

UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS: ÁREA DE
ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS

O PROBLEMA DA ESTIMATIVA DE RECURSOS MINERAIS NO ESTUDO DA EXEQÜIBILIDADE DE LAVRA

MIGUEL ANTONIO CEDRAZ NERY

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

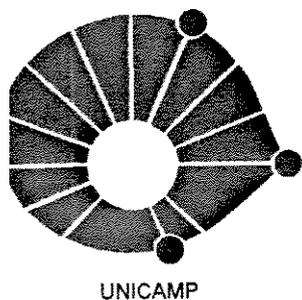
Esta dissertação corresponde à a
redação final da dissertação defendida
por MIGUEL A. C. NERY
e coorientada por Amanda Roman
em 31.8.95

Amanda Roman
ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO
AGOSTO - 1995

N359p

25783/BC



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS: ÁREA DE
ADMINISTRAÇÃO POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS**

O PROBLEMA DA ESTIMATIVA DE RECURSOS MINERAIS NO ESTUDO DA EXEQÜIBILIDADE DE LAVRA

Miguel Antonio Cedraz Nery

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como requisito parcial visando a obtenção do título de Mestre em Geociências - Área de Administração e Política de Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre - AGP - IG/UNICAMP

**CAMPINAS - SÃO PAULO
AGOSTO - 1995**

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/Unicamp
	N 359 p
V.	E.
T. 000 BC/	25783
PROG.	433/95
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	30/09/95
N.º CPDC.m.	000.767.85-7

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA I.G. - UNICAMP

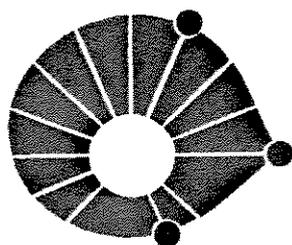
N359p Nery, Miguel Antonio Cedraz
O problema da estimativa de recursos minerais no estudo da exequibilidade de lavra / Miguel Antonio Cedraz Nery.- Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientador: Armando Zaupa Remacre
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências.

1. Jazidas. 2. Recursos Minerais (Reservas) 3. Pesquisa Mineral. 4. Projetos avaliação. I. Remacre, Armando Zaupa. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências.

UNIVERSIDADE DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



UNICAMP

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS: ÁREA DE
ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: O PROBLEMA DA ESTIMATIVA DE
RECURSOS MINERAIS NO ESTUDO DA EXEQÜIBILIDADE DE
LAVRA

AUTOR: MIGUEL ANTONIO CEDRAZ NERY

ORIENTADOR: Prof. Dr. ARMANDO ZAUPA REMACRE

COMISSÃO EXAMINADORA

PRESIDENTE:

Armando Zaupa Remacre
Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre

EXAMINADORES: *Iran F. Machado*
Prof. Dr. Iran F. Machado - IG / UNICAMP

Wilson Trigueiro de Sousa
Prof. Dr. Wilson Trigueiro de Sousa - EM / UFOP

CAMPINAS, 31 DE AGOSTO DE 1995

ERRATA

Pg. ix: LISTA DE FIGURAS - 8: Onde constar "acetáveis" leia-se "aceitáveis".

Pg. 1: Onde constar "...necessidade de quantificação da massa..." leia-se "... necessidade de quantificação e qualificação da massa...".

Onde constar "... um processo de avaliação permita o seu aproveitamento..." leia-se "...um processo de avaliação comprove o seu aproveitamento...".

Pg. 11: Onde constar "... medida de confiabilidade..." leia-se "...medida de confiabilidade...".

Pg. 12: Onde constar "...remunerar o capital..." leia-se "... remunerar o capital...".

Pg.15: Onde constar "...uma relação e mineração limite..." leia-se "...uma relação de mineração limite...".

Pg. 20: Onde constar "...a legislação minerária brasileira..." leia-se "...o Regulamento do Código de Mineração no Brasil...".

Pg. 28: Onde constar "... U.S. Secities Exchange Comission..." leia-se "... U.S. Securities Exachange Commission...".

Pg. 31: Onde constar "...(Froidevaux, 1892)..." leia-se "...(Froidevaux, 1982)...".

Pg.33: Onde constar "...Sabourin (1983)..." leia-se "...Sabourin (1984)...".

Pg. 42: Na Figura 7 :

Onde constar "Lucratividade" leia-se "Rentabilidade".

Lavra". Onde constar "Recuperação de Lavra Utiliza Fator" leia-se "Utiliza Fator de Recuperação de Lavra".

Onde constar "Estratégia de Exploração" leia-se "Estratégia de Explotação".

Pg. 47: Onde constar "...estiver estabelecendo o método de lavra..." leia-se "...estiver detalhando o método de lavra...".

Pg. 48: Onde constar "...em relação à de minério a ser lavrada..." leia-se em relação à de minério a ser lavrada...".

Pg. 51: Onde constar "...determinação de um valor a uma porção..." leia-se "determinação de um valor monetário a uma porção...".

Pg. 52: Onde constar "...valor tempo do dinheiro..." leia-se "...valor do dinheiro no tempo...".

Pg. 54: Onde constar "VPL" leia-se "BL".

Onde constar "...performance d a..." leia-se "...performance da...".

Pg. 56: Onde constar "A curvas..." leia-se "A curva...".

Onde constar "...receita total..." leia-se "...receita global...".

Pg. 57: Onde constar "...gerado-se informações..." leia-se "...gerando-se informações...".

Pg. 75: Onde constar "...no 8,..." leia-se "...no QUADRO 9,...".

Pg. 80: Onde constar "...RT..." leia-se "...RG...".

Pg. 85: Onde constar "...simulação de VPL's..." leia-se "...simulação de VA's...".

Onde constar "QUADRO 11" leia-se "QUADRO 13".

QUADRO 13: Onde constar "VALOR PRESENTE LÍQUIDO" leia-se "VALOR ATUAL".

Pg. 86: Onde constar "...tamanho e e da rentabilidade..." leia-se "tamanho de da rentabilidade...".

Pg. 87: Onde constar "...procedimento conformes..." leia-se "...procedimento conforme...".

" A pesquisa científica é um aspecto, na verdade, o momento culminante de um processo de extrema amplitude e complexidade pelo qual o homem realiza sua suprema possibilidade existencial, aquela que dá conteúdo à sua essência de animal que conquistou a racionalidade: a possibilidade de dominar a natureza, transformá-la, adaptá-la às suas necessidades ".

Álvaro Vieira Pinto, *Ciência e Existência*.

A Nalva, minha esposa.

A meus filhos, Vitor e Mariana.

A meus pais, Valda e Gabriel.

AGRADECIMENTOS

Ao Ministério de Minas e Energia, nas pessoas do Dr. João Tarcisio de Almeida e do Dr. Walter Faustini, pelo apoio institucional necessário para a realização deste curso de Mestrado.

À Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), Fazenda Brasileiro - Bahia, na pessoa do Dr. Eugênio Vitorasso que gentilmente cedeu os dados de sondagem e autorizou a sua utilização nesta pesquisa.

Ao Programa de Apoio à Pesquisa em Administração Pública - PAP, Convênio CAPES / ENAP, pelas concessões da bolsa de estudos e do auxílio à pesquisa, bem como ao CNPQ.

Ao amigo e Professor Hildebrando Hermann, pelo incentivo e apoio pessoal para que eu viesse à Campinas cursar o Mestrado e pelos momentos de reflexão.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre, pela paciência em atender às minhas solicitações, pelas discussões e sugestões, imprescindíveis para a elaboração desta Dissertação.

Aos professores deste Instituto, em particular, do Departamento de Administração e Política de Recursos Minerais, a nossa consideração e estima.

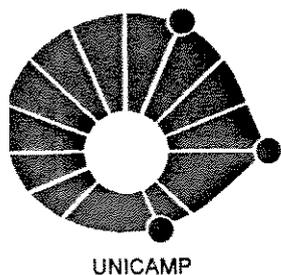
Aos colegas deste Instituto, que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta Dissertação, em especial ao amigo e Mestre Eng^o Petain Ávila de Souza, por tudo que nos ensinou ao longo dessa convivência.

A Cássia, Dora e Márcia, pela dedicação em atender à nossa pesquisa bibliográfica.

A Cristina e Tânia, que sempre atenderam de forma prestativa às nossas solicitações de secretaria, e aos demais funcionários deste Instituto.

Ao Eng^o Moacir Cornetti, Analista de Sistemas da AGP/IG pelo apoio prestado, necessário à utilização dos *softwares* instalados no LIG/ AGP/IG.

Aos amigos Elisabete e João Carlos Salles, Marileuza e Jocy Miranda, e Marcia e Antonio Pinhatti pela solidariedade prestada em todos os momentos.



UNIVERSIDADE DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS: ÁREA DE
ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RESUMO

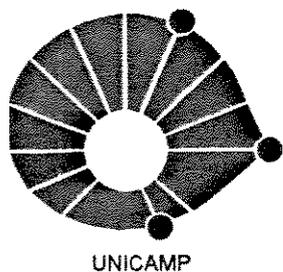
**O PROBLEMA DA ESTIMATIVA DE RECURSOS MINERAIS
NO ESTUDO DA EXEQÜIBILIDADE DE LAVRA**

MIGUEL ANTONIO CEDRAZ NERY

O objetivo da dissertação é explorar as técnicas geoestatísticas de estimativa de recursos geológicos, relacionando-as aos conceitos de avaliação econômica, com a finalidade específica de aplicação em projetos de aproveitamento de depósitos minerais.

A estimativa de recursos minerais pela técnica de krigagem permite avaliar a confiabilidade dos parâmetros da própria estimativa, através da variância de krigagem. Em função dela, os blocos krigados são classificados. Na conversão desses recursos em reservas, importa a definição do teor de corte, que garanta a recuperação e a remuneração do capital investido.

A dissertação é ilustrada com o estudo de um depósito e aborda sistemática e instrutivamente os elementos necessários à avaliação de sua economicidade. No trabalho, determinados passos são seguidos para a avaliação do depósito, até a esfera do Projeto Conceitual de mina. Nesta etapa, a conversão dos recursos em reservas minerais ocorre apenas com a indicação da exeqüibilidade de lavra.



UNIVERSIDADE DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS: ÁREA DE
ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ABSTRACT

**THE PROBLEM OF THE ESTIMATE FROM RESOURCES MINERAL IN
THE STUDY OF THE MINE FEASIBILITY**

By MIGUEL ANTONIO CEDRAZ NERY

The purpose of this dissertation is to explore the relationship between the geostatistics techniques of estimating geological resources and the concepts of economic evaluation, aiming specifically at applying them to projects of exploitation of mineral deposit .

The resources estimate by the kriging technique allows quantification of its error through the kriging variance. According to the latter, the blocs kriged are classified. In the conversion from resources to reserves it is important to define the cut-off grade that assures the required recuperation and remuneration of the invested capital. .

The dissertation is illustrated with the study of a gold deposit and makes a systematic and instructive approach to the elements required for the evaluation of ore deposits. In this dissertation, certain steps are followed in the deposit evaluation until the Conceptual Project of the mine. In this step, the conversion of resources into mineral reserves only occurs with the indication of the mine feasibility.

LISTA DE FIGURAS

1. Representação esquemática da parametrização de reservas.....	17
2. Gráfico da relação entre a precisão e o tamanho do bloco.....	29
3. Gráfico de classificação de blocos krigados em função do seu tamanho	30
4. Gráfico da precisão da estimativa X teor de corte.....	31
5. Gráfico da expectativa econômica do teor com margem de erro variável.....	32
6. Diagrama da homogeneidade de depósitos X proporção de minerais-minério.....	37
7. Diagrama de classificação de recursos e de reservas.....	42
8. Curvas do tamanho e da rentabilidade mínimos aceitáveis.....	57
9. Mapa de localização regional.....	58
10. Mapa geológico regional da área-alvo.....	59
11. Mapa geológico do depósito.....	60
12. Mapa-base e perfil indicativo da orientação da sondagem.....	61
13. Histograma dos teores amostrados.....	63
14. Histogramas dos teores com teor de corte geológico de 0,3 g / ton.....	64
15. Variogramas experimentais dos teores.....	66
16. Variogramas direcionais regularizados e ajustados.....	68
17. Modelo variográfico regularizado - anisotrópico.....	69
18. Representação da elipsóide da vizinhança de pesquisa.....	71
19. Nuvem de correlação Z vs. Z*	75
20. Mapa de isovariância dos blocos krigados.....	76
21. Configurações utilizadas para o cálculo da variância de krigagem.....	77
22. Mapa base dos blocos krigados.....	78
23. Corte esquemático do projeto conceitual da lavra.....	79
24. Curvas de seleção tamanho / teor X rentabilidade.....	82
25. Parametrização da reserva base.....	82

LISTA DE QUADROS

1. Classificação de recursos minerais proposta por McKelvey.....	19
2. Comparação entre os sistemas de classificação de recursos e reservas existentes.	27
3. Classes de recursos por economicidade, níveis de confiança e margem de erro....	33
4. Classificação de recursos para a mina de Short Creek.....	34
5. Resumo comparativo dos sistemas de classificação por critérios geoestatísticos.....	35
6. Proposta de estrutura de classificação de recursos e de reservas.....	39
7. Ambientes técnico-econômicos.....	45
8. Estatística simples dos dados.....	63
9. Parâmetros de vizinhança da krigagem	75
10. Classificação dos blocos krigados.....	79
11. Quadro dos teores para tamanho mínimo e rentabilidade mínima.....	81
12. Fluxo de caixa para avaliação da viabilidade econômica.....	84
13. Resultado da análise de sensibilidade.....	85

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

B: Custo de beneficiamento	RML: Relação de mineração limite
BL: Benefício Líquido	r_{\min} : Taxa mínima de atratividade
Ca: Custo de lavra a céu aberto	RT: Receita total
Ce: Custo de remoção de estéril	TC: Teor de corte
Cs: Custo de lavra subterrânea	Te: Teor de equilíbrio econômico
CVRD: Companhia Vale do Rio Doce	TIR: Taxa interna de retorno
DNPM: Departamento Nacional da Produção Mineral	TL: Teor limite
F.R.: Funções de recuperação	TMO: Teor mínimo operacional
FRP: Fator que atualiza valores no tempo	TU: Teor de utilização
G_L : Teor lucrativo	SMU: Unidade de seletividade mineira
G_m : Teor médio mínimo	V: Bloco de lavra
h: Vetor separação de pares de pontos	VAE: Valor anual equivalente
I: Investimento	VPL: Valor presente líquido
P: Preço da substância	VR: Variável regionalizada
PAE: Plano de Aproveitamento Econômico	x: Locação de um ponto
R: Taxa de recuperação do beneficiamento	Z^*_k : Teor estimado
	Z_α : Teor amostrado
	Z(x): variável Z no ponto x
	λ_α : ponderadores da Krigagem
	γ : Semi-variograma

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE QUADROS.....	x
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xi
I. INTRODUÇÃO.....	1
II. O PROBLEMA DA ESTIMATIVA DE RECURSOS MINERAIS	6
II.1. PRINCÍPIOS DA ESTIMATIVA DE RECURSOS MINERAIS.....	6
II.2. ESTIMATIVA DE RECURSOS MINERAIS POR GEOESTATÍSTICA.....	7
II.2.1. Variabilidade do Depósito.....	8
II.2.1.1. O Variograma Experimental.....	9
II.2.1.2. O Ajuste do Modelo Variográfico.....	10
II.2.2. A Estimativa por Krigagem.....	10
II.3. PARAMETRIZAÇÃO E TEOR DE CORTE.....	12
II.3.1. O Conceito do Teor de Corte.....	12
II.3.1.1. Equação de Equilíbrio Econômico.....	14
II.3.1.2. Teores Econômicos.....	15
II.3.2. Curvas de parametrização: Tonelagem X Teor.....	16
III. CLASSIFICAÇÃO DE RECURSOS E DE RESERVAS.....	18
III.1. CONCEITOS DE RECURSOS E DE RESERVAS.....	19

III.1.1. Os Conceitos de Recursos e Reservas no Brasil.....	20
III.1.2. Recursos e Reservas em outros Países.....	23
III.2. A GEOESTATÍSTICA NA CLASSIFICAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS.....	28
III.2.1. Classes de Recursos e Erros de Estimativa.....	28
III.3. MODELO ADOTADO PARA CLASSIFICAÇÃO DE RECURSOS E RESERVAS.....	36
IV. AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE DEPÓSITOS MINERAIS	43
IV.1. FASES E ASPECTOS DO PROJETO DE VIABILIDADE DE LAVRA.....	44
IV.1.1. Aspectos da Viabilidade de Lavra.....	44
IV.2. PARÂMETROS TÉCNICOS NA DEFINIÇÃO DA LAVRA.....	45
IV.2.1. O Método de Lavra e a Relação de Mineração Limite.....	47
IV.2.2. Estudo de Preço e de Mercado.....	48
IV.3. A CONVERSÃO DE RECURSOS EM RESERVAS MINERAIS.....	49
IV.3.1. Os Conceitos de Indicação e de Demonstração da Exequibilidade de Lavra.....	59
IV.3.2. Fluxo de Caixa.....	51
IV.3.2.1. Taxa Mínima de Atratividade do investidor.....	52
IV.3.2.2. Taxa Interna de Retorno.....	52
IV.3.2.3. Valor Presente Líquido ou Valor Atual.....	53
IV.4. CRITÉRIO DO TAMANHO E DA RENTABILIDADE MÍNIMOS ACEITÁVEIS.....	54
IV.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	57
V. ESTUDO ILUSTRATIVO DE CASO	58
V.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA-ALVO.....	58
V.1.1. Localização.....	58
V.1.2. Geologia Regional e Local.....	59
V.1.3. Descrição do Depósito.....	60
V.2. RESULTADOS DA SONDAGEM.....	61
V.2.1. Análise Preliminar dos Dados.....	62
V.3. VARIABILIDADE DO DEPÓSITO.....	65
V.3.1. Variograma Experimental	65
V.3.2. Regularização da Sondagem.....	66

V.3.3. O Modelo Variográfico Ajustado	68
V.4. A ESTIMATIVA DOS RECURSOS GEOLÓGICOS POR KRIGAGEM.....	70
V.4.1. A Definição dos Parâmetros de Vizinhaça.....	70
V.4.2. A Validação Cruzada no Estudo dos Parâmetros de Estimativas.....	72
V.4.3. A Krigagem de Blocos.....	75
V. 5. O ESTUDO DA EXEQÜIBILIDADE DE LAVRA.....	80
V.5.1. Critério da Seleção Tamanho x da Rentabilidade Mínimos Aceitáveis.....	80
V.5.2. Conversão dos Recursos em Reservas Minerais.....	83
V.5.3. Análise de Sensibilidade à Variação no Preço.....	85
VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
VIII. ANEXOS.....	95
VIII.1. ANEXO 1.....	95
VII.2. ANEXO 2.....	96
VII.3. ANEXO 3.....	97

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O objetivo da pesquisa mineral baseia-se na necessidade de quantificação da massa mineralizada existente num determinado depósito, passível de ser extraída a partir da comprovação da sua viabilidade técnica e econômica, ou seja, da exeqüibilidade de lavra. Isto significa afirmar que, em termos econômicos, um depósito mineral em si não possui um valor monetário, só passando a possuí-lo a partir do momento em que um processo de avaliação permita o seu aproveitamento com algum benefício de retorno.

O controle sobre os teores dos depósitos a serem aproveitados tornam-se da maior importância, pois propicia uma boa distinção entre o que pode ser economicamente viável, o que é sub-econômico e o que é anti-econômico. O conhecimento pormenorizado do depósito, a partir da estimativa de recursos em que o seu nível de confiança seja levado em consideração, implica em assegurar uma diminuição nos riscos de investimentos.

A importância de desenvolver uma pesquisa sobre o problema da estimativa de recursos minerais no estudo da exeqüibilidade de lavra reside em quatro pontos básicos:

- i. a quantificação do erro de estimativa;
 - ii. a utilização deste erro na classificação de recursos e reservas;
 - iii. critérios técnicos e econômicos para a conversão de recursos em reservas;
 - iv. expectativa de retorno do investimento na definição do teor de corte.
- Desta forma, estabeleceu-se como ferramenta-mestra para a estimativa

de recursos uma abordagem geoestatística, justificada devido a tal metodologia permitir calcular o erro que se comete ao extrapolar a informação de furos de sonda para blocos de lavra de uma jazida. Sendo esses erros de estimativa detectados previamente, diminui a possibilidade de, na ocasião da lavra, enviar-se para o beneficiamento um bloco de estéril como minério, ou de enviar-se para as pilhas de "bota-fora" um bloco de minério estimado como estéril, propiciando portanto um melhor aproveitamento do depósito.

A avaliação de depósitos minerais por métodos geoestatísticos aqui abordados nasceu com suas primeiras aplicações, ainda que de forma empírica, por D. G. Krige, em 1954, na África do Sul. Atualmente, centenas de jazidas minerais já foram avaliadas por geoestatística em todo o mundo, devendo o seu desenvolvimento, por exemplo, a G. Matheron, M. David, A.G. Journel, A.Marechal., C.H. Huijbregts. Nos últimos anos, a aplicação da geoestatística tem se estendido para outras áreas do conhecimento, como a agronomia e a meteorologia, dentre outras.

No setor mineral brasileiro, além de não se observar, em muitos casos, a utilização de técnicas geoestatísticas de estimativa de recursos, raramente têm sido aplicados os princípios e as etapas aceitas como indispensáveis ao melhor aproveitamento do depósito. A etapa da avaliação da exequibilidade de lavra, fundamental para a elaboração ótima do Plano de Aproveitamento Econômico (P.A.E.), tem sido, em muitos casos, desenvolvida de forma muito incipiente.

A geoestatística é a linguagem básica, é a estrutura elementar para que se possa modelar os depósitos minerais. Assim, num país onde ocorre um grande número de pequenos depósitos ou de grandes depósitos com baixos teores, a difusão de técnicas que permitam a elevação do nível de seu aproveitamento é fator determinante para o próprio desenvolvimento do setor. Com avanço da micro-informática e com a geoestatística atingindo a sua terceira geração, empregando *softwares* que facilitam o seu uso, a avaliação de depósitos utilizando-se de um ferramental técnico especializado torna-se imprescindível.

Inúmeros são os casos em que a empresa de mineração, ao não realizar uma avaliação mais rigorosa que permita um melhor desenvolvimento das operações de lavra, não promove o melhor aproveitamento do depósito. Assim, incorre-se em baixos índices de recuperação de lavra, resultando num baixo nível de seletividade mineira ou

numa lavra predatória, em que a vida útil da própria mina termina por ser reduzida. O instrumental necessário para a melhoria desse controle pode ser fornecido, principalmente, pelas técnicas geoestatísticas (Análise Variográfica, Krigagem, etc.), que aqui são tratados de forma ilustrativa.

O nível de exigência sobre o controle de qualidade sobre produtos minerais, impostos pela indústria consumidora desses bens, já altera aquela conceituação. Atualmente, a empresa de mineração vê-se obrigada a controlar não apenas as substâncias úteis agregadas, como as substâncias nocivas ao processo industrial. Assim, o que antes poderia ser considerado como um depósito homogêneo, hoje não mais o seria.

Em 1991, o Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) publicou um texto estabelecendo as Bases para a Implantação do Sistema Permanente de Quantificação do Patrimônio Mineral Brasileiro. A publicação sugere uma padronização das reservas minerais, com base em curvas de parametrização, com o objetivo de:

- "i. Evitar a lavra ambiciosa e predatória;
- ii. Elevar a qualidade do processo produtivo em termos de vida útil, teor, recuperação, controle de qualidade etc.;
- iii. Parametrizar as distribuições da tonelagem e dos teores do depósito para um perfeito planejamento da produção;
- iv. (...)
- v. Potencializar o aproveitamento dos bens minerais, que são patrimônio da União".

Assumindo o espírito de uniformização de conceitos e divulgação de uma metodologia de avaliação de jazidas, essa pesquisa buscou responder, ainda que em parte, ao conjunto de questões suscitadas pelo citado texto.

Neste contexto, a dissertação está estruturada em cinco capítulos, além desta introdução.

No capítulo II, busca-se apresentar os problemas relacionados à estimativa de recursos descrevendo, em linhas gerais, a importância das técnicas geoestatísticas e como essas se diferenciam dos métodos convencionais.

O capítulo III aborda a discussão conceitual sobre recursos e reservas

minerais. Uma revisão bibliográfica é feita sobre os modelos de classificação assumidos pelas legislações em diversos países. Em seguida, discute-se a importância do erro e do nível de confiança da estimativa com uma revisão bibliográfica dos modelos de classificação de recursos e reservas a partir de critérios geoestatísticos. O capítulo é concluído adotando-se um sistema de classificação.

No quarto capítulo, discorre-se sobre o processo de conversão de recursos em reservas. Para tanto, é necessário realizar o estudo de viabilidade considerando os ambientes técnicos e econômicos diferenciados, apropriados para se proceder à 'indicação' de exeqüibilidade de lavra ou à 'demonstração'.

No quinto capítulo, para efeito de aplicação prática dos conhecimentos aqui revelados, é apresentado um estudo ilustrativo de caso, baseado em um dos corpos do depósito de ouro da mina Papagaio da Fazenda Brasileiro (município de Teofilândia, Estado da Bahia), cedido pela Companhia Vale do Rio Doce. Entretanto, o objetivo não é fazer o estudo exaustivo propriamente dito daquele depósito, mas sim demonstrar e discutir como estudos do gênero podem ser realizados. Os dados oriundos de apenas um dos corpos (PPG1-B), dentre os vários existentes em todo o depósito de Papagaio, foram considerados suficientes para o desenvolvimento da pesquisa e serviram apenas para ilustrar o tratamento geoestatístico.

Por questões estratégicas, como os resultados da estimativa revelaram um somatório total dos recursos e de seus teores pouco expressivos, foi necessário potencializar tais valores em dez vezes, elevando-se aquele corpo à categoria de um depósito de médio porte para efeito da ilustração da avaliação econômica. Este artifício justifica-se pela função meramente ilustrativa do estudo. O corpo originalmente estudado só tem a sua extração viabilizada por estar associado a vários outros que garantiram a implantação do empreendimento na área. Além disso, o artifício apenas torna os dados mais próximos dos relativos a uma jazida propriamente dita, em que para o estudo da sua exeqüibilidade de lavra, não se levaria em conta a existência de outros depósitos (ou corpos mineralizados) na sua circunvizinhança.

No último capítulo, são feitas algumas considerações finais, resumindo-se os procedimentos necessários para uma melhor avaliação técnico-econômica de um depósito mineral.

O tratamento geoestatístico dos dados de sondagem do depósito, obtidos junto à CVRD, foi realizado utilizando-se do programa computacional ISATIS¹ instalado em rede nas estações de trabalho do Laboratório de Informações Geológicas (LIG) do IG/UNICAMP . Esse programa é fundamental para se produzir as estimativas de recursos por geoestatística e o cálculo das variâncias inerentes a tal avaliação. Subsidiariamente, fez-se uso dos programas ANAVAR² e PLAYKRIG³ na análise dos resultados e na geração das curvas e modelos discutidos.

