (ou lotes de massa), ordenados segundo a seqüência de lavra. Não há limite no número de blocos/lotos e/ou simulações a serem utilizadas pela rotina. A partir deste momento, os dados presentes no banco de dados serão chamados apenas de lote.

Para a realização dos cálculos, é obrigatório que o banco de dados contenha a massa e o volume de cada lote. As colunas contendo essas informações devem estar dispostas antes das colunas contendo os resultados das simulações geoestatísticas.

As colunas contendo as informações sobre as simulações geoestatísticas devem estar dispostas de forma contínua no banco de dados.

Cada coluna do banco de dados deve conter exatamente o mesmo número de dados. Lotes que não contenham teor não devem ser colocados no arquivo de entrada (como ocorre em programas de geoestatística, onde se substitui esses dados por valores -999).

A Figura 3.14 apresenta a janela de identificação dos dados de entrada. Através de uma pequena janela é possível visualizar o cabeçalho do arquivo de

entrada selecionado, auxiliando no preenchimento dos parâmetros necessários a realização dos cálculos.

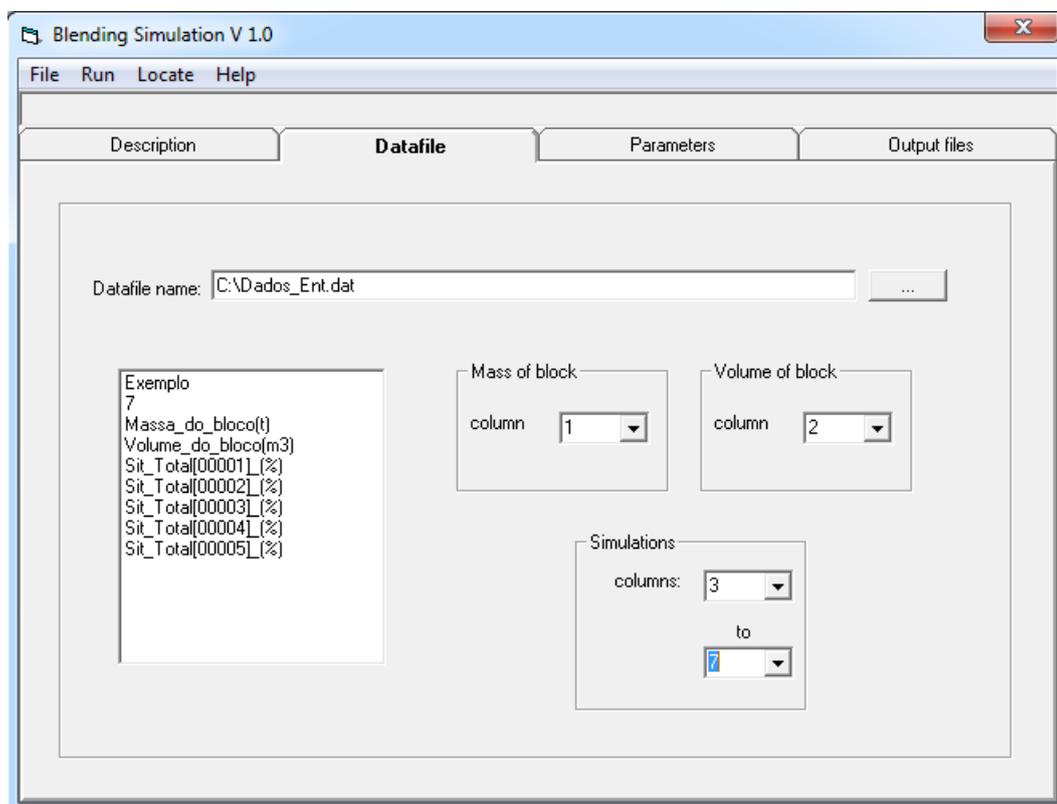


Figura 3.14 - Janela contendo as informações dos dados de entrada do *BlendSim*.

Apesar de não ser obrigatório, recomenda-se adicionar as coordenadas de cada lote. Seu possível uso será explicado posteriormente.

3.5.3 Cálculo de variabilidade entre pilhas de diferentes massas

Os teores dos lotes são diferentes entre si e diferentes do teor médio observado em determinado período. Entretanto, quando ocorre o agrupamento da massa dos lotes em pilhas, o teor médio de cada pilha aproxima-se do teor médio do período analisado. Assim, as pilhas reduzem a variação dos teores que alimentam a usina, se comparados com a variabilidade de teores que se teria, caso a alimentação fosse realizada diretamente com o ROM. Outras considerações podem ser feitas quanto à variância entre pilhas, por exemplo:

- quanto maior as pilhas, menor será a variabilidade dos teores em relação ao teor médio anual;

- por definições já vistas anteriormente, é impossível se obter um material completamente homogêneo. Desse modo, deve-se buscar o ponto adequado na variabilidade obtida na operação.

Para compreender melhor esse conceito, tomou-se como exemplo sete diferentes cenários hipotéticos e compararam-se os resultados. Para facilitar os cálculos, foi considerado que lotes de mesmo suporte possuem massa e volume equivalentes.

No primeiro cenário, temos 24 lotes, cada um com 1000 m³ de volume e teores em porcentagem. Esses lotes apresentam teor médio de 3,28% e um desvio padrão de 0,62%. O teor médio permanece constante em todos os cenários (como visto em definições anteriores), mas não o desvio padrão entre as amostra.

3.1	2.9	3.2	3.1	3.3	3.3	3.3
2.7						
3.8	3.4	3.4	3.4	3.0	3.4	
2.9						
3.2	3.7	3.0	3.0	3.0		
4.2						
3.4	3.1	3.0	3.8	3.5		
2.7						
2.9	2.9	3.1	3.4	3.3		
2.9						
3.1	3.1	3.5	3.0	3.2		
3.0						
2.4	3.8	3.0	3.0	3.0		
5.1						
4.3	3.9	3.0	3.0	3.0		
3.4						
3.1	3.0	3.0	3.0	3.0		
2.9						
3.4	3.8	3.0	3.0	3.0		
4.1						
3.1	2.9	3.0	3.0	3.0		
2.7						
2.9	3.1	3.0	3.0	3.0		
3.3						
Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7

Figura 3.15 - Cenários equiprováveis para formação de pilhas hipotéticas.

A Tabela 3.1 apresenta os resultados obtidos para todos os cenários, onde se podem comprovar as considerações feitas sobre a variância entre pilhas.

Tabela 3.1 - Resultados do exemplo hipotético

Número de lotes	24	12	8	6	4	3	1
Volume do lote (m ³)	1000	2000	3000	4000	6000	8000	24000
Desvio padrão	0,62	0,38	0,34	0,31	0,22	0,10	0,00
Variância	0,39	0,15	0,11	0,10	0,05	0,01	0,00

A Figura 3.16 apresenta o gráfico gerado a partir dos sete cenários. Note que o comportamento da curva é exatamente o esperado nesse tipo de estudo.

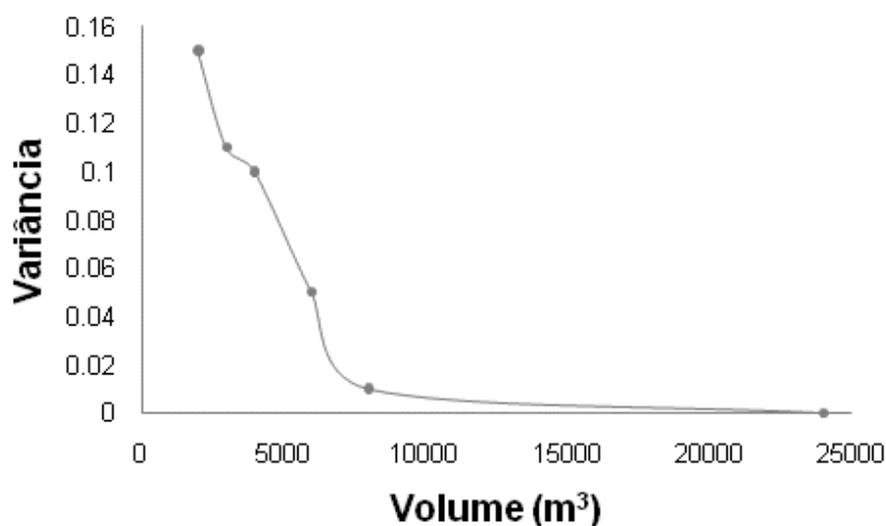


Figura 3.16 - Redução de variabilidade para o aumento do volume em diversos cenários.

No *BlendSim*, a primeira etapa para estudar a redução de variabilidade do material com pilhas de homogeneização é em relação ao aumento de massa. É necessário preencher apenas três parâmetros (em destaque na Figura 3.17), sendo eles:

- massa inicial: esse será o tamanho de pilha inicial do cálculo. O valor adotado deve ser maior que a menor massa no arquivo de entrada;

- massa final: esse é o maior tamanho de pilha a ser analisado. O valor adotado deve ser menor que o somatório das massas no arquivo de entrada;
- incremento de massa: indica a diferença entre os tamanhos de pilhas analisadas. O valor desse parâmetro deverá ser maior que a menor massa do arquivo de entrada e, menor que o somatório do arquivo de entrada.

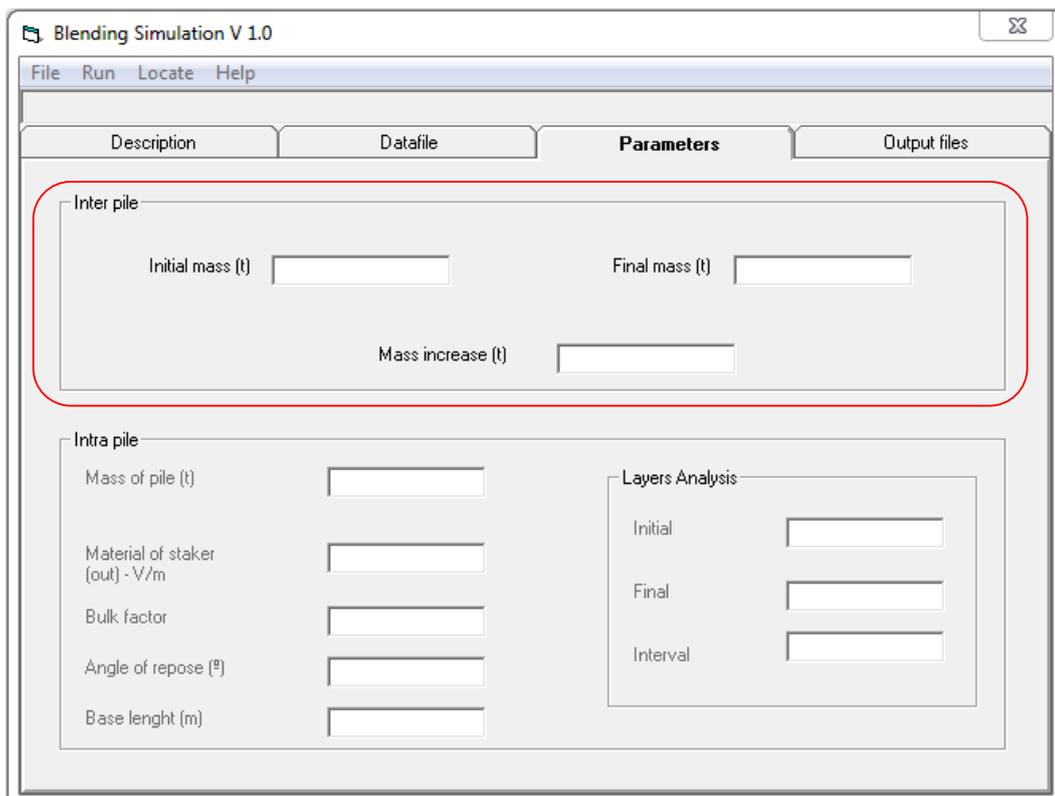


Figura 3.17 - Janela de parâmetros do *BlendSim (Inter pile)*

O algoritmo somente realizará os cálculos se os parâmetros forem preenchidos corretamente, caso contrário enviará ao usuário uma advertência e indicará o local do erro ao usuário.

Na primeira etapa, calcula-se o teor médio ponderado da primeira simulação geoestatística, segundo a Equação 3.1.

$$T_{sim} = \frac{1}{M_t} \sum_1^n (T_l \times M_l) \quad (3.1)$$

Onde:

T_{sim} : teor médio da simulação geoestatística;

M_t : somatório das massas dos lotes no banco de dados;

T_l : teor do lote;

M_l : massa do lote;

n : número de lotes que compõem a simulação geoestatística.

Na segunda etapa, calcula-se o teor médio ponderado de cada pilha, para a massa inicial determinada, para a simulação geoestatística em questão (Equação 3.2).

$$T_p = \frac{1}{M_p} \sum_1^n (T_l \times M_l) \quad (3.2)$$

Onde:

T_p : teor médio da pilha;

M_p : massa total da pilha;

T_l : teor do lote;

M_l : massa do lote;

n : número de lotes que compõem a pilha.

Para cada pilha formada, calcula-se a diferença quadrática em relação ao teor médio da simulação (T_{sim}), somando os resultados. No final do procedimento, divide-se o valor obtido pelo número total de pilhas formadas, obtendo-se a variância para a massa de pilha em questão. O procedimento é repetido para as demais massas de pilhas solicitadas na janela de parâmetros.

Na terceira etapa, os procedimentos citados nas etapas anteriores são repetidos para as demais simulações.

Após a execução da rotina, será gerado um arquivo tipo *ascii*, contendo a massa das pilhas formadas (*mass*), além da variabilidade das mesmas para cada simulação geoestatística.

Um exemplo de resultado pode ser visto na Tabela 3.2, sendo este apenas ilustrativo (um estudo de caso será apresentado no capítulo 4). A rotina *Inter pile* pode ser acessada através do menu principal do programa, ou pressionando a tecla "F5".

Tabela 3.2 - Arquivo de saída da rotina *Inter Piles*.

Mass	Simulation_1(Var)	Simulation_2(Var)	Simulation_3(Var)	Simulation_4(Var)	Simulation_5(Var)
28962,6	2,5	3,22	2,66	2,9	2,58
49276,2	1,98	2,46	1,93	2,33	1,93
69443,2	1,74	2,14	1,63	1,89	1,5
89481,6	1,56	1,87	1,61	1,73	1,43
107058,3	1,43	1,72	1,33	1,7	1,25
127558,9	1,27	1,65	1,16	1,54	1,04
147424,6	1,28	1,47	1,2	1,28	0,98
168091,6	1,11	1,36	1,07	1,17	0,84
187352,1	1,01	1,18	0,93	1,09	0,78
206733,3	1,09	1,22	0,95	1,06	0,72
227668,4	0,89	1,13	0,8	1,14	0,68
246380,8	1,01	1,14	0,92	1,11	0,7
268444,8	0,94	1,05	0,74	1,02	0,65

No exemplo da Tabela 3.2, os parâmetros utilizados foram:

- massa inicial de 30.000 t;
- massa final de 270.000 t;
- incremento de massa de 20.000 t.

No algoritmo, cada lote pode pertencer a apenas uma pilha de homogeneização e, como os dados de entrada podem apresentar massas diferentes, nem todas as pilhas terão o mesmo número de lotes em sua composição. Também, não poderão existir pilhas com massa superior àquela

determinada nos parâmetros. Sendo assim, é calculada a massa média das pilhas para cada massa de pilha solicitada, como pode ser vista na primeira linha da Tabela 3.2, onde para as pilhas de 30.000 t, a massa média ficou 28.962,6 t.

Como os resultados encontram-se em um arquivo tipo *ascii*, pode-se facilmente lê-los em diversos softwares, a fim de gerar os gráficos de redução de variabilidade. A Figura 3.18 apresenta o gráfico gerado a partir da Tabela 3.2.

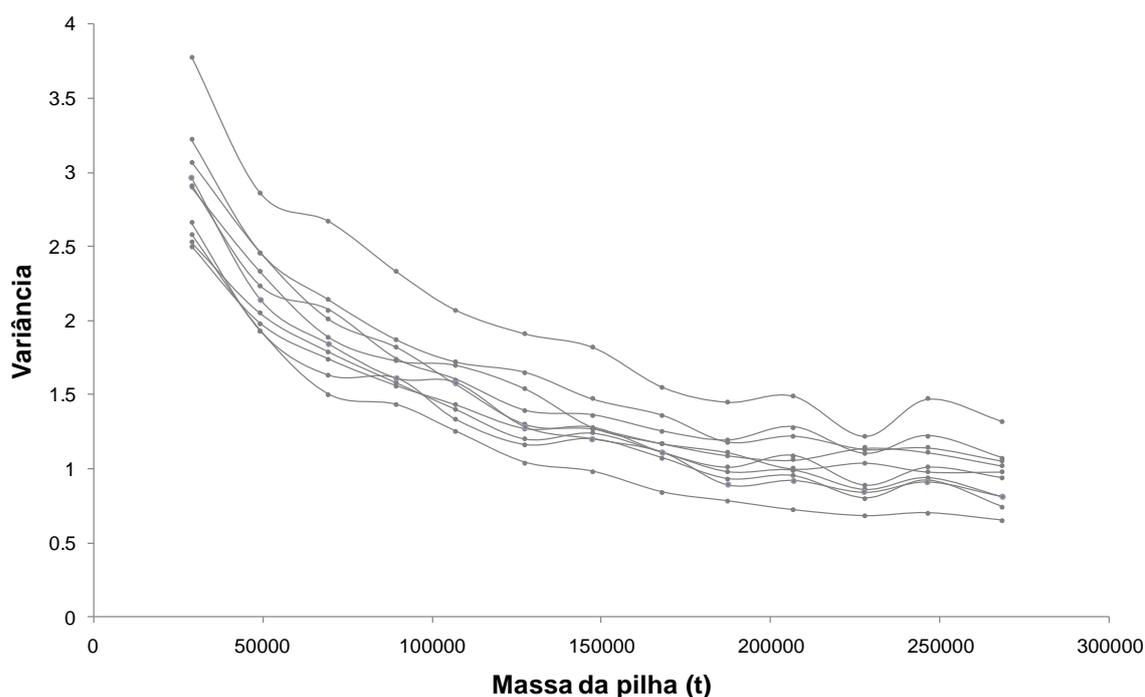


Figura 3.18 - Curvas de redução de variabilidade considerando diversas massas de pilhas.

Nota-se que o comportamento das curvas corresponde ao esperado, conforme visto em tópicos anteriores. Cada linha, nesse gráfico, representa uma simulação geostatística. Assim, como visto no Capítulo 2, esses gráficos compõem um conjunto que mapeia a banda de incerteza.

Além do comportamento da variabilidade, é possível analisar as pilhas em séries temporais. Para cada massa de pilha escolhida para ser analisada, são formados diferentes números de pilhas. O algoritmo armazena esses valores durante o cálculo, para todas as simulações geostatísticas analisadas, e retorna para o usuário uma de duas opções:

- os teores extremos das pilhas, obtidos a partir das diferentes simulações (banda de incerteza);

- todas as pilhas formadas em todas as simulações.

A Figura 3.19 apresenta uma série temporal com a banda de incerteza obtida a partir de cinco simulações geoestatísticas, para as pilhas com aproximadamente 210.000 t do exemplo acima citado. A linha vermelha representa o máximo teor de cada pilha e a azul o mínimo, obtidos através das simulações geoestatísticas.

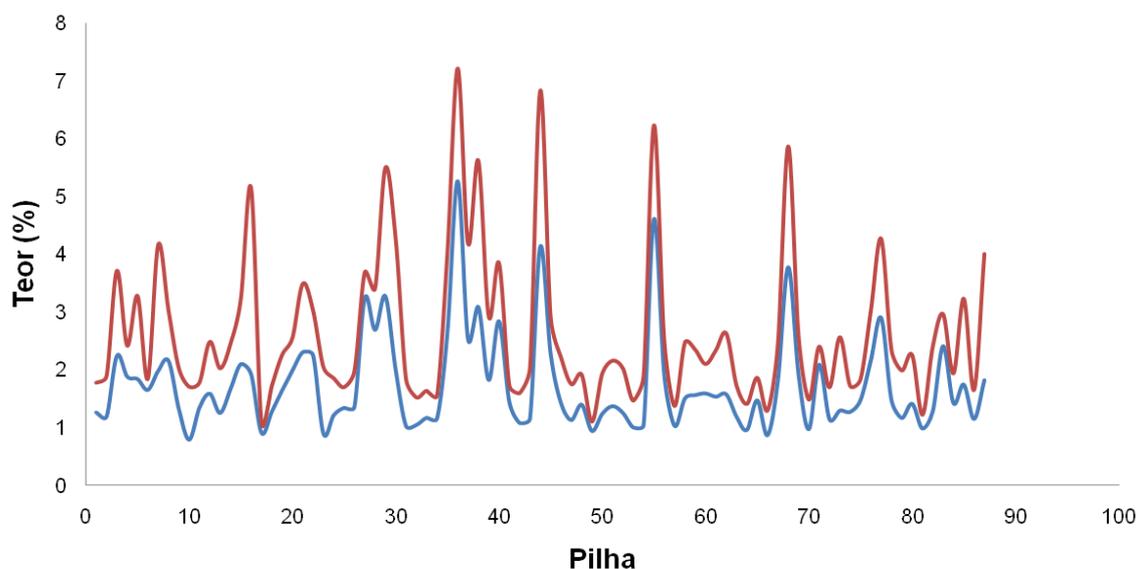


Figura 3.19 - Série temporal com os teores máximos e mínimos das pilhas de homogeneização simuladas, onde a linha vermelha representa o máximo teor e a azul o mínimo teor de cada pilha, obtido a partir de 5 simulações geoestatísticas.

3.5.4 Pilhas de homogeneização como uma ferramenta no auxílio ao planejamento de lavra

Na indústria mineira, é comum o uso de contratos estabelecendo os limites de contaminantes presentes no minério. O planejamento de lavra, através do seqüenciamento dos blocos, visa manter os contaminantes dentro dos limites (blendagem na lavra). Mas, com o uso de pilhas de homogeneização, talvez seja possível utilizar blocos, antes considerados impróprios na seqüência de lavra, sem penalidade nos teores.

Através do menu principal do programa, é possível acessar uma rotina denominada *Locate*. Essa rotina tem o objetivo de localizar espacialmente os lotes de massa que compõem as pilhas de homogeneização com teor fora das

especificações. As pilhas de homogeneização serão consideradas fora de especificação quando a sua banda de incerteza (valor mínimo e máximo) encontrar-se fora de uma faixa de teores pré-estabelecida.

A Figura 3.20 apresenta a janela de parâmetros da rotina *Locate*. A idéia é que o usuário analise os resultados da rotina *Inter pile* e, detectando a presença de pilhas problemáticas, refine o estudo (alterando os parâmetros da rotina *Inter pile* se necessário) solicitando a posição espacial das mesmas. Para que essa rotina funcione, torna-se necessário que o arquivo de entrada contenha as coordenadas X, Y e Z de cada lote.

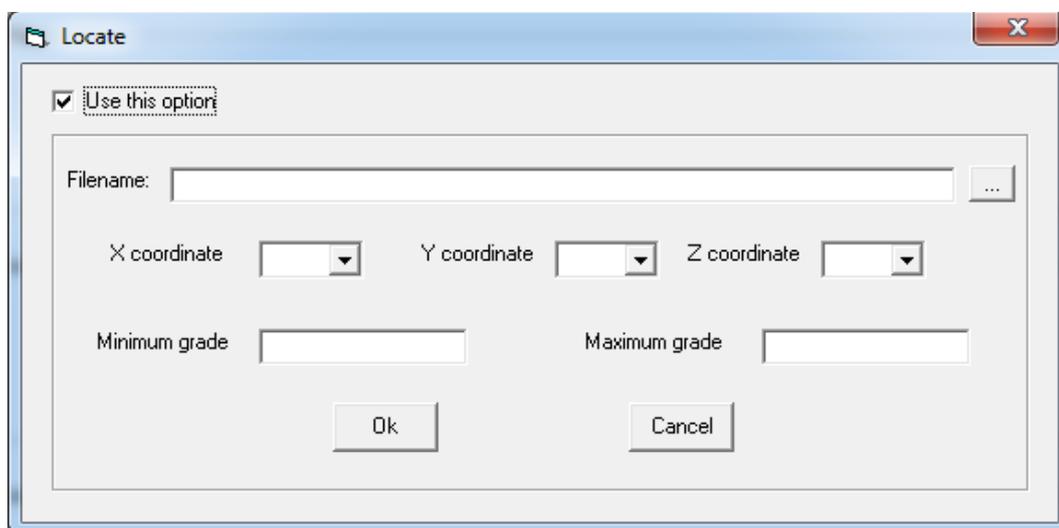


Figura 3.20 - Janela de parâmetros do *BlendSim* (*Locate*).

Digamos que a série temporal da Figura 3.19 represente os teores de um contaminante em nosso depósito. Devemos procurar por pilhas que contenham sua banda de incerteza fora de faixa de tolerância (entre 0% e 5%), ou seja, fora das especificações desejadas. A Tabela 3.3 apresenta os resultados obtidos no arquivo de saída do exemplo. Note, que para a massa de 210.000 t, a pilha número 36 foge das especificações.

Tabela 3.3 - Arquivo produzido pela rotina *Locate*.

Pile	Expected_mass	Real_mass	Grade	XLocate	YLocate	ZLocate	Number_of_blocks
.							
.							
.							
40	190000	188500	5,147	3	13	6	65
36	210000	208800	5,268	8	12	6	72

Esse arquivo contém, para todas as massas solicitadas na rotina *Inter pile*, as pilhas que fogem as especificações, contendo os seguintes dados:

- número da pilha na série temporal;
- massa esperada da pilha;
- massa real da pilha;
- teor que foge as especificações (o valor da banda de incerteza que esteja mais próximo da banda aceitável);
- coordenadas X, Y e Z do primeiro lote a formar a pilha;
- número de lotes que formam a pilha.

Há dois casos onde as pilhas podem fugir às especificações: no primeiro caso, a banda de incerteza pode ficar acima do teor máximo estabelecido, e então será informado o menor teor de pilha obtido pelas simulações (aplicado a contaminantes); no segundo caso, a banda de incerteza pode ficar abaixo do teor mínimo estabelecido, e então será informado o maior teor de pilha obtido pelas simulações (aplicado a minério).

3.5.5 Cálculo de variabilidade interna de pilhas de determinada massa

A grande parte da redução de variabilidade em pilhas de homogeneização deve-se à relação volume-variância. Mas, outro componente no sistema de homogeneização em pilhas é o arranjo de como as camadas serão dispostas no leito de formação. Pilhas do tipo longitudinal, por possuírem uma configuração triangular, apresentam uma relação direta entre a altura da pilha e seu

comprimento. O algoritmo desenvolvido leva em consideração a heterogeneidade de distribuição.

No método de pilhas *chevron*, ilustrado na Figura 3.21, o efeito da homogeneização é obtido da seguinte forma (Valente, 1982):

- como resultado da deposição do minério ROM em leito por leito, a alimentação da pilha é dividida em pequenas quantidades ΔR , onde ΔR representa a massa de cada um dos leitos;
- assim, as variações das características de qualidade que ocorrem no material ROM são igualmente divididas nos intervalos de ΔR ;
- devido ao modo de construção dessas pilhas, as variações entre as quantidades ΔR estarão sobrepostas quando a pilha se completar;
- considerando seções de corte devidamente orientadas (Figura 3.21), percebe-se que devido ao efeito de sobreposição de parte dos ΔR de cada leito, haverá alteração nas características de variação de seção para seção, sendo estas menores do que as variações existentes entre os referidos ΔR ;
- se cada seção de corte ou fatia de retomada tiver a massa ΔK , o processo de homogeneização, neste tipo de pilha, tem de ser estudado em função de ΔR , ΔK e N , sendo N o número de leitos que a pilha comportou.

O correto dimensionamento de uma pilha de homogeneização consiste, essencialmente, em selecionar os valores ótimos para os parâmetros N , ΔR e ΔK , de forma a minimizar as variações entre os diversos ΔK . As variações entre os diversos ΔK , são menores do que as variações entre os diversos ΔR , porque haverá um pedaço de cada ΔR em cada ΔK e se admite que dentro de cada ΔR há uma homogeneidade aceitável (há heterogeneidade entre os diversos ΔR).

A forma de deposição e de retomada do material é importante para a obtenção da homogeneização desejada entre os ΔK . O aumento do número de leitos (N) reduz a quantidade de material por leito ΔR , permitindo que o efeito da homogeneização em pilhas seja acentuado pela redução nas variações entre as seções de retomada (ΔK).

As pilhas de homogeneização longitudinais são as mais utilizadas devido a sua aplicação na mineração e simplicidade em relação aos equipamentos utilizados, embora outras configurações de pilhas, como as pilhas circulares, também possam apresentar essas características.

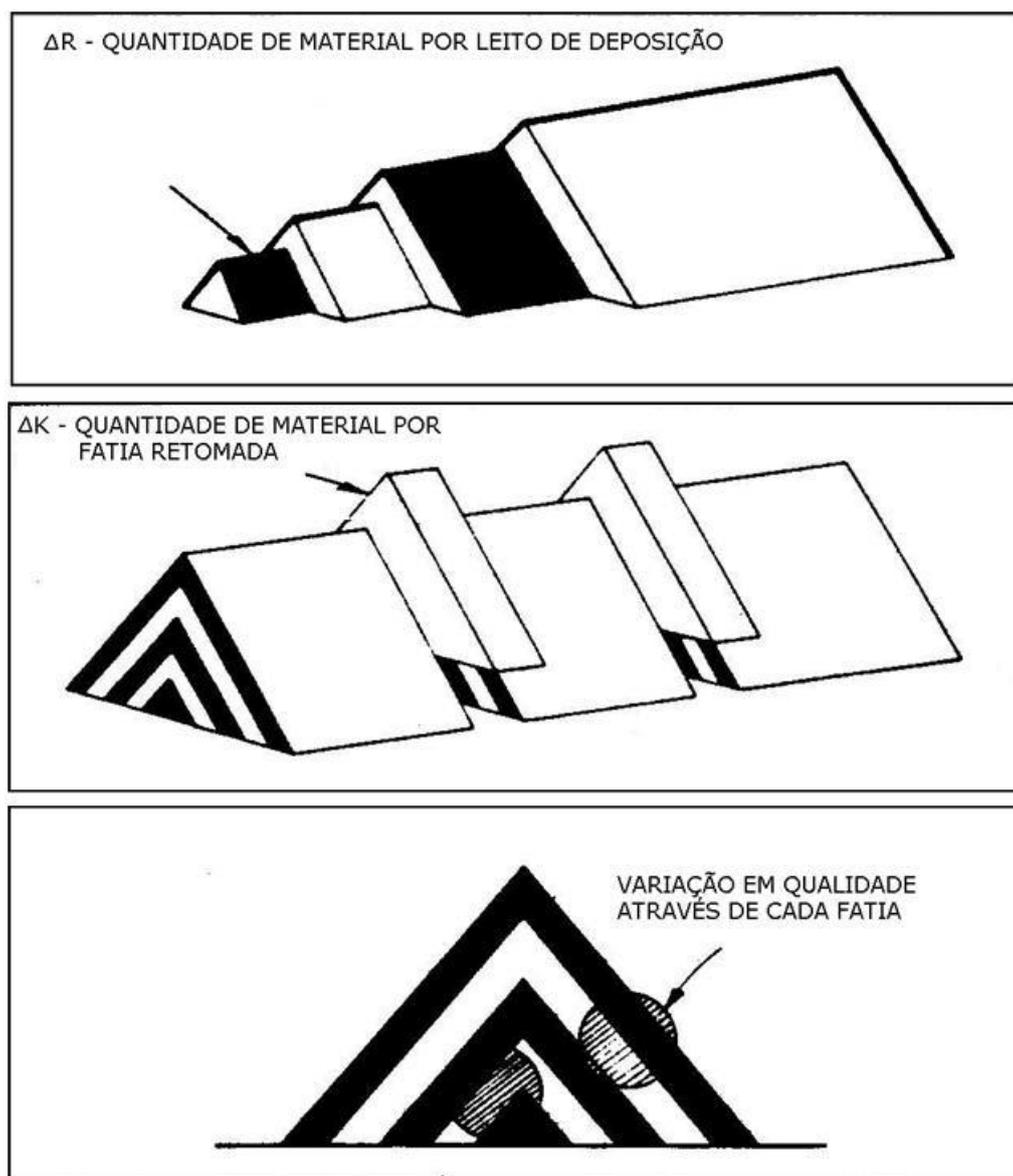


Figura 3.21 - Deposição e retomada na pilha *chevron* (Schofield, 1980).

Em uma pilha de homogeneização ideal haverá variações somente dentro das fatias retomadas e a média dos valores da distribuição de frequência dentro dessas fatias será constante para todas as fatias de uma pilha (Gambin, 2003).

Teoricamente, o efeito da homogeneização será melhor obtido quanto maior for o número de leitos N da pilha, embora numa situação real o aumento de N para além de um determinado número deverá ser antieconômico. Além disso, conforme o número de leitos de uma pilha cresce, a correlação entre as variabilidades da qualidade do material entre os leitos adjacentes cresce até atingir um ponto máximo (Schofield, 1980).

Segundo Ferreira (1989), o custo da aquisição dos equipamentos de empilhamento e retomada é diretamente proporcional à largura dos mesmos, e conseqüentemente proporcional à largura da pilha. O inverso ocorre com os transportadores, pois quanto maior a largura da pilha, menor será o seu comprimento. Desse modo, o ponto adequado de operação refere-se ao tamanho e *layout* de pilha que forneça material adequado as necessidades da usina de beneficiamento, levando em consideração o menor custo possível com os equipamentos de formação da mesma.

Diversos métodos têm sido testados com o objetivo de projetar e especificar completamente a homogeneização por pilhas longitudinais. Entre esses processos de homogeneização em pilhas, destaca-se o processo gaussiano, o processo de Monte Carlo, entre outros. Esses processos não serão abordados nesta discussão, porém estão apresentados em Schofield (1980).