¹ *Software* Geoestatístico desenvolvido pela Geovariances. Versão 2.0, 1994

² Programa de Análise Variabilidade e Krigagem, desenvolvido por Remacre & Cornetti . Unicamp, Versão 1.0.

³ Programa para Cálculo de Variância de Estimativa em Linguagem Fortran. Remacre & Cornetti . Unicamp.

CAPÍTULO II

O PROBLEMA DA ESTIMATIVA DE RECURSOS MINERAIS

Neste capítulo, é discutido o que significa uma estimativa mineral, os problemas de confiabilidade a ela inerentes e como, através da geoestatística, tem-se buscado quantificar o seu erro.

II.1. PRINCÍPIOS DA ESTIMATIVA DE RECURSOS MINERAIS

A estimativa de recursos minerais objetiva quantificar a massa mineralizada existente em um determinado depósito. Ocorre, no entanto, que, para essa determinação, informações obtidas por amostragens pontuais são extrapoladas para volumes bem maiores do que os amostrados e que a lavra será efetuada sobre os blocos e não sobre as amostras - o que muitas vezes conduz a prejuízos irreparáveis, se não forem observados dois fenômenos:

i. Efeito suporte: O suporte é o volume físico sobre o qual o teor é definido. Os teores obtidos na fase de pesquisa são, em geral, medidos sobre suportes pequenos. Em verdade, não se lavra uma mina com testemunhos, mas com unidades bem maiores, em que os teores se comportam menos dispersos e com valores menos extremados. O método de lavra deve, assim, projetar um suporte capaz de selecionar o material desmontado e determinar se o seu envio será para a usina, para o "bota-fora" ou para uma pilha de minério marginal.

Assim, é óbvio que se efetua uma melhor seleção lavrando-se pequenos blocos do que grandes blocos. Em contrapartida, quanto menor o suporte de lavra, maior o custo de extração⁴.

ii. Efeito Informação: A lavra nunca é procedida segundo os seus teores verdadeiros, mas sim sobre os seus teores estimados. Isto pode implicar que blocos com teores reais abaixo de um determinado teor de corte, mas estimados acima, sejam enviados à usina, ou que blocos com teores reais acima do teor de corte, mas

⁴ É importante ressaltar que o suporte de lavra (unidade de seletividade mineira) conceitualmente é diferente do suporte utilizado numa estimativa global, e em termos práticos não necessariamente os dois assumem as mesmas dimensões.

estimados abaixo, venham a ser enviados ao "bota-fora".

Isto não necessariamente ocorre em função de uma má estimativa, mas sim devido à seleção de lavra ocorrer por um critério indireto. Deve-se ressaltar que os blocos avaliados serão sempre selecionados de acordo com teores estimados e não de acordo com teores verdadeiros - o que sempre conduzirá a discrepâncias.

Por outro lado, algumas técnicas tradicionais de quantificação de recursos assumem que o teor médio das amostras ou das sondagens representa, exatamente, a média dos teores *in situ* do depósito como um todo. Assim, nenhum procedimento usado tradicionalmente para promover estimativas de recursos permite avaliar de forma quantitativa o seu nível de confiança, a ponto de permitir classificar os recursos pelo grau de incerteza associado, principalmente quando se trata de uma mineralização que apresenta variabilidade expressiva nos teores em relação ao raio de influência das amostras.

Os procedimentos clássicos de quantificação de recursos utilizando volumes ou áreas de influência de cada seção, de fato, não são as melhores opções para se efetuar estimativas. O teor médio de um determinado depósito, por exemplo, será pouco representativo, se ocorre próximo e na mesma área de influência de uma zona rica e significativamente expressiva. Uma avaliação submetida baseada nos métodos clássicos, que não quantificam a margem de erro da estimativa, apresentaria um grau de incerteza associado à estimativa extremamente elevado.

As técnicas geoestatísticas propiciam não apenas a definição do teor médio mais provável *in situ*, como também determinam a probabilidade (%) de que o teor verdadeiro esteja dentro de um determinado intervalo de confiança. Esse tipo de informação é de interesse relevante para o investidor, devido à incerteza inerente às reservas interferir no nível de confiabilidade do próprio projeto.

II.2. ESTIMATIVA DE RECURSOS MINERAIS POR GEOESTATÍSTICA

Conceitualmente, pode-se afirmar que a geoestatística é o ramo da ciência que estuda os fenômenos espaciais ou temporais com algum grau de correlação. O seu objetivo é formar uma idéia sobre a estrutura do fenômeno, ou seja, de como provavelmente o fenômeno se encontra estruturado no espaço. Em sendo uma

ferramenta auxiliar das geociências, permite colocar a geologia em números, através da construção de mapas (interpolação, extrapolação e filtros), estimativas de reservas com avaliação do erro, estimativa de distribuições espaciais, gerações de modelos estocásticos, impacto econômico-financeiro, impacto de incertezas geológicas e impactos a alternativas de projetos.

Sendo $z(x)$ o valor da variável z no ponto x , o problema está em representar a variabilidade da função $Z(x)$ no espaço, quando x é a variável (Journel & Huijbregts, 1989). Por essa interpretação, pode-se resolver os problemas de estimação do valor $Z(x_0)$ no ponto x_0 , em que os dados não estão disponíveis, ou estimar a porção dos valores $Z(x)$ dentro de um determinado espaço maior do que um dado limite conhecido. Pode-se, assim, caracterizar as 'variáveis regionalizadas', no caso de um fenômeno mineralizado, como a distribuição espacial de um certo número de quantidades medidas.

Em suma, a geoestatística está relacionada às funções aleatórias que decorreram da teoria das variáveis regionalizadas (VR). Essa teoria considera que as variáveis apresentam valores distintos quando tomadas de um ponto a outro do espaço, revelando uma certa continuidade. Tal continuidade é verificada quando se obtêm valores próximos em dois pontos amostrados, quanto menos afastados estejam os referidos pontos. Desta forma, a utilização da geoestatística é recomendada para depósitos que apresentem alguma variabilidade do atributo em estudo (teores, por exemplo).

A geoestatística oferece duas vantagens sobre os métodos convencionais de 'cálculo de reservas'. Em primeiro lugar, permite obter o melhor resultado possível da informação das amostras disponíveis. Em segundo lugar, permite avaliar o nível de confiança da estimativa. Em alguns casos, em que o corpo apresenta uma boa continuidade do atributo em estudo, admissivelmente, há pouca diferença entre recursos estimados por krigagem e outras técnicas que ponderam a distância. Ainda assim, a geoestatística deveria ser usada preferencialmente por permitir a quantificação do erro de estimativa.

II.2.1. Variabilidade do Depósito

A análise estrutural objetiva extrair da aparente desordem dos dados

disponíveis uma imagem da variabilidade e uma medida de correlação existente entre os valores tomados em dois pontos do espaço. Tal objetivo só é atingido através da confecção de variogramas. Assim, a análise estrutural ou variográfica consiste num conjunto de estudos cujo objetivo é o de elaborar um modelo operacional de variograma característico do fenômeno em foco. Deste modo, o variograma descreve como a variabilidade espacial de uma variável regionalizada $Z(\mathbf{x})$ pode ser caracterizada.

Em geral, o variograma é uma função crescente com a distância entre dois pontos diferentes. O crescimento mais ou menos acentuado do variograma representa o modo como ocorre a influência de uma amostra sobre as zonas mais afastadas da sua circunvizinhança. Pela "Hipótese Intrínseca", a função variograma depende somente de um vetor separação \mathbf{h} (módulo e direção) e não da locação \mathbf{x} . Na prática, o variograma é a ferramenta matemática que permite estudar a dispersão natural das variáveis regionalizadas, que representam o grau de continuidade da mineralização.

O variograma, em verdade, é uma maneira simples de utilizar a geoestatística na avaliação de um depósito mineral. O modelo de variograma escolhido será determinante no processo da krigagem⁵ e influenciará todos os resultados e conclusões. É possível estimar um variograma $2\gamma(\mathbf{h})$ do conjunto de dados disponíveis através do cálculo da média aritmética do quadrado das diferenças entre duas medidas experimentais $[Z(\mathbf{x}_i), Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})]$ de pares de pontos separados pelo vetor \mathbf{h} .

II.2.1.1. O Variograma Experimental

O objetivo básico do variograma, enquanto uma ferramenta geoestatística, é o de condensar as feições estruturais principais de um fenômeno regionalizado, dentro de uma forma operacional (Journel & Huijbregts, 1989).

A estatística clássica estaria impossibilitada em diferenciar distintos eventos geológicos que, por exemplo, apresentassem distribuição espacial de teores diferentes, ... mas a mesma média, mesma variância e portanto o mesmo desvio padrão e coeficiente de dispersão. Assim, do ponto de vista estatístico, seriam idênticas. A

⁵ A krigagem é uma técnica geoestatística de estimativa de recursos minerais.

resposta a esse tipo de problema é dada a partir da construção de variogramas.

Para ser confeccionado, um variograma experimental de dados amostrados deve estar associado a várias informações, previamente observadas, tais como:

i. O número de pares formadores de cada ponto de valor dos dados usados na construção do valor de γ . Estes números de pares agem como ponderador no comportamento variográfico da variável em estudo, representando um indicador de um possível erro de estimação;

ii. A dimensão da zona dos dados utilizados a ser coberta no cálculo do semi-variograma, na prática, raramente ultrapassa a metade do campo total amostrado;

iii. A média aritmética da variável e a sua variância de dispersão.

II.2.1.2. O Ajuste do modelo variográfico

Para se proceder a uma estimativa geoestatística de recursos por krigagem, é necessário que se tenha variogramas ajustados a um modelo teórico e que este seja representativo do fenômeno em estudo, ou seja, dos próprios variogramas experimentais.

Os modelos variográficos foram desenvolvidos a partir da necessidade de se obter uma função $\gamma(h)$, para um 'h' qualquer que expressasse o comportamento geral do variograma experimental. Devido às suas flutuações, seria impossível obter uma estimativa e a sua precisão, assumindo apenas os mesmos dados experimentais, sem fazer uma hipótese teórica que pudesse revelar um comportamento determinado por uma relação matemática.

II.2.2. A Estimativa por Krigagem

Vários métodos de avaliação utilizam valores médios das amostras para estimar os recursos de um depósito. Muitos, inclusive, utilizam ponderadores que são função da distância ao centro do bloco a avaliar, não levando em conta a variabilidade do depósito, de tal forma que os erros de estimativa não podem ser avaliados.

Os métodos estatísticos conseguem avaliar a precisão da estimativa, mas, no entanto, superestimam tal erro, dado não levarem em conta as correlações espaciais. Na geoestatística, desenvolveu-se a teoria da estimativa de recursos. Para prover a medida da confiabilidade e para efeito de estimativas locais, o método que fornece o melhor estimador linear dos blocos é a krigagem.

Assim, o problema da estimativa local está em encontrar o melhor estimador do valor médio de uma variável regionalizada sobre um domínio limitado, considerando as dimensões comparadas às zonas quasi-estacionárias (homogêneas) do depósito, o teor médio do bloco localizado dentro da zona homogênea da mineralização. A krigagem é uma técnica de estimação local que proporciona o melhor estimador não-tendencioso, em termos matemáticos, das características desconhecidas em estudo, por proporcionar um resultado com uma variância mínima (Journel & Huijbregts, 1989).

O estimador linear Z^* considerado é uma combinação linear de "n" dados escolhidos para a estimativa:

$$Z_k^* = \sum_1^n \lambda_\alpha Z_\alpha$$

Os "n" ponderadores λ_α são calculados para assegurar que o estimador será não-enviesado e que a variância de estimação será mínima, condição para que o estimador Z_k^* seja ótimo. O sistema de krigagem é um sistema de equações que permite calcular o valor de cada um dos ponderadores, de tal forma que a variância de estimativa seja mínima e a soma dos ponderadores seja igual a 1. A grande vantagem da krigagem é eliminar os erros sistemáticos de estimativa de recursos.

O sistema de krigagem leva em consideração:

- i. a variabilidade da estrutura da mineralização através da função semivariograma ;
- ii. a disposição dos furos entre si;
- iii. a disposição dos furos em relação ao bloco **V** a ser avaliado;
- iv. a variância de estimativa.

A essência de uma boa estimativa não é simplesmente produzir um bom resultado como valor para o teor de determinado bloco, mas também dar alguma indicação da margem de erro com que o teor verdadeiro, a ser obtido somente na lavra, variará em relação ao teor estimado.

II.3. PARAMETRIZAÇÃO E TEOR DE CORTE

II.3.1. O Conceito do Teor de Corte

Tanto a teoria econômica clássica quanto o princípio de conservação dos recursos naturais requerem que a mineração apresente um desempenho em que uma tonelada produzida de minério promova uma receita suficiente para cobrir os custos de produção, o pagamento de *royalties* e remunerar o capital investido. Em termos gerais, o teor associado a essa tonelagem é chamado de teor de corte. Em termos econômicos, o conceito de teor de corte representa o valor pelo qual se separa o que é minério de estéril.

Assim, o teor de corte pode ser considerado como o limite técnico, num dado momento e com uma determinada tecnologia, significando que o teor abaixo dele é considerado insatisfatório, ou ainda, um limite físico num depósito mineral particular submetido a determinadas restrições técnicas (Coléou, 1989).

O cálculo apropriado do teor de corte a ser aplicado a partir dos resultados da estimativa de recursos requer uma avaliação de determinados fatores, como preço do produto, o custo operacional e a recuperação metalúrgica. No estágio inicial de avaliação do projeto, no entanto, esses fatores terminam tendo de ser estimados a grosso modo, com base na experiência de outros empreendimentos. Assim, a estimativa de custos operacionais, em particular, muda significativamente, na maioria dos casos, com os procedimentos de avaliação à medida em que evolui o nível de detalhamento.

O estabelecimento de um determinado teor de corte empregado nunca deve ser considerado como definitivo e, ainda que se esteja numa fase de detalhamento, pode ser revisto. Se, por exemplo, ocorre uma mudança no preço do produto, conseqüentemente o teor de corte sofrerá alteração que, por sua vez, implicará em alterações na seleção da reserva lavrável do empreendimento. A seleção do teor

de corte tende a ser um processo constante e interativo.

Dentro deste ponto de vista, o teor de corte é específico para cada depósito mineral, no momento da avaliação, e a sua definição deve estar relacionada a um propósito específico. Pode-se definir como propósito, para efeito de objetivos do planejamento, tanto o plano de lavra para toda a vida útil da mina ou seu plano operacional de curto prazo, quanto a taxa interna de retorno ou o valor presente líquido da jazida, nestes casos determinados pelos interesses do investidor ou mesmo pela lavra de um bloco. Não há, assim, um teor de corte que venha a ser utilizado para todas as condições e todos os objetivos.

Um teor de corte, numa conceituação operacional, só faz sentido se comparado a um bloco de lavra que é a unidade mínima de lavra, também conhecida por unidade de seletividade mineira (S.M.U.). A S.M.U. é o volume mínimo em que é possível realizar uma efetiva separação entre minério e estéril, dentro de um dado condicionamento técnico-econômico. Para cada depósito, existe um método ótimo de mineração que permite fornecer um teor de utilização requerido pelo processo, a um custo viável e a uma escala de produção compatível.

O teor de corte é determinado na seleção de blocos de reservas minerais, numa fase de projeto básico ou mesmo de projeto executivo, tanto por restrições físicas da mina (ângulo de talude, área mínima operacional, fator de diluição etc), como por condições econômicas na ocasião da lavra, influenciadas pela variação no preço do produto ou nos custos operacionais. Esses custos incluem todas as despesas diretas ou indiretas relacionadas à lavra, concentração, refino e comercialização.

Na verdade, qualquer requisito técnico que imponha restrições sobre quantidades de massa, conduz a restrições sobre teores. O teor de corte deve, assim, ser considerado como um limite econômico dentro de um determinado ambiente econômico, resultado do estudo de viabilidade para converter os recursos em reservas minerais.

Como na fase de pesquisa mineral é prevista a realização de caracterização tecnológica do minério, os seus resultados permitem, de antemão, predizer qual o tipo de processamento mineral a ser utilizado na usina de concentração. Mesmo na fase de projeto conceitual, quando ainda não se detalhou a base de engenharia, com tal definição já se permite também saber aproximadamente a taxa de

recuperação metalúrgica e os seus custos unitários de concentração.

Na análise econômico-operacional de uma mina, esses fatores são fundamentais para se garantir o equilíbrio econômico do empreendimento. Por outro lado, o horizonte econômico imposto em termos operacionais é de curto prazo para efeito de planejamento, não se levando em conta o valor do dinheiro no tempo. Para se avaliar se um determinado bloco paga os custos de sua extração e do seu beneficiamento, é necessário fazer tal análise a partir da própria equação de equilíbrio econômico.

II.3.1.1. Equação de Equilíbrio Econômico

Como em toda e qualquer atividade, também na mineração o equilíbrio econômico reside na igualdade entre custos e receitas. Desta forma, a viabilidade para aproveitamento de um determinado bloco implica em que a diferença entre receitas e custos resulte em um valor maior ou igual a zero. Portanto, o equilíbrio econômico é dado pela expressão:

$$(p \cdot r) \cdot t - [C_a + (C_e \cdot R) \cdot B] \geq 0$$

sendo,

p: o preço da substância útil agregada

r: recuperação da usina

t: o teor recuperável de um bloco qualquer de minério

C_a: Custo de Lavra a céu aberto

C_e: Custo para remoção de estéril

R: Relação de mineração

B: Custo de beneficiamento.

II.3.1.2. Teores Econômicos

Segundo Pereira, N. (1975), considera-se Teor de Equilíbrio Econômico (Te) aquele que torna economicamente atrativo o aproveitamento de um determinado bloco de lavra. A comparação entre o teor real do bloco (t_i), ou seja, o teor médio, e o teor de equilíbrio econômico, calculado a partir das demais características do bloco, permite decidir se o bloco deve ou não ser lavrado. Assim, se:

$t_i \geq Te$: o bloco deve ser lavrado, pois gerará um Benefício Líquido (BL), no mínimo, nulo;

$t_i < Te$: o bloco não deve ser lavrado, pois gerará um BL negativo, se computados os custos de extração (C_a).

O Teor de Equilíbrio Econômico serve principalmente para definir os limites da reserva lavrável, ou seja, da própria cava. Esse teor possui algumas derivações, que são comentadas a seguir:

i. Teor Limite (TL)

É o teor que compensa, economicamente, realizar a lavra subterrânea, ou melhor, aquele que deriva de custos a céu aberto iguais aos de sub-solo. Esse teor pode ser obtido, substituindo os valores dos custos na equação de equilíbrio econômico, admitindo-se que o bloco tenha uma relação e mineração limite. Assim, todo o bloco com teor acima de TL, sempre será lavrado, pois gerará sempre um BL positivo.

ii. Teor de Corte (TC)

Pereira, N. (1975) define que o teor de corte (operacional) é o menor teor que compensa lavar economicamente um bloco que possua uma relação de mineração nula ($R=0$). Tal teor conduz a um valor de substância útil agregada capaz de pagar pelas operações de extração, sem levar em conta a remoção de qualquer conteúdo de estéril.

iii. Teor Mínimo Operacional (TMO)

É o teor que viabiliza o aproveitamento do conteúdo útil, com custos de lavra e relação de mineração nulos, tendo-se apenas as despesas com as operações subseqüentes à extração/remoção. Poderia ser considerado, assim, o extremo inferior da faixa que, comumente, se classifica como minério, pois tem viabilidade econômica, ainda que a sua lavra seja paga pelo Te. É possível exemplificar, citando um determinado bloco pouco mineralizado, localizado dentro da cava, que terá que ser removido na condição de estéril, para efeito dos custos de lavra, para liberar a face livre de outros blocos mais ricos, e que posteriormente poderá vir até ser enviado à usina.

iv. Teor de Utilização (TU)

É o teor médio mínimo de alimentação da usina de beneficiamento. Deve localizar-se numa faixa entre o teor de corte e o teor mínimo operacional. Na eventualidade de ter-se de reduzir a faixa de teor de minério que será enviado à planta de tratamento, tal teor não poderá atingir valores inferiores ao TMO ou poder-se-ia estar gerando um BL negativo e, conseqüentemente, obtendo prejuízo.

O propósito do teor de corte é limitar, portanto, a inclusão de material considerado mineralizado no inventário dos recursos. Para uma dada tonelagem de material mineralizado, haverá um teor mínimo que irá ao encontro desse critério. Como, na prática, a maioria dos depósitos são heterogêneos, para se obter as possibilidades de determinação do teor de corte, torna-se necessário o conhecimento da curva tonelagem-teor do depósito em estudo.

II.3.2. Curvas de Parametrização: Tonelagem x Teor

A utilização dos teores econômicos como um critério fundamental na tomada de decisão de um investimento em mineração ou no planejamento operacional de lavra conduz ao problema de se estabelecer as relações Quantidade x Teor, as quais podem se apresentar sob três formas diversas (Tonelagem x Teor de Corte, Metal Contido x Teor de Corte e Teor Médio x Teor de Corte). O conjunto dessas funções é conhecido por funções de recuperação (F.R.) e a sua representação gráfica por curvas

e tabelas denomina-se Parametrização de Reservas (Remacre, 1982).

Assim, um controle de forma parametrizada permite fazer uma seleção dos recursos ou das reservas na ocasião do estudo de viabilidade econômica, ou possibilita um melhor acompanhamento da produção da mina, observando o comportamento do minério remanescente e procedendo ao melhor aproveitamento do depósito mineral. Tal controle é feito a partir do conhecimento da quantidade de minério em massa (tonelada de minério ou metal contido) relacionada ao teor de corte, por classes de teores em percentual acumulado decrescente das faixas mais pobres para as mais ricas. O limite inferior de cada classe corresponde às opções de teores de corte que se relacionam aos respectivos teores médios.

Para diferentes situações, os teores de corte são calculados como "valores-padrão", determinados com o propósito de classificar o que é econômico ou não-econômico para ser aproveitado como um bem mineral.

Na conversão de recursos em reservas minerais, é feito um histograma acumulado decrescente da distribuição das classes de teores do minério. O teor de corte é um parâmetro que permite selecionar a tonelagem, o conteúdo metálico total e o teor médio mínimo a ser recuperado na lavra. O teor médio mínimo é representativo de toda a faixa selecionada pelo teor de corte no histograma acumulado decrescente e significará o teor médio da própria reserva.

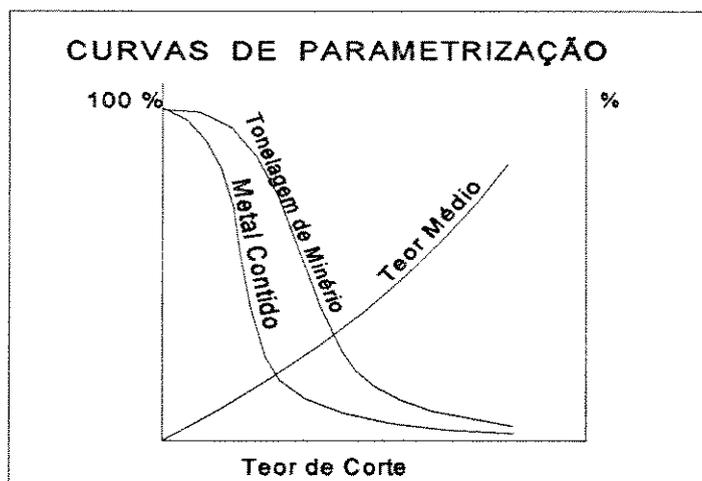


Figura 1: Representação esquemática da Parametrização de reservas.

Pelas curvas de parametrização, um determinado teor de corte serve tanto para a determinação geológica do que é minério ou estéril, quanto para a análise do aspecto econômico determinado por critérios estabelecidos pelo investidor.

CAPÍTULO III

CLASSIFICAÇÃO DE RECURSOS E DE RESERVAS

Neste capítulo são discutidos os conceitos e sistemas utilizados internacionalmente para classificação de recursos e de reservas minerais. Além disso, é apresentada uma revisão bibliográfica de sistemas propostos por determinados autores, utilizando-se parâmetros geoestatísticos para promover tal classificação. Por fim, adota-se um outro critério a partir da incorporação de parte de alguns desses sistemas. Aqui são desenvolvidos alguns conceitos, os quais muitas empresas vêm utilizando de forma semelhante, para efeito de seus controles internos e de seus planejamentos de lavra. Entretanto, tais conceitos, da forma aqui apresentada, não se encontram elencados em outra referência bibliográfica, embora alguns trabalhos apresentados no Simpósio sobre Recursos e Reservas (realizado em Sidney, Austrália, em 1987) tenham utilizado esquemas conceituais parecidos com os aqui adotados.

III. CLASSIFICAÇÃO DE RECURSOS E DE RESERVAS

Em linhas gerais, a distinção entre a condição de 'um depósito mineral explotável' e 'não-explotável' é dinâmica, variando em função de parâmetros econômicos e de fatores tecnológicos. O termo 'reserva' é restrito ao conhecimento corrente de depósito explotável. Recursos conhecidos são as reservas, somadas à parte do depósito não-explotável (Govett & Govett, 1974). Alguns autores afirmam ainda que 'reservas' são, por definição, 'Reservas Lavráveis', ou seja, aquela parte de um depósito mineral que pode ser econômica e legalmente extraída ou produzida no tempo de sua determinação.

Em estágios iniciais da avaliação de um depósito, quando o conhecimento quantitativo é disponível, principalmente, no aspecto geológico, o termo 'depósito mineral delimitado' pode ser usado para se referir a recursos estimados ou não. O termo 'reserva' torna-se apropriado somente após alguma avaliação da economicidade do depósito (Vallée & Côte, 1992).

Em verdade, o tema é profundo e polêmico. A legislação minerária em cada país estabelece uma conceituação própria e, no caso específico dos recursos estimados por geoestatística, vários especialistas têm elaborado contribuições distintas.

III.1. CONCEITOS DE RECURSOS E DE RESERVAS

Os conceitos desenvolvidos por McKelvey e atualizados pelo *Bureau of Mines* (1986) (*apud* Machado, 1989) classificam:

i. RECURSO: uma concentração de materiais de ocorrência natural em estado sólido, líquido ou gasoso, no interior ou sobre a crosta terrestre, de tal modo que a extração econômica de um produto seja presente ou potencialmente viável.

ii. RESERVA: aquela porção do recurso identificado, a partir do qual um mineral utilizável ou um produto energético pode ser extraído econômica e legalmente à época de sua determinação.

O próprio McKelvey buscou classificar recursos e reservas através de um diagrama muito discutido e alterado por diversos autores. O diagrama original é apresentado no Quadro 1.