Nesta dissertação, o cálculo da variabilidade interna da pilha só poderá ser realizado após o cálculo da variabilidade entre pilhas de diferentes massas. Para emular uma pilha de homogeneização, são necessários os seguintes parâmetros:

- massa da pilha de homogeneização (1);
- volume de material descarregado pela empilhadeira a cada metro do trajeto (2);
- fator de empolamento do material (3);
- ângulo de repouso do material (graus) (4);
- largura da base da pilha (5);
- número de camadas inicial do estudo (6);
- incremento no número de camadas (7);
- número de camadas final do estudo (8).

A Figura 3.22 apresenta os locais onde cada parâmetro deve ser preenchido.

Figura 3.22 - Janela de parâmetros do *BlendSim* (Intra pile).

O algoritmo divide o cálculo em dois ciclos, sendo o primeiro ciclo referente às simulações geoestatísticas, e o segundo referente às diferentes camadas solicitadas na janela de parâmetros. Ou seja, para cada simulação, serão realizados os cálculos referentes às camadas (conforme solicitado pelo usuário), e para cada camada, serão realizadas as etapas descritas a seguir, para cada pilha possível de se formar com o banco de dados.

Na primeira etapa, calcula-se o número de lotes necessário para formar a pilha de homogeneização e obtém-se o seu teor médio ponderado, segundo a Equação 3.3. Após, calcula-se o volume total da pilha para a massa especificada pelo usuário, segundo a Equação 3.3.

$$V_p = \sum_1^n (V_l \times F_e) \quad (3.3)$$

Onde:

V_p : volume total da pilha de homogeneização;

V_l : volume de cada lote que compõe a pilha de homogeneização;

F_e : fator de empolamento fornecido pelo usuário;

n : número de lotes que compõe a pilha.

Sabendo o volume total da pilha e o número de camadas, tem-se o volume de material que será utilizado em cada camada.

A etapa seguinte é a chave no cálculo da rotina *Intra pile*, é a vazão de material da empilhadeira. O algoritmo baseia-se na premissa que a empilhadeira terá uma vazão constante do material, bem como manterá uma velocidade também constante ao longo de todo o percurso. A razão entre esses dois valores deve ser informada pelo usuário (m^3/m). Com essa razão, pode-se calcular o comprimento da pilha de homogeneização (a qual será informada no arquivo de saída), além desse ser o modo de definir o layout da pilha longitudinal que está sendo estudada.

Para entender melhor essa relação, vamos utilizar um exemplo hipotético. A Tabela 3.4 apresenta cinco lotes (com massa calculada para formar uma pilha de homogeneização), onde o teor médio ponderado é 2,79% e o desvio padrão 0,59%.

Tabela 3.4 - Lotes utilizados para compor as pilhas de homogeneização hipotéticas.

Lote	Teor (%)	Volume (m3)
1	2,5	15
2	2,9	13
3	3,7	14
4	2,1	12
5	2,7	14

Para as configurações da pilha, vamos considerar uma área de base igual a 5,6 m e um ângulo de atrito interno de 35°. A vazão do material na empilhadeira será testada em duas situações, sendo a primeira 1 m^3/m e a segunda de 0,25 m^3/m .

Na primeira situação, o tipo de empilhamento deve ser chevron, com 4 camadas (Figura 3.23). Para isso, precisa-se de uma pilha com 17 m de comprimento.

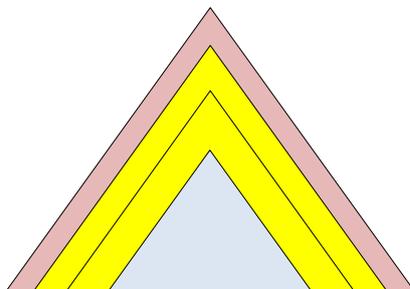


Figura 3.23 - Empilhamentos tipo *chevron* do exemplo.

A pilha de homogeneização da primeira situação é mostrada na Figura 3.24. O princípio de montagem da pilha é o mesmo utilizado pelo algoritmo na rotina *Intra piles*, onde os valores são armazenados em forma de matriz, sendo cada camada uma coluna, e cada linha o corte de retomada do material. As fatias retomadas para alimentar a planta de beneficiamento apresentam um desvio padrão de 0,30%.

Sentido de empilhamento do material				Teor médio da fatia retomada
↓	↑	↓	↑	
2.5	3.7	3.7	2.7	3.15
2.5	3.7	3.7	2.7	3.15
2.5	3.7	3.7	2.7	3.15
2.5	3.7	3.7	2.7	3.15
2.5	3.7	3.7	2.7	3.15
2.5	3.7	3.7	2.7	3.15
2.5	2.9	3.7	2.7	2.95
2.5	2.9	3.7	2.7	2.95
2.5	2.9	2.1	2.7	2.55
2.5	2.9	2.1	2.7	2.55
2.5	2.9	2.1	2.7	2.55
2.5	2.9	2.1	2.7	2.55
2.5	2.9	2.1	2.7	2.55
2.5	2.9	2.1	2.7	2.55
2.5	2.9	2.1	2.1	2.4
2.9	2.9	2.1	2.1	2.5
2.9	2.9	2.1	2.1	2.5
Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	

Figura 3.24 - Empilhamento do material no método *chevron* do exemplo.

Já, na segunda situação, como temos uma vazão equivalente a um quarto da primeira situação, serão necessárias 16 camadas. Esses valores foram escolhidos para que se possa montar uma pilha do tipo *windrow* (Figura 3.25).

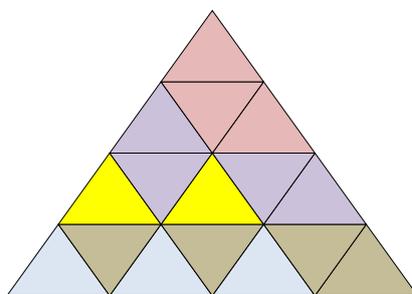


Figura 3.25 - Empilhamento tipo *windrow* do exemplo.

A rigor, cada coluna da Figura 3.26 deveria ser chamada de cordão, pois nem todas estão sobrepostas. O algoritmo não faz distinção entre cordão e camada, pois como a retomada do material é feita de maneira perpendicular ao

solo, a disposição geométrica é irrelevante, pois todas as colunas da matriz formada irão compor a média da fatia.

As fatias retomadas para alimentar a planta de beneficiamento apresentam um desvio padrão de 0,05%, uma redução significativa na variabilidade do material.

Sentido de empilhamento do material																Teor médio da fatia retomada	
↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑		
2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	2.9	2.9	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.69	
2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	2.9	2.9	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.69	
2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.79	
2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.79	
2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.79	
2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.79	
2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.79	
2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.79	
2.5	2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.76	
2.5	2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.76	
2.5	2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.81	
2.5	2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.81	
2.5	2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.7	2.85	
2.5	2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.7	2.85	
2.5	2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.7	2.85	
2.5	2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.7	2.85	
2.5	2.5	2.5	2.5	2.9	2.9	3.7	3.7	3.7	3.7	2.1	2.1	2.7	2.7	2.7	2.7	2.85	
Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4			Camada 5		Camada 6	Camada 7		

Figura 3.26 - Empilhamento do material no método *windrow* do exemplo.

É possível perceber a partir desse exemplo que a redução de variabilidade na saída da pilha de homogeneização foi muito reduzida com a utilização de pilha do tipo *windrow*. Em contrapartida, a complexidade em sua construção é muito maior. Desse modo, um controle adequado da configuração da vazão de material da empilhadeira é de extrema importância na utilização do algoritmo.

No *BlendSim*, calcula-se a variância das fatias retomada em relação ao teor médio da pilha, para cada pilha formada, somando os resultados. No final do procedimento, divide-se o valor obtido pelo número total de pilhas formadas,

obtendo-se a variância para o número de camadas em questão, em cada simulação. O procedimento é repetido para as demais simulações e configurações de pilhas solicitadas na janela de parâmetros. Esse cálculo é realizado com base na propriedade aditiva da variância de dispersão (Isaaks & Srivastava, 1989).

O arquivo de saída irá informar se a geometria de cada pilha emulada é válida para determinado número de camadas. Para isso, calcula-se a área da face da pilha emulada (Equação 3.4), para cada número de camada solicitado nos parâmetros, pois o volume e o comprimento da pilha emulada são conhecidos.

$$A_f = \frac{V_p}{C_p} \quad (3.4)$$

Onde:

A_f : área da face da pilha de homogeneização emulada;

V_p : volume da pilha de homogeneização emulada;

C_p : comprimento da pilha de homogeneização emulada.

Como o usuário informa a base que a pilha final deverá possuir (B_p) e o ângulo de atrito interno do material que está sendo empilhado, a rotina calcula a altura da pilha final (h_p), ou seja, a maior altura que uma pilha pode ter de acordo com os parâmetros informados ao algoritmo (Equação 3.5).

$$A_{fp} = \left(\frac{\frac{B_p}{2} \times h_p}{2} \right) \times 2 = \frac{B_p}{2} \times h_p \quad (3.5)$$

Onde:

A_{fp} : área da face da pilha de homogeneização (configuração final);

B_p : base da pilha de homogeneização (configuração final);

h_p : altura da pilha de homogeneização (configuração final).

Quando a área da face da pilha emulada (A_f) for maior que a área de face da configuração final (A_{fp}), o cálculo irá prosseguir, mas será informado no arquivo

de saída da rotina a inviabilidade de formar pilhas de homogeneização com essa configuração. Pilhas possíveis de serem formadas serão identificadas como 1, caso contrário será 0.

A Figura 3.27 apresenta a janela de parâmetros preenchida, e o algoritmo sendo executado (a barra azul informa o progresso do cálculo).

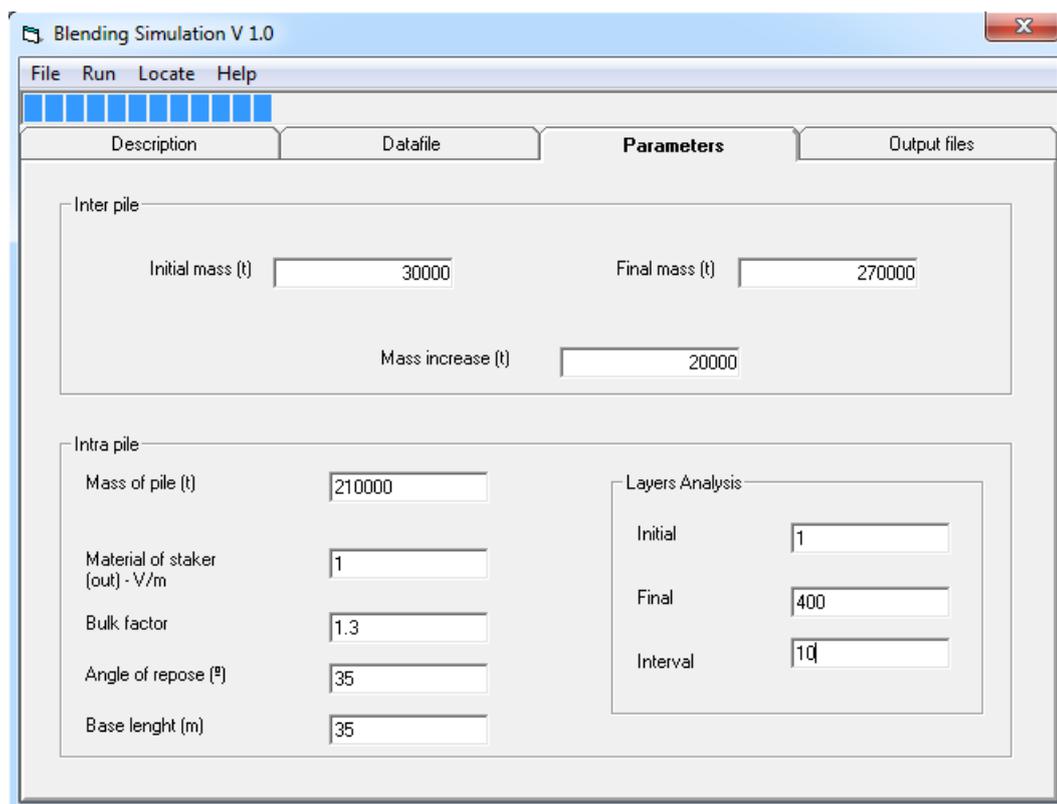


Figura 3.27 - Janela de parâmetros do *BlendSim* (intra-pilhas)

A Tabela 3.5 apresenta o resultado da rotina, segundo os parâmetros acima apresentados. O arquivo gerado apresenta o número de camadas analisadas (*layers*), o comprimento médio da pilha para esse número de camadas (*layers*), a viabilidade de formar pilhas com essa configuração (*Height_Indicator*) e a variabilidade interna das pilhas para cada simulação.

Tabela 3.5 - Resultado da rotina *Intra pile*.

Layers	Average_Length	Height_Indicator	Simulation_1(Var)	Simulation_2(Var)	Simulation_3(Var)	Simulation_4(Var)	Simulation_5(Var)	Simulation_6(Var)
1	94900	1	10,95	13,75	11,77	11,23	11,97	12,85
.								
101	939	1	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
111	854	1	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02
121	784	1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
131	724	1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
141	673	1	0	0	0	0	0	0
151	628	1	0	0	0	0	0	0
161	589	1	0,01	0,01	0,01	0	0,01	0,01
171	554	1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
181	524	1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
191	496	1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
201	472	1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
211	449	1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
221	429	0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
.								
391	242	0	0	0	0	0	0	0

Como nos exemplos anteriores, esses resultados são interpretados de forma gráfica (Figura 3.28), onde a redução de variabilidade ocorre com o aumento no número de camadas. Mas, como nem todas as configurações calculadas podem ser aplicadas em um modelo real, deve-se filtrar os dados e analisar apenas os valores coerentes. Neste exemplo, as pilhas não poderão ter mais do que 211 camadas e optou-se por não realizar pilhas com menos de 100 camadas, pois estas necessitariam um pátio com comprimento superior a 1 km. O resultado pode ser visto na Figura 3.29.

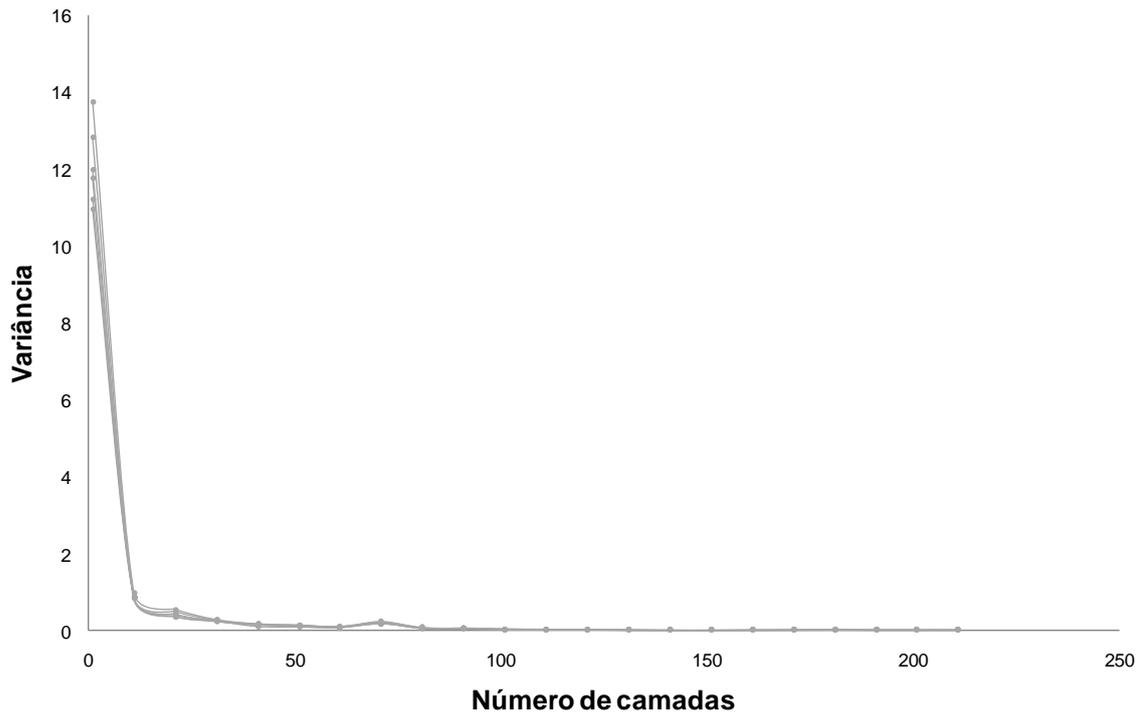


Figura 3.28 - Gráfico de redução de variabilidade com o aumento de camadas na pilha de homogeneização.

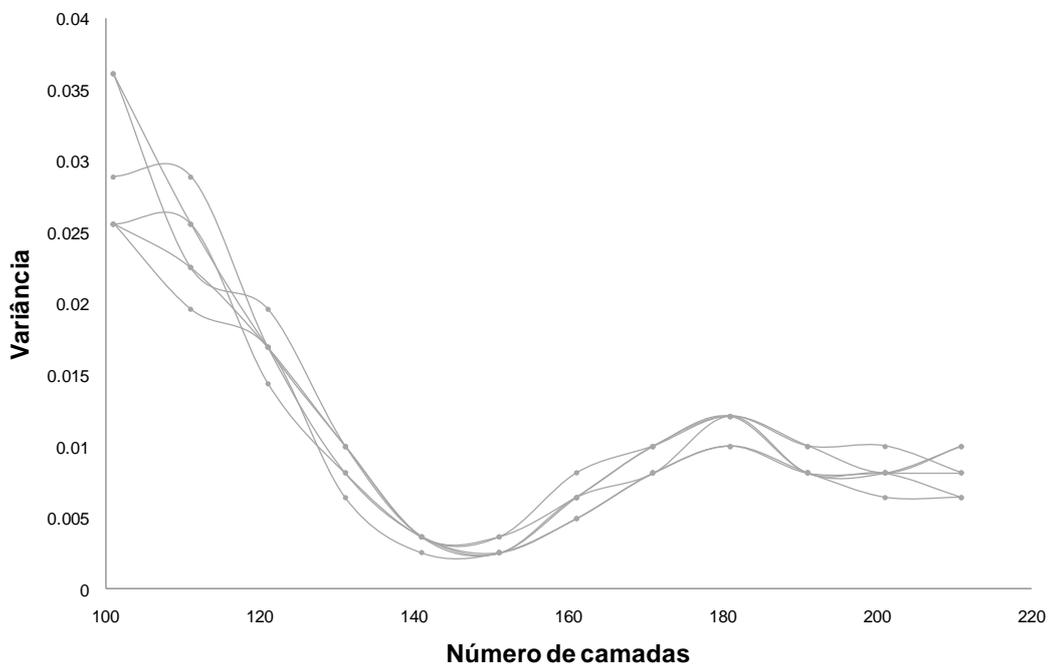


Figura 3.29 - Gráfico de redução de variabilidade para configurações de pilha com viabilidade de construção.

Com esse limites na configuração da pilha definidos, pode-se executar novamente a rotina e refinar os resultados. As flutuações deste gráfico serão analisadas no próximo capítulo.

3.5.6 Resultados apresentados pelo algoritmo

No algoritmo, todos os cálculos de variabilidade empregam a variância (σ^2), por se tratar de uma variável aditiva, mas os resultados podem ser apresentados ao usuário de diferentes maneiras.

A Figura 3.30 apresenta a janela onde deve ser feita a escolha do diretório onde serão salvos os arquivos de saída, bem como o tipo de resultado desejado.

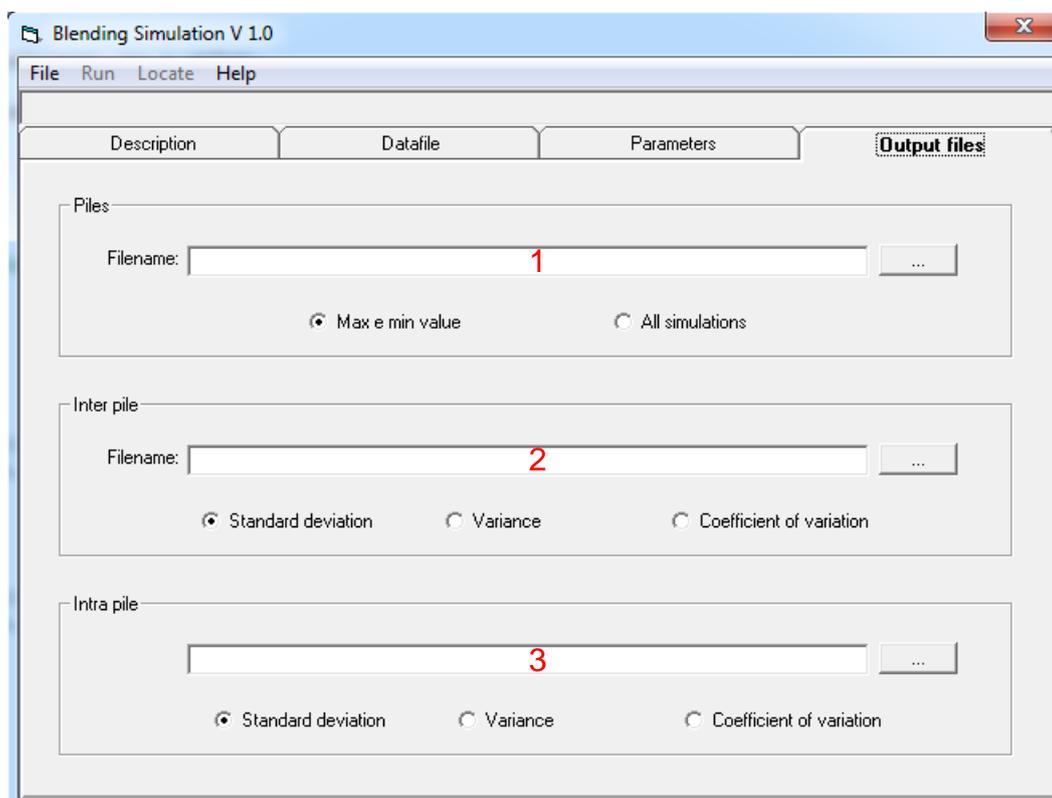


Figura 3.30 - Janela contendo as informações dos dados de saída do *BlendSim*.

O primeiro campo (1) é referente à série temporal das pilhas formadas (como mostrada na Figura 3.19). Existem duas opções nesse campo, sendo a primeira para salvar uma banda de incerteza (apenas o menor e o maior teor médio de cada pilha, obtido pela simulação serão apresentados), gerando apenas um arquivo *ascii*. Na segunda opção (*All simulations*), serão salvos todos os

teores médios, de todas as pilhas, gerando um arquivo *ascii* para cada massa de pilha analisada. Em ambos os casos, a unidade de saída é igual ao de entrada.

O segundo campo (2) é referente à análise de redução de variabilidade em função do incremento de massa. Pode-se escolher que os resultados sejam apresentados em forma de desvio padrão (SD), variância (VAR) ou coeficiente de variação (CV). O resultado pode se visto na Tabela 3.2. A opção escolhida é identificada no arquivo, na identificação da simulação (cabeçalho), pela abreviatura dentro do parêntese (exemplo - Simulation_1(Var)).

O terceiro campo (3) corresponde à análise de camadas na pilha. Esse campo apenas irá ser liberado após a execução de rotina *Inter pile*. Os princípios básicos do arquivo de saída são os mesmo do campo 2.

A rotina *Locate* encontra-se em uma janela separada (Figura 3.20), acessada pelo menu principal do programa.

3.6 Comentários finais

Este capítulo abordou a natureza da variabilidade das características dos minérios e os conceitos de homogeneidade e heterogeneidade.

Visando a homogeneização das características de um minério ROM, foram apresentadas algumas das estratégias de pilhas de homogeneização.

Foram abordadas as principais características das diferentes estratégias de homogeneização, com o objetivo de atender a necessidade de um mercado interessado na redução de custos para viabilização de novos projetos.

O Capítulo 4 aplica a metodologia em um estudo de caso de uma mineração de ferro, que procura controlar a variabilidade do teor de sílica no seu produto final.

Capítulo 4

Estratégia de homogeneização incorporando incerteza

Este capítulo apresenta os resultados dos testes do algoritmo desenvolvido para emular a variabilidade do minério em pilhas de homogeneização, utilizando modelo de blocos previamente simulados e seqüenciados.

4.1 Estudo de caso

Para realização do estudo de caso, foi tomado como base o sistema de homogeneização do complexo Vargem Grande, o qual recebe minério das minas de Capitão do Mato (CMT) e Tamanduá (TAM).

Através de dados fornecido pela Vale, foi possível resgatar as informações das diversas etapas que compõem o sistema de homogeneização no ano de 2004. Esses dados auxiliaram na determinação do volume de material que irá alimentar o algoritmo.

Para formação das pilhas de homogeneização no complexo Vargem Grande, o material proveniente das minas é transportado por um transportador de correia de longa distância (TCLD). O material transportado via TCLD é empilhado em pilhas nos pátios de homogeneização A ou B de Vargem Grande (Figura 4.1). As pilhas de homogeneização montadas são do tipo chevron e a empilhadeira é de lança fixa. Os pátios para a formação das pilhas de homogeneização têm

capacidade para uma massa de aproximadamente 200.000 t, com 300 m de comprimento e 38 m de largura.



Figura 4.1 - Pátios para formação das pilhas de homogeneização.

A retomada do minério nas pilhas de homogeneização é realizada através de uma recuperadora de duas rodas de caçamba (Figura 4.2), que descarrega o material retomado nos transportadores de correia, que por sua vez alimentam a usina de beneficiamento.



Figura 4.2 - Recuperadora de roda de caçamba.

4.1.1 Definições de lavra

Em planejamento de lavra, tradicionalmente, define-se a seqüência de lavra a partir de um modelo de blocos com teores estimados por krigagem. Dentro do seqüenciamento de lavra, existe a definição dos avanços operacionais e a determinação da seqüência de extração dos blocos. Existem ainda dois tipos de planejamento de produção, sendo eles:

- planejamento de curto prazo: necessário para o funcionamento de uma mina em operação, em escala semanal, mensal e anual;
- planejamento de longo prazo: usualmente realizado para estudos de viabilidade e financiamento. Isto subentende trabalhos de avaliação de recursos e reservas com definição de cava final, elementos determinantes no processo de tomada de decisão.

Os dados históricos de lavra da Vale, para as minas Capitão do Mato e Tamanduá, contém apenas a planejamento de curto prazo em avanços operacionais. Os únicos dados existentes sobre a seqüência de lavra realizada são as topografias da área, realizadas no início de cada mês. Superfícies geradas

com esses dados apresentam a conformação topográfica do terreno e das bancadas de frente de lavra.

Para cada mina do estudo, foram geradas 13 superfícies topográficas contendo a conformação da topografia do terreno e das bancadas no início de cada mês (janeiro de 2004 a janeiro de 2005), gerando sólidos em programa específico para essa finalidade. Cada sólido gerado corresponde a um mês de lavra no ano de 2004. A Figura 4.3 apresenta um corte vertical (exagero vertical de três vezes) sobre as topografias inicial de 2004 e inicial de 2005, na mina capitão do mato, exemplificando o procedimento realizado.

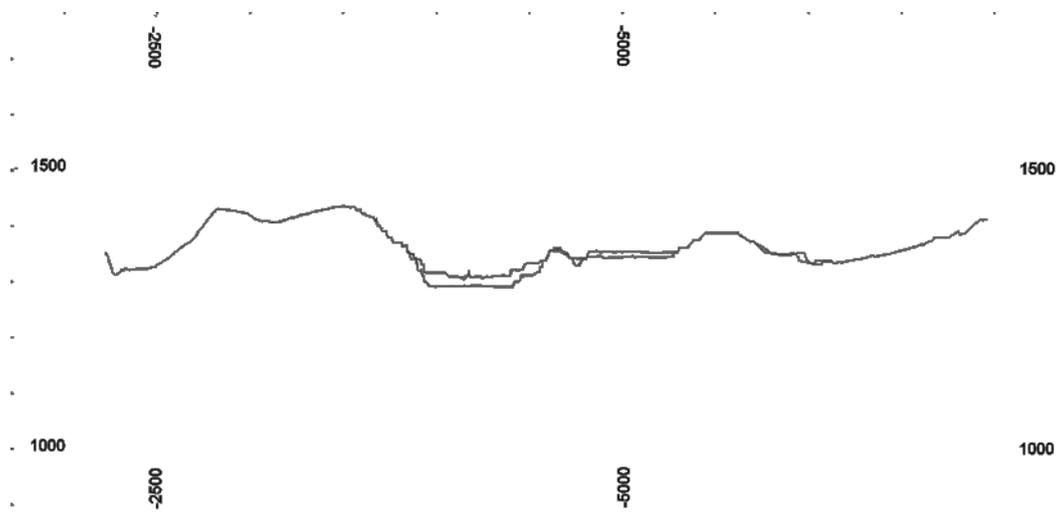


Figura 4.3 - Corte vertical (XZ) sobre as topografias inicial de 2004 e inicial de 2005, na Mina Capitão do Mato, paralelo a coordenada y = 810.

Após gerar os sólidos correspondentes a lavra, para os 12 meses de 2004, foram identificados os blocos lavrados dentro de cada mês (mas não a seqüência dos blocos durante o mês). O modelo de blocos utilizado para determinar a seqüência de lavra, tem seus teores estimados por krigagem (fornecido pela Vale), contendo também os valores estimado da densidade de cada bloco. O tamanho do bloco é de 10 m x 10 m x 10 m.

A Tabela 4.1 apresenta a massa real (amostrada pela empresa) e a estimada (obtida pela identificação dos blocos no interior do sólido gerado) para a Mina Capitão do Mato. A Tabela 4.2 apresenta os resultados para a Mina Tamanduá.

Tabela 4.1 - Produção do ano de 2004 na Mina Capitão do Mato.

Mês	Massa real (kt)	Massa estimada (kt)
Janeiro	585.4	605.5
Fevereiro	873.5	855.8
Março	1002.4	997.3
Abril	847.7	849.8
Mai	1036.5	1043.6
Junho	1040.1	1041.6
Julho	1043.9	1036.6
Agosto	1040.4	1053.3
Setembro	1030.7	1021.7
Outubro	1057.2	3542.4
Novembro	955.3	959.2
Dezembro	834.9	848.5

Tabela 4.2 - Produção do ano de 2004 na Mina Tamanduá.

Mês	Massa real (kt)	Massa estimada (kt)
Janeiro	505.9	530.9
Fevereiro	481.5	479.3
Março	788.0	771.6
Abril	722.5	735.1
Mai	1075.8	1079.7
Junho	1072.6	1077.6
Julho	999.7	994.3
Agosto	1122.3	1069.9
Setembro	1001.1	1010.4
Outubro	963.6	947.3
Novembro	861.8	866.5
Dezembro	697.5	709.2

Conhecendo os blocos que foram extraídos no ano de 2004, foi necessário identificar os correspondentes a minério. Os critérios estabelecidos para a

definição de minério são ligeiramente diferentes entre as minas. Em ambos os casos, o teor de corte de minério de ferro (Fe) é de 56%, mudando apenas as litologias de itabirito consideradas como estéril, conforma a Tabela 4.3 e a Tabela 4.4.

Tabela 4.3 - Descrição das litologias consideradas estéril na mina Capitão do Mato.

Litotipo	Descrição
ICS	Itabirito Compacto Silicoso
ICSR	Itabirito Compacto Silicoso Rico
IFS	Itabirito Friável Silicoso
IMS	Itabirito Médio Silicoso
IMSR	Itabirito Médio Silicoso Rico

Tabela 4.4 - Descrição das litologias consideradas estéril na mina Tamanduá.

Litotipo	Descrição
ICC	Itabirito Contaminadas Compacto
ICS	Itabirito Compacto Silicoso
ICSR	Itabirito Compacto Silicoso Rico
IFC	Itabirito Friável Contaminadas
IFS	Itabirito Friável Silicoso
IMC	Itabirito Médio Contaminadas
IMS	Itabirito Médio Silicoso
IMSR	Itabirito Médio Silicoso Rico

A Figura 4.4 e a Figura 4.5 apresentam a vista em planta de todos os blocos lavrados pela empresa em 2004.

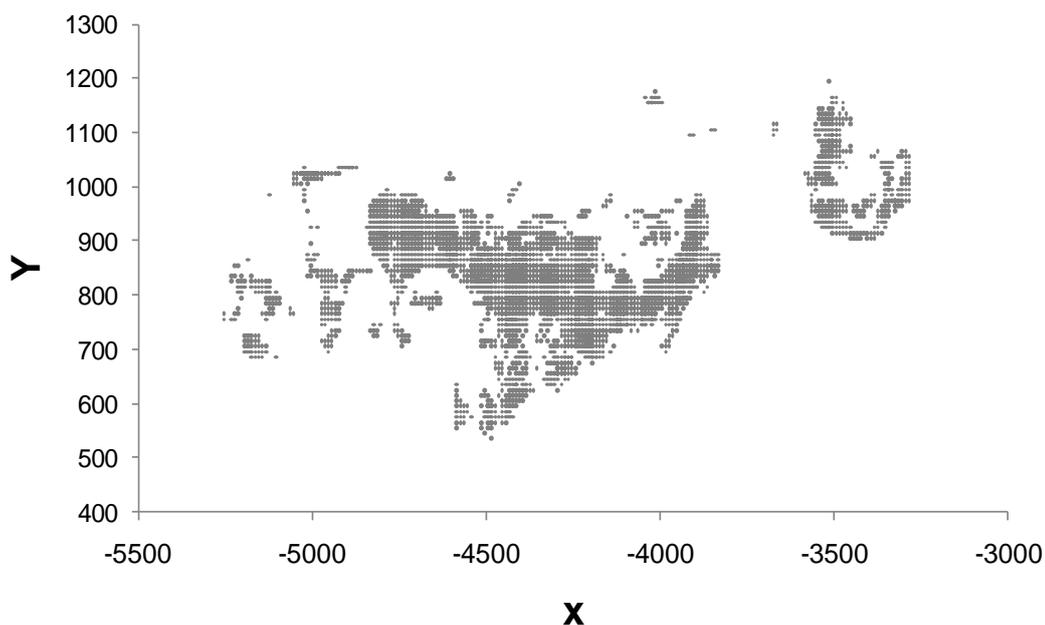


Figura 4.4 - Vista em planta dos blocos lavrados no ano de 2004 na mina Capitão do Mato.