QUADRO 1

Classificação dos Recursos Minerais Proposta por McKelvey - 1972

	RECURSOS IDENTIFICADOS			RECURSOS Ñ IDENT.	
	PROVADO	PROVÁVEL	POSSÍVEL	Recursos Hipotéticos	Recursos Especulat.
RECUPERÁVEL	RESERVAS				
PARAMARGINAL	RECURSOS IDENTIFICADOS				
SUBMARGINAL					

rescente
viabilidade da

↑

recuperação
econômica

← Conhecimento Geológico Crescente

FONTE: Govett & Govett, 1974

III.1.1. Os Conceitos de Recursos e Reservas no Brasil

Atualmente, a legislação minerária brasileira determina que:

"Parágrafo Único - Considera-se:

I - Reserva Medida: a tonelagem de minério computado pelas dimensões reveladas em afloramentos, trincheiras, galerias, trabalhos subterrâneos e sondagens, e na qual o teor é determinado pelos resultados de amostragem pormenorizada, devendo os pontos de inspeção, amostragem e medida estar tão proximamente espaçados e o caráter geológico tão bem definido que as dimensões, a forma e o teor da substância mineral possam ser perfeitamente estabelecidos, a tonelagem e o teor computados rigorosamente determinados dentro dos limites estabelecidos, os quais não devem apresentar variação superior, ou inferior a 20% (vinte por cento) da quantidade verdadeira;

II - Reserva Indicada: a tonelagem e o teor de minério computados parcialmente de medidas e amostras específicas, ou de dados da produção e parcialmente por extrapolação até distância razoável com base em evidências geológicas;

III - Reserva Inferida: estimativa feita com base no conhecimento dos caracteres geológicos do depósito mineral, havendo pouco ou nenhum trabalho de pesquisa" (*apud* Pinto, Uile (Org.) Consolidação da Legislação Mineral e Ambiental, 1991 : Regulamento do Código de Mineração. artigo 26, parágrafo único).

Em outra passagem do Regulamento do Código de Mineração, na alínea "g" do mesmo artigo 26, é determinado, quanto ao relatório final de pesquisa, o seguinte:

"Artigo 26 - O relatório referido no item VIII do artigo anterior será circunstanciado e deverá conter dados informativos sobre reserva mineral, qualidade do minério ou substância útil, a exeqüibilidade de lavra e especificamente sobre: (...)

g) demonstraçãõ da exeqüibilidade econõmica de lavra; "(grifo nosso)

A discussãõ dos objetivos da pesquisa mineral estã relacionada à prõpria conceituaçãõ de 'recursos' e de 'reservas'. A legislaçãõ mineral no Brasil nãõ diferencia os dois conceitos, nem mesmo define o conceito de 'recurso mineral'.

O DNPM, percebendo a existênciã de uma conceituaçãõ ultrapassada na legislaçãõ sobre os conceitos de 'recursos' e 'reservas', publicou, em 1992, o texto 'Bases Técnicas de um Sistema permanente de Quantificaçãõ do Patrimõnio Mineral Brasileiro', sugerindo, como providênciãs necessãrias para colocar o ambiente legal em sintonia com o ambiente técnico-econõmico, as seguintes alterações no texto legal:

"a) mudar as atuais definições de reservas (medida, indicada e inferida) para recursos medidos indicados e inferidos;

(...)

c) alterar a palavra 'demonstraçãõ' para a 'indicaçãõ' da exeqüibilidade de lavra, quando da apresentaçãõ do relatõrio final de pesquisa por parte do titular;

d) acrescentar, no capítulo "da Lavra", a exigênciã de "demonstraçãõ" da exeqüibilidade;

(...)

f) inserir as definições de reserva Provada e Provável no capítulo "Da Lavra", para efeito de anexã-las ao Plano de Aproveitamento Econõmico".

O nívõl de informações sistematizadas na fase de pesquisa mineral é suficiente para determinaçãõ e quantificaçãõ geolõgica dos recursos de um depõsito. Neste estãgio, a elaboraçãõ do projeto de engenharia ainda encontra-se definido apenas no seu aspecto conceitual, tornando impossívõl demonstrar a exeqüibilidade econõmica da lavra, como exige a legislaçãõ atualmente.

A proposiçãõ do órgãõ representa um avanço em relaçãõ ao texto legal atual. A distinçãõ entre 'indicaçãõ' e 'demonstraçãõ' da exeqüibilidade de lavra tem sentido, pois, associados a esses conceitos, estãõ os nívõis de 'incerteza geolõgica' e de 'incerteza econõmica' inerentes a cada estãgio da avaliaçãõ. Entretanto, o texto nãõ explicita o que seria necessãrio para se proceder à 'indicaçãõ' da exeqüibilidade de lavra.

A conversãõ de recursos em reservas deve ocorrer a partir da definiçãõ

conceitual do projeto de engenharia da mina ou quando esta já se encontra em lavra - situações em que, além das informações geológicas, os parâmetros técnicos estão minimamente definidos e são suficientes para assegurar a 'indicação' ou 'demonstração' da exeqüibilidade técnico-econômica para a lavra, a depender do estágio de detalhamento do projeto.

A afirmação feita por McKelvey de que um recurso é caracterizado como potencialmente econômico não entra no mérito do estágio da avaliação do depósito. A proposição do DNPM de alteração da legislação, embora, por sua vez, proponha que se proceda à 'indicação' da exeqüibilidade de lavra na fase final da pesquisa mineral, não considera que este nível de avaliação, ao ser feito, eleva por si só o *status* dos recursos minerais potencialmente econômicos ao grau de viabilidade econômica, mesmo que esta apenas se apresente em estágio preliminar. Tal estudo significa um avanço no processo de tomada de decisão do investimento.

III.1.2. Recursos e Reservas em Outros Países

Quanto aos conceitos 'recursos' e 'reservas', que orientam a prática mineira internacional ainda hoje, não foi estabelecido um consenso.

Nos Estados Unidos e no Canadá (Howe & McCarthy, 1987), a regulamentação sobre o assunto é bastante semelhante. Ambos os países dividem as classes de reservas em 'provadas' e 'prováveis'.

Nos dois países, os relatórios de avaliação de depósitos minerais, para efeito de elaboração, são divididos em cinco categorias:

- a) relatório preliminar (da exploração);
- b) relatório intermediário (de desenvolvimento);
- c) relatório financeiro superior (produção);
- d) estudo de viabilidade (relatório de avaliação), empregando equipe multidisciplinar de especialistas para investigar os problemas de cada fase tecnológica e econômica do depósito em estudo;
- e) relatório de propostas especiais.

Em ambos os países, E.U.A. e Canadá, 'minério' é definido como um agregado natural de um ou mais minerais, que, sob determinadas condições, pode ser extraído, proporcionando um saldo líquido lucrativo, ou cujas partes podem ser lucrativamente separadas. Naqueles países não é exigida indicação da exequibilidade de lavra na quantificação dos recursos e as definições de 'reservas provadas', 'prováveis' e 'possíveis' são as mesmas :

Minério Provado (ou medido) é o material em que a tonelagem é computada das dimensões reveladas em afloramentos, trincheiras, escavações e sondagens, e para as quais é computado o teor dos resultados da amostragem detalhada. Os pontos de inspeção, amostragens e de medição são tão estritamente espaçados, e o caráter geológico tão bem definido, que as dimensões, forma e o teor computados devem ser rigorosamente determinados, dentro dos limites estabelecidos.

Minério Provável (ou indicado) é o material em que a tonelagem e o teor são parcialmente computados de medições e amostras específicas, ou de dados de produção e parcialmente de exploração até uma distância razoável, com base em evidência geológica. Os pontos disponíveis para inspeção, medição e amostragem são espaçados demais para permitir, através deles, a delimitação da configuração dos corpos de minério ou a definição do teor.

Minério Possível (ou inferido) é aquele em que as estimativas de quantidade são largamente baseadas em conhecimento amplo do caráter geológico do depósito e para o qual há poucas amostras e medições. Por vezes, há apenas algumas amostras e as estimativas são baseadas sobre uma continuidade assumida ou por repetição, havendo razoável indicação geológica e podendo tais indicações incluir comparações com depósitos de tipo similar ou ainda podem ser incluídos corpos que estejam completamente encobertos, se houver evidência específica de sua presença.

Esse esquema adotado pelos E.U.A e pelo Canadá foi estabelecido pelo U.S. Geological Survey, na década de 40 (Bureau of Mines, 1976), e serviu para orientar a maioria dos Serviços Geológicos dos países mineradores ocidentais (Machado, 1989).

A prática mineira, inclusive no Brasil, considera que a reserva provada está delimitada em quatro faces de escavação ou em exposições na superfície do terreno. A reserva provável está bloqueada em três ou mesmo em duas faces, enquanto que a

reserva possível está exposta e amostrada em apenas uma face, ou não está exposta, absolutamente (Machado, 1989).

Dentro dessa mesma terminologia de classificação, Govett & Govett (1974) caracterizam que, para a engenharia de minas, reserva provada é aquela em que o minério é bloqueado em três dimensões por trabalhos subterrâneos ou por sondagem; provável é a extensão da provada, onde as condições garantem uma quase certeza de que o minério será encontrado; e possível é o minério prospectivo adjacente ao corpo mineralizado e às estruturas geológicas, onde faltam procedimentos de exploração e sondagem que permitam a certeza, assim como a extensão e precisão da locação do minério.

Já nos países da Comunidade dos Estados Independentes (CIS), ex-União Soviética, os princípios de classificação de recursos foram desenvolvidos em 1960. Em 1981, entretanto, um novo sistema de classificação de 'recursos' e 'reservas' foi adotado. Esse sistema ainda é utilizado nos países do CIS. O sistema consiste em proceder a uma divisão das concentrações minerais em sete categorias e três grandes grupos, baseados no nível de exploração desenvolvido sobre o depósito: Reservas exploradas (A, B, C1), reservas avaliadas (C2) e recursos prognosticados (P1, P2, P3). Em termos comparativos, as reservas A e B corresponderiam à Medida, C1 à Indicada, C2 à inferida e os recursos P1 e P2 aos Hipotéticos e P3 aos especulativos (Diatchikov, 1994).

A Austrália tem sido um dos países mais preocupados com a discussão sobre 'recursos' e 'reservas', visando uma melhor adequação dos termos às condições exigidas pelo estágio tecnológico e pela conjuntura do mercado na ocasião da avaliação de depósito. O modelo determinado pela legislação australiana é o seguinte:

Recursos são subdivididos em inferidos, indicados e medidos, em ordem crescente do nível de confiança e de conhecimento geológico. Reservas são classificadas como provadas e prováveis (Australasian Code for Report of Identified Mineral Resources and Ore Reserves. AIMM, 1990).

Sem dúvida, o modelo australiano já representa um avanço em relação ao modelo americano e canadense. A categoria de recursos, desta forma, fica definida até que o estudo de viabilidade seja concluído e que todos os aspectos relacionados à produção de minério do depósito em estudo sejam observados de forma satisfatória.

Jeffreys (1987) critica o código australiano, afirmando que, antes de tudo, os recursos devem ser classificados de tal forma que reflitam o nível de confiança da exploração. Esse grau de confiança é, usualmente, tomado dentro do cálculo, quando forem quantificadas as reservas lavráveis. Há, na verdade, uma imprecisão na legislação australiana relativa à definição da classificação de reservas provadas e prováveis, particularmente, quanto ao aspecto relativo às condições econômicas. Assim, o citado autor sugere uma alteração, com o objetivo de se incluir considerações de ordem prática com respeito à viabilidade econômica da extração mineral. O objetivo é, exatamente, o de estabelecer um critério de avaliação quantificada do valor real de um recurso mineral.

O autor sugere classificar os recursos em medido, indicado, e inferido (classe 1 e classe 2) e as reservas em lavrável *in situ*, recuperável e comercial. Os recursos seriam classificados pelo nível decrescente de exploração geológica. As reservas lavráveis *in situ* seriam resultado da soma dos recursos medido + indicado, e teriam a sua economicidade avaliada dentro da esfera de um projeto conceitual.

Jeffreys (1987) ainda afirma que a passagem para reserva recuperável envolveria a aplicação do fator de recuperação de lavra. Da reserva recuperável para a reserva comercial a passagem envolveria o fator de recuperação da usina de beneficiamento (para os casos de minério beneficiado na própria mina). Grimley (1987) registra que esses conceitos de reservas já estavam contemplados pelo novo código australiano de carvão para efeito de relatório de recursos identificáveis e de reservas desde o mês de fevereiro de 1986.

Em virtude da coexistência de diferentes definições nacionais de recursos e reservas e buscando uma uniformização, um Grupo de especialistas das Nações Unidas (Machado, 1989) decidiu sugerir, em 1979, que fosse evitado o termo 'reserva' e utilizado, exclusivamente, o termo 'recurso', ainda que não fosse previsto que tal sistema substituísse os aceitos em cada país. Segundo aquele Grupo, os recursos seriam classificados em econômicos e sub-econômicos. Os recursos econômicos seriam subdivididos em R1, R2 e R3, e os subeconômicos em r, r2 e r3. A categoria R1 consideraria estimativas altamente seguras de jazidas comprovadamente lavráveis, em que as distribuições dos teores e a caracterização tecnológica do minério seriam estabelecidas por observação direta ou interpolação mínima, podendo os erros de estimativas atingir até

50%. A classe R2 seria relativa a jazidas já descobertas, normalmente, nas proximidades daquelas do tipo R1, e as suas estimativas admitiriam erros superiores a 50%. As do tipo R3 considerariam jazimentos com estimativas feitas por extrapolações geológicas, de indicações geofísicas e geoquímicas ou de analogias estatísticas, podendo ser definidas por caráter meramente especulativo e consideradas como a serem descobertas.

Para os recursos sub-econômicos, só foi definida a categoria r. Esta seria considerada nos casos de depósitos com estimativas seguras, porém inviáveis para serem lavradas economicamente.

Dos sistemas de classificação descritos, é importante observar que as experiências de EUA e Canadá não classificam os recursos, por conseguinte não os distinguem de reservas minerais. É importante, no caso, a sistemática de relatórios de avaliação e de elaboração de projetos exigida por suas legislações.

Para os países do CIS, por influência da experiência histórica anterior socializante, o sistema não leva em consideração o aspecto da economicidade do depósito.

O modelo sugerido pelas Nações Unidas preocupa-se, apenas, em classificar o inventário quantificado como potencialmente econômico, não definindo critérios para julgar-se o que de fato é realmente econômico, as reservas.

A legislação brasileira atual, além de não definir os recursos, exige a demonstração da exeqüibilidade de lavra num ambiente de engenharia completamente impróprio para o cumprimento de tal exigência.

O sistema australiano - o mais avançado de todos - só é falho por não levar em conta o nível de definição das variáveis técnicas como critério de classificação das reservas. Poderia, também, definir duas classificações para recursos minerais, a depender da metodologia de quantificação.

O QUADRO 2 compara os sistemas de classificação de recursos e reservas citados.

QUADRO 2
COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE RECURSOS E
RESERVAS EXISTENTES

ORIGEM	Classes de Recursos	Classes de Reservas	Comentários
EUA e Canadá (1976)	- o -	Provado	Não classifica recursos e nem os distingue de reservas
		Provável	
		Possível	
CIS (1981)	Prognosticados (P1,P2,P3)	Exploradas (A,B,C1)	Não considera a economicidade do jazimento
		Avaliadas (C2)	
Austrália (1990)	Medido	Provado	As reservas são classificadas pelo mesmo critério dos recursos
	Indicado	Prováveis	
	Inferido		
ONU (1979)	Econômicos (R1,R2,R3)	- o -	Não classifica as reservas
	Subeconômicos (r1, r1, r3)		
Brasil (1967)	- o -	Medida	Classifica recursos como reservas
		Indicada	
		Inferida	

III.2. A GEOESTATÍSTICA NA CLASSIFICAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS

III.2.1. Classes de Recursos e Erro de Estimativa

A história recente de classificação de reservas minerais iniciou em 1943, com o *U.S. Bureau of Mines* adotando as categorias de 'medida', 'indicada' e 'inferida' para a estimativa dos recursos nacionais, estabelecendo, explicitamente, que essas categorias não seriam adaptadas às operações mineiras (Royle, 1977). Discussões posteriores na *Society of Economic Geologists*, entre 1953 e 1956, recomendaram o uso das tradicionais classes de 'provada', 'provável' e 'possível' para uso nas minas e consideraram os

conceitos de 'medida', 'indicada' e 'inferida' apropriados, exclusivamente, para avaliação de recursos e reservas de uma indústria mineral, região ou nação. A prática corrente do *U.S. Securities Exchange Commission* considera somente duas categorias: provada e provável, para efeito de aplicação financeira.

Ainda segundo Royle (1977), a discussão acerca da margem de erro relacionado às "reservas" ocorreu em julho de 1970 na World Mining. Os países da Europa Oriental, por interesse próprio a uma economia planificada, introduziram a divisão das categorias de reservas entre A, B, C e C_a , quando, a partir de então, o valor numérico da margem de erro e do grau de confiança passaram a ser considerados.

Onde quer que um procedimento de estimação seja usado, haverá um erro de estimativa, simplesmente devido à quantidade desconhecida a ser estimada, pois Z é, normalmente, diferente de Z^* . Assim, um erro de estimativa $Z - Z^*$ é cometido. Esse erro continua desconhecido, mas a média e a variância dos erros darão a medida de confiabilidade da estimativa.

O problema de se quantificar o erro que se comete quando uma medida é extrapolada vem sendo motivo de investigação por diversos pesquisadores há algum tempo. O estabelecimento de critérios técnicos e geoestatísticos para classificar recursos é uma tônica abordada por diversos autores com o intuito de atender a objetivos específicos e diversos. Dos textos obtidos da literatura, percebe-se uma diferença significativa entre os critérios estabelecidos por cada um, muitos respondendo a aspectos exclusivamente operacionais, o que dificulta a aplicação desses critérios para efeito de inventário mineral de estimativas globais.

Diehl & David (1982) consideram que o conceito de nível de confiança geológica requer uma nova interpretação do erro geoestatístico. A incerteza na estimativa dos parâmetros da jazida é função também das dimensões do bloco, sendo razoável definir não somente os limites superiores do intervalo de risco para cada classe de incerteza, mas também as dimensões do bloco, o que reflete o estágio típico de planejamento associado a diferentes categorias de minério. Existe uma dificuldade na definição dos blocos dentro do corpo de minério para satisfazer às restrições de uma determinada categoria, levando em conta seu volume e a precisão de sua estimativa.

A solução proposta pelos autores é um método interativo. Inicia-se com

a estimativa de um pequeno bloco e, gradativamente, são aumentadas as suas dimensões. Na seqüência, são determinados o volume e a variância de krigagem de cada um e comparados com as restrições relativas ao primeiro (o mais restritivo), classe A. Se tanto o volume quanto o intervalo de confiança (calculado da σ_k^2) satisfazem às restrições, o bloco é classificado na categoria A. Caso o volume do bloco em estudo exceda o limite superior da classe A, sem obter uma precisão suficientemente pequena, o procedimento continua nas condições menos restritivas da classe B, e assim sucessivamente até que o bloco seja, enfim, classificado.

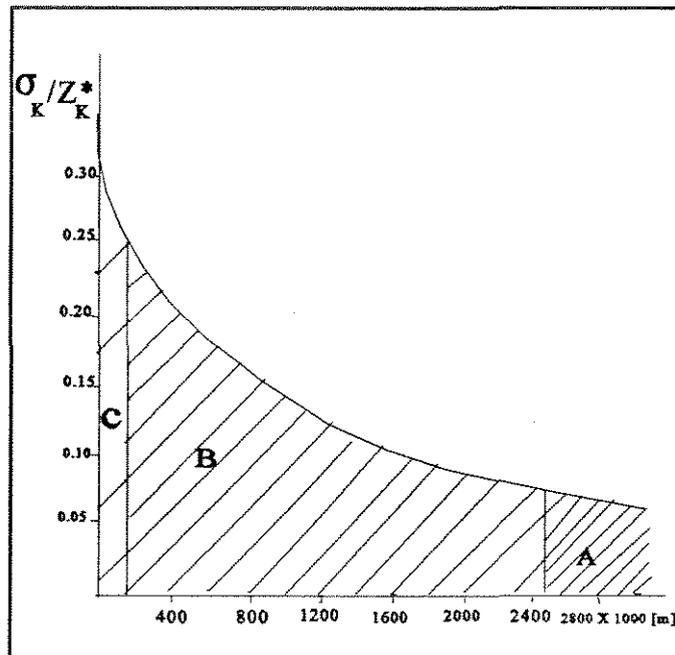


Figura 2: Relação entre precisão e tamanho do bloco
 FONTE: Diehl & David (1982)

Para maximizar a quantidade de minério na classe superior, o procedimento de interação se inicia no ponto que apresenta a melhor precisão (valor baixo para σ_k/Z_k^* do ponto ou de um bloco pequeno). Os passos seguintes se estendem do pequeno bloco inicial onde o seu ponto é definido e segue em crescimento contínuo, perseguindo aquela direção onde o gradiente σ_k/Z_k^* é menor. A figura 2 expressa a relação entre a precisão (relativa ao desvio padrão da krigagem) e o tamanho do bloco para um depósito de fosfato.

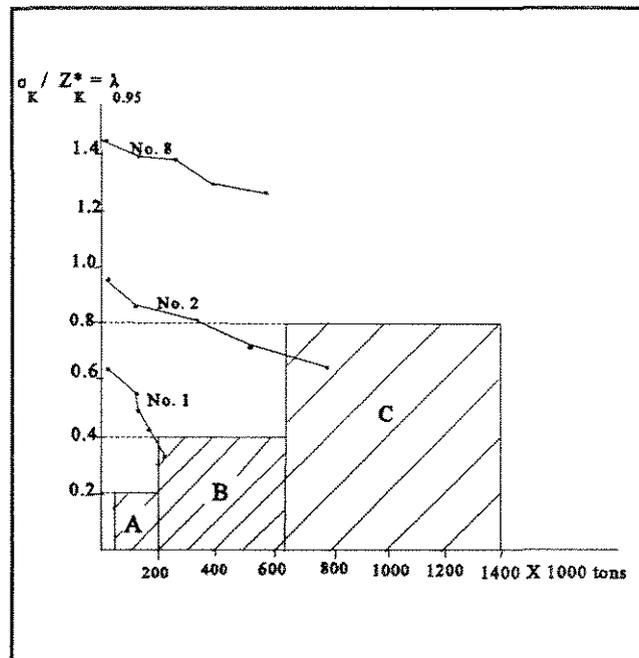


Figura 3: Classificação dos blocos de No. 1 e 2 após cinco interações. O bloco No. 8 não foi classificado.
 FONTE: Diehl & David (1982)

O bloco nº 2 satisfaz as condições da categoria C após cinco interações. O bloco nº 8 não pode ser classificado, pois mesmo depois de cinco interações a sua precisão continua pobre, e continuar aumentando o seu tamanho seria impossível (Diehl & David, 1982).

Froidevaux (1982), por sua vez, considera que, para a geoestatística, a média e a variância do erro permitem avaliar a confiabilidade de uma estimativa de recursos minerais de um depósito. Compara os métodos geoestatísticos com os métodos convencionais de classificação de reservas, em que a zona de influência é fixada arbitrariamente, não refletindo, necessariamente, a especificidade do comportamento da distribuição espacial do depósito mineral, nem oferecendo confiança para se encontrar o erro padrão requerido.

Considera, ainda, que a qualidade de uma estimativa é função de:

- a. a distância entre o volume a ser estimado e o conjunto de informações;
- b. a quantidade, unidade, tamanho e distribuição do conjunto das

informações;

- c. as dimensões e a geometria do volume (V) a ser estimado;
- d. as características do variograma $\gamma(h)$.

Como o grau de confiança geológico depende da malha de sondagem, da extensão do erro, do tamanho do depósito e da natureza da mineralização (variabilidade e continuidade), o citado autor sugere que a partir das curvas tonelagem X teor de corte e teor médio X teor de corte sejam definidos os limites superior e inferior de confiança, obtendo-se para cada teor de corte o nível de confiança (precisão ou erro). Desta forma, são classificados os blocos com até + ou - 15% de erro (precisão) como categoria A e, acima disto, como B (Froidevaux, 1892). A figura 4 apresenta esse procedimento.

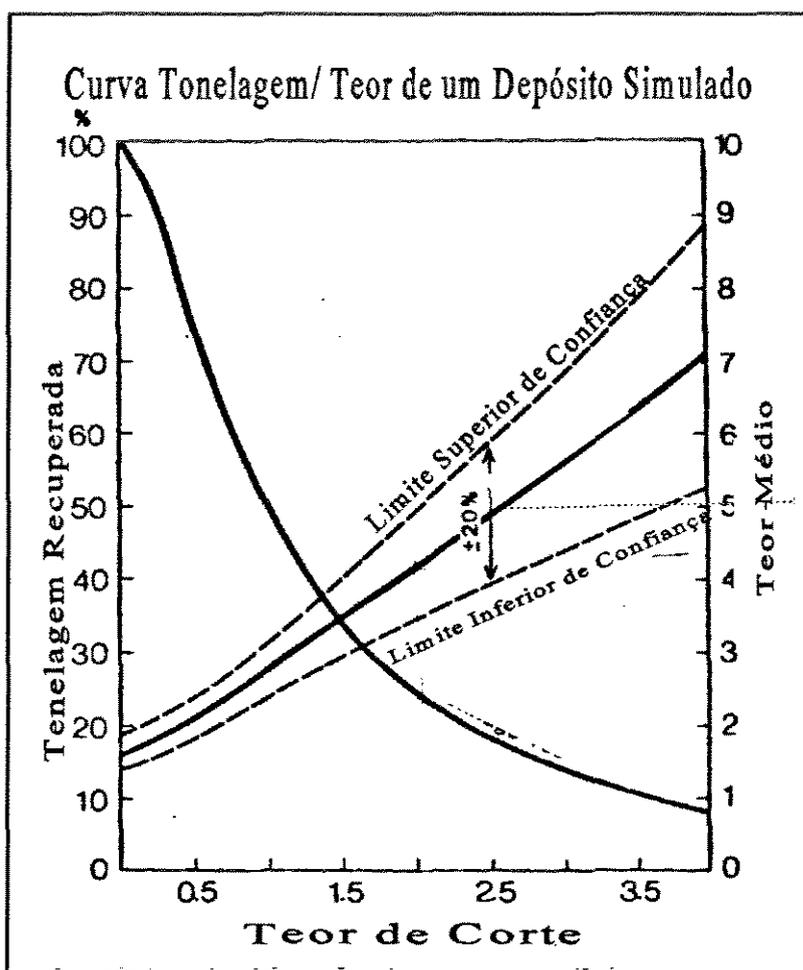


Figura 4: Precisão da estimativa X teor de Corte. Impacto sobre a classificação de reservas.
Fonte: Froidevaux, 1982.

Wober & Morgan (1993) sugerem uma classificação para reservas baseada em parâmetros geoestatísticos e econômicos, buscando identificar, para investidores, analistas financeiros e bancos financiadores, o grau de risco associado com a categoria específica de reserva. A designação das classes identifica o grau de confiança da estimativa para a tonelagem e o teor de um volume da produção anual de minério.



Figura 5: Análise de sensibilidade da expectativa do teor
 FONTE: Wober & Morgan, 1993.