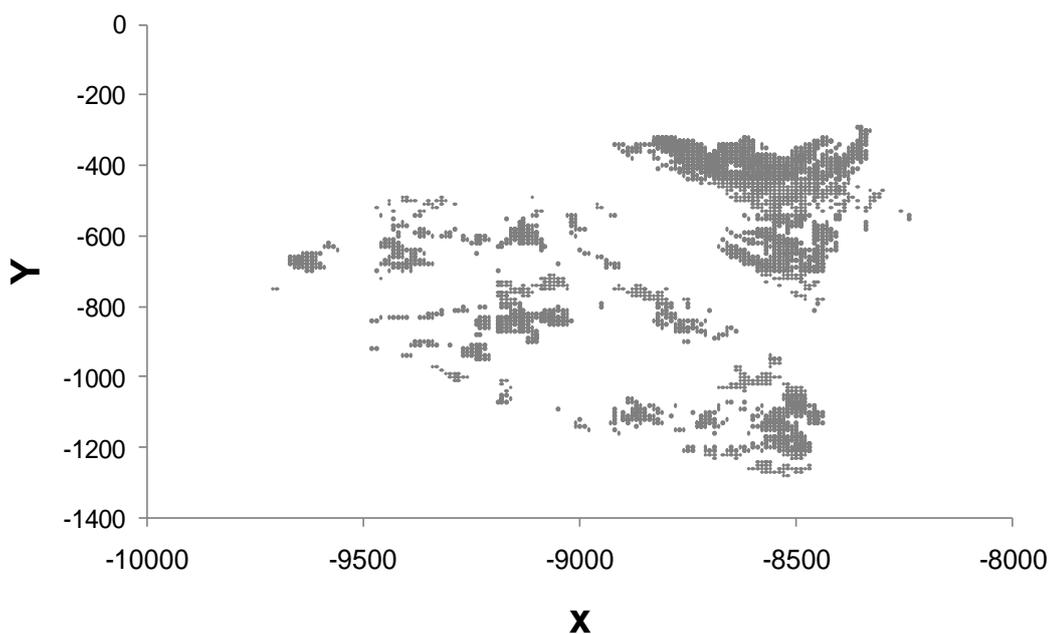


Figura 4.5 - Vista em planta dos blocos lavrados no ano de 2004 na mina Tamanduá.

A informação obtida até aqui é insuficiente para realizar um estudo de dimensionamento de pilhas de homogeneização e confrontar os resultados com realidade da operação, pois os blocos não estão seqüenciados dentro de cada mês. Para amenizar esse problema, e ter uma seqüência de lavra mais aproximada da real, foi utilizado o programa PDFSeq (Ribeiro, 2007), uma ferramenta simples e interativa, que busca os avanços de lavra de um período,

diminuindo a variabilidade do parâmetro selecionado através de um seqüenciamento por estacionarização de teores, respeitando os parâmetros físicos da lavra. A seqüência de lavra dentro de cada mês foi realizada a partir dos teores de minério de ferro, no modelo de bloco krigado.

4.1.2 Preparação dos dados simulados

Para utilização dos dados das simulações geoestatísticas, foi necessário aplicar aos modelos simulados a seqüência de lavra. A aplicação da seqüência de lavra obtida através dos procedimentos anteriormente citados, diretamente nos modelos simulados, foi possível devido à compatibilidade do suporte entre os modelos. O tamanho do bloco no modelo simulado é de 10 m x 10 m x 10 m e os vértices dos blocos são coincidentes com os do modelo krigado.

A Figura 4.6 e a Figura 4.7 mostram as séries temporais com a banda de incerteza associada a cada bloco, obtida através das simulações geoestatísticas, para as minas Capitão do Mato e Tamanduá, respectivamente. São apresentados apenas os maiores (vermelho) e menores (azul) teores de sílica para cada bloco, obtidos a partir de 50 cenários equiprováveis.

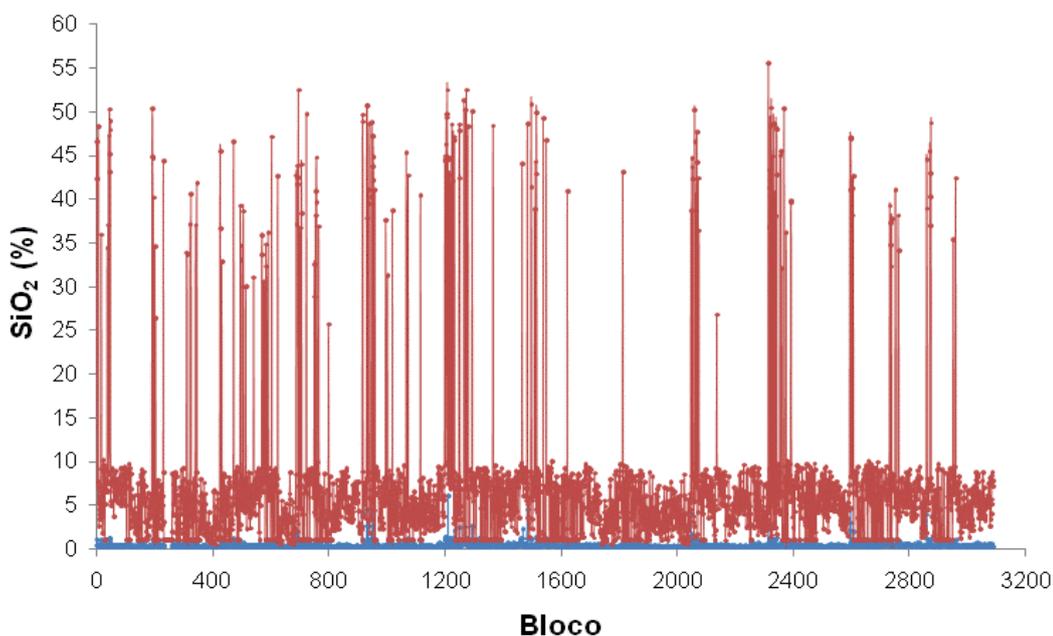


Figura 4.6 - Série temporal dos blocos seqüenciados na mina Capitão do Mato. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica, obtidos a partir de 50 cenários equiprováveis.

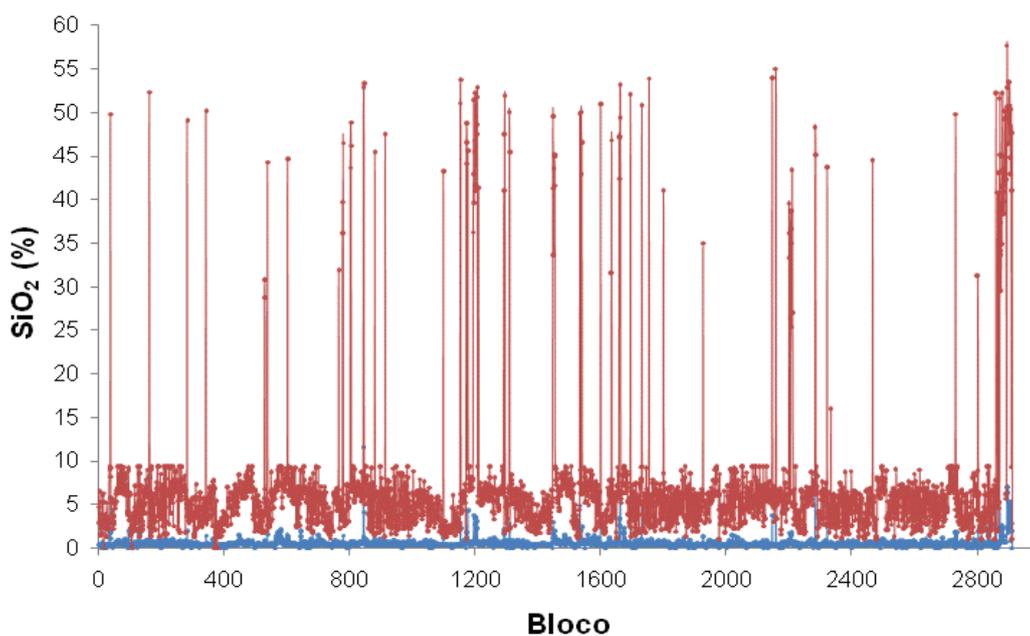


Figura 4.7 - Série temporal dos blocos seqüenciados na mina Tamanduá. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica, obtidos a partir de 50 cenários equiprováveis.

Os dados provenientes de ambas as minas foram unidos em um único arquivo, sendo este ordenado de forma crescente pelo mês de lavra (primeira coluna da Figura 4.8). Logo após, ordenou-se de forma crescente a seqüência de lavra obtida pelo PDFSeq (terceira coluna da Figura 4.8). Esse novo arranjo dos dados representa a seqüência utilizada no *BlendSim* (quarta coluna da Figura 4.8).

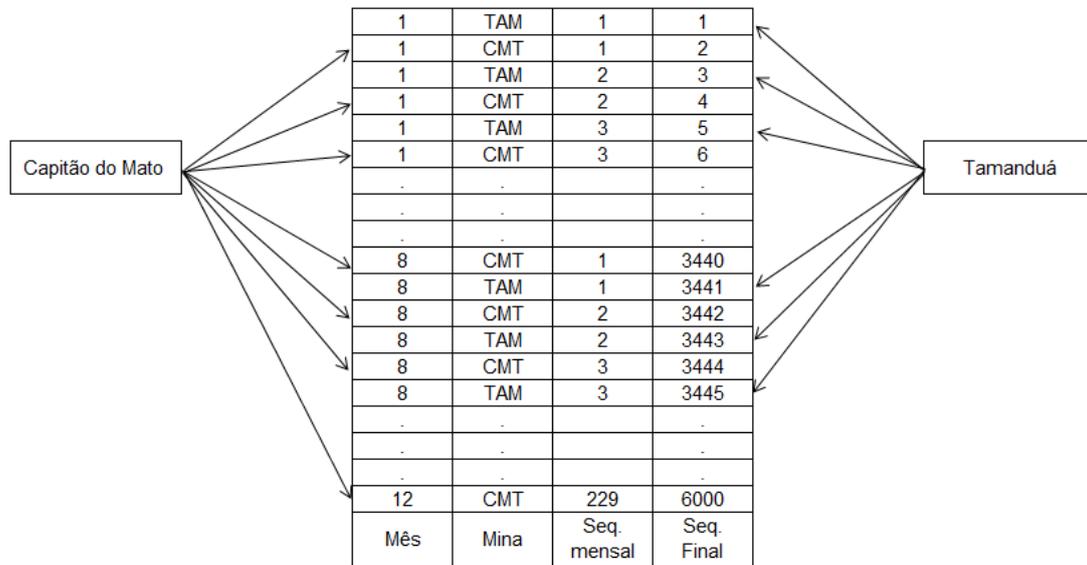


Figura 4.8 - Exemplo do seqüenciamento dos blocos com a união dos dados das minas em um único arquivo.

Esse procedimento não leva em consideração a blendagem na junção do material das duas minas, deixando para o *BlendSim* realizar essa tarefa. O resultado final pode ser visto na Figura 4.9, onde é apresentada a série temporal com a banda de incerteza dos blocos que irão alimentar as pilhas de homogeneização emuladas.

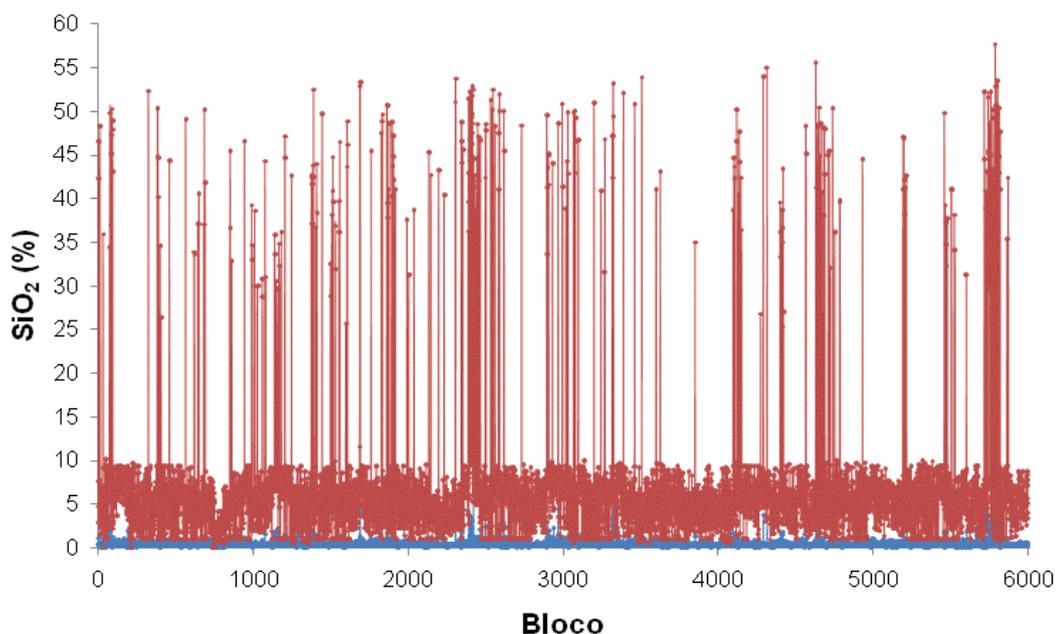


Figura 4.9 - Série temporal dos blocos seqüenciados. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica, obtidos a partir de 50 cenários equiprováveis.

4.2 Redução de variabilidade em função do aumento de massa

Através da análise da Figura 4.9, pode-se entender a necessidade do uso de pilhas de homogeneização. As flutuações de teores no material proveniente da lavra são enormes para a variável sílica (considerando o limite superior do gráfico). Alimentar a usina de beneficiamento com esse material tornaria os processos subseqüentes muito difíceis de serem controlados de forma adequada.

Para a análise de redução de variabilidade em função do incremento de massa, foram utilizados os seguintes parâmetros de cálculo:

- massa inicial de 30.000 t;
- massa final de 270.000 t;
- incremento de massa utilizado de 20.000 t.

O cálculo foi realizado utilizando 50 cenários equiprováveis do depósito (simulações geoestatísticas). A Figura 4.10 apresenta o gráfico de redução de variabilidade.

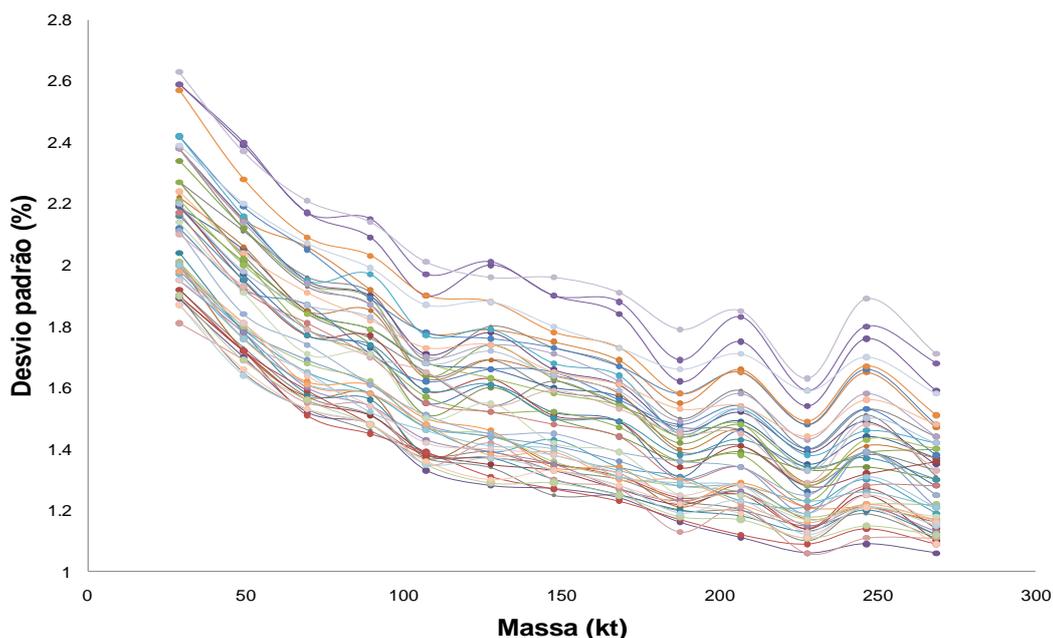


Figura 4.10 - Gráfico de redução de variabilidade em função do incremento de massa, para 50 cenários equiprováveis.

Pode-se notar pelo gráfico que há uma redução significativa de variabilidade até 210.000 t. A partir desse ponto, as curvas tendem a tornar-se assintóticas em relação ao eixo X. Desse modo, a massa de 210.000 t será o alvo de estudo da rotina *Inter pile*, sendo também esse valor o mais próximo do praticado no complexo Vargem Grande. Não será utilizado o valor de 200.000 t, pois as pilhas formadas são levemente inferiores ao valor determinado (conforme especificado no Capítulo 3).

A Tabela 4.5 apresenta a redução de variabilidade em dois cenários equiprováveis, para as pilhas de 210.000 t (obtidos através das simulações geoestatísticas), sendo os que apresentam a maior e a menor redução de variabilidade. No cenário com a menor redução de variabilidade do material, o valor obtido fica em aproximadamente 65%. O comportamento de redução de variabilidade está dentro do esperado, conforme estudos feitos a partir dos dados históricos da empresa (Marques *et al.*, 2010).

Tabela 4.5 - Resultados na redução de variabilidade no cenário com maior redução de variabilidade (26) e o de menor redução de variabilidade (49) para pilhas de 210.000 t.

Cenário equiprovável	Desvio padrão dos dados de entrada (%)	Desvio padrão das pilhas de homogeneização (%)	Redução na variabilidade (%)
26	4,56	1,12	75,5
49	4,90	1,71	65,1

Os resultados do *BlendSim* contemplam séries temporais, com a banda de incerteza, de todas as pilhas formadas (em diferentes massas). A Figura 4.11, Figura 4.12 e a Figura 4.13 apresentam a banda de incerteza para as pilhas de 70.000, 130.000 e 210.000 t, respectivamente. Pode-se perceber a redução na banda de incerteza com o aumento de massa, com a redução de valores extremos, conforme descrito no Capítulo 3.

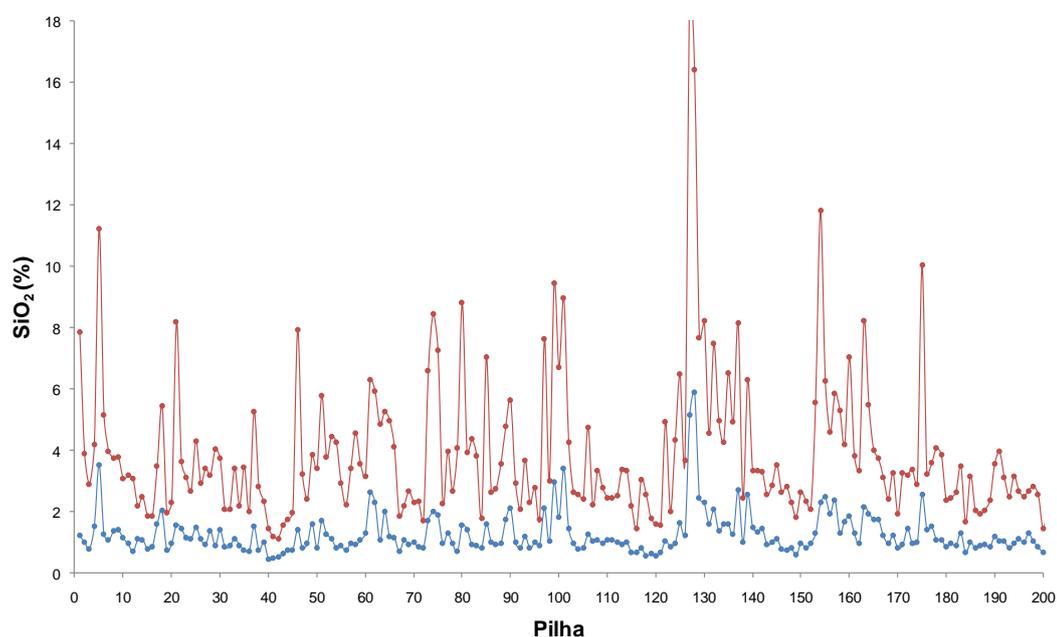


Figura 4.11 - Série temporal das pilhas de 70.000 t. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis.

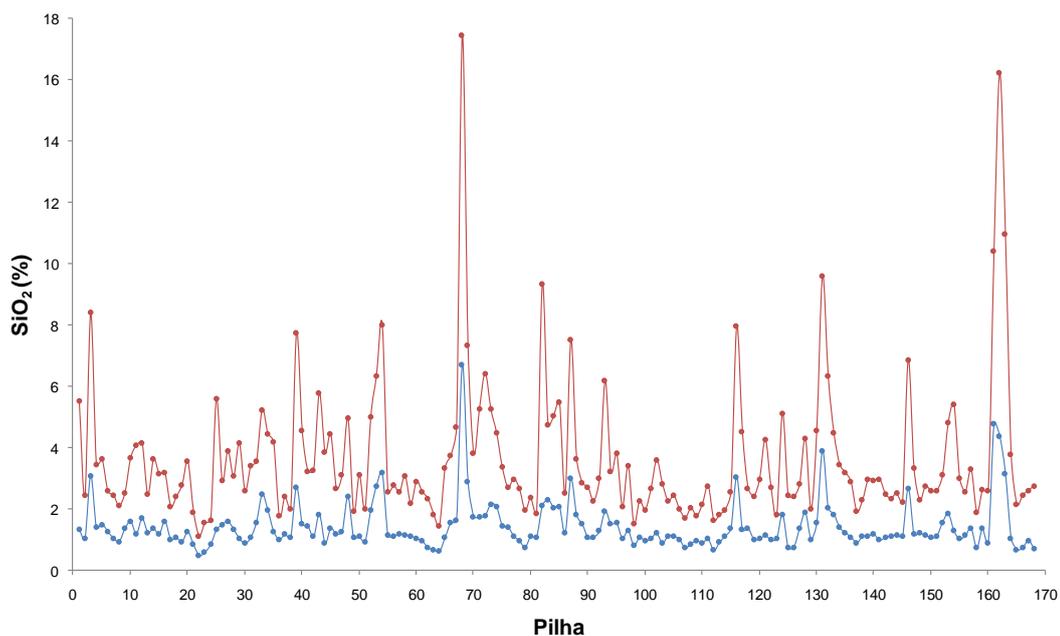


Figura 4.12 - Série temporal das pilhas de 130.000 t. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis.

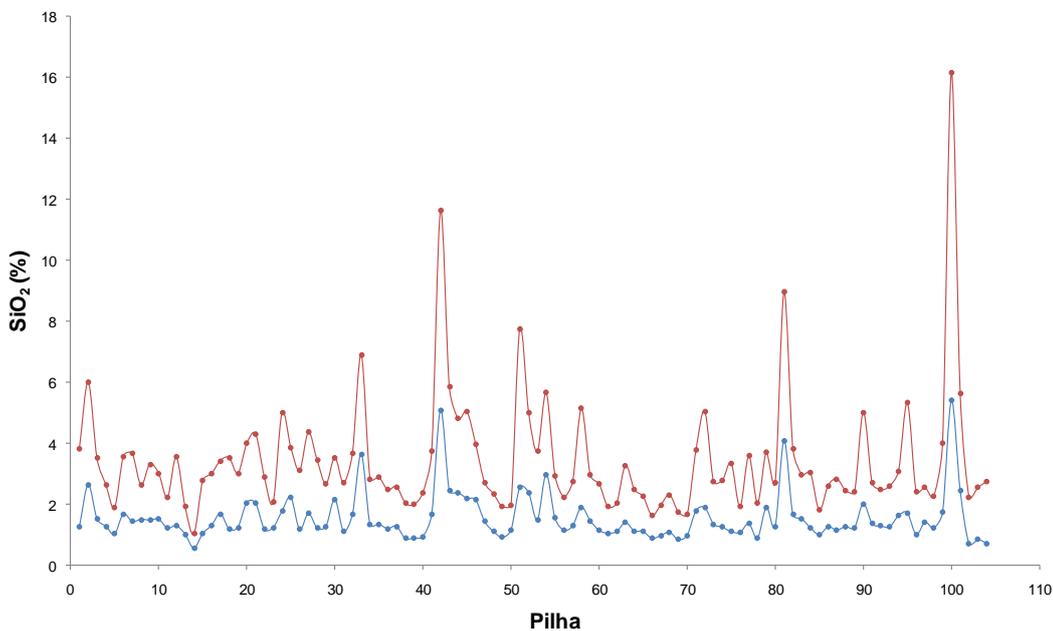


Figura 4.13 - Série temporal das pilhas de 210.000 t. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis.

4.3 Pilhas de homogeneização associadas ao planejamento de lavra

Em muitos casos na indústria mineira, lotes de minério que apresentem seus parâmetros de qualidade fora dos limites estabelecidos podem ser rejeitados

ou penalizados pelo cliente. Sendo assim, medidas devem ser tomadas para evitar o custo elevado dessas penalizações. A homogeneização do minério ROM pode ser uma solução para este problema.

A rotina *Locate* do *BlendSim* se apresenta como uma ferramenta útil na solução desse problema, pois permite mapear *in situ* os blocos formadores de pilhas que fogem às especificações determinadas. Desse modo, é possível alterar parâmetros no planejamento de lavra, tais como teor de corte, teores dos contaminantes, etc., e analisar seu impacto na planta de beneficiamento. Essa rotina funciona associada à rotina *Inter Pile*, não podendo ser executada separadamente.

Como exemplo, foi assumido que os limites da variável sílica estejam entre 0% e 5% (apenas para ilustrar o funcionamento da rotina, sendo desconsiderado na análise de variabilidade interna da pilha). Qualquer pilha que tiver sua banda de incerteza fora das especificações será identificada pela rotina, conforme pode ser visto na Tabela 4.6 (os resultados foram obtidos juntamente com a execução do exemplo anterior). A rotina informa, para cada pilha fora de especificações, o teor da pilha mais próxima dos limites estabelecidos, ou seja, se a banda de incerteza estiver acima da faixa especificada na rotina, será informado o limite inferior da mesma, caso contrário, será informado o limite superior (no caso da pilha 42, o teor de 5,088% representa o limite inferior da banda de incerteza). As coordenadas informadas são referentes ao primeiro bloco formador da pilha. Como o arquivo de entrada está ordenado de forma crescente, segundo a seqüência de lavra, é possível identificar todos os blocos que formam a pilha, na tentativa de identificar a causa do problema.

Tabela 4.6 - Resultado da rotina Locate.

Pile	Expected_mass	Real_mass	Grade	XLocate	YLocate	ZLocate	Number_of_blocs
306	30000	29597,2	9,308	-9060	-750	1360	10
307	30000	26851,55	5,995	-9030	-750	1360	8
726	30000	27033,81	6,101	-4425	855	1295	8
180	50000	49992,83	5,976	-9090	-740	1360	16
181	50000	49569,56	6,655	-9040	-740	1360	15
127	70000	67964,58	5,137	-4465	575	1295	21
128	70000	69954,59	5,88	-9050	-730	1360	21
303	70000	68138,26	5,549	-9390	-700	1330	21
99	90000	89982,31	7,096	-4475	575	1295	28
81	110000	109414,6	5,489	-9060	-740	1360	32
68	130000	126521	6,701	-4465	575	1295	39
59	150000	149820,5	5,901	-4455	575	1295	45
52	170000	168588,5	5,43	-8790	-790	1350	50
42	210000	206848,6	5,088	-4425	645	1305	61
100	210000	208654	5,393	-4415	865	1295	64
84	250000	249851,6	5,205	-4425	855	1295	77

A Figura 4.14 apresenta a série temporal das pilhas de 210.000 t, onde a área em verde representa os limites estabelecidos na rotina, e em destaque as pilhas que fogem às especificações. Em dois casos (pilhas 42 e 100), a banda de incerteza ficou completamente fora das especificações, indicando que certamente essa pilha não poderá ser usada na planta de beneficiamento. Apesar do limite superior da banda de incerteza estar acima de 5% também para outras pilhas, existe a possibilidade de que, em outros cenários dessas pilhas, elas estejam dentro dos limites estabelecidos, pois o limite inferior da banda de incerteza encontra-se dentro da faixa aceitável.

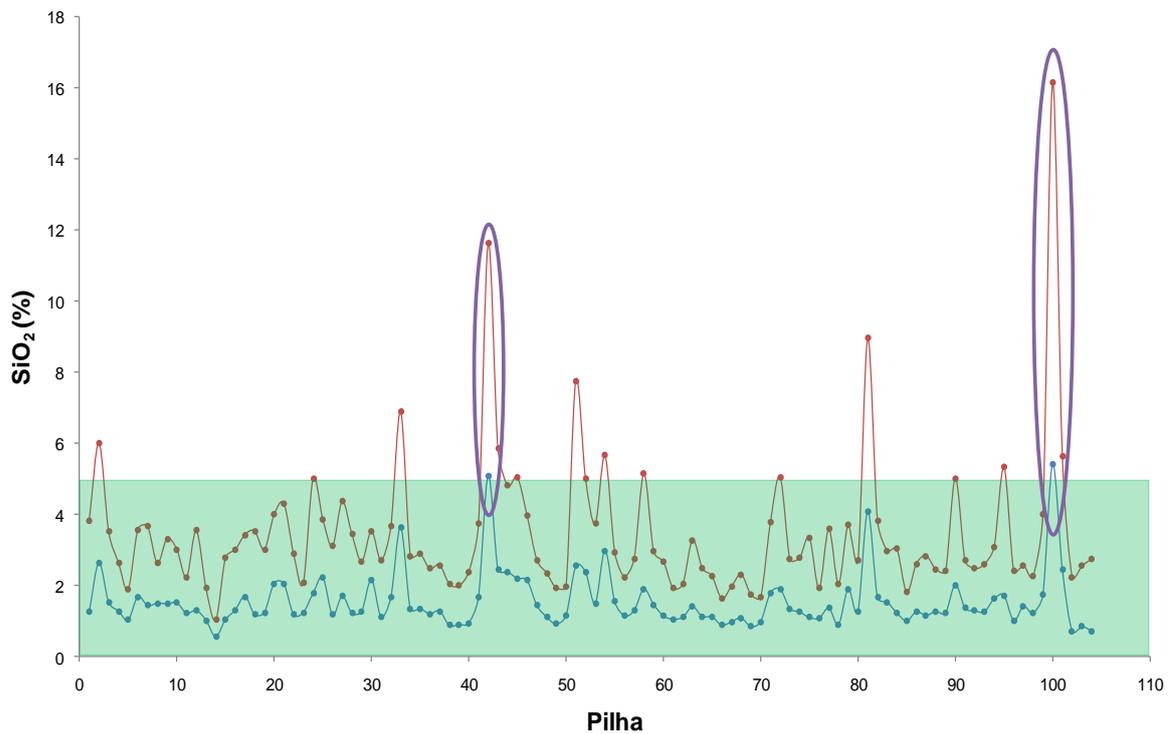


Figura 4.14 - Pilhas de 210.000 t fora das especificações. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis.

A Figura 4.15 apresenta a série temporal dos blocos formadores da pilha 42 e a Figura 4.16 os da pilha 100, ambas apresentam a banda de incerteza obtida dos 50 cenários equiprováveis.

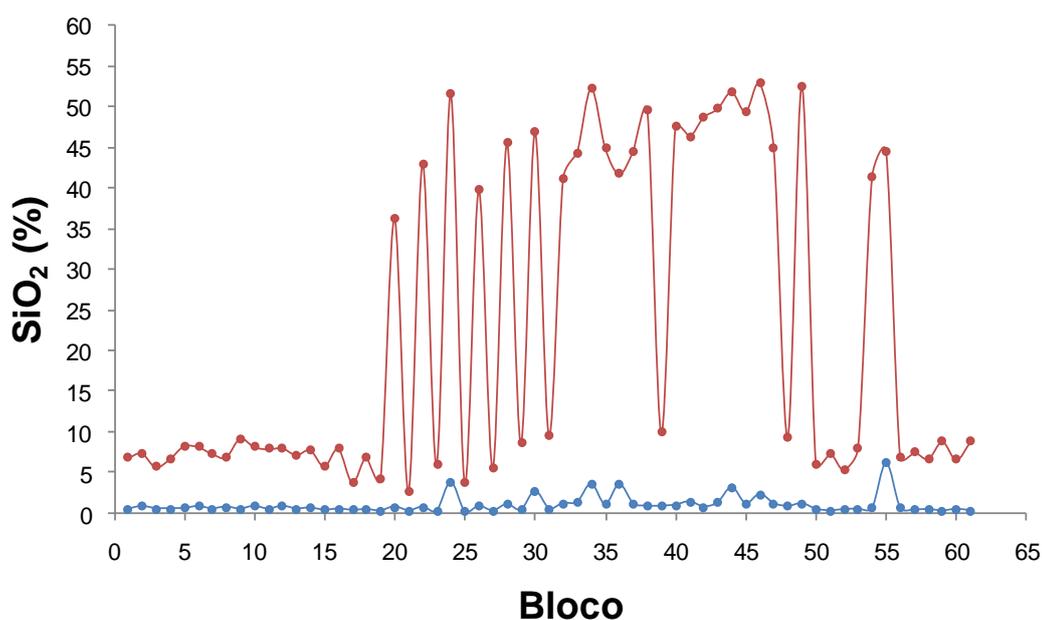


Figura 4.15 - Série temporal com a banda de incerteza dos blocos formadores da pilha 42. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis.