Na figura 5, os autores expressam a análise de sensibilidade da expectativa econômica do teor em que a margem de erro não é fixa. A expectativa econômica é obtida dentro da margem A - C ou dentro da margem D .

Assim, são determinados o risco e a incerteza na tomada de decisão de investimento, os quais são inerentes às próprias reservas minerais, no sentido de se atingir as metas econômicas e os objetivos financeiros anuais. A tabela seguinte (QUADRO 3) mostra as classes propostas onde estão relacionados, além dos objetivos econômicos qualitativos (subjetivos), os níveis de confiança e a margem de erro. Os autores, ao elaborarem um critério de classificação que contemple os níveis de confiança da estimativa

e dos riscos de investimento, confundem os conceitos de recursos e de reservas. A classe B difere da classe A somente no nível de confiança.

QUADRO 3

Classificação Convencional	Classes Propostas	Unidade de Estimativa	Soma Unitária	Nível de Confiança	Erro ±
Provada	Classe A	Volume da Produção Anual	Capital / Payback	95 %	10
	Classe B	Volume da Produção Anual	Capital / Payback	84 %	10 - 15
Provável	Classe C	Global	Capital / Payback	95 %	10 - 15
	Classe D	Global ou Volume da Produção Anual	80% Capital / Payback	84 %	15 - 20
Inferida	Classe E	Prognosticada Superficialmente Limites das Classes A - D		Dados extremamente espaçados : geologicamente contínuos	
Potencial	Classe F	Prognosticada: Ordem de Magnitude		Presença e dimensão de ambiente geológico	

Fonte: Wober e Morgan, 1993.

Sabourin (1983) propõe uma definição para várias categorias de recursos, tendo aplicado métodos geoestatísticos para o caso específico para a mina de carvão linhito de Short Creek, na zona sudeste de Saskatchewan. A proposta adotada classifica quantidades locais em tonelagem (metal contido ou minério), usando limites (KV) da variância de krigagem (σ_k^2) relacionados à variância de distribuição (σ_b^2) dos blocos. Estes limites da variância de krigagem são calculados usando a relação:

$$\sigma_k^2 = K \sigma_b^2 ,$$

em que K é uma constante escolhida arbitrariamente para representar várias categorias de recursos. Os limites KV são definidos no citado trabalho, usando K= 0.2, K=0.4 e K=0.8,

para reservas medida, indicada e inferida, respectivamente. Este método funciona apenas quando σ_k^2 varia proporcionalmente com σ_b^2 para diferentes tamanhos de blocos. O resultado está expresso no Quadro 4.

QUADRO 4
CLASSIFICAÇÃO DE RECURSOS PARA A MINA DE SHORT CREEK

			Bloco 1000 x 1000		Bloco 500 x 500		Bloco 250 x 250	
	MEDIDO	σ_k^2 / σ_b^2	$2 \sigma_{KM}$	0.1280	0.6861	0.1773	0.8313	0.2
	TONELAGEM		69×10^6		76×10^6		81×10^6	
INDICADO	σ_k^2 / σ_b^2	$2 \sigma_{KI}$	0.3469	0.11281	0.3830	0.12219	0.4	0.12664
	TONELAGEM		146×10^6		150×10^6		152×10^6	
INFERIDO	σ_k^2 / σ_b^2	$2 \sigma_{KF}$	0.7820	0.16960	0.7943	0.17598	0.8	0.17910
	TONELAGEM		211×10^6		211×10^6		211×10^6	

Fonte: (Sabourin, 1983)

É uma classificação que assume como critério para classificação dos blocos krigados a relação σ_k^2 / σ_b^2 .

Para efeito de alteração da legislação mineral brasileira, o DNPM (Bases Técnicas para um sistema de quantificação do Patrimônio Mineral Brasileiro, 1992) sugere alternativamente as seguintes categorias para recursos estimados por geoestatística :

Reserva Provada: Calculada por métodos geoestatísticos em que o bloco estimado tenha dimensões pertinentes à escala de produção e proporcionalidade com alcances variográficos e tenha no mínimo uma amostra na auréola de influência, o que equivale a determinar as relações de covariância amostra(s)/bloco, bloco/bloco e amostra(s)/amostra(s).

Reserva Provável: Reserva calculada por métodos geoestatísticos em que o bloco estimado tenha dimensões pertinentes à escala de produção e proporcionalidade com os alcances variográficos e nenhuma amostra em sua área de influência, o que

equivale a atribuir à variância de krigagem do bloco, o valor da variância *a priori* mais o valor covariograma do bloco.

Os parâmetros que norteiam essa classificação sugerida pelo DNPM são interessantes para serem trabalhados. O critério de classificação não estabelece valores fixos para classificar blocos krigados. Entretanto, as quantidades mínimas de amostras na vizinhança de pesquisa, uma para 'provada' e nenhuma para 'provável', podem revelar um nível de confiança pouco seguro para classificar blocos krigados. Os textos acima transcritos para definir reserva 'provada' e 'provável' poderiam definir recursos, dado que a geoestatística em si não entra no mérito da avaliação da economicidade, porquanto aborda apenas as variáveis de incerteza geológica.

Assim, o QUADRO 5 sintetiza de forma comparativa todos os sistemas de classificação de recursos aqui descritos.

QUADRO 5
RESUMO COMPARATIVO DOS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE RECURSOS E RESERVAS POR CRITÉRIOS GEOESTATÍSTICOS

Método de Classificação	Critério Geoestatístico	Nível de Confiança	Ambiente Geológico	Unidade de Classificação	Classes	Observações
Diehl & David	σ_k / Z_k^*	Geológico	Recursos	Bloco	A, B e C	Tamanho Variável dos Blocos
Froidevaux	Teor de Corte & Limites de Confiança	Geológico	Recursos	Global	A, B, C, D, E e F	Seleciona sem Avaliação Econômica
Wober & Morgan	Nível de Confiança	Geológico/ Econômico	Reserva	Global (Produção Anual)	Provada Provável Inferida Potencial	Confunde Recursos com Reservas
Sabourin	σ_k^2 / σ_b^2	Geológico	Recursos	Bloco	Medida Indicada Inferida	Tamanho Variável dos Blocos
DNPM	Quantidade Mínima de Amostras (1 ou 0)	Geológico / Econômico	Reserva	Global (Bloco / Auréola)	Provada Provável	O critério exige poucas amostras

III.3. MODELO ADOTADO PARA CLASSIFICAÇÃO DE RECURSOS E RESERVAS

Nos modelos de classificação consultados, observa-se quase sempre uma pouca precisa distinção conceitual entre 'recursos' e 'reservas'. Como no caso dos recursos o mérito da economicidade é apenas relativo ao aspecto da condição 'potencialmente econômico', a base para a sua classificação deve ser relativa ao nível de confiança geológico. No caso das reservas, a base para a sua classificação deve envolver os parâmetros técnicos e as variáveis econômicas.

De uma forma geral, os depósitos minerais podem ser classificados tanto pela geometria como pela distribuição de teores em simples e complexos conforme a figura 6. Para os casos em que ocorre uma boa continuidade da distribuição do atributo em estudo e uma geometria simples, o uso dos métodos convencionais pode ser feito, ainda que não se quantifique o erro de estimativa (figura 6, segmento A). Para os depósitos onde a distribuição de teores é complexa, o emprego da geoestatística é fundamental. (figura 6, segmento B e segmento C). Com o avanço da geoestatística aliado aos recursos atuais da informática, essas técnicas tornaram-se muito mais recomendadas para qualquer tipo de depósito, independentemente das condições apresentadas.

Outro aspecto importante a ressaltar é que, devido às exigências impostas pela indústria de transformação quanto à qualidade dos insumos de origem mineral, depósitos antes considerados homogêneos, atualmente, não mais o seriam. Depósitos que apresentam, por exemplo, uma certa continuidade nos teores da substância útil agregada podem revelar uma paragénese distinta para elementos nocivos ao beneficiamento. O controle deste tipo de problema também pode ser feito com o uso da geoestatística.

Independentemente da geoestatística poder ser aplicada na maioria dos casos, existindo métodos distintos para a estimativa de recursos, devem também ser distintas as classificações para os seus resultados.

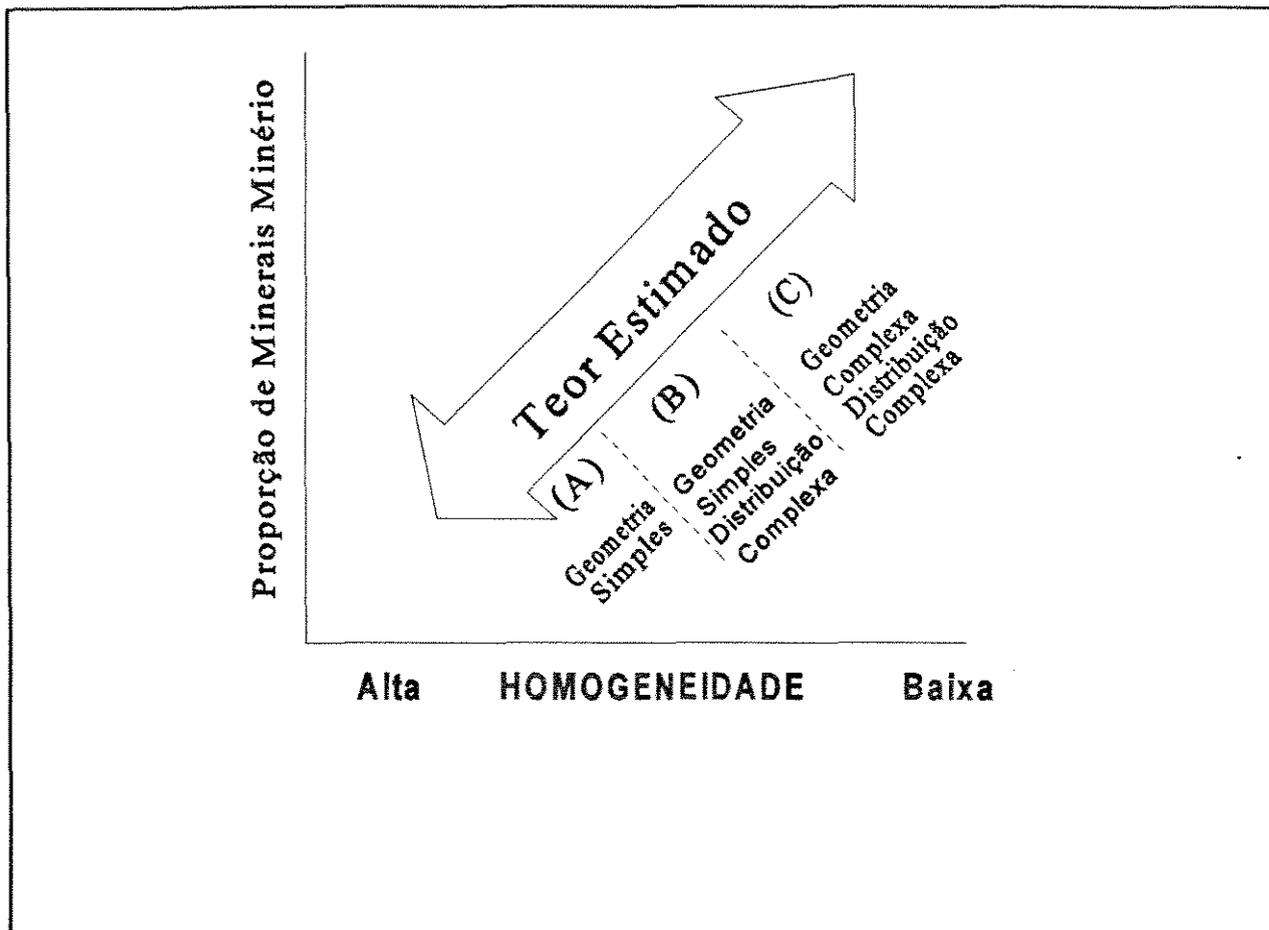


Figura 6: Diagrama da Homogeneidade dos depósitos X proporção de minerais-minério
 Fonte: Carras, 1987 (simplificado pelo autor)

Assim, pode-se definir uma classificação determinística, para recursos estimados por métodos convencionais, os quais não permitem quantificar os erros de cubagem. Nesses casos, classificar-se-iam os recursos em medidos, indicados e inferidos, pois, pela confiabilidade geológica que supostamente justificou o emprego do método (polígono ou inverso da distância), teriam tais termos um sentido mais adequado à expressão conceitual. Isto por tais métodos não considerarem a variabilidade dos teores para efeito de influência das amostras, mas sim a mera extrapolação do atributo. A outra conceituação seria de conteúdo probabilístico, em que os recursos estimados por métodos geoestatísticos seriam subdivididos em recursos provados, prováveis e possíveis. Essa denominação para as classes seria mais apropriada para esses casos, em virtude do método permitir quantificar a probabilidade de incerteza do cálculo, através da variância

de estimativa.

Desta forma, o sistema de classificação aqui adotado baseia-se, em parte, no modelo australiano e no proposto pelo documento do DNPM (Bases para um sistema permanente de quantificação do Patrimônio Mineral Brasileiro, 1992), incorporando alguns conceitos de Jeffrey (1987). Duas categorias para recursos são adotadas: uma classificação determinística e outra probabilística. Para a classificação probabilística, o critério adotado baseia-se na sugestão do DNPM, com modificações no número mínimo de amostras nas auréolas de influência para proporcionar uma maior confiabilidade.

Na conversão dos recursos em reservas, é assumido o conceito de reserva-base do empreendimento. No caso das classes de reservas, adotaram-se como critério de diferenciação, exclusivamente, as variáveis econômicas e os parâmetros técnicos de lavra. O diagrama apresentado no Quadro 6 sintetiza, de uma maneira geral, a concepção e as sub-divisões do sistema para recursos e reservas. Para os casos de quantificação de depósitos por métodos convencionais, seria definida a classificação determinística, sendo os recursos classificados como Medidos, Indicados e Inferidos, tendo-se:

I - Recurso Medido: a tonelagem de minério computado pelas dimensões reveladas em afloramentos, trincheiras, galerias, trabalhos subterrâneos e sondagens, e na qual o teor é determinado pelos resultados de amostragem pormenorizada, devendo os pontos de inspeção, amostragem e medida estar tão proximamente espacejados e o caráter geológico tão bem definido que as dimensões, a forma e o teor da substância mineral possam ser perfeitamente estabelecidos, a tonelagem e o teor computados rigorosamente determinados dentro dos limites estabelecidos, os quais não devem apresentar variação superior, ou inferior a 20% (Vinte por cento) entre duas metodologias de cálculo;

QUADRO 6

PROPOSTA DE ESTRUTURA DE CLASSIFICAÇÃO DE RECURSOS E RESERVAS

Nível Crescente de Confiança Geológica e Técnica



Recursos Identificados	Econômicos	VIÁVEIS	DEMONSTRAÇÃO DA EXEQÜIBILIDADE		RESERVA BASE		RESERVA LAVRÁVEL	RESERVA RECUPERÁVEL	
			INDICAÇÃO DA EXEQÜIBILIDADE		RESERVA BASE				
	Potenciais	Quantificados	Classificação Probabilística	Possível	Provável	Provado			
			Classificação Determinística	Inferido	Indicado	Medido			
	Sub-Econômicos	Marginal							
Sub-Marginal									
Não Ident.	HIPOTÉTICOS								
	ESPECULATIVOS								

Risco de Investimento Decrescente

FONTE: McKelvey (*apud* GOVETT & GOVETT, 1974)(Modificado pelo autor)

II - Recurso Indicado: a tonelagem e o teor de minério computados parcialmente de medidas e amostras específicas, ou de dados da produção e parcialmente por extrapolação até distância razoável com base em evidências geológicas;

III - Recurso Inferido: estimativa feita com base no conhecimento dos

caracteres geológicos do depósito mineral, havendo pouco ou nenhum trabalho de pesquisa.

Quanto aos recursos estimados por métodos geoestatísticos, adotou-se a seguinte classificação:

i. Recurso Provado: Calculado por métodos geoestatísticos em que o bloco estimado tenha dimensões pertinentes à estimativa de escala de produção (Unidade de Seletividade Mineira) e as dimensões da vizinhança de pesquisa guardem proporcionalidade com alcances variográficos, tendo no mínimo quatro amostras na primeira auréola de influência, determinando as relações de covariância amostra(s) / bloco, bloco / bloco e amostra(s) / amostra(s), ou a variância de krigagem do bloco como correspondente ao limite superior da classe;

ii. Recurso Provável: Calculado por métodos geoestatísticos em que o bloco estimado tenha dimensões pertinentes à estimativa da escala de produção (Unidade de Seletividade Mineira) e as dimensões da vizinhança de pesquisa guardem proporcionalidade com os alcances variográficos, tendo no mínimo duas amostras em sua segunda auréola de influência, atribuindo a variância de krigagem do bloco como limite superior da classe;

iii. Recurso Possível: Calculado por métodos geoestatísticos em que o bloco estimado tenha dimensões pertinentes à estimativa da escala de produção (Unidade de Seletividade Mineira) e as dimensões da vizinhança de pesquisa guardem proporcionalidade com os alcances variográficos, tendo no mínimo uma amostra em sua terceira auréola de influência.

No caso das Reservas Minerais, essas são determinadas a partir da conversão dos recursos geológicos no momento em que se estuda a exeqüibilidade técnico-econômica. Se esse estudo for feito no Relatório final de Pesquisa, deve ser apenas 'indicativo', pois os seus parâmetros técnicos e variáveis econômicas serão estimados, no âmbito do Projeto Conceitual da Lavra. Quando se tratar do Plano de Aproveitamento Econômico, o estudo de exeqüibilidade terá um caráter 'demonstrativo', pois nesta etapa da avaliação as variáveis e parâmetros técnicos e econômicos já envolvem o nível de dimensionamento do Projeto Básico de engenharia.

Como, corretamente, a prática mineira não recomenda a inclusão de

material classificado como "possível" na determinação de reservas, estas passariam a ter as seguintes definições:

iv. Reserva Base: é derivada de recursos geológicos, estimados por métodos geoestatísticos ou convencionais, usando somente material contido dentro do universo das categorias de recursos 'provados' e 'prováveis', ou de 'medidos' e 'indicados', para indicação da exeqüibilidade, em que o teor de corte seja determinado a partir do fluxo de caixa do projeto. No caso da demonstração da exeqüibilidade, seriam incluídos apenas os recursos 'provados' ou 'medidos'.

v. Reserva Lavrável: É a reserva *in situ* considerada dentro de uma determinada área da jazida minerável (através de um determinado método de lavra), estabelecida dentro do perímetro da unidade mineira determinado pelos limites da abertura de exaustão (cava ou flanco para céu aberto e realces ou câmaras para subsolo).

vi. Reserva Recuperável: É a reserva *in situ* estabelecida dentro do perímetro da unidade mineira determinado pelos limites da abertura de exaustão (cava ou flanco para céu aberto e realces ou câmaras para subsolo), excluindo os pilares de segurança e as zonas de distúrbios geo-mecânicos, além do minério localizado fora dos referidos limites da área a ser minerada. É a reserva da mina prevista efetivamente para alimentar a usina de beneficiamento, levando em consideração as perdas com gerações de finos, mistura com material estéril ou diluição (contaminações do minério pelo estéril) decorrentes do método de lavra com a conseqüente geração de renda (receita). É o minério que, efetivamente, gerará o concentrado a ser comercializado.

A figura 7 sintetiza a proposição global para classificação de recursos e reservas.

CLASSIFICAÇÕES DE RECURSOS E DE RESERVAS

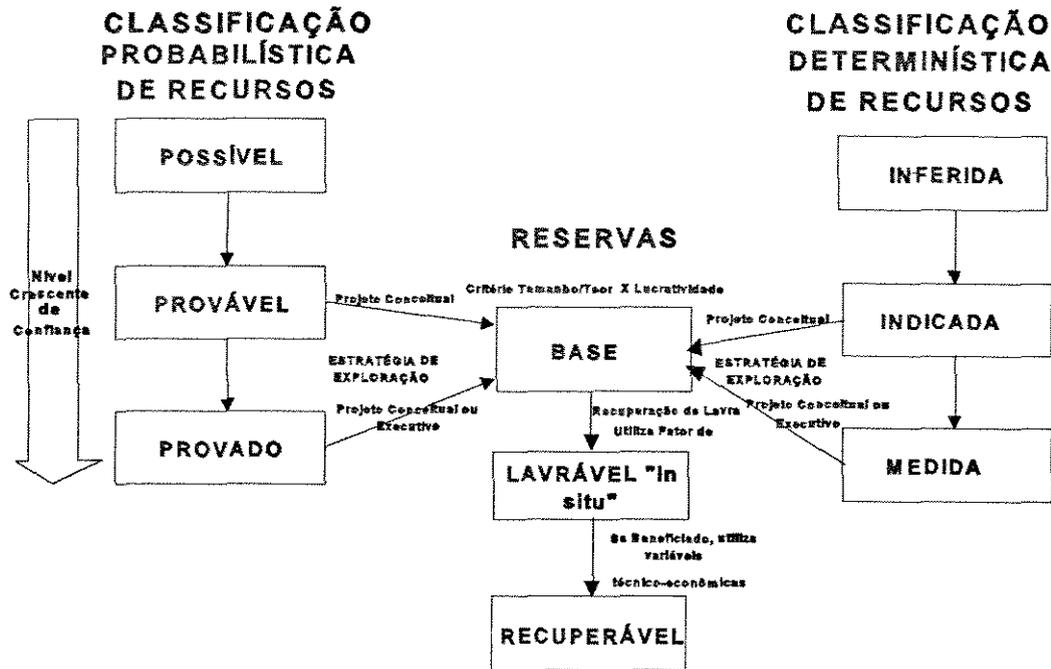


Figura 7: Modelo adotado para classificar recursos e reservas
 FONTE: Resources and Reserves Symposium, AIMM : Sydney, 1987. (Modificado pelo autor)

CAPÍTULO IV

AVALIAÇÃO TÉCNICO- ECONÔMICA DE DEPÓSITOS MINERAIS

Neste capítulo, são discutidas as fases de elaboração de um projeto de viabilidade de lavra e os aspectos referentes à cada uma dessas fases. Caracteriza-se a distinção entre a 'indicação' de exeqüibilidade de lavra e a 'demonstração', desenvolvendo critérios técnico-econômicos necessários para a conversão de recursos em reservas minerais.

IV. AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE DEPÓSITOS MINERAIS

Segundo Goode et alli (1991), o estudo de exeqüibilidade de lavra determina a viabilidade econômica de um projeto, no seu nível de exatidão ou margem de segurança requerida para a tomada da decisão de se investir. As análises econômicas, usualmente, incluem o cálculo do desconto do fluxo de caixa. Os componentes-chave do fluxo de caixa, por sua vez, são o custo de capital do projeto, o custo operacional, o projeto de engenharia, a escala de produção, os preços dos produtos e o detalhe financeiro. No caso da indústria mineral, a estimativa de reserva é de fundamental importância para todo o cálculo do valor da mina, sobretudo quando se relaciona à escala de produção, determinando, assim, a vida útil do empreendimento.

O desenvolvimento do estudo sobre o aspecto comercial de um depósito mineral, invariavelmente, requer o investimento de capital na preparação da jazida para a lavra. Portanto, sempre será necessário demonstrar para o investidor do capital que a produção de uma *commodity* vendável é tanto 'exeqüível tecnicamente', quanto 'viável economicamente'.

IV.1. FASES E ASPECTOS DO PROJETO DE VIABILIDADE DE LAVRA

O objetivo de qualquer empreendimento é a maximização do lucro a longo prazo. No caso de uma empresa de mineração, esse prazo é determinado pela vida útil da mina, que variará em função da escala de produção e dos valores da reserva mineral. Estes parâmetros são determinados a partir da elaboração do projeto para o empreendimento, detalhado por fases e em cada uma das fases são realizados os estudos de viabilidade. Esses estudos contribuem na decisão de se continuar investindo no projeto ou se o mesmo deve ser descartado.

IV.1.1. Aspectos da Viabilidade de Lavra

Conceitualmente, considera-se que o estudo de viabilidade pode ser classificado da seguinte forma:

i. Viabilidade Técnica: Determinada pelas condições topográficas, climáticas, geológicas, estruturais, pelo tipo de jazida e tamanho, dificuldades de lavra e processamento;

ii. Viabilidade Econômica: a operação paga os custos de lavra e de processamento, remunerando o capital investido e tornando o empreendimento rentável;

iii. Viabilidade Financeira: determinada pelas condições de financiamento impostas pelo mercado e pela possibilidade de associações empresariais (ex.: *joint ventures*);

iv. Viabilidade Imponderal: aqueles elementos imensuráveis de um projeto (Impactos ambientais, sociais, políticos etc).

A necessidade de avaliação do conjunto desses elementos varia de caso a caso, podendo interferir em maior ou menor grau no estudo da exequibilidade econômica de lavra do depósito mineral . Cada um dos aspectos citados encontra-se presente nas diversas fases de avaliação de aproveitamento de um depósito mineral. Para cada condicionamento técnico há uma condição econômica associada, desenvolvendo um resultado de conteúdo físico sob determinadas restrições ou permissões de ordem jurídica. O QUADRO 7 apresenta a relação entre os ambientes

técnico-econômicos dentro do processo de avaliação da viabilidade de lavra de depósitos minerais.

QUADRO 7
AMBIENTES TÉCNICO - ECONÔMICOS

AMBIENTE LEGAL	AMBIENTE GEOLÓGICO	AMBIENTE ECONÔMICO	AMBIENTE DE ENGENHARIA
Relatório Final de Pesquisa	RECURSO	Coleta Dados	
			Projeto Conceitual
Plano de Aproveitamento Econômico	RESERVA BASE	Estudos Preliminares	
	RESERVA LAVRÁVEL		Ante-Projeto
		Pré-Viabilidade	
	RESERVA RECUPERÁVEL	Viabilidade/ Exequibilidade	
			Projeto Executivo

Fonte: Bases Técnicas de Um Sistema de Quantificação do Patrimônio Mineral Brasileiro - Estudos de Política e Economia Mineral - DNPM/MME, 1991 (adaptado pelo autor).

Pelo quadro, considera-se que a conversão dos recursos minerais para a reserva base ocorre ainda na fase final da pesquisa mineral, a partir da elaboração do projeto conceitual da mina, e com base em estudos preliminares de mercado. As reservas lavrável e recuperável só seriam definidas com o Plano de Aproveitamento Econômico (P.A.E.).

IV.2. PARÂMETROS TÉCNICOS NA DEFINIÇÃO DA LAVRA

Após a fase de interpretação geológica e da definição (quantificação) dos recursos, a fase de elaboração do projeto determinará os parâmetros técnicos operacionais que interferirão de forma decisiva na economicidade do depósito. A definição do método de lavra é a primeira medida nesta fase.