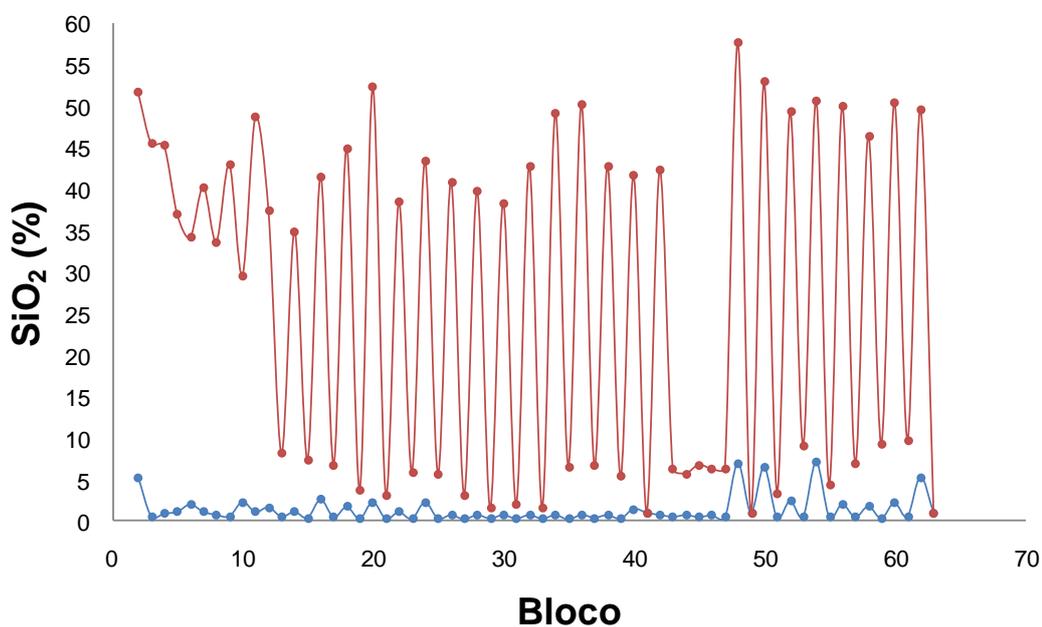


Figura 4.16 - Série temporal com a banda de incerteza dos blocos formadores da pilha 100. A linha azul representa o menor teor e o vermelho o maior teor de sílica obtido a partir dos 50 cenários equiprováveis.

A Figura 4.17 apresenta uma vista em planta da mina Capitão do Mato, onde são identificados os blocos formadores das pilhas 42 (pontos azuis) e 100 (pontos vermelhos). A Figura 4.18 apresenta uma vista em planta da mina

Tamanduá, onde são identificados os blocos formadores das pilhas 42 (pontos azuis) e 100 (pontos vermelhos).

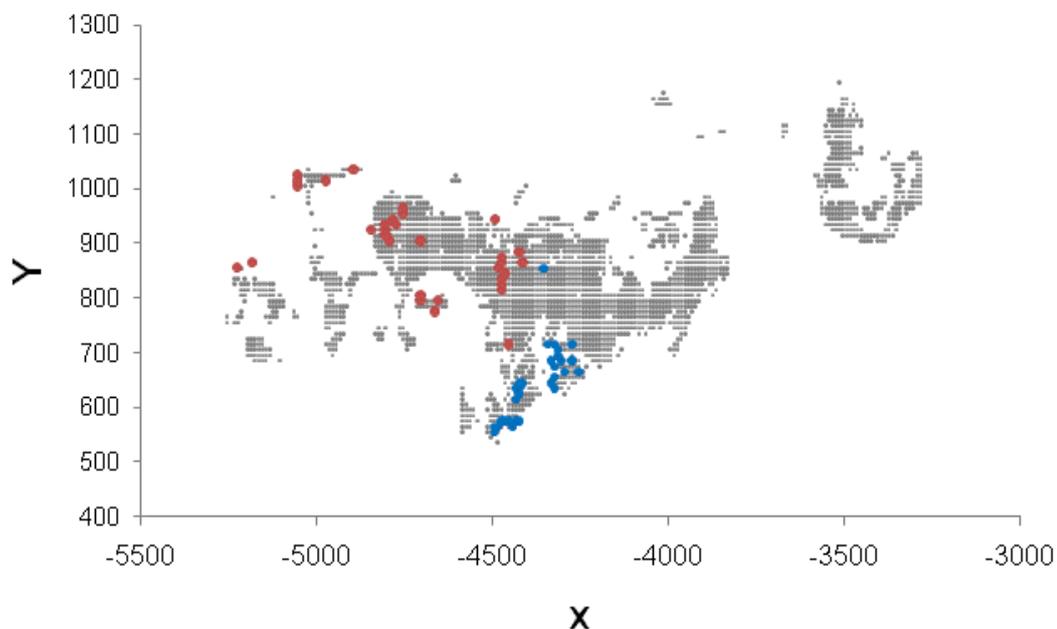


Figura 4.17 - Vista em planta da localização dos blocos no Depósito Capitão do Mato, onde os pontos cinza são os blocos lavrado em 2004, os pontos azuis são os blocos da pilha 42 e os pontos vermelhos são os blocos da pilha 100.

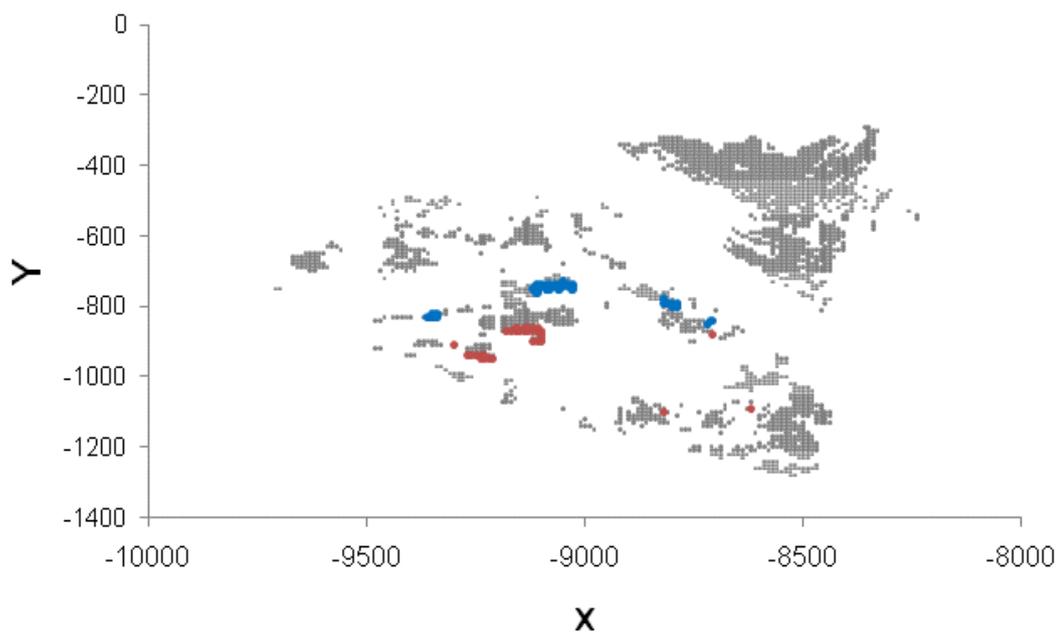


Figura 4.18 - Vista em planta da localização dos blocos no Depósito Tamanduá, onde os pontos cinza são os blocos lavrado em 2004, os pontos azuis são os blocos da pilha 42 e os pontos vermelhos são os blocos da pilha 100.

De posse da localização dos blocos que afetam a banda de incerteza das pilhas de homogeneização, cabe a área do planejamento de lavra avaliar as causas e soluções do problema. Neste estudo, optou-se por remover todos os blocos formadores das pilhas 42 e 100 e avaliar os resultados. Após a remoção dos blocos, a rotina não encontrou pilhas fora de especificação (tanto nas pilhas de 210.000 t quanto nas pilhas referentes a outras massas). A Figura 4.19 apresenta a série temporal com a banda de incerteza para pilhas de 210.000 t, após alteração nos dados (remoção dos blocos).

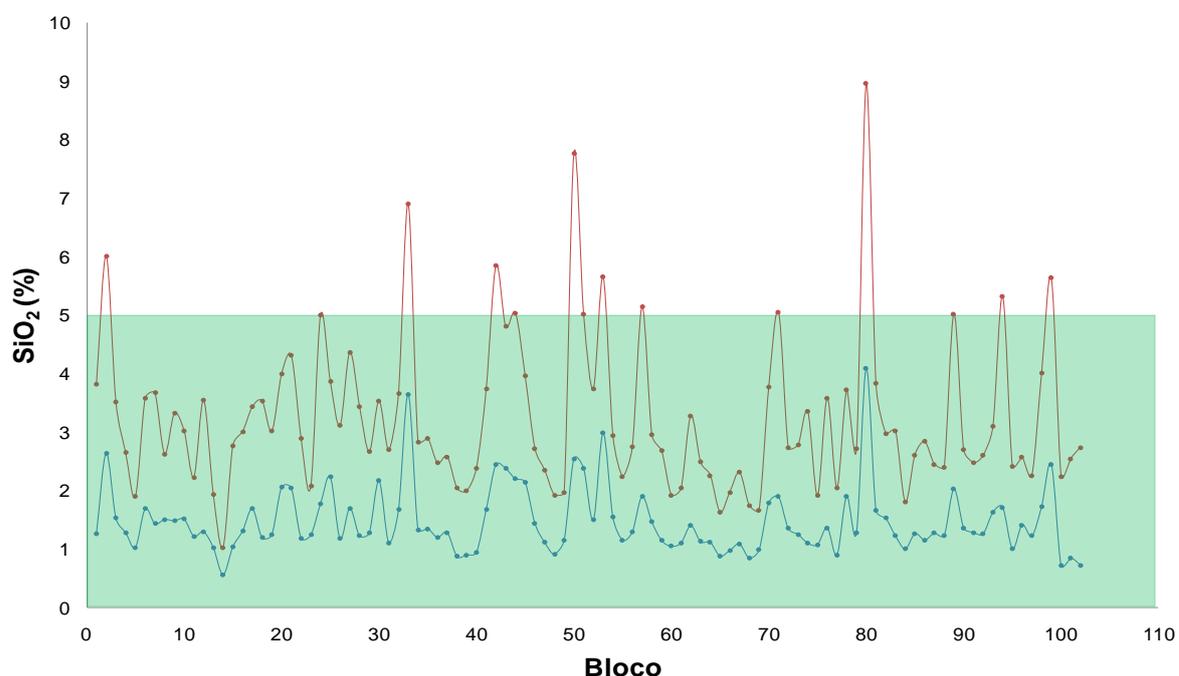


Figura 4.19 - Série temporal das pilhas de 210.000 t com o planejamento de lavra alterado (blocos formadores das pilhas 42 e 100 removidos).

4.4 Variabilidade interna da pilha

No complexo Vargem Grande, uma pilha de aproximadamente 200.000 t leva em média três dias para ser formada. Devido à velocidade da montagem, não é possível formar pilhas com um número elevado de camadas, sendo estas em torno de cinquenta. Para formar pilhas com essas características, o equipamento deve ter uma vazão de aproximadamente quatro metros cúbicos e meio a cada metro de movimento (para as dimensões do pátio desse estudo de caso).

Para a análise de variabilidade interna das pilhas de homogeneização, foram escolhidos os seguintes parâmetros:

- massa da pilha de homogeneização de 210.000 t;
- volume de material descarregado pela empilhadeira a cada metro do trajeto será de 2 e 4,5 m³ por metro;
- fator de empolamento do material 1.3;
- ângulo de repouso do material de 35°;
- largura da base da pilha de 38 m;
- número de camadas inicial do estudo igual a 1;
- incremento no número de camadas igual a 5;
- número de camadas final do estudo igual a 150.

Essa análise é feita com base na heterogeneidade de distribuição, ou seja, na forma como o material está distribuído no interior da pilha. As partes que compõe a pilha são diferentes entre si, além de serem diferentes do teor médio da pilha. Organizando os lotes que compõem a pilha em diferentes números de camadas, leva-se à redução das variações no material que irá alimentar a usina.

A Figura 4.20 apresenta os resultados de redução da variabilidade interna da pilha em função do número de camadas para vazão de 2 m³ por m de movimento da empilhadeira. Esse é um cenário que requer um tempo maior para formação da pilha e necessidade de um número grande de movimentos para o pátio com as dimensões do exemplo. A Tabela 4.7 mostra o comprimento médio que as pilhas de homogeneização apresentam para cada configuração (número de camadas).

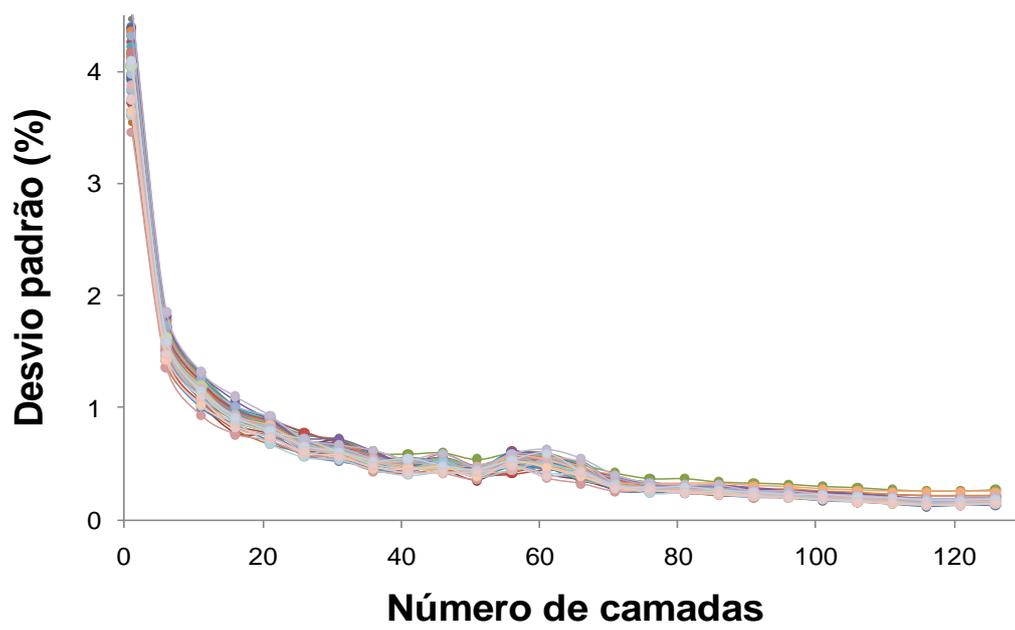


Figura 4.20 - Gráfico de redução de variabilidade em função do número de camadas para pilhas geradas com vazão do material de 2 m³/m.

Tabela 4.7 - Comprimento médio das pilhas de homogeneização para diferentes números de camadas (vazão de 2 m³/m).

Número de camadas	Comprimento médio das pilhas (m)
1	38317,5
6	6385,9
11	3483
16	2394,3
21	1824,4
26	1473,8
31	1235,9
36	1064,1
41	934,1
46	832,4
51	750,7
56	683,8
61	627,8
66	580,2
71	539,2
76	503,7
81	472,6
86	445
91	420,7
96	398,6
101	378,9
106	360,9
111	344,7
116	329,9
121	316,1
126	303,7

Apesar de ter sido solicitado na rotina, o cálculo de até 150 camadas, foi possível emular pilhas de até 126 camadas que respeitassem a configuração geométrica possível para a pilha (dados os equipamentos disponíveis).

A Figura 4.21 apresenta os resultados de redução da variabilidade interna da pilha em função do número de camadas para vazão de $4,5 \text{ m}^3$ por metro de movimento da empilhadeira. Este cenário é o que mais se assemelha às pilhas do complexo Vargem Grande. Note que aumentando a vazão do material, teremos o mesmo comportamento no gráfico (pois se trata do mesmo pátio e geometria de pilha), porém tem-se um menor número de camadas que respeitam as configurações impostas pela geometria da pilha, conforme pode ser vista na Tabela 4.8.

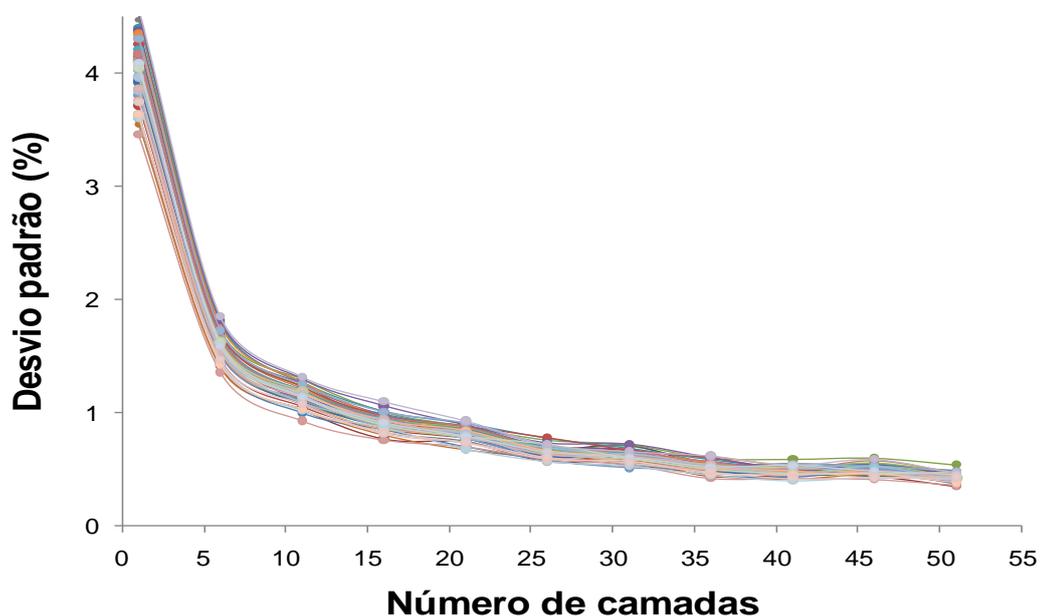


Figura 4.21 - Gráfico de redução de variabilidade em função do número de camadas para pilhas geradas com vazão do material de $4,5 \text{ m}^3/\text{m}$.

Tabela 4.8 - Comprimento médio das pilhas de homogeneização para diferentes números de camadas (vazão do material de 4,5 m³/m).

Número de camadas	Comprimento médio das pilhas (m)
1	17029,6
6	2837,8
11	1547,7
16	1064,1
21	810,4
26	654,5
31	548,8
36	472,6
41	414,7
46	369,7
51	333,4

A partir de 35 camadas o ganho em redução de variabilidade não foi significativo, mas o comprimento da pilha foi reduzido consideravelmente. Sendo assim, poderia ser usado um equipamento com vazão maior, na tentativa de obter pilhas com aproximadamente 35 camadas e um comprimento adequado as dimensões de pátio especificado.

A Figura 4.22 apresenta um trecho do gráfico de primeiro cenário com descarga de 2 m³/m, onde foi realizado um refinamento do mesmo (análise de 35 a 63 camadas, com incremento de 1 camada), nele pode-se contemplar melhor as flutuações que ocorrem na redução de variabilidade com o aumento do número de camadas nas pilhas. Essas flutuações ocorrem devido a uma proximidade das pilhas emuladas com o sistema de homogeneização chamado de *bed blending*. Neste sistema, cada fatia retomada inclui as mesmas proporções do material, ou seja, apresentam as mesmas camadas em sua composição. Quando o número de camadas for igual ao número de lotes em sua formação, ocorrerá uma redução significativa da variabilidade nesse ponto (teoricamente deveria ser zero). Poderá também ocorrer flutuações no gráfico (em menor escala) quando o número de camadas for múltiplo do número de lotes em sua formação.

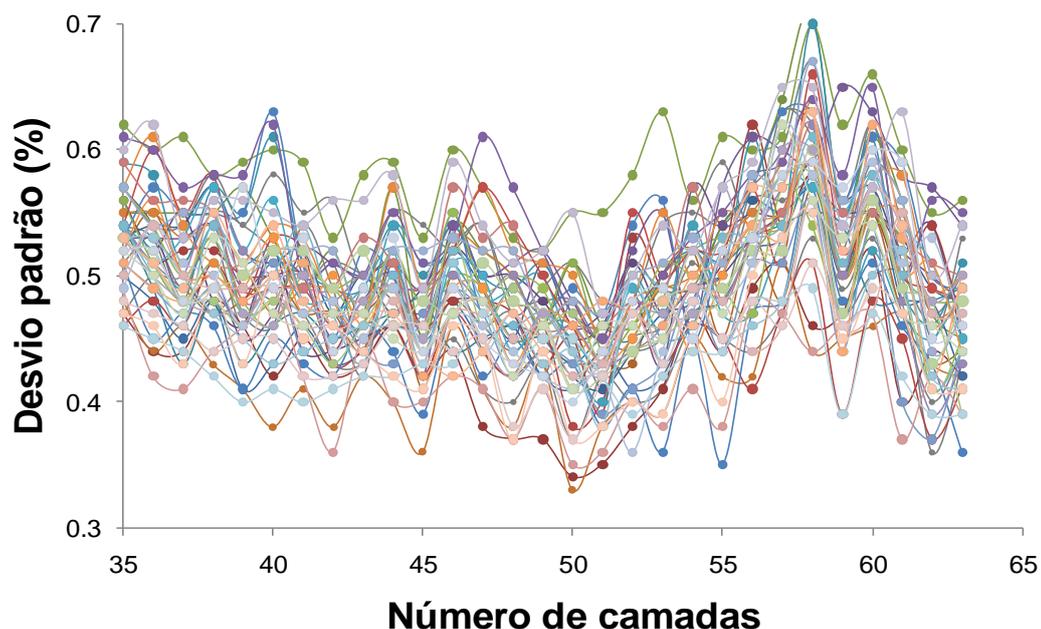


Figura 4.22 - Gráfico de redução de variabilidade em função do número de camadas para pilhas geradas com vazão do material de $2 \text{ m}^3/\text{m}$, entre as camadas 35 e 65.

4.5 Comentários finais

O presente capítulo abordou a utilização de modelos gerados por simulação geoestatística como forma de melhoria na estratégia de homogeneização em pilhas longitudinais, mostrando não só a necessidade de dimensionar a massa a ser utilizada na pilha, mas também a forma com esta será montada.

Também, foi possível verificar o uso das pilhas de homogeneização como uma ferramenta auxiliar no planejamento de lavra, permitindo prever o risco das mesmas estarem fora dos limites especificados.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões sobre os objetivos traçados para esta dissertação, além de algumas recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 5

Conclusões e Recomendações

Neste capítulo é apresentado o conjunto de conclusões obtidas sobre a metodologia e sua aplicabilidade. Também são apresentadas algumas recomendações de trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

A utilização de modelos equiprováveis do depósito permite que a estratégia de homogeneização por pilhas incorpore as possíveis flutuações apresentadas por determinada variável no depósito. A maior vantagem de incorporar essas flutuações a uma pilha de homogeneização será o conhecimento da faixa de variação do teor médio da mesma (banda de incerteza), possibilitando uma margem maior de negociação de contratos entre o produtor e o consumidor em relação às características de qualidade.

As pilhas de homogeneização se destacam pela flexibilidade de manipulação das características do material de alimentação. No entanto, como os custos de sua implementação são elevados, é necessário procurar as dimensões de pilha que oferece uma boa redução de variabilidade, tendo o menor custo de implementação.

A operação de um sistema de homogeneização traz diferentes ganhos na redução da variabilidade, dependendo do modo como é utilizado. Devem ser escolhidos os parâmetros de formação da pilha (tamanho e número de camadas),

que satisfaçam as exigências de variabilidade máximas admitidas requeridas nas próximas etapas do processo.

O uso de um algoritmo criado para prever a variabilidade do minério nas pilhas de homogeneização reflete em seus resultados a incerteza associada ao fenômeno (mineralização). Para se obter resultados confiáveis, deve-se garantir a boa execução dos procedimentos da simulação geoestatística.

A maior redução de variabilidade em um sistema de homogeneização acontece com o aumento de massa (relação volume-variância). Entretanto, o número de camadas deve ser cuidadosamente analisado na formação de uma pilha de homogeneização, pois uma pilha que tenha massa elevada, mas não for montada corretamente, não trará a redução de variabilidade esperada.

O efeito da homogeneização será melhor obtido quanto maior for o número de camadas da pilha, porém esta metodologia demonstra que a partir de determinado número de camadas, a redução de variabilidade é praticamente nula.

5.2 Recomendações

O algoritmo teve seus resultados validados a partir de modelos numéricos, em diversos cenários hipotéticos, em sua fase de desenvolvimento. No estudo de caso, seus resultados foram coerentes e dentro do esperado. Entretanto, não foi possível realizar uma reconciliação com os dados reais do complexo Vargem Grande, devido à baixa densidade de dados referentes às pilhas de homogeneização e à inexistência da seqüência de lavra bloco a bloco. Recomenda-se a aplicação da metodologia em um caso real, o qual disponha de abundância de informações referentes à lavra e a pilhas de homogeneização, confrontando os dados reais com a banda de incerteza obtida a partir das simulações.

Como o algoritmo permite realizar diversas variações em seus parâmetros, simulando diversos tipos de configurações, seria interessante a realização de um estudo com base econômica, analisando a relação entre largura da base e comprimento da pilhas e seu impacto nos custos de implementação. Um exemplo dessas relações pode ser visto em Ferreira (1989).

Uma avaliação do impacto na alteração dos parâmetros de lavra sobre as pilhas de homogeneização poderia ser realizada com o auxílio das rotinas presentes no algoritmo.

O algoritmo contempla apenas pilhas de homogeneização do tipo longitudinal. Entretanto, existem outros tipos de pilhas de homogeneização (tal como pilhas circulares), os quais poderiam ser implementados no *BlendSim*.

Referências Bibliográficas

FLSmidth (s. d.). FLSmidth - Circular Blending System. <<http://www.flsmidth.com/en-US/Products/Product+Index/All+Products/Storage/Circular+Blending+Store+System/CBS++Circular+Blending+System>>. Acessado em 13/04/2010.

FLSmidth (s. d.). FLSmidth - Longitudinal Bridge Scraper Store. <<http://www.flsmidth.com/en-US/Products/Product+Index/All+Products/Storage/Longitudinal+Bridge+Scraper+Store/BS++Longitudinal+Bridge+Scraper+Store>>. Acessado em 13/04/2010.

BLACKWELL, G.H. & ANDERSON H.M. & RONSON K. 1999. *Simulated grades and open pit mine planning - resolving opposed positions*. Proceedings, 28th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries, Colorado, U.S.A., p. 205-215.

BLACKWELL, G.H. & SINCLAIR, A.J. 2002. *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge University Press, Cambridge, 381p.

BLEINES, C. & DERAISME, J. & GEFFROY, F. & PERSEVAL, S. & RAMBERT, F. & RENARD, D. & TOUFFAIT, Y. 2001. *ISATIS software manual*. Geovariances and École des Mines de Paris, 531p.

BONATO, F.S. & COSTA, J.F.C.L. & KOPPE, J.C. 2000. *Planejamento de Lavra Baseado na Variabilidade de Atributos Geológicos*. REM - Revista Escola de Minas, Vol. 53, Nº 4, p. 275-284.

- BONATO, F.S. 2000. *Planejamento de Lavra com Auxílio de Simulação Geoestatística*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 87p.
- CHILÈS, J.P. 1984. *Simulation of a Nickel Deposit: Problems Encountered and Practical Solutions*. In: Verly, G., David, M., Journel, A. and Marechal, A. (Eds.) *Geostatistics for Natural Resources Characterization*. Reidel Publishing Company, Dordrecht, p. 1015-1030.
- CHILÈS, J.P. & DELFINER, P. 1999. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. John Wiley & Sons Ltd., New York, 695p.
- CLARK, I. & WHITE, B. 1976. *Geostatistical Modelling of An Orebody as An Aid to Mine Planning*. Proceedings, 14th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries, Colorado, U.S.A., p 1004-1012.
- CLARK, I. 1979. *Practical Geostatistics*. Applied Science Publishers Ltd., London, 129p.
- COSTA, J.F.C.L. 1997. *Developments in Recoverable Reserves and Ore Body Modeling*. PhD Thesis, WH Bryan Mining Geology Research Centre, The University of Queensland, 333p.
- DAGBERT, M. 1981. *The Simulation of Space-Dependent Data in Geology*. In: Craig, R.G.; Labovitz, M. L. (Eds.) *Future Trends in Geomathematics*. Pion Limited, London, p. 29-47.
- DAVID, M. 1973. *Tools for Planning: Variances and Conditional Simulations*. Proceedings, Proceedings, 11th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries, Arizona, U.S.A., p. D10-D23.

- DAVID, M. & DOWD, P. & KOROBOV, S. 1974. *Forecasting Departure from Planning in Open Pit Design and Grade Control*. Proceedings, 12th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries, Colorado, U.S.A., p. F131-F153.
- DAVID, M. 1977. *Geostatistical Ore Reserve Estimation. Developments in Geomathematics 2*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 364p.
- DAVID, M. 1988. *Handbook of Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation. Developments in Geomathematics 6*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 216p.
- DERAISME, J., DE FOUQUET, C. & FRAISSE, H. 1984. *Geostatistical Orebody Model for Computer Optimization of Profits from Different Underground Mining Methods*. Proceedings, 18th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries, London, p 583-590.
- DEUTSCH, C.V. & JOURNEL, A.G. 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, 2^a Edição, 369p.
- FERREIRA, F.M. & CHAVES, A.P. & DELBONI, H. 1992. *Conditional Simulation Method for Design of Blending Piles*. Proceedings, 23th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries, Phoenix, U.S.A., p. 615-623
- FERREIRA, F.M. 1989. *Otimização do Projeto de Pátios de Homogeneização Através do Método da Simulação Condicional*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 114p.
- GAMBIN, F. 2003. *Aperfeiçoamento da Estratégia de Homogeneização de Minérios Utilizando Simulação Geoestatística*. Dissertação de Mestrado.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 96p.

GAMBIN, F. & COSTA, J.F.C.L. & KOPPE, J.C. 2005. *Estratégia de controle de qualidade de minério na lavra usando simulação geoestatística*. REM - Revista Escola de Minas, Vol. 58, Nº 4, p. 193-200.

GERSTEL, A.W. & WERNER, J.W. 1996. *Computer Simulation Program for Blending Piles*. Bulk Solids Handling, Vol. 16, Nº 1, p. 49-58.

GOOVAERTS, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 483p.

GY, P.M. 1998. *Sampling for Analytical Purposes*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 153p.

HUSTRULID, W. & KUCHTA, M. 1995. *Open Pit Mine Planning & Design Fundamentals*. A. A. Balkema, Rotterdam, Vol. 1, 636p.

ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, M.R. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561p.

JOURNEL, A.G. 1974. *Geostatistics for Conditional Simulation of Ore Bodies*. Economic Geology, Vol. 69, Nº 5, p. 673-687.

JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, C.J. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, 600p.

MARQUES, D.M. & COSTA, J.F.C.L. & RIBEIRO, D.T. & STANGLER, R.L. & CASTRO, E.B. & KOPPE, J.C. 2010. *A comprovação da relação volume x variância na homogeneização da sílica em minério de ferro*. REM - Revista Escola de Minas, Vol. 63, Nº 2, p. 355-361.

- MATHERON, G. 1963. *Principles of Geostatistics*. Economic Geology, N° 58, p. 1246-1266.
- MATHERON, G. 1973. *The Intrinsic Random Functions and Their Applications*. Advances in Applied Probability, N° 5, p. 439-468.
- MATHERON, G. 1982. *La d'Estructuration des Hautes Teneurs et le Krigeage des Indicatrices*. Internal report N-761, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, 33p.
- MYERS, J.C. 1996. *Geostatistical Error Management: Quantifying Uncertainty For Enviromental Sampling And Mapping*. Van Nostrand Reinhold, New York, 545p.
- NOWAK, M.S., SRIVASTAVA, R.M., SINCLAIR, A.J. 1993. *Conditional simulation, a mine planning tool for a small gold deposit*. Proceeding, Geostatistics Troia'92, Tróia, Portugal, p. 977-987.
- PILGER, G.G. 2000. *Critérios para Locação Amostral Baseados em Simulação Estocástica*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 127p.
- PITARD, F.F. 1993. *Pierre Gy's Sampling Theory and Sampling Practice. Heterogeneity, Sampling Correctness, and Statistical Process Control*. CRC Press, Boca Raton, 2ª Edição, 488p.
- PARKER, H. 1979. *The Volume Variance Relationship: A Useful Tool for Mine Planning*. Engineering and Mining Journal, Vol. 180, p. 106-123.
- RAVENS-CROFT, P.J. 1992. *Risk analysis for mine scheduling by conditional simulation*. Institution of Mining and Metallurgy, Vol. 101, p. A104-A108.

- RIBEIRO, D.T. 2007. *PDFseq: Mine Scheduling Simulation Based on Block Probability Distribution Function: An Iron Ore Application*. Proceedings, 33th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries, Santiago, Chile, p. 369-374.
- ROSSI, M.E. 1999. Uncertainty and Risk Models for Decision-Making Processes. Proceedings, 28th International Symposium on Computer Applications in the Mineral Industries, Colorado, U.S.A, p. 185-195.
- SCHOFIELD, C.G. 1980. Homogenisation/Blending Systems Design and Control for Minerals Processing. TransTech Publications, Germany, 236p.
- SOUZA, L.E. 2002. *Estimativa de Incertezas e suas Aplicações na Classificação de Recursos Minerais*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 170p.
- SOUZA, L.E. & COSTA, J.F.C.L. & KOPPE, J.C. 2004. *Uncertainty Estimate in Resources Assessment: A Geostatistical Contribution*. Natural Resources Research, Vol. 13, p. 1-5.
- SOUZA, L.E. 2007. *Proposição Geoestatística Para Quantificação do Erro em Estimativas de Tonelagens e Teores*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 193p.
- VALENTE, J.M.G.P. 1982. *Geomatemática – Lições de Geoestatística*. Fundação Gorceix, Ouro Preto, Vol. 6, 323p.

Apêndice A

CD de distribuição do *software* desenvolvido

O presente apêndice disponibiliza para testes o conjunto de rotinas implementadas no software *BlendSim*, apresentadas ao longo da realização desta dissertação. O *BlendSim* não é um produto comercial e não fornece qualquer tipo de garantia, suporte ou manutenção. Foi realizada uma série de testes na utilização do *software*, mas falhas poderão ocorrer, devido às muitas combinações possíveis de dados e parâmetros de entrada. Sendo assim, o autor não se responsabiliza pelo seu emprego ou pelos resultados obtidos por seu intermédio.