Os métodos de lavra variam em sua capacidade de minimizar o efeito diluição, através da lavra seletiva de material que apresente teor economicamente aceitável. Em termos gerais, uma mineração menos dispendiosa é menos seletiva. Sob esse ponto de vista, pode ser uma falsa economia a escolha de um método de lavra simples, por ser menos dispendioso. O custo adicional de um método de lavra mais dispendioso poderá ser compensado com a receita adicional proporcionada pela boa seletividade dos teores.

Os fundamentos econômicos da mineração são os custos, que são determinados pela quantidade de massa lavrada e processada, e a receita determinada pela massa da substância útil agregada produzida (metal contido, por exemplo). Esses dois fatores, custos e receita, estão relacionados ao teor do minério, que determinará, em última instância, a lucratividade do empreendimento.

Para as estimativas de recursos por geoestatística, pode-se subdividir o depósito em blocos. A definição desses blocos é estabelecida obedecendo à proporcionalidade dos alcances variográficos. As dimensões do bloco de krigagem, entretanto, não necessariamente serão as mesmas dimensões dos blocos de lavra, também conhecidos por unidade de seletividade mineira (S.M.U.), mas preferencialmente tais dimensões devem guardar também alguma proporcionalidade com relação à dimensão dos blocos utilizadas na estimativa.

A S.M.U. é a unidade mínima de lavra em que é possível realizar a separação entre o minério e o estéril, sendo o parâmetro geométrico para se avaliar se o seu conteúdo é rentável ou não. Na determinação das dimensões da S.M.U., deve-se observar a espessura das lentes ou dos corpos mineralizados, determinando a provável altura da bancada, que deve ser compatível com a escala de produção da mina. Também no processo de modelamento da lavra, deve-se levar em consideração o grau de seletividade do minério na lavra. Quanto menores forem as dimensões da S.M.U., mais seletiva ela o será, tomando-se, no entanto, mais dispendiosa a lavra. A diluição do minério pelo estéril sempre ocorre, em maior ou menor grau, a depender do nível de seletividade inerente ao método de lavra escolhido e aos parâmetros a ele relacionados.

Quando observado nessa perspectiva, a diluição pelo estéril torna-se um fator econômico relevante. A diluição faz crescer a tonelagem e os custos, e diminuir o teor do minério e conseqüentemente a receita. Assim, é importante proceder a um

apropriado desconto para a diluição, quando se estiver estabelecendo o teor lavrável, e é importante considerar também o efeito diluição, quando se estiver estabelecendo o método de lavra, para que este seja o suficientemente seletivo e minimamente dispendioso.

Do ponto de vista prático, é inevitável que algumas partes da própria reserva lavrável sejam descartadas durante a lavra. É inevitável também que algum material estéril seja lavrado como minério. As quantidades de minério não recuperado e de minério diluído pelo estéril devem ser tomadas dentro do contorno da reserva lavrável, mas não da reserva recuperável.

Em diversas situações, a experiência sugere que muitas operações mineiras incorram num nível significativamente mais alto de diluição do teor da lavra em relação ao que fora estimado no projeto de lavra. Frequentemente, a diluição é definida arbitrariamente, como uma percentagem das reservas *in situ*, quando o mais correto seria defini-la pelo cálculo de quanto representa o volume da porção estéril na massa mineralizada.

No âmbito de elaboração do Projeto Conceitual, entretanto, por não se ter detalhado o projeto básico de engenharia, não necessariamente têm de ser definidos os parâmetros operacionais e de lavra, tais como diluição, ângulo de talude, área mínima operacional, altura de bancos etc. A definição do método de lavra e a relação de mineração podem ser suficientes para determinação das variáveis econômicas para o fluxo de caixa nesta fase da avaliação. Essas variáveis são, na verdade, os custos de extração de minério, de remoção de estéril e de beneficiamento, se for o caso. No âmbito do projeto conceitual, para efeito de conversão de recursos em reservas, muitas vezes estes custos são estimados genericamente ou a partir da experiência de lavra de depósitos que apresentem similaridades.

IV.2.1. O Método de Lavra e a Relação de Mineração Limite

Os custos unitários representam a forma contábil de se estabelecer a relação entre a despesa geral da atividade produtiva e a correspondente quantidade produzida. Na mineração, além de se fazer o cálculo do custo unitário geral de lavra e beneficiamento, é recomendável que ele seja desdobrado em outros componentes, sobretudo se a empresa possui um nível maior de complexidade no seu processo de

produção e inclusive para garantir o melhor planejamento e execução das atividades de lavra.

Assim, o controle individualizado de custos unitários de produção de minério (Ca), de remoção de estéril (Ce) e de beneficiamento (B) torna-se fundamental para se garantir o necessário acompanhamento do nível de economicidade do empreendimento mineiro e a melhor utilização do depósito.

Em função do método de lavra (céu aberto ou sub-solo e suas variações) deve-se estimar na fase de indicação da exeqüibilidade, os custos de produção de minério para a lavra a céu aberto (Ca) e para a lavra subterrânea (Cs).

Um controle efetivo desses custos será determinante na definição do que será lavrado e do que efetivamente será aproveitado, ou seja, o que de fato será enviado à usina ou o que irá para o "bota-fora".

Vale ressaltar que a determinação detalhada dos custos exige diversas decisões complexas e o seu controle também representa um custo.

O critério para decidir se a lavra será a céu aberto ou subterrânea deve tomar por base o cálculo da relação de mineração limite ou relação estéril/minério.

A Relação de Mineração Limite (RML) define o valor máximo da porção de estéril a ser removida em relação à de minério a ser lavrada, e que tornará a lavra a céu aberto mais atrativa que a lavra subterrânea, sem assegurar, entretanto, a economicidade da própria lavra. Assim, a relação de mineração limite é dada pela expressão matemática:

$$RML \geq \frac{Ca - Cs}{Ce}$$

IV.2.2. Estudo de Preço e de Mercado

O preço do produto é, normalmente, das variáveis mais importantes no estudo de avaliação da exeqüibilidade, embora a previsão do seu comportamento futuro

apresente sempre um razoável grau de incerteza. Muitas vezes, o mercado é dependente de fatores não-prognosticáveis. O estudo de mercado deve determinar qual a direção que deverão tomar os preços dos produtos, a sua demanda e a sua oferta, possibilidades de oligopolização, fatores artificiais de mercado determinados por políticas governamentais etc.

A seleção do preço de venda é, por outro lado, muito significativa no cenário de definição de parâmetros econômicos e até mesmo físicos no estudo da exeqüibilidade de lavra, particularmente no estabelecimento do teor de corte para o planejamento da mina.

O método comumente praticado é aquele em que se assume o preço corrente na ocasião da avaliação. Isto, no entanto, não significa afirmar que seja o procedimento mais correto para seleção do preço a ser projetado ao longo da vida útil do empreendimento. Considerando ser o preço a variável mais significativa na determinação da lucratividade futura, a previsão do seu comportamento a jusante no tempo deve ser baseado numa análise racional da relação oferta /demanda.

Os modelos econométricos previsionais são a ferramenta desenvolvida para determinação do comportamento futuro dos preços e mercados. Esses modelos são desenvolvidos, normalmente, por análise de regressão a partir de séries históricas, projetando o seu comportamento futuro. Regressões lineares simples relacionando preço x tempo são utilizadas em muitos casos. Para casos mais complexos é recomendável promover uma regressão linear múltipla, em que variáveis independentes como PIB, renda *per capita*, produção entram no cálculo para definição do próprio preço.

IV.3. A CONVERSÃO DE RECURSOS EM RESERVAS MINERAIS

IV.3.1. Os Conceitos de Indicação e de Demonstração da Exeqüibilidade de Lavra

A diferença entre 'indicação' e 'demonstração' da exeqüibilidade de lavra foi introduzida no vocabulário corrente do setor mineral brasileiro como sugestão do DNPM para alteração da legislação mineral, conforme mencionado no Capítulo II. A proposta adota o termo 'indicação' para a definição de perspectivas razoáveis de aproveitamento econômico, ou seja, a condição potencialmente econômica dos

recursos minerais quantificados. Isto ocorreria na fase de relatório final de pesquisa, quando então não seriam ainda definidas quaisquer reservas minerais. A 'demonstração' seria feita na ocasião de elaboração do Plano de Aproveitamento Econômico.

Após a confirmação da descoberta de um depósito mineral, os métodos para a sua avaliação podem ser vistos como um processo sistemático conduzindo para o estudo de viabilidade econômica. O estágio da definição do depósito mineral requer o uso sistemático de métodos de pesquisa mineral e de amostragem para definir a zona mineralizada. Neste estágio, as informações para a estimativa dos recursos podem ser tratadas por métodos convencionais, mas, preferencialmente, deve-se fazer uso da geoestatística, que permite, como discutido no Capítulo II, determinar o seu erro através da variância de estimativa.

O estudo de viabilidade ou de exeqüibilidade técnico-econômica para desenvolvimento de uma mina com uma recomendável confiabilidade é essencial para suportar a decisão de realizar ou não a lavra. É somente nesse estágio que são definidas as reservas.

Na etapa de Relatório Final de Pesquisa, por não se ter o Projeto Básico de engenharia, mas apenas o Projeto Conceitual, os parâmetros técnicos e as variáveis econômicas apresentam um nível de incerteza maior e então só é possível ser feita a 'indicação' da exeqüibilidade de lavra. Na etapa de elaboração do Plano de Aproveitamento Econômico, o processo permite um conhecimento quantitativo maior dos parâmetros técnicos, associado a uma margem de risco menor, mas suficientemente pequena que possibilite a 'demonstração' da exeqüibilidade de lavra.

Para a indicação ou para a demonstração da exeqüibilidade deve-se sempre levar em conta a previsão de um fluxo de caixa obtido a partir da técnica de melhor estimativa de cada variável envolvida e proporcionado pelo desenvolvimento da futura mina. Aqui, entende-se o fluxo de caixa como uma base econômica, em que o 'valor do dinheiro no tempo' é levado em consideração para determinação do teor de corte.

O desenvolvimento de uma metodologia para determinação do teor de corte, aplicável a jazidas que apresentem uma heterogeneidade qualitativa quanto à distribuição espacial da substância útil agregada na composição do seu minério, deve objetivar a determinação dos teores que apresentam os melhores resultados no fluxo

de caixa de um empreendimento mineiro. Para tanto, deve ser considerada a expectativa de retorno do investidor em relação ao provável aproveitamento econômico do respectivo depósito. Assim, estar-se-á atribuindo a uma determinada porção dos recursos geológicos (estimados, por exemplo, por métodos geoestatísticos) o *status* de 'reservas'. Aí reside a distinção entre o conceito de recursos minerais (potencialmente econômico) e o conceito de reservas minerais viáveis economicamente, ainda que essa viabilidade guarde consigo uma margem de incerteza. Numa fase de projeto conceitual, quando o procedimento de avaliação permite evoluir até a indicação da exeqüibilidade de lavra, o fato de se definir minimamente critérios técnicos de engenharia que permitam a determinação de um valor a uma porção quantificada de recursos, caracteriza a sua conversão em reserva. Essa reserva seria então considerada como 'base' para o detalhamento do próprio projeto de engenharia do empreendimento na fase de elaboração do Plano de Aproveitamento Econômico. Com o detalhamento do aspecto técnico-econômico, definem-se as demais categorias de reservas (lavrável ou recuperável). Na 'demonstração' da exeqüibilidade há também o seu nível de incerteza. Uma variação brusca no preço de uma substância pode inviabilizar um projeto, mesmo que tenha sido "demonstrada" a sua viabilidade.

IV.3.2. Fluxo de Caixa

O Fluxo de Caixa relativo a um lapso de tempo, normalmente anual, corresponde à diferença entre todas as receitas e despesas, ou seja, a todas as entradas e saídas de caixa verificadas ao longo da vida útil do empreendimento, sendo determinada pela relação entre a reserva estimada e a escala de produção prevista para a mina. Assim, o fluxo de caixa anual poderá ser definido segundo a origem dos recursos a serem investidos (próprios ou de terceiros) e deve ser calculado sempre antes e após a incidência do imposto de renda.

A análise do desconto do fluxo de caixa, como uma tarefa de avaliação, consiste em desenvolver um modelo matemático do projeto, tal que a sua sensibilidade para mudanças técnicas, econômicas e financeiras seja o critério a ser avaliado.

Tendo sido desenvolvido tal modelo, é necessário quantificar a viabilidade do projeto, sob determinadas condições, como uma oportunidade de investimento em relação a outros projetos ou alternativas conflitantes ou mutuamente

excludentes. Os métodos usados para essa comparação variam muito, mas aqueles que consideram o valor tempo do dinheiro são os mais comuns. Geralmente, os procedimentos usuais levam em conta a análise do desconto do fluxo de caixa em relação à taxa interna de retorno do fluxo de caixa descontado (TIR), ou quanto ao valor atual (V.A.) ou ainda, em termos de V.A.E.. Esses métodos proporcionam uma avaliação que é facilmente comparada às alternativas de investimento.

No fluxo de caixa, para uma determinada escala de produção, deve-se considerar que a reserva será lavrada e o minério extraído da mina alimentado numa usina de beneficiamento. O seu produto, o concentrado, será comercializado pelo seu conteúdo, quando são conhecidas as entradas de caixa. As saídas de caixa são verificadas em cada etapa do processo produtivo.

Para as saídas de caixa, é importante saber quanto representam os valores do custo de capital e do custo operacional em cada etapa do ciclo produtivo. Os custos de capital são as despesas referentes ao pagamento do investimento. Neste caso, as despesas de capital incluem gastos relativos à implantação do projeto, desenvolvimento permanente, aquisição de equipamentos e capital de giro, necessários para manter a produção. Toda a despesa, *a priori*, está relacionada à ocasião em que foi definido o teor de corte.

Por outro lado, como já foi dito, os custos operacionais são os relativos às despesas diretas e indiretas com a lavra, o beneficiamento, o refino e a comercialização.

Quanto às entradas do fluxo de caixa, a principal é relativa à receita proveniente da venda do produto e é determinada pela cotação do preço no mercado consumidor da substância útil contida no concentrado e pela escala de produção.

IV.3.2.1. Taxa Mínima de Atratividade do Investidor (r_{\min})

É o índice adotado como política geral da empresa, mediante a comparação com outros investimentos já realizados em que já são conhecidos os benefícios, a rentabilidade e os riscos envolvidos. Uma empresa pode adotar taxas mínimas de atratividade diferentes para diferentes projetos com riscos distintos.

IV.3.2.2. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A taxa interna de retorno (TIR) pode ser definida como a taxa de desconto que iguala o valor atual das entradas ao das saídas de caixa, ou seja, a taxa que anula o valor atual.

No critério do valor atual são conhecidos os fluxos de caixa e a taxa mínima de atratividade, e busca-se calcular o próprio valor atual. No critério da TIR, ao se conhecer os fluxos de caixa, busca-se calcular o valor particular da taxa de descontos que anula o VA.

IV.3.2.3. Valor Atual (V.A.) Valor Anual Equivalente (V.A.E.) e Benefício Líquido (B.L.)

No planejamento de lavra, seja na fase inicial de definição do aspecto projeto conceitual ou já na fase de implantação, seja na sua fase operacional, é necessário observar alguns elementos ou parâmetros básicos que interferem no próprio desenvolvimento do empreendimento, os quais, se observados de forma integrada, podem determinar o nível de economicidade ou mesmo de viabilidade da mina.

O Valor Atual, calculado a uma determinada taxa **K** na data zero da distribuição do fluxo de caixa de um projeto, representa o valor máximo a ser pago pela jazida àquela taxa, ou seja:

$$V.A. = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1 + K)^t} - I$$

V.A.: Valor Atual a ser pago pela jazida

I: Investimento

R_t: Fluxo de Caixa Anual Gerado pelo Projeto

n: Vida Útil do Projeto

K: Taxa de Desconto

No caso do V.A.E. o seu cálculo consiste em transformar a distribuição do fluxo de caixa em uma série periódica uniforme equivalente de duração igual à sua vida útil.

Em termos de planejamento operacional de uma mina, o Benefício

Líquido (BL) da produção (P) corresponde à diferença entre o valor de venda da produção beneficiada e as suas despesas de produção, não se levando em conta, obviamente, o valor do dinheiro no tempo.

$$BL = P \cdot r (p - C)$$

onde,

BL : Benefício Líquido

P: Produção (tonelagem)

r: recuperação (%)

p: Preço de venda

C: Despesas gerais.

É o VPL, portanto, que determinará o que será lavrado e assim a lavra só ocorrerá se o bloco gerar um $VPL \geq 0$.

IV.4. CRITÉRIO DO TAMANHO E DA RENTABILIDADE MÍNIMOS ACEITÁVEIS NA SELEÇÃO DA RESERVA BASE DO EMPREENDIMENTO

A hipótese básica deve partir da estimativa de recursos (provado +provável), em que o teor de corte assumido para a sua definição é o teor de corte geológico, exclusivamente. Não se recomenda incluir os recursos classificados como 'possíveis', dado o grau de incerteza sobre a sua estimativa. Além disso, o investidor deve ter definida qual a receita global prevista a ser gerada com a lavra do depósito. Outro parâmetro econômico importante é a previsão do montante de capital a ser investido no empreendimento. Esse montante é determinado pela capacidade nominal de produção prevista, com o que se estabelece a escala efetiva de produção anual e conseqüentemente a vida útil da mina. Esse procedimento é realizado para cada quantidade parametrizada de recursos (provado + provável), associada a vários teores de corte.

Um depósito econômico é definido pelo seu tamanho mínimo aceitável e pelo critério de rentabilidade. O tamanho mínimo assegura que as oportunidades de desenvolvimento são suficientemente grandes para propiciar uma contribuição significativa para a *performance* da empresa como um todo. O tamanho pode ser

medido pela de 'receita global' obtida com a venda do produto da lavra, a qual representa a medida do tamanho mínimo. A condição de rentabilidade mínima é determinada pelo custo de capital da empresa e pode ser medida pela taxa interna de retorno, segundo Mackenzie (1983).

Dada a ordem de magnitude dos custos e do preço dentro do ambiente a serem estimados sobre uma base de informações disponíveis e de experiência passada, a tarefa é avaliar as combinações possíveis do tamanho do depósito e do teor do minério que satisfaçam as condições mínimas para definir um depósito econômico. Essas condições mínimas aceitáveis podem ser consideradas como uma função da localização do depósito e em relação às condições infraestruturais, ou como uma função do preço, ou, até mesmo, como função de outra variável de incerteza importante específica.

Para se estabelecer um critério que leve em conta um depósito com tamanho e rentabilidade aceitáveis, o ponto inicial é definir o que a companhia de mineração considera como um depósito econômico. Em geral, um depósito econômico é definido como aquele que possui uma quantidade de minério mínima que satisfaça um determinado critério de rentabilidade. O tamanho é medido pela receita global obtida com a lavra do depósito. As condições de rentabilidade mínima são determinadas pelo custo de capital da empresa, ou seja na condição particular da $TIR = r_{min}$.

O procedimento a ser seguido para determinação das condições mínimas aceitáveis para o tamanho toma por base que a receita global (RG) deve ser maior ou igual do que a receita mínima esperada pelo investidor (Y) a partir da seguinte equação:

$$RG \geq Y$$

$$RG = T \cdot Gt \cdot R \cdot P$$

de **RG** : Receita Global(restrição econômica determinada pela estratégia de investimento da empresa)

T: Tonelagem do depósito (variável independente)

Gt: Teor Médio para um Depósito de Tamanho Mínimo Aceitável

R: Recuperação Metalúrgica

P: Preço

médio mínimo(G_m), definido pelo ponto de cruzamento das duas curvas citadas, ou seja, a situação particular em que $G_t = G_r$ (Figura 8).

Feita a seleção do teor médio mínimo, pode-se conhecer o teor de corte pelo valor correspondente observado nas curvas de parametrização. Com os valores de massa mineralizada e teor médio, calcula-se o fluxo de caixa propriamente dito, determinando-se o valor atual e a TIR.

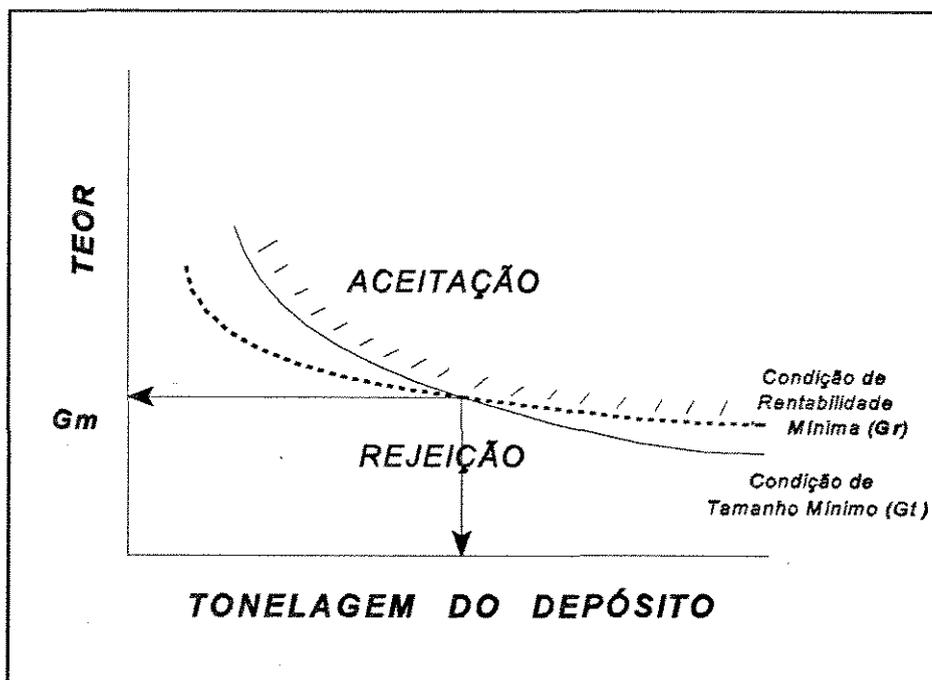


Figura 8: Condições Mínimas de Aceitação
Fonte: Mackenzie, B. (1983)

IV. 5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Denomina-se análise de sensibilidade o exame dos efeitos das variações no retorno do investimento, ou seja, a verificação do que ocorre com o retorno do investimento, ou outra variável de saída, se uma ou mais variáveis de entrada assume(m) diferentes valores em torno do(s) valor(es) pontual(ais) estimado(s) inicialmente.

A partir da simulação de condições de mercado (preços, TIR's) busca-se proceder à análise de sensibilidade dos respectivos retornos (VA's, TIR etc.). Na verdade, com a análise de sensibilidade, constroi-se cenários, gerado-se informações sobre determinadas variáveis estratégicas.

CAPÍTULO V

ESTUDO ILUSTRATIVO DE CASO

Neste capítulo, é apresentado um exemplo de um depósito para efeito de ilustração e aplicação dos conceitos discutidos nesta dissertação. É realizado um tratamento geoestatístico dos dados oriundo da sondagem, desde o estudo da variabilidade dos teores do depósito até a sua estimativa por krigagem. A partir dos recursos estimados, é desenvolvido o estudo de viabilidade de lavra, diferenciando a fase de indicação da fase de demonstração da exequibilidade. Assim, busca-se com o exemplo ilustrar as definições relacionadas à conversão de recursos em reservas minerais.

V. ESTUDO ILUSTRATIVO DE CASO

V.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA-ALVO

V.1.2. Localização

A área-alvo denomina-se Papagaio. Situa-se a cerca de 6 km a leste da Fazenda Brasileiro, próximo ao povoado Canto, pertencente ao município de Teofilândia, que dista 220 km a norte de Salvador, Estado da Bahia, conforme o mapa apresentado na figura 9. A área destacada no mapa representa a abrangência do Projeto Fazenda Brasileiro do qual o alvo faz parte.

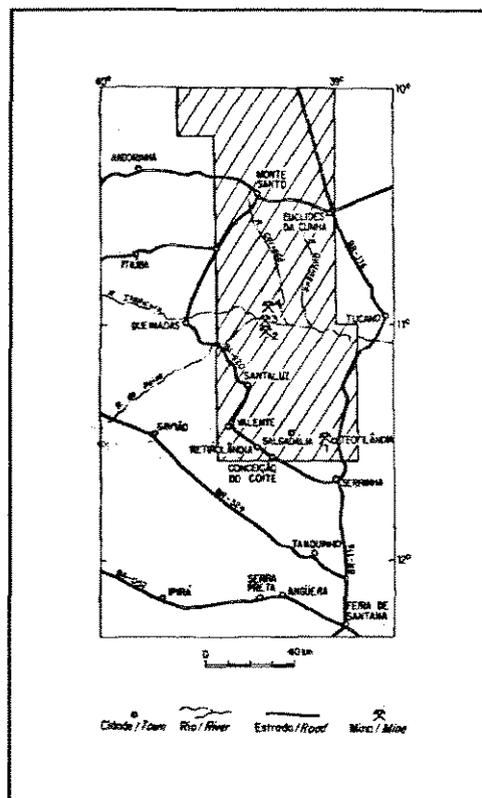


Figura 9: Mapa de Localização
Fonte: CVRD/ DOCEGEO. Relatório Final de Pesquisa/ Alvo Papagaio

V.1.2. Geologia Regional e Local

O alvo encontra-se localizado na parte sul do "greenstone" no contato entre as rochas vulcânicas e os domos graníticos e quartzopórfiros de Teofilândia.

Conforme o Relatório Final de Pesquisa da Docegeo, regionalmente, o "greenstone belt" do Rio Itapicuru localiza-se no Cráton do São Francisco. Constitui uma seqüência vulcanossedimentar, proterozóica, encravada em calhas sinclinais com intercalações de corpos graníticos. Tais litotipos mostram um "trend" N-S ao norte do "greenstone" e E-W na parte sul do mesmo, conforme o mapa geológico regional (Fig. 10).

Localmente, são observados as seguintes unidades litológicas: quartzo pórfiro, feldspatos pórfiro, xistos máficos ferruginosos, feldspato-mica-clorita carbonato xistos e meta-andesitos. Na área, é observada uma intensa atividade hidrotermal. O xisto verde é a rocha predominante do metamorfismo de baixo grau. A orientação geral da seqüência é E-W com caimento de 20° S.

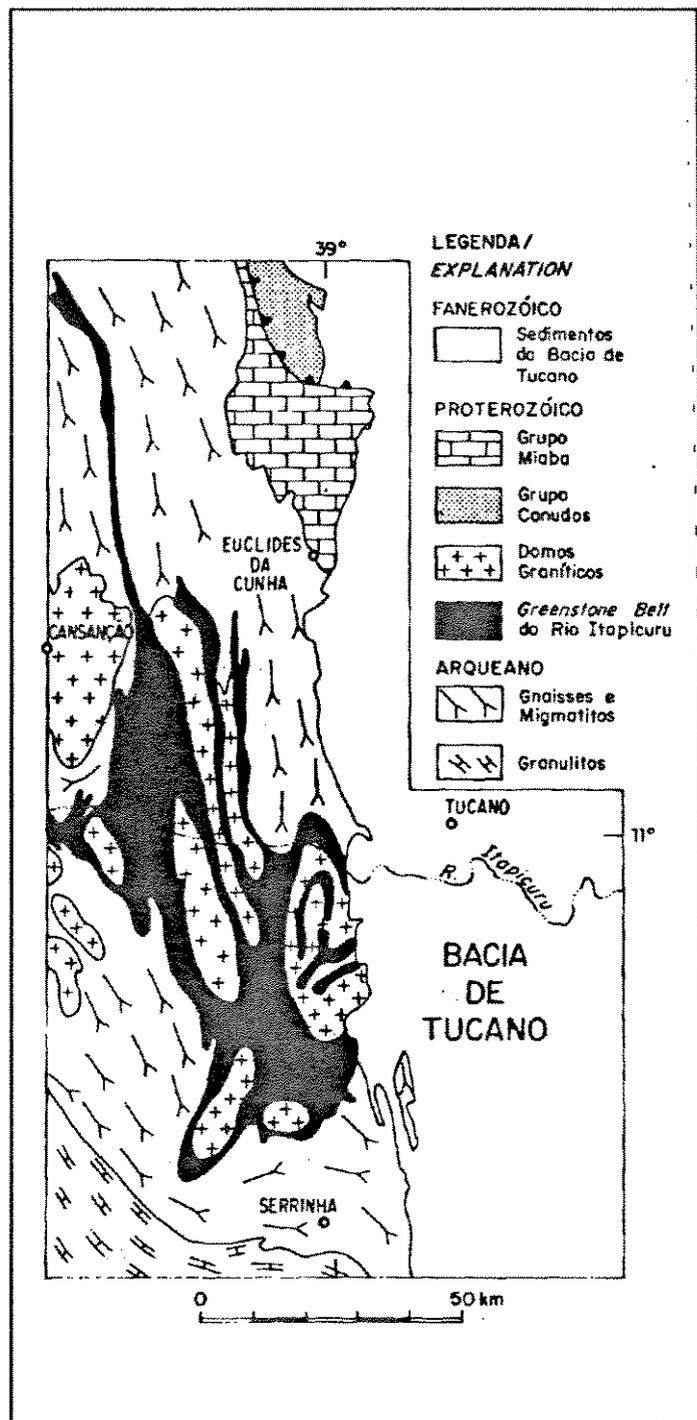


Figura 10: Mapa Geológico Regional
Fonte: CVRD/ DOCEGEO. Relatório Final de Pesquisa/
Alvo Papagaio

V.1.3. Descrição do Depósito

O depósito denominado 'Papagaio' é típico de zonas de alteração relacionadas a rochas supracrustais do "greenstone belt", alteradas por hidrotermalismo em zonas de cisalhamento. Foram detectados três corpos mineralizados na parte sudeste da área, onde reside o interesse do trabalho. Em sub-superfície, os corpos distribuem-se em pequenas lentes, sem continuidade lateral local verificada. As zonas mineralizadas, geralmente, associam-se ao contato dos metabasaltos-metaandesitos-quartzo pórfiro (CVRD / DOCEGEO).

As zonas mineralizadas em superfície ocorrem, principalmente, associadas a rochas máficas ferruginosas e nos contatos destas com as rochas subvulcânicas ácidas e ainda com bolsões quartzo-feldspáticos caulinizados (Figura 10). Em superfície, as rochas máficas alteradas por hidrotermalismo apresentam a associação mineral de quartzo-feldspato-sericita-caulim-argilominerais e, localmente, biotita. Os corpos apresentam um plunge com 10° na direção oeste. O material mineralizado possui uma densidade média de 2,5 e o corpo alvo é o "PPG1-B".

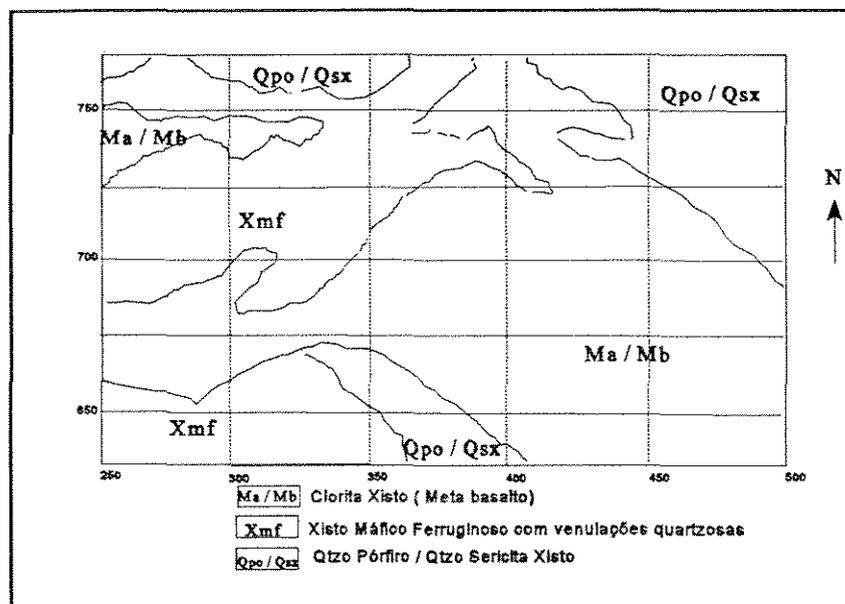


FIGURA 11: Mapa Geológico do Depósito

Esse corpo PPG1-B possui como litotipos predominantes metabasaltos, meta-andesitos, com intercalações de xisto máfico-ferruginosos, xistos grafitosos e apófises de quartzo-pórfiro. A foliação é suavemente ondulada, com orientação preferencial E-W / 20 - 40° S. Em superfície, o corpo apresenta quatro

faixas mineralizadas paralelas e descontínuas na direção E-W. Nas faixas ao N, S, SE e SW predominam corpos de formas lenticulares a elípticas, suavemente onduladas e com dimensões variáveis de até 35 x 27 m. Na porção E e central, observa-se uma faixa com boa continuidade lateral, lenticular com extremidades de forma dendrítica e dimensão não maior que 80 x 10m. Em sub-superfície, o comportamento das faixas mineralizadas é de um corpo estratiforme com caimento em média de 30°S e expressiva continuidade lateral. A mineralização se associa, preferencialmente, ao xisto máfico-ferruginoso.

Os principais controles da mineralização são o litológico e o estrutural. O controle litológico é observado nas mineralizações que estão associadas ao contato de rochas máficas com domos de quartzo-pórfito. Já o controle estrutural relaciona as mineralizações à zona de alterações hidrotermais com aporte de vasos e vênulas de quartzo (CVRD / DOCEGEO).

V.2. RESULTADOS DA SONDAGEM

Para efeito do tratamento geoestatístico (estudo da variabilidade e estimativa de recursos geológicos) foram utilizados dados resultantes da análise de 46

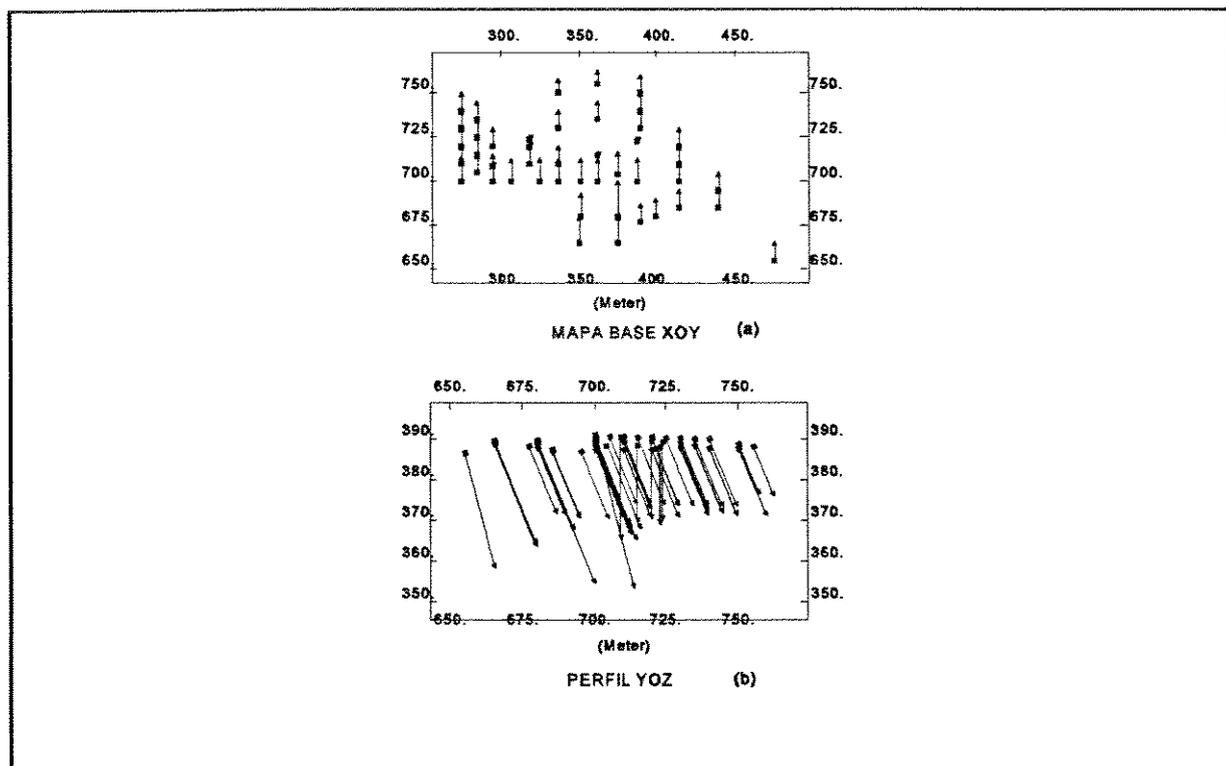


FIGURA 12: Orientação Geral da Sondagem

furos de sonda efetuados numa malha semi-regular com espaçamento 20 X 10 m, atingindo uma profundidade média de 25m, com orientação geral para norte (figura 12a).

A inclinação geral dos furos é variável, sendo que a direção preferencial da maioria é de 60° N (Figura 12b).

V.2.1. Análise Preliminar dos Dados

No caso do depósito-alvo para ilustração deste trabalho, por ser de ouro, algumas características que afetam o grau de confiança da estimação de teores devem ser ressaltadas:

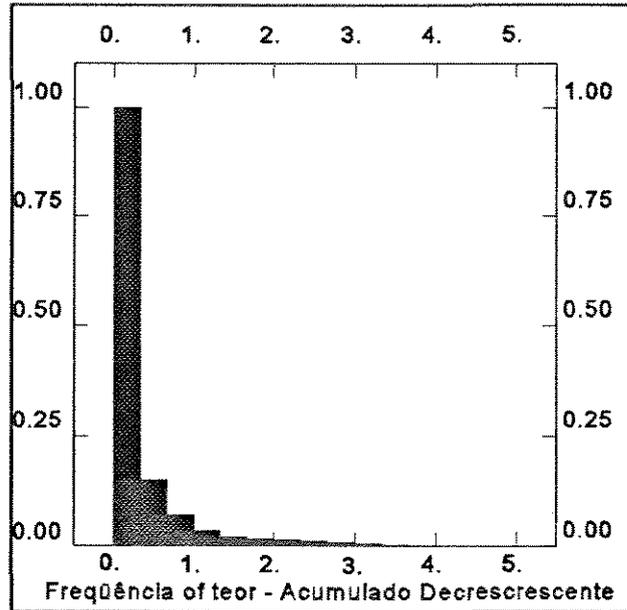
- i. a dificuldade de se obter amostras confiáveis;
- ii. concentrações de teores médios baixos contra altos valores de variância;
- iii. pouca continuidade da mineralização;
- iv. complexa determinação do contato estéril/minério;
- v. distribuição enviesada de valores experimentais.

Dessas características, ressalta-se que apenas a primeira é passível de ser controlada, pois depende das condições da amostragem.

Como a mineralização é composta por material oxidado (solo e fragmentos de rocha), contendo concentrações localizadas de ouro de forma lenticular e como essas lentes nem sempre obedecem aos contatos geológicos, é necessário estabelecer-se um critério que defina o que é material 'mineralizado' e o que é estéril. Separar os teores que apresentam alguma concentração mais expressiva daqueles que se confundem com a 'abundância crustal'. Para tanto, é recomendável, inicialmente, que se proceda a uma avaliação estatística simples do conjunto de dados resultantes da análise química dos teores dos testemunhos da sondagem.

O conjunto exaustivo de dados da sondagem com 15 classes, revela que 15% das amostras apresentam teores acima de 0,33g/t (Figura 13). Pelo histograma, pode-se, assim, estabelecer um 'teor de corte geológico' com valor maior ou igual a 0,3g/t que seleciona as lentes mineralizadas daqueles teores que se

confundem com a 'abundância crustal'. De outra forma, esse 'teor de corte geológico', para muitos profissionais da geologia, é determinado a partir da experiência prática de cada um, para cada tipo de depósito e a depender da respectiva substância útil agregada, ali presente.



Uma estatística simples de medida de tendência central foi feita, tanto para o conjunto exaustivo de dados, quanto para o caso de teor de corte 0.3 g/t. Os resultados são os expressos na tabela abaixo:

QUADRO 8

ESTATÍSTICA SIMPLES DOS DADOS AMOSTRADOS

Amostras	Mínimo	Máximo	Teor Médio	Dev. Padrão
1292	0	22.4	0.347152	1.28713

Assim, utilizando um teor de corte geológico de 0.3 g/t a distribuição dos teores apresenta, no histograma de frequência (figura 14a), um comportamento assimétrico positivo, ou seja, a frequência de valores mais baixos é muito maior do que a de valores mais altos de teor de ouro. A figura 14b representa o histograma acumulado do teor médio. A figura 14c retrata o histograma simples do metal contido. Observando a cauda desse histograma, notam-se classes dispersas de alta concentração, podendo revelar comportamentos pepíticos.

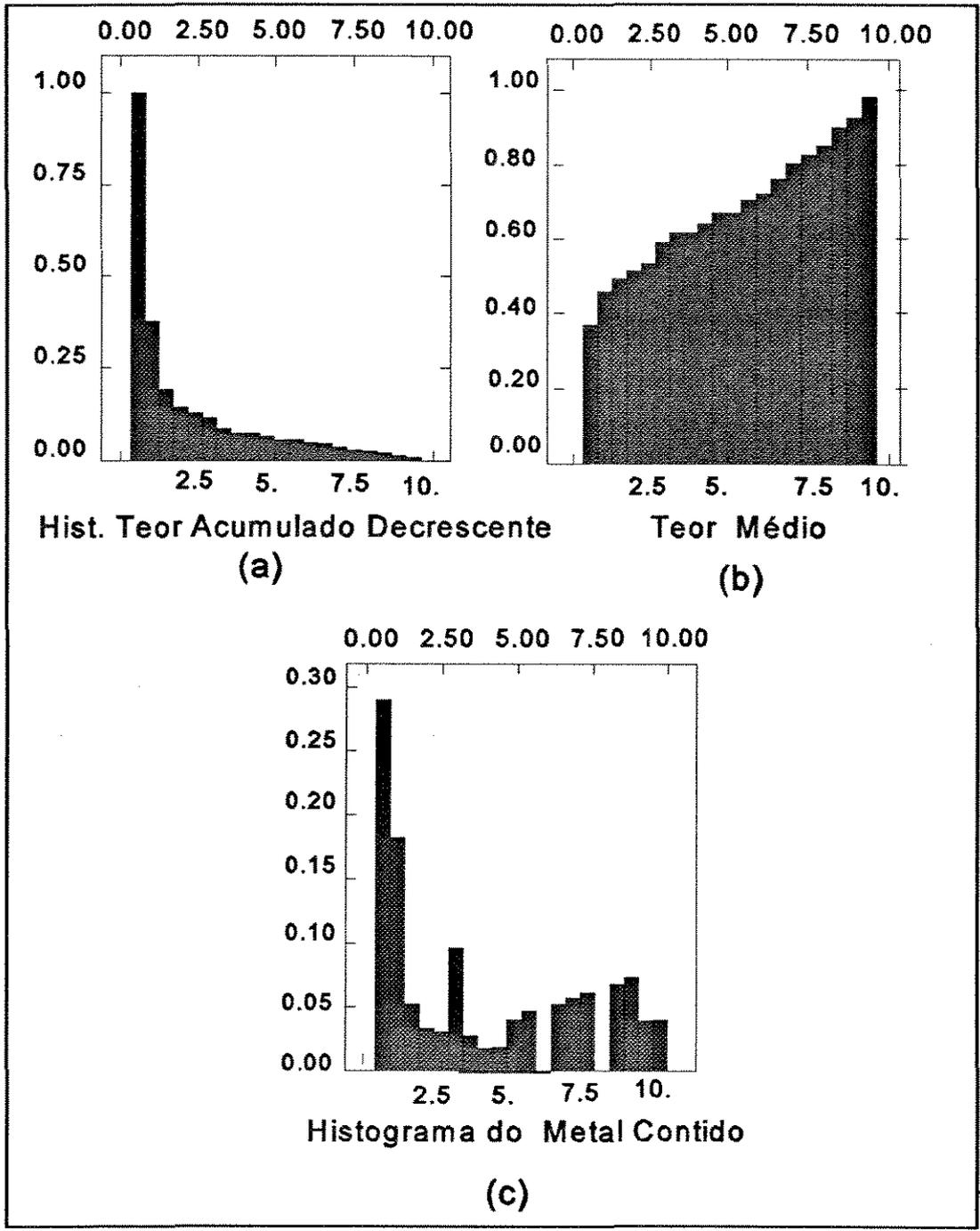


Figura 14: Histogramas do teor com teor de corte geológico 0,3 g/t

V.3. VARIABILIDADE DO DEPÓSITO

V.3.1. O Variograma Experimental

De acordo com o conjunto de dados das amostras dos testemunhos de sondagem, para a análise estrutural foram estabelecidos os seguintes parâmetros variográficos:

a. Dado que a malha da sondagem é semi-regular 20 X 10 metros, o passo escolhido foi de 22 metros na direção E-W, 10 metros em N-S e 1 metro na direção vertical, buscando-se, assim, eliminar efeitos de pepita puro nos variogramas horizontais. Na direção vertical, o passo foi de 1 metro, justificado em função de se ter suportes diferenciados das amostras analisadas, tanto de 0.5 - 0.5 metro quanto de 1 - 1 metro, isto muitas vezes chegando a ocorrer num mesmo furo.

b. A tolerância do passo foi de 50% nas três direções, de acordo com a recomendação prática, e a angular foi de 45°. Para os casos em que os dados não estão distribuídos em uma malha totalmente regular, é necessário realizar agrupamentos em "classe de distância" e "classe de ângulos"⁷.

c. O número de passos foi de 6 para a direção X, 7 para Y e 15 para Z, pois desta forma foi coberta mais da metade da área amostrada do depósito.

A variografia experimental na direção longitudinal, com o ângulo de inclinação preferencial da maioria dos furos (60°) foi descartada por apresentar resultados semelhantes aos da direção 90°, correspondente à vertical, a qual foi priorizada por um critério de manter a direção preferencial da provável futura lavra descendente por bancadas. Os variogramas experimentais obtidos para cada direção estão apresentados na figura 15.

Observando esses variogramas, percebe-se que o valor de $(C+C_0)$ chega a assumir níveis em torno de 2 a 2,5, o que, por ser muito alto e pelo comportamento conhecido por "dente de serra" (picos altos alternando com baixos), dificultaria um ajuste que expressasse, da melhor forma, o comportamento do fenômeno em estudo. Esse comportamento deve-se à existência de pares formados por valores

⁷ A tolerância, neste caso, deve ser a menor possível para evitar distorções na análise dos resultados. apud Journel & Huijbregts(1989).

altos com valores baixos.

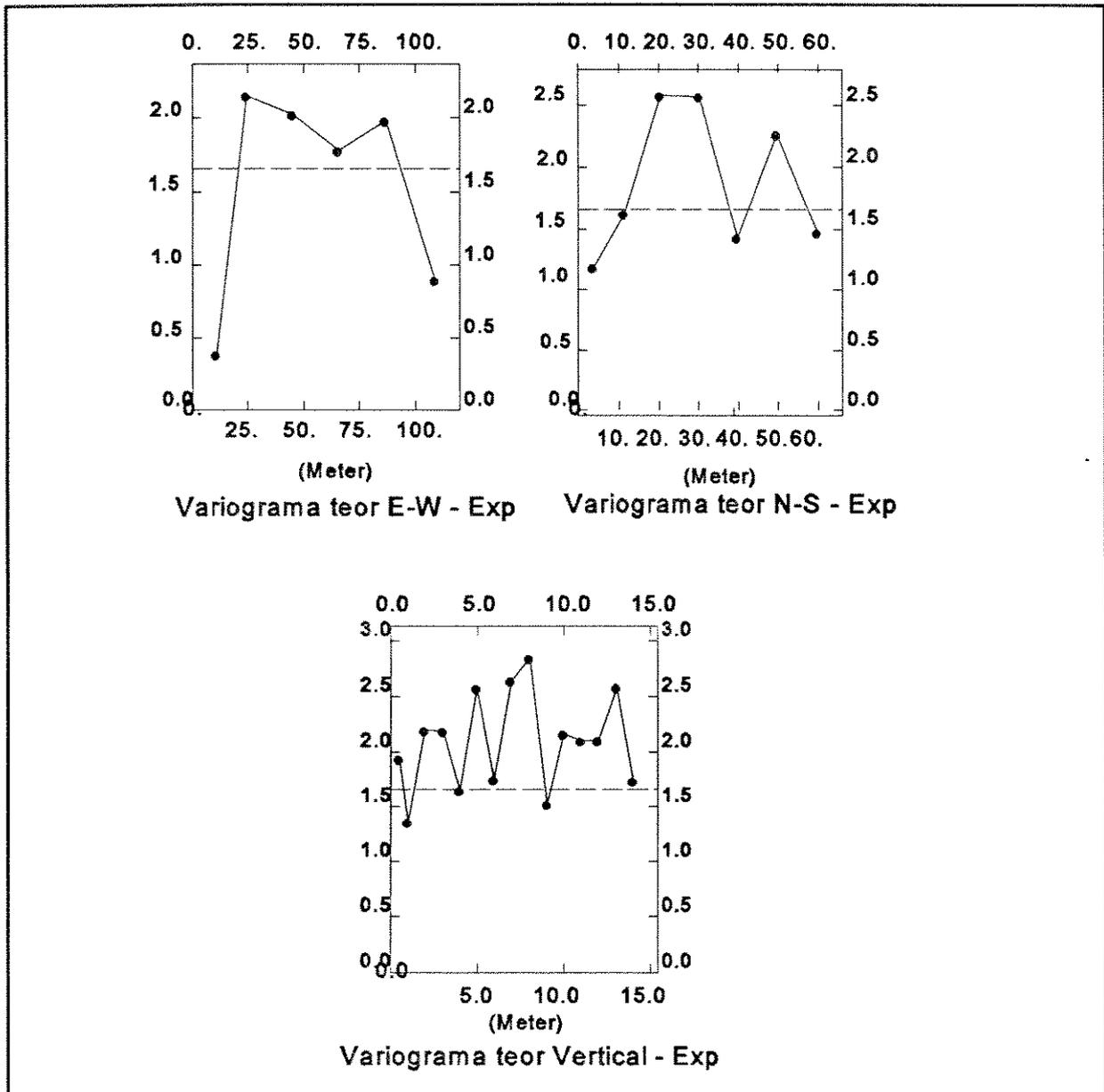


FIGURA 15 : Variogramas Experimentais nas direções E-W, N-S e Vertical.

V.3.2. A. Regularização da Sondagem

O teor médio é, nos testemunhos de sondagem, medido num ponto x através de uma amostra v , centrada em x . Entretanto, as reservas precisam ser avaliadas para blocos de um volume significativamente maior do que a amostra original. O tamanho, o volume e o método de análise da amostra original estão associados a seu suporte, de tal forma que histogramas e variogramas construídos com suportes

diferentes terão, igualmente, comportamentos distintos.

De um modo geral, quanto maior o tamanho do suporte, tanto menores serão as variações de teores, pois ocorrerão diluições devidas à homogeneização dos teores.

Como, para os casos onde ocorrem amostras pontuais com espaçamentos distintos, o suporte a ser variografado será determinante no estudo da variabilidade do depósito (o que significa suportes de representatividade de amostragem diferentes), é recomendável que seja procedida à regularização. Desta forma, se as amostras não possuem um tamanho constante, deve-se proceder à reconstituição dos teores para um suporte constante " l " e depois calcular o semi-variograma, conforme citado.

Em geral, em cada situação em que o suporte se apresente de maior tamanho, as variações do atributo serão menores, já que existirão diluições e, conseqüentemente, homogeneização dos teores.

A regularização pode ser feita, ao longo dos furos, ou ao longo de fatias de espessura constante (bancos de lavra).

No caso do alvo PPG1-B , as amostras dos testemunhos de sondagem foram analisadas tanto para suportes com intervalos de 0.5 - 0.5 metro, quanto para intervalos de 1.0 - 1.0 metro, o que exigiu o processo de regularização ao longo dos furos. Foi assumida a média dos teores das amostras presentes em cada intervalo de metro em metro. Como resultado, as 1292 amostras iniciais distribuídas nos 46 furos foram reduzidas a apenas 1002, o que possibilitou a construção de variogramas em melhores condições para se promover o ajuste. Os variogramas regularizados são os constantes da figura 16. Com a regularização da sondagem, a variância experimental, que era de 1,6598, caiu para 1,0549. O próprio variograma experimental na direção vertical (figura 15c), quando comparado ao regularizado na mesma direção (figura 16c), revela a importância desse procedimento na análise variográfica, pois o segundo já não mais apresentou o comportamento de "dente de serra".

V.3.3. O Modelo Variográfico Ajustado

As características dos variogramas regularizados apresentaram um comportamento isotrópico num plano aproximadamente horizontal (direção E 10° W em torno do eixo N-S e a direção N-S) e anisotrópico em relação ao eixo vertical. Ressalta-se que na direção E-W, a rotação em 10° em torno do eixo N-S ocorreu buscando-se uma concordância com a inclinação das lentes mineralizadas, interpretadas geologicamente. Assim, os variogramas apresentam duas estruturas. Com modelo esférico, os variogramas formam patamar em aproximadamente $C = 0.717$ e com um alcance de 22 metros no 'plano horizontal' e de 5 metros no eixo vertical.

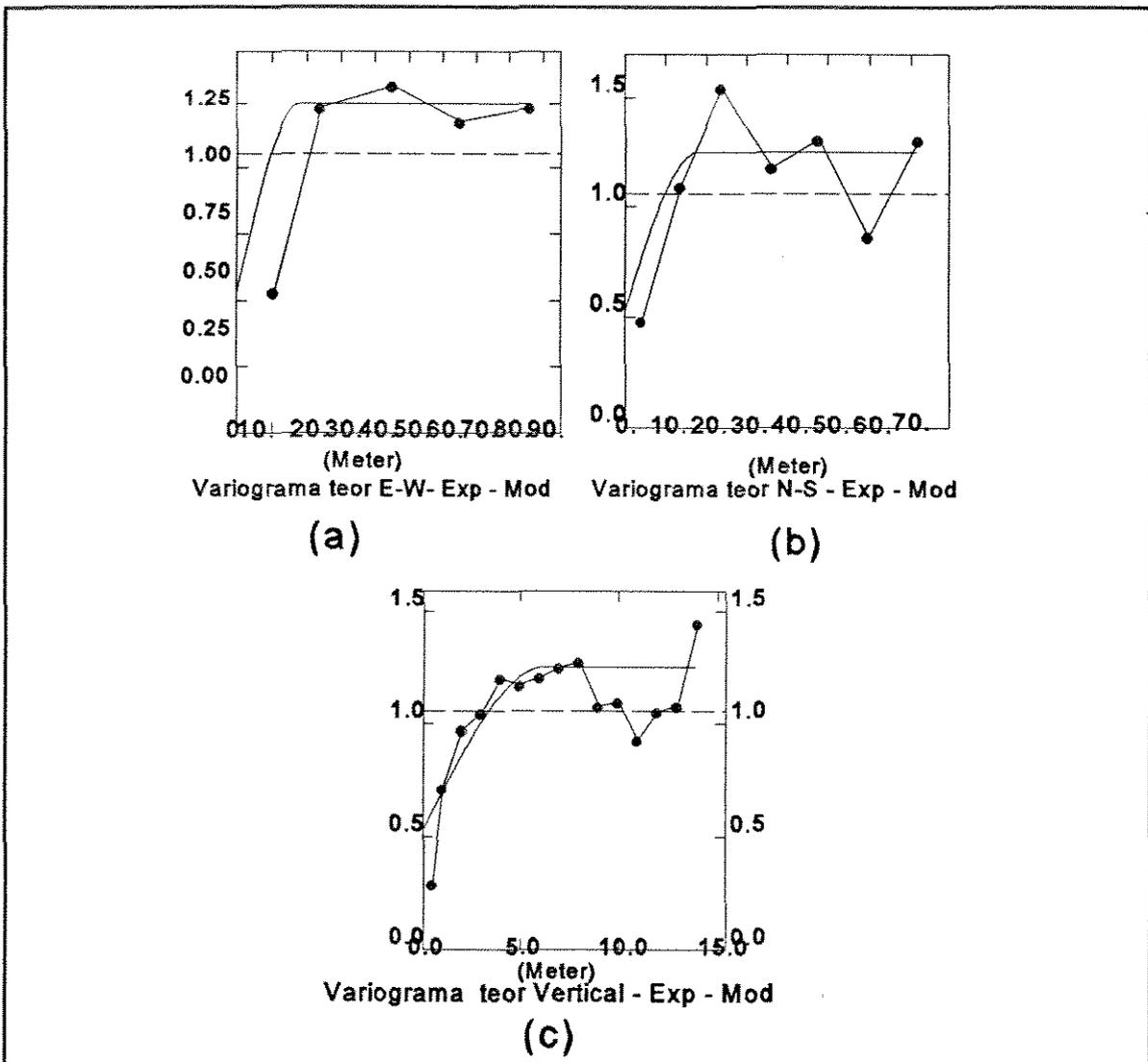


Figura 16: Variogramas Regularizados e ajustados nas direções (a) E-W, (b) N-S, (c) Vertical.

Para o ajuste variográfico, foi utilizado um fator de anisotropia igual a 4. A segunda estrutura variográfica corresponde ao modelo pepítico, onde o C_0 (efeito pepita) assume o valor de $C_0 = 0.532$. Na figura 16, os variogramas nas três direções são apresentados superpostos.

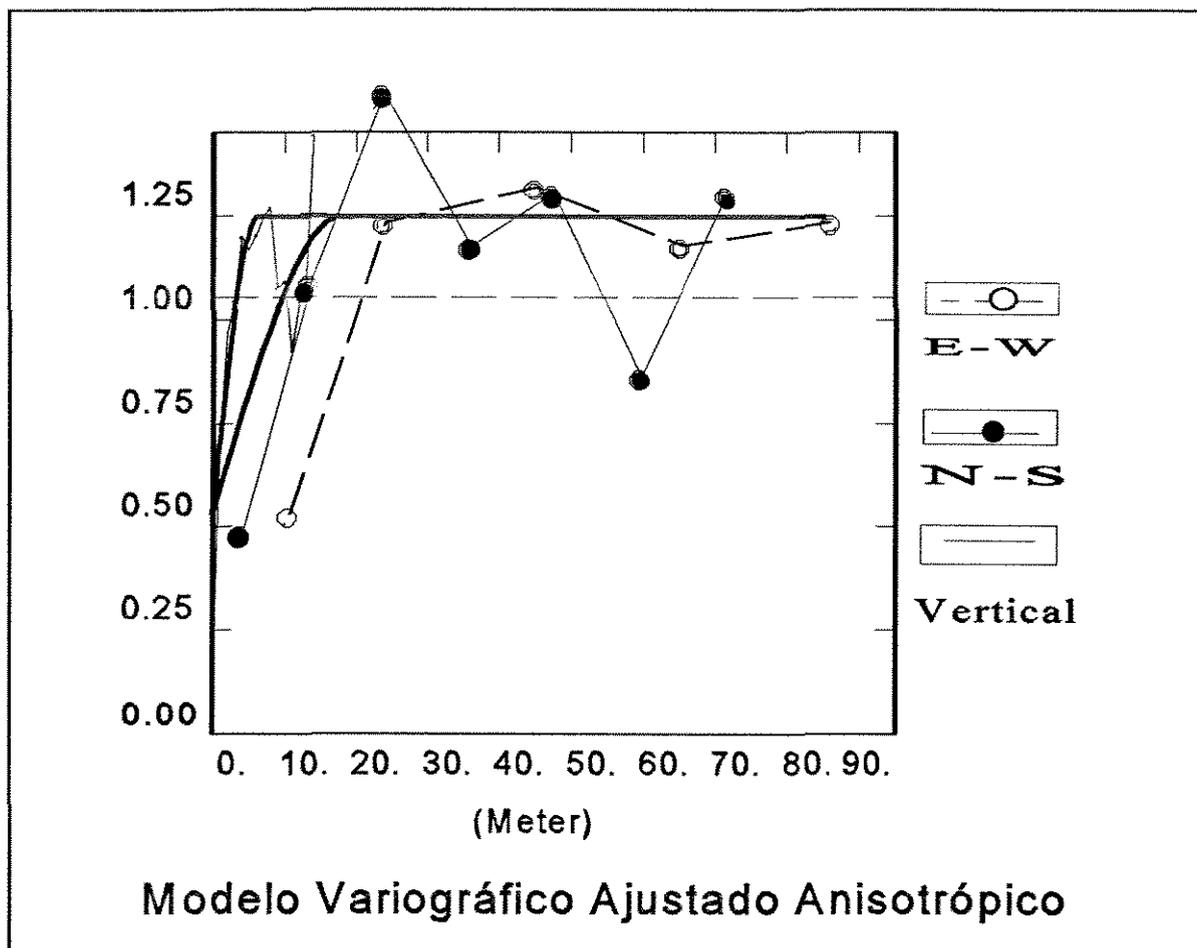


Figura 17: Variogramas superpostos nas três direções, indicando uma anisotropia entre os planos horizontal e vertical.

V.4. A ESTIMATIVA DOS RECURSOS GEOLÓGICOS POR KRIGAGEM

A estimativa de recursos por geoestatística é, normalmente, procedida pelo método da krigagem. Para que os resultados dos teores krigados estejam dentro dos limites esperados, obtêm-se os melhores ponderadores num sistema de combinação linear que proporcione uma variância de estimativa baixa para cada bloco krigado e um erro padrão igualmente baixo. Isto significa dizer que o objetivo não é outro senão o de encontrar resultados de teores estimados os mais próximos dos teores verdadeiros, evitando, ao máximo, os erros de sobre e subestimativa.

V.4.1. A Definição dos Parâmetros de Vizinhaça

No processo de estimativa dos recursos geológicos *in situ* pelo método da krigagem, a ser descrito nos próximos itens, é recomendado que seja observada uma certa proporcionalidade em relação aos alcances verificados no ajuste da análise variográfica.

Em se tratando de um depósito com modelo variográfico anisotrópico, em que a variabilidade se comporta na forma de uma elipsóide, é recomendável que a vizinhaça de pesquisa também tenha essa conformação, sendo o seu centro, o ponto a ser estimado. Abaixo, estão descritos sinteticamente o modelo e os parâmetros de vizinhaça utilizados na primeira auréola de pesquisa.

MODELO VARIOGRÁFICO

Variáveis : teor de ouro

Ângulo de Rotação : 10°

Número de estruturas básicas: 2

Estrutura #1 : Esférica - Escala: 22m

Patamar: 0.7172

Anisotropia: (1, 1, 4)

Estrutura #2 : Efeito Pepita

Patamar: 0.5321

Extensão do Bloco E-W : 20m

Extensão do Bloco N-S : 20m

Extensão do Bloco Vertical : 5m

PARÂMETROS DE VIZINHANÇA

Tipo = DISTÂNCIA

Raio E-W : 22m

Raio N-S : 22m

Raio Vertical : 5m

Ângulo de Rotação: 10°

Nº Mínimo de Informações: 3

Nº Ótimo de Informações: 6

Nº Máximo de Informações: 8

Malha E-W : 20m

Malha N-S: 20m

Malha Vertical: 5m

A figura 18 apresenta, de forma gráfica, a definição da vizinhança nos planos XOY, XOZ e YOZ,

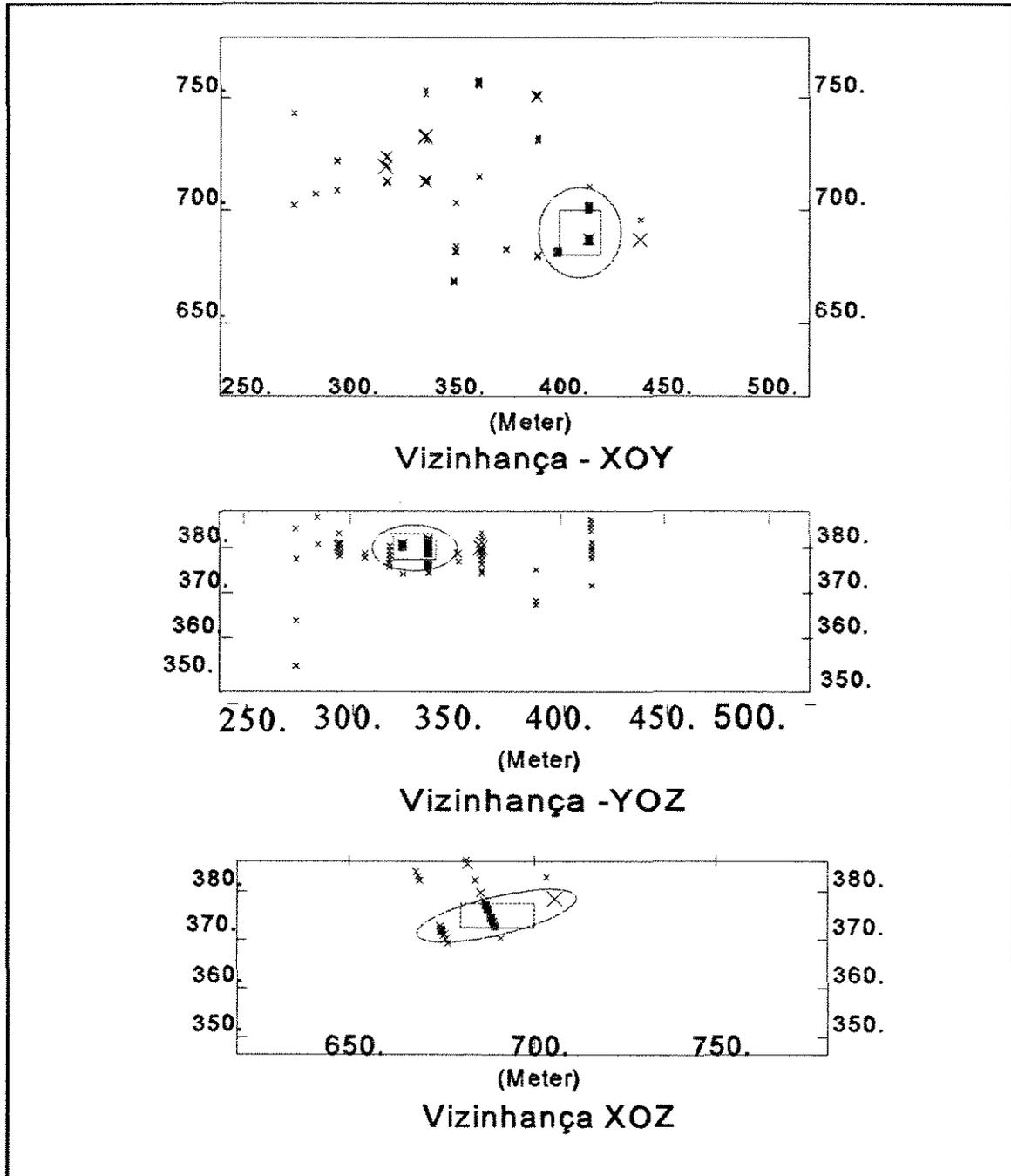


Figura 18: Elipsóide de Vizinhança nos Planos XOY, XOZ e YOZ.

V.4.2. A Validação Cruzada no Estudo dos Parâmetros de Estimativa

A validação cruzada é um procedimento geral que analisa a compatibilidade entre um conjunto de dados e a estrutura do modelo variográfico. Ela pode ser usada para modelos com estrutura estacionária ou não-estacionária, tanto para os casos de uma única variável ou para a condição multivariada e ainda para todos os tipos de vizinhança.

O aspecto principal é poder analisar cada ponto alvo que apresente um grau de discrepância alto. No procedimento, o ponto em estudo é temporariamente removido do conjunto de dados e uma estimacão (Z^*) é produzida por krigagem, usando a informação de sua vizinhança e o modelo a ser testado em uma determinada locação alvo. Em adicção, o próprio processo de krigagem produz a variância de estimativa (σ^2_E).

Assim, é possível comparar o erro experimental entre o valor estimado e o valor verdadeiro e a previsão de erro dentro do modelo, através dos seguintes valores médios:

i. Erro médio	$\frac{1}{N} \sum_N (Z - Z^*)$
ii. Variância do erro	$\frac{1}{N} \sum_N (Z - Z^*)^2$
iii. Erro médio padrão	$\frac{1}{N} \sum_N \frac{(Z - Z^*)}{\sigma}$
iv. Variância do erro padronizado.	$\frac{1}{N} \sum_N \frac{(Z - Z^*)^2}{\sigma}$

Uma estimativa é considerada com boa precisão, se o seu erro médio experimental tende a zero e a sua variância do erro médio experimental é pequena.

O estudo da validação, em suma, é uma técnica que permite selecionar o melhor, entre diferentes ponderadores, entre diferentes estratégias de pesquisa ou entre diferentes modelos variográficos. Os resíduos da validação cruzada ($Z - Z^*$) representam uma informação importante. Um estudo cuidadoso da sua distribuição espacial objetivando a estimacão permite detectar os problemas relacionados aos

parâmetros dessa estimação. A validação cruzada é um passo preliminar ao cálculo final da estimativa. Em termos práticos, o resultado da validação cruzada pode contribuir para a avaliação dos parâmetros envolvidos na metodologia de estimação.

O coeficiente de correlação entre os teores das amostras e os teores estimados é outro indicador da qualidade da estimativa, obtido utilizando-se a validação cruzada, permitindo julgar os parâmetros do modelo de krigagem. Por melhor que seja o modelo variográfico e a definição dos parâmetros de vizinhança, sempre haverá um erro $Z - Z^*$. Na prática, um modelo dificilmente irá espelhar exatamente a distribuição dos teores *in situ*.

Com a validação cruzada pode-se efetuar ajustes necessários ao modelo de krigagem. Para o caso do corpo PPG1-B, o referido modelo foi definido, após alguns procedimentos de validação cruzada, em que foram testados diferentes parâmetros de vizinhança (quantidades mínima e máxima de amostras na auréola de pesquisa, estrutura do raio de pesquisa, se por distância ou por setor angular, com *cut-off* ou sem). A figura 19 apresenta graficamente os resultados da validação cruzada.

Além de respeitar o modelo variográfico ajustado, levando-se em consideração os alcances, patamar e anisotropia, assumiu-se o mínimo de 3 amostras na auréola de pesquisa e 8 no máximo e também que a estrutura da vizinhança seria por distância, sendo utilizado *um cut-off* geológico de 0.3 g/t.

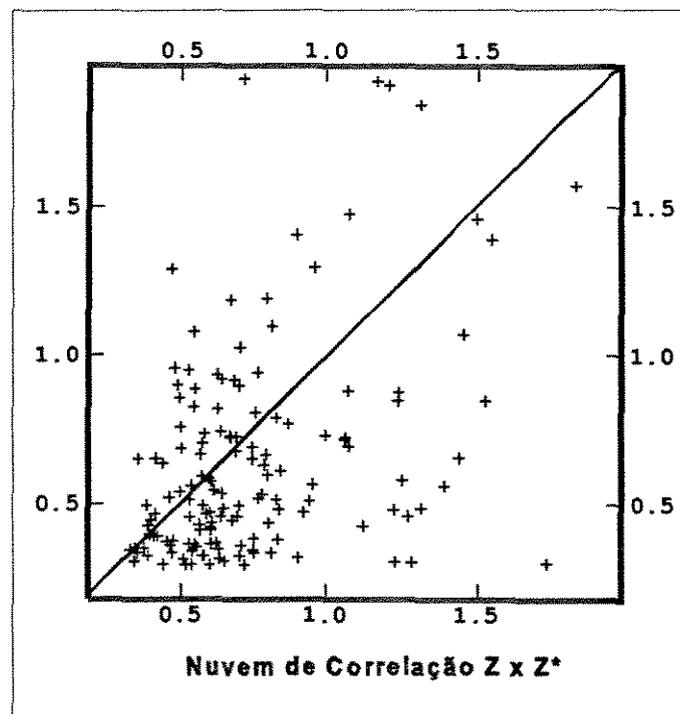


Figura 19: Resultado da Validação Cruzada

Desta forma, obteve-se os seguintes resultados, após a eliminação dos valores *outliers*:

Estatística baseada em 148 dados de teste

	Média	Variância
Erro	0.04	0.23
Erro Padrão	0.03	0.22

No exemplo, são considerados dados robustos quando o seu erro padrão está entre -2.5 e 2.5 . Nas circunstâncias, o coeficiente de correlação obtido foi de 0,64. Com esses resultados pode-se confirmar os parâmetros para que a krigagem fosse feita com a necessária confiabilidade.

V.4.3. A Krigagem de Blocos

Apesar de ter sido utilizado o modelo do variograma regularizado na krigagem, apenas as amostras que apresentaram teores acima de 0,3g/t (teor de corte geológico) foram consideradas para efeito de ponderação do teor médio de cada bloco.

A krigagem foi feita a partir de três auréolas de pesquisa distintas, com elipsóides crescentes e concêntricos, proporcionais aos alcances dos modelos variográficos, para três tamanhos de blocos distintos. Foi fixado que as dimensões de cada bloco corresponderiam respectivamente às direções em E-W, N-S a 20, 20 e para todos os blocos variando na direção vertical em 2.5, 5.0 e 10 metros. Para efeito do resultado final da krigagem, caso um mesmo bloco viesse a ser krigado mais de uma vez, prevaleceria o resultado da krigagem correspondente à auréola de dimensões menores. Assim, o total de blocos com teores acima de 0.3g/t é apresentado no 8, com os respectivos parâmetros do procedimento da krigagem.

QUADRO 9
PARÂMETROS DE VIZINHANÇA DE KRIGAGEM

PARÂMETROS	1ª Auréola	2ª Auréola	3ª Auréola	Des. Padrão
Dimensões(X,Y,Z)	22, 22, 5	33, 33, 7.5	44, 44,10	-----
Nº Mín, Ot, Max Amost	4, 6, 8	2, 6, 10	1, 6, 12	-----
Estratégia	Distância	Distância	Distância	-----
Quant. Blocos Krigados 20, 20, 2.5 m	185	275	397	0,74
Quant. Blocos Krigados 20, 20, 5 m	85	126	197	0,70
Quant. Blocos Krigados 20, 20, 10 m	38	60	192	0,75

Partindo-se dos resultados obtidos, selecionou-se a malha de blocos de dimensões (20, 20, 5) em função desta apresentar o menor desvio padrão dos teores, assumindo que atenderia a escala de produção da futura mina, considerando serem, portanto, que as dimensões da Unidade de Seletividade Mineira, para efeito de continuidade do estudo de caso.

Na figura 20, é apresentado o mapa de isolinha do resultado da variâncias de estimativa com intervalo de nível de 0,1. Nota-se na figura que a variância de estimativa cresce do centro para as bordas do depósito. Nas regiões extremas do depósito, o erro de estimativa é naturalmente maior devido à existência de um número menor de dados amostrados.

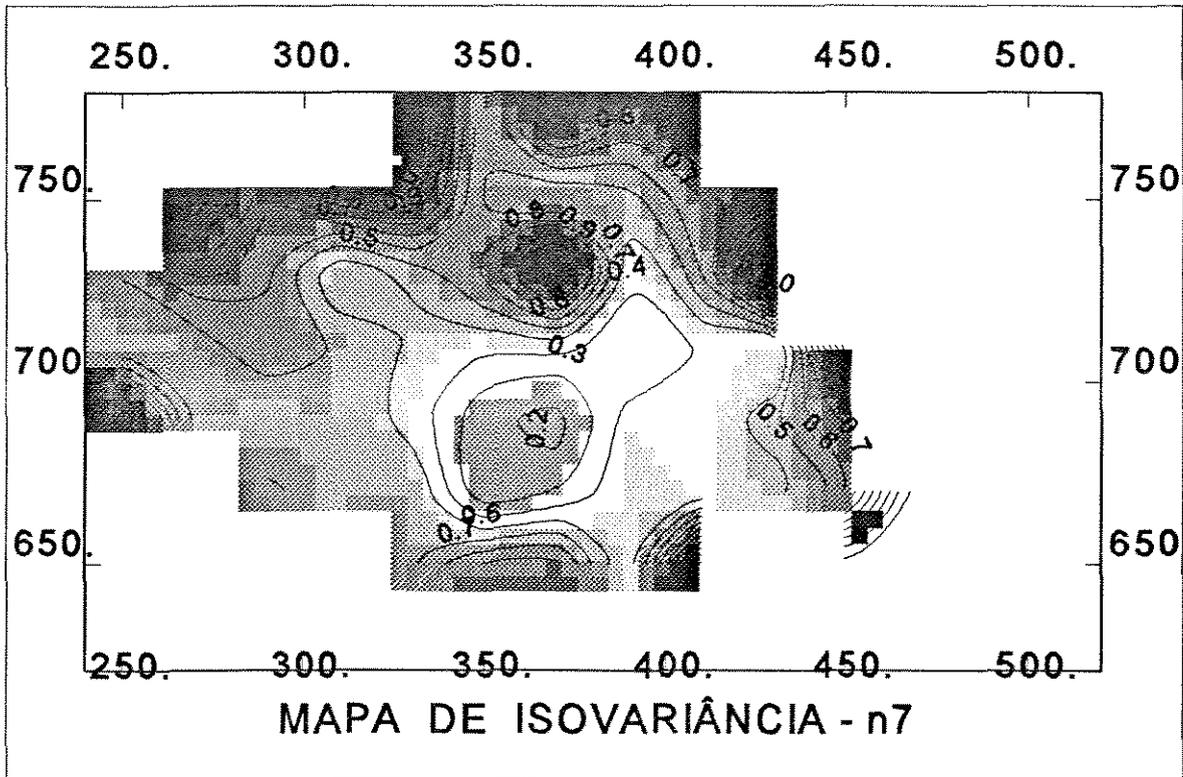


Figura 20: Mapa de curvas de isovariância em superposição ao mapa da variância

Para efeito de aplicação prática da classificação de recursos aqui adotada no Capítulo III, foi procedido o cálculo da variância de krigagem ordinária. Considerou-se o tamanho do bloco na dimensão de maior continuidade (20 X 20), 4 amostras (n° mínimo na primeira auréola) nos vértices opostos do bloco, no plano de maior continuidade (XOY) e de 2 amostras (número mínimo na segunda auréola).

O cálculo foi realizado utilizando-se o programa PLAYKRIG. Os resultados são apresentados a seguir:

KRIGAGEM DE UM BLOCO COM NO MÍNIMO 4 AMOSTRAS

	σ^2	σ	$2 * \sigma$	$-\mu$
Krigagem ordinária :	.3173	.5633	.1127	.1831
Krigagem simples :	.2109	.4593	.9185	.5807
Krigagem da média :	.315	.5616	.1123	.3154
Variância de Z^* :	.3154			
Inclinação da regressão (Z_v/Z_v^*) =	.4193			

KRIGAGEM DE UM BLOCO COM NO MÍNIMO 2 AMOSTRAS

	σ^2	σ	$2 * \sigma$	$-\mu$
Krigagem ordinária :	.6324E	.7952E	.1590E	.4923
Krigagem simples :	.2443	.4943	.9886	.7883
Krigagem da média :	.6245	.7903	.1581	.6245
Variância de Z^* :	.6245			
Inclinação da regressão (Z_v/Z_v^*) =	.2117			

O cálculo da variância de krigagem segundo as configurações (figura 21) serve apenas para estabelecer os limites para classificação das variâncias dos blocos estimados. É apenas uma referência para avaliar se a variância obtida para cada bloco é alta ou baixa, o que determinaria o nível de confiança da estimativa. Os parâmetros de vizinhança da auréola de pesquisa não interferem nesse cálculo.

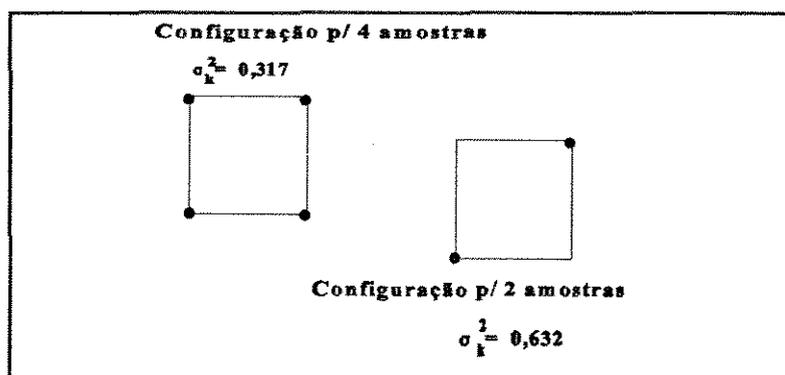


Figura 21: Configuração da disposição relacionada à quantidade mínima de amostras para o cálculo da variância de krigagem.

Esse critério não é o mais perfeito, pois, para corpos homogêneos, não necessariamente, se aplicaria o mesmo critério para o número mínimo de amostras, em que a confiabilidade sobre a estimativa de cada bloco é bem mais elevada.

De posse do resultado dos valores das variâncias de krigagem para cada situação, foi feita a classificação dos blocos krigados. A classificação para cada classe é apresentada no Quadro 10.

QUADRO 10

CLASSIFICAÇÃO DOS BLOCOS KRIGADOS				
CLASSES DOS RECURSOS	BLOCOS	TONELAGEM	TEOR	Au CONTIDO (Kg)
PROVADO ($0 < \sigma^2 < 0.317$)	39	1.950.000	1,20	2.335
PROVÁVEL ($0.317 < \sigma^2 < 0.632$)	183	9.150.000	1,02	9.315
POSSÍVEL ($\sigma^2 > 0.632$)	186	9.300.000	0,81	7.505
Total (Provado+Provável.+Possível)	408	20.400.000	0.94	19.155
Total (Provado + Provável)	222	11.100.000	1,05	11.650

A figura 22 apresenta o Mapa-Base dos blocos krigados para os recursos provado + provável com as curvas de isoteor superpostas.

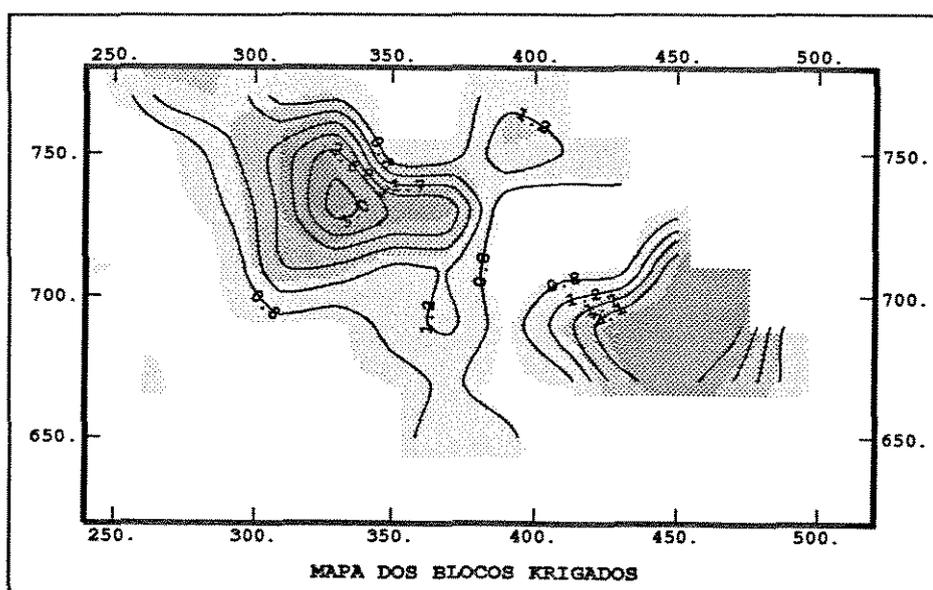


FIGURA 22: Mapa Base dos Blocos Krigados dos Recursos Provado+ Provável

V. 5. O ESTUDO DE EXEQUIBILIDADE DE LAVRA

Pelo tipo de depósito (ouro oxidado em material desagregado), onde não há uma necessidade maior com despesa de explosivos pois o desmonte pode ser feito mecanicamente, é possível fazer uma previsão, com base em outras minas na mesma região, de que os custos operacionais terão as seguintes grandezas:

Custo de Lavra Subterrânea (Cs):	US \$ 20.00
Custo de Lavra a Céu Aberto(Ca):	US \$ 3.70
Custo de Remoção de Estéril (C):	US\$ 3.20

Assim, utilizando a equação da Relação de Mineração Limite tem-se:

$$\text{RML} \geq \frac{20.00 - 3.70}{3.20} \quad \therefore$$
$$\text{RML} \geq 5.09$$

Isto quer dizer que a Relação de Mineração para o projeto pode atingir o valor máximo de 5.09 : 1 que a mina, ainda assim, se viabiliza a céu aberto. A partir de uma seção padrão do corpo, pode-se estimar a Relação de Mineração para o projeto.

Pelo corte esquemático da figura 23, dos aproximadamente 34 blocos da cava, 9 são blocos de estéril e 25 blocos mineralizados, correspondendo a uma Relação de Mineração para o projeto de 0.36: 1, portanto bem abaixo da relação de mineração limite. Com isso não há dúvida que o método de lavra será a céu aberto.

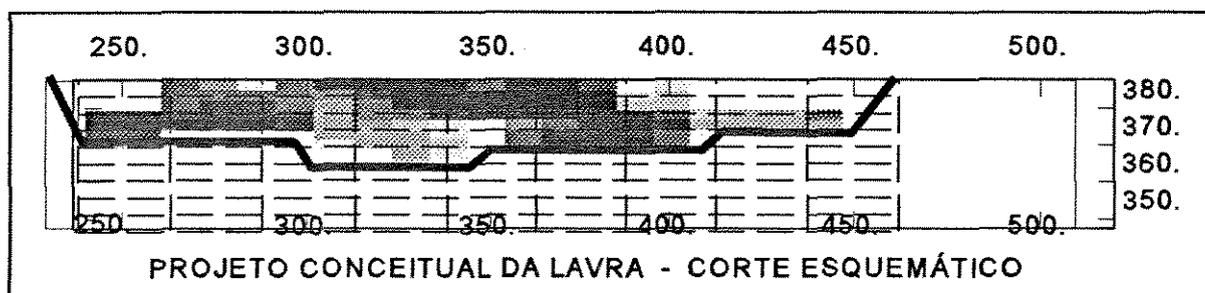


Figura 23: Perfil da cava para estabelecer a provável relação de mineração do projeto.

V.5.1. Critério da Seleção do Tamanho e da Rentabilidade Mínimos Aceitáveis

No caso do ouro, a substância útil de interesse no corpo PPG1-B, o seu mercado tem mantido-se estável há mais de uma década. Como os seus preços vem mantendo-se dentro da mesma ordem de grandeza nos últimos cinco anos a nível de mercado internacional, com uma ligeira queda ao longo desse período, tomou-se como base, para o estudo da economicidade aqui ilustrado, o preço praticado na ocasião da avaliação, correspondente a US\$ 12.33 /grama de ouro (já deduzidos os impostos incidentes sobre o faturamento).

Quanto ao investimento total para o empreendimento, pelas características do minério desagregado a lavra seria realizada por desmonte mecânico e em sendo minério oxidado de ouro, a concentração ocorreria por processo de lixiviação em pilha, por experiências de outros empreendimentos, pode-se afirmar que o investimento total para implantação da mina giraria em torno de US\$ 13 milhões correspondente a uma capacidade instalada de produção de cerca de 700.000 toneladas / ano de minério.

Para a definição do teor G_t discutido no Capítulo IV relativo à curva do tamanho mínimo aceitável, foi estabelecido uma escala de produção média de 600.000 toneladas / ano, compatível com a ordem de grandeza do futuro empreendimento. Assim, calculou-se a vida útil proporcional para cada uma das várias faixas de teores do depósito. O custo operacional unitário total assumido foi de US\$ 8.24

A taxa de recuperação metalúrgica assumida foi de 75%, com base na experiência de processo de concentração mineral através do processo de lixiviação em pilha. A taxa mínima de atratividade aceita seria de 10% a.a. . A receita global mínima (como medida do tamanho mínimo) assumida como estratégia da empresa para aceitação correspondeu a US\$ 50 milhões. Desta forma para os cálculos do G_t e do G_r utilizou-se as seguintes relações matemáticas já vistas no Capítulo IV:

$$G_t = f (T)$$

$$G_t = \frac{RT}{T \cdot R \cdot P}$$

Para o teor mínimo rentável a equação

$$I - f(Gr)(FRP)^n$$

r min

deve ser desenvolvida tornando $G_r = f(T)$, ou seja:

$$I - [((Produção Anual)R.P.G_r) - (Produção AnualXCusto)](FRP)^n$$

10

$$I - \left[\left(\frac{T}{n} \cdot R.P.G_r \right) - \left(\frac{T}{n} \cdot X \text{Custo} \right) \right] (FRP)^n$$

10

que é a expressão de $G_r = f(T)$.

Como todas as variáveis são conhecidas nas equações de G_t e de G_r , calculou-se o valor para cada um relativo às tonelagens dos diversos teores de corte.

Os resultados constam do QUADRO 11.

QUADRO 11

CRITÉRIO DE SELEÇÃO DO TAMANHO MÍNIMO E RENTABILIDADE

Blocos (Ton)	Qtde de Blocos	Cutoff	Ton Acumul.	Teor Médio	Au Cont. (g)	Vida Útil P.:600.000 t	Gt 50.000.000	FRP 10%	Gr
50000	222	0,3	11.100.000	1,05	11653557	18	0,48	8,201	1,17
50000	154	0,54	7.700.000	1,314	10121342	13	0,7	7,103	1,22
50000	106	0,73	5.300.000	1,63	8637516	9	1,02	5,759	1,3
50000	87	0,92	4.350.000	1,81	7860711	7	1,24	4,868	1,37
50000	74	1,11	3.700.000	1,945	7197055	6	1,46	4,355	1,43
50000	63	1,29	3.150.000	2,074	6534139	5	1,72	3,791	1,51
			Custo Unit.ário Produção Total= 8.24						

Esses resultados permitiram fossem construídas as curvas do tamanho e da rentabilidade mínimos, mostradas na figura 24.

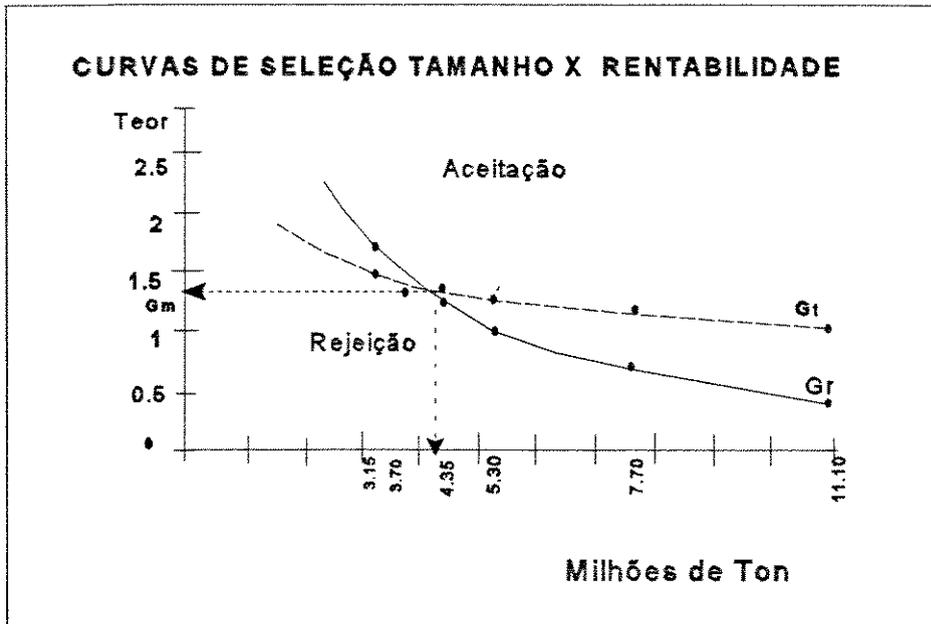


Figura 24 - Curva de Seleção do Tamanho e da Lucratividade mínimos

Pelas curvas de tamanho e rentabilidade determinou-se o Teor Médio Mínimo $G_m = 1,45$ g/t para o depósito que é o ponto ótimo onde se obtém o maior tamanho em relação à menor rentabilidade aceitáveis ($G_t = G_r$). A figura 25 apresenta o resultado da parametrização da reserva base (recurso provado + provável) para o caso ilustrativo do corpo PPG1-B, onde são vistos as curvas para tonelagem, metal contido e teor médio.

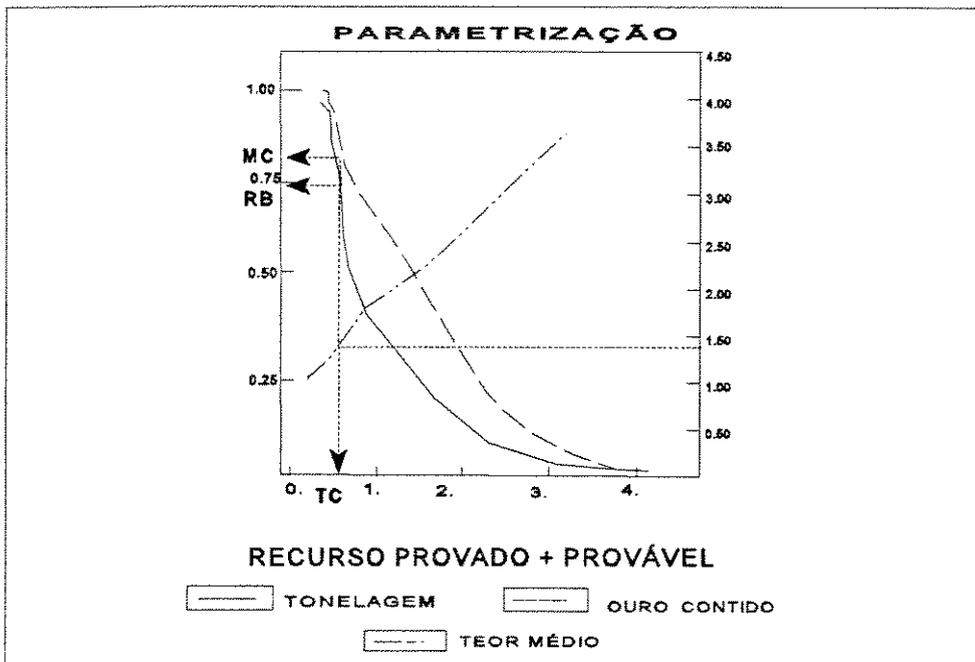


FIGURA 25: Parametrização dos Recursos Provado + Provável.

V.5.2. Conversão dos Recursos em Reservas Minerais

Assim, conhecendo-se o teor médio mínimo (Gm), satisfaz-se a condição mínima aceitável de tamanho e rentabilidade. A partir dos recursos provado + provável parametrizados, obteve-se a quantidade de massa mineralizada minimamente aceitável e o seu respectivo teor de corte. Em verdade, poderia ser seguido um outro critério para definição do teor de corte, calculando-se um fluxo de caixa para cada faixa de reserva com o seu teor de corte correspondente e a respectiva vida útil para a mina. Assim, selecionar-se-ia o teor de corte que apresentasse o melhor resultado no fluxo de caixa (ou pelo maior VA ou pela maior TIR).

Tendo-se definido pelo critério do teor médio mínimo, com esse valor foi possível elaborar o fluxo de caixa para o empreendimento (QUADRO 12), envolvendo os parâmetros técnicos de engenharia no âmbito do projeto conceitual e as variáveis econômicas a eles relacionados. Esse estudo de viabilidade econômica na esfera do Projeto Conceitual de Engenharia caracteriza a 'indicação de exequibilidade de lavra'.

No fluxo de caixa, para o cálculo da depreciação, considerou-se 10% do investimento total que corresponde a uma vida útil de 10 anos para o conjunto dos equipamentos. Considerou-se, ainda, como somatório de tributos uma alíquota geral de 40% (Imposto de renda e Contribuição Social - tributos diretos) sobre o lucro tributável no fluxo de caixa.

No critério do valor atual (V.A.) são conhecidos os fluxos de caixa e a taxa mínima de atratividade, e busca-se calcular o próprio V.A. a essa taxa. Pelo critério da T.I.R., procura-se o valor particular da taxa de desconto que anula o V.A.. Tal taxa é a própria T.I.R..

V. 5.3. Análise de Sensibilidade à Variação do Preço

Para efeito de simplificação, dado que o objeto deste estudo não é o de aprofundar essas técnicas, é assumida, no exemplo ilustrativo do depósito PPG1-B, uma situação em que não há financiamento de terceiros nem o efeito inflação, admitindo-se uma situação hipotética com moeda constante. Na verdade, com a análise de sensibilidade, gera-se informações sobre determinadas variáveis de interesse, e neste caso seria a simulação de VPL's em função das reservas, ou dos teores de cortes.

Pelo critério do valor atual do fluxo de caixa para cada faixa de teor, considerando uma taxa mínima de atratividade de 10%, foram realizadas 3 análises de sensibilidade; um fluxo de caixa para cada variação no preço (US\$ 13,50; US\$ 11,50; US\$ 10,50), obtendo-se os resultados expressos no quadro 13.

No âmbito de um projeto conceitual, relativo à fase de Relatório Final de Pesquisa, em função da incipiência de informações de ordem técnica de engenharia, não é possível definir as classes de reserva lavrável e recuperável.

QUADRO 13
RESULTADO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

PREÇO US\$/g de Au	VALOR PRESENTE LÍQUIDO (US\$)			TIR (%)
	Tx. 10 %	Tx. 12 %	Tx. 15 %	
10,50	-800.770	-1.725.030	-2.834.580	8,52
11.50	1.694.130	528.180	-885.390	13,03
12.33	3.764.890	2.938.350	732.43	16,59
13.5	6.683.920	5.034.600	3.012.980	21,14

Pelo Quadro 11 percebe-se a sensibilidade do projeto, tornando-se viável até o preço de US\$ 11,50 a uma taxa máxima de 12%. Em todos os cenários ao preço de US\$ 10,50 o projeto se torna inviável economicamente.

CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa desta dissertação permitiu a sistematização de conceitos teóricos relativos à avaliação de depósitos por métodos geoestatísticos associados a conceitos de engenharia econômica. Desta forma, discutiu-se o problema da classificação na conversão dos recursos em reservas minerais, caracterizando-os a partir da avaliação da economicidade de lavra.

Os objetivos da pesquisa foram atingidos ao se construir uma abordagem que incorpora a *interface* de duas disciplinas: pesquisa mineral por métodos geoestatísticos e engenharia econômica.

No exemplo analisado, foram revelados passos desenvolvidos a partir de uma base de dados de sondagem, objetivando a seleção da reserva base do empreendimento, sob o critério de definição do tamanho e da rentabilidade mínimos aceitáveis. Para uma melhor qualidade na avaliação de depósito, observou-se os seguintes procedimentos:

i. Análise preliminar estatística dos dados amostrados, definindo um teor de corte geológico; análise variográfica com a definição do modelo; definição da vizinhança de pesquisa para a krigagem e teste do modelo variográfico e dos parâmetros da vizinhança de pesquisa da krigagem pela técnica da validação cruzada. Realização da krigagem dos blocos em, pelo menos, três auréolas de pesquisa proporcionais aos alcances variográficos;

ii. classificação dos recursos krigados nas três auréolas em 'provados', 'prováveis' e 'possíveis', segundo a variância de estimativa, calculada sob o critério do número mínimo de amostras, considerando as dimensões da malha dos blocos;

iii. definição do método de lavra, estimando os seus parâmetros técnicos e as variáveis econômicas que interferem na viabilidade do futuro empreendimento, no âmbito do projeto conceitual, para efeito de indicação da exeqüibilidade de lavra ;

iv. a partir soma dos recursos provados e prováveis, critério da rentabilidade e do tamanho mínimos, define-se o teor de corte. Pelo fluxo de caixa, calcula-se o Valor Atual e a Taxa Interna de Retorno indicando a exequibilidade de lavra e convertendo-se recursos na reserva base do empreendimento. A análise de sensibilidade sob cenários econômicos otimistas e pessimistas, comparando-se com o cenário corrente.

v. Alternativamente, pode-se selecionar ou converter recursos em reservas pelo fluxo de caixa para várias faixas de teores, determinando-se aquele teor de corte que apresenta o melhor resultado no fluxo de caixa.

O desenvolvimento de procedimentos conformes à sistemática discutida e ilustrada, caso se tornasse uma prática corrente das empresas mineradoras, diminuiria decerto a margem de erro nas estimativas de recursos e o risco nas tomadas de decisão relativas a um investimento mineral. Além disso, seria obtida uma melhoria na quantificação do inventário mineral, criando condições mais adequadas para o estabelecimento de políticas de desenvolvimento para o setor. É importante ressaltar que uma classificação mais apropriada que as atuais para recursos e reservas deve ser definida expressando o rigor que as técnicas de estimativa e de avaliação econômica já atingiram.

Por sua vez, a parametrização de reservas na avaliação de depósitos e no planejamento de lavra, revelou-se uma prática indispensável, e atualmente tem sido utilizada de forma corrente para diversas empresas. Controlando a qualidade de seus produtos para a garantia do suprimento do mercado, que eleva a cada dia a exigências mais rígidas, a indústria mineral se torna mais competitiva e sofisticada. Por conseguinte, a gestão governamental deste segmento produtivo passa a exigir uma estrutura administrativa em condições similares. O instrumental necessário para a melhoria deste controle, público e privado, pode ser fornecido pelas técnicas geoestatísticas e de avaliação econômica.

Por fim, conclui-se pela necessidade premente de implantação de uma cultura no setor mineral que incorpore a preocupação sobre a confiabilidade das técnicas de estimativa de recursos e sobre a importância da avaliação econômica na conversão de recursos em reservas minerais.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- . AUSTRALASIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY. Australasian Code for Report of Identified Mineral Resources and Ore Reserves. AIMM: Melbourne, MAR, 1990. 137 - 140 p.
- . BASS, C. B. Reserve data project planning. IN: Resources and Reserves Symposium. Sydney: AIMM, 1987. pp. 81 - 88.
- . BAILLY, P. A. . The Problems of converting resources to reserves. MINING ENGINEERING: Clinton, Iowa, JAN, 1976. pp 27 - 37.
- . BERCKMAN, A. & ARMSTRONG, M.. Combining geostatistics and financial analysis for a south african gold deposit. Periódico ignorado. Centre de Géostatistique: Fontainebleau, s.d.p. - pp 249 - 256.
- . BIDEAUX, R. (ed.). Ore reserve estimation. IN: Surface mining (Kennedy, B.A. (ed.)) 2nd. Littleton: AIME, 1989. pp 287 - 392 .
- . BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. Avaliação econômica dos direitos Minerários: documento preliminar. Brasília: DNPM, 1980. 62p.
- . . Ministério da Infraestrutura. Departamento Nacional da Produção Mineral. Bases Técnicas para um Sistema Permanente de Quantificação do Patrimônio Mineral Brasileiro. Brasília: DNPM, 1991. 28p.
- . . Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. Metalurgia extrativa do ouro. Série tecnologia mineral - Nº 37 - Seção

metalurgia extrativa N° 14. Brasília, 1986, 79 p.

- . Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção. Principais depósitos minerais do Brasil. Vol.III. Brasília, 1988. 670p.
- . BURNES, M.P. . Computer - assisted mineral appraisal and feasibility. AIME: New York, 1980. 167p.
- . CARRAS, S.N. Concepts for estimating ores reserves and a comparative view of resources estimation methods. IN: Resources and Reserves Symposium. Sydney: AIMM, 1987. pp 73 - 80.
- . COLÉOU, T. Cutoff Grade Optimization: a panacea or fool's paradise? GEOSTATISTICS, (Armstrong, M. (ed.)) vol. 2. Fontainebleau: Kluwer A.P. 1989. pp889 - 900.
- . CVRD / DOCEGEO. Relatório final de pesquisa - Alvo Papagaio. Volume 1/6. Fevereiro, 1994.17p.
- . DAVID, M. . Geostatistical ore reserve estimation. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1977. 364p.
- . DESBARATS, A. & DAVID, M.. Influence of selective mining on optimum pit design. CIM BULLETIN. Canadá: vol. 77, n°.867. JUL,1984. p. 49 - 56.
- . DIATCHKOV, S.. Principles of classification of reserves and resources in the CIS countries. MINING ENGINEERING: Clinton, Iowa, MAR, 1994. pp 214 - 217.
- . DIEHL, P. & DAVID, Michel. Classification of reserves/resources based on geostatistical methods. CIM BULLETIN: Canadá, Vol 75, N° 838, FEB, 1982. pp 127 - 136.

- . FROIDEVAUX, R.. Geostatistics and ore reserve classification. CIM BULLETIM: Canadá, Vol 75, Nº 843, JUL, 1982. pp 77 - 83.
- . GENTRY, D.W. & O'Neil, T.J. . Mine Investment analysis. AIME: New York, 1984. 502 p.
- . GEOVARIANCES. Isatis (Software Computacional Geoestatístico). Versão 2.0. 1994
- . GOODE, J.R. et alli. Back to basic: the feasibility study. CIM Bulletin: Canadá: vol. 84, Nº. 953 . SEP., 1991. pp 53 - 61.
- . GOVETT, G. J. & GOVETT, M. H. The concept and measurement of mineral reserves and resources. RESOURCES POLICY. s.l.p., SEP, 1974. pp 46 - 55.
- . GRIMLEY, P.H.. Canadian Report Practices. IN: Reserves and resources Symposium . Sydney: AIMM, 1987. pp 1 - 9.
- . GUARASCIO, M., DAVID, M. & HUIJBREGTS, C. Advanced geostatistics in the mining industry. Boston: D. Riedel, 1975. 449p.
- . GUIBAL, D.. Grade/Tonnage curves and optimization of mining project. IN: Resources and Reserves Symposium. Sydney: AIMM, 1987. pp 89 - 92.
- . GUERRA, P. A. G.. Geoestatística Operacional. Brasilia: DNPM, 1988.145 p.
- . HANCOCK, M.C.; GOODAY, P and BRECH,G . Ore reserve sistem - principles and practice. IN: Resources and Reserve Symposium. Sydney: AIMM, 1987. pp 137 - 148
- . HIRSCHFELD, Henrique. Engenharia econômica. 3.ed. São Paulo: Atlas, 1986. 440 p.
- . HOWE, A.C. & MCCARTHY, J. Canadian and American guidelines on ore reserves

reporting and comparison with those propose for Australia. IN: Resources and Reserves Symposium. Sydney: AIMM, 1987. pp 23 - 25.

SAAKS, E. & SRIVASTAVA, R. M. . An indroduction to applied geostatistics. New York: Oxforford University, 1989. 561 p.

JEFFREYS, J. T.. A metodology for estimating reserves from resouces models. IN: Resources and Reserves Symposium. Sydney: AIMM, 1987. pp. 65 - 72.

JOHN, H. T. . Cut-off grades cumulations for an open-pit mine. CIM BULLETIM: Canadá, JUL, 1985. Vol 78, N° 879. pp 73 - 98.

JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, J. CH.. Mining Geostatistics. London: Academic Press, 1989. 145p.

JOURNEL, A.G. Recoverable reserve estimation - the geostatistical approach. Mining Engineering: Clinton, Iowa, JUN, 1985. pp. 563 - 568.

KNUDSEN, H. P. & BAAFI, E. Y.. Geostatistics for the evaluation of precious metals. IN: Resouces and Reserves Symposium. Sydney: AIMM, 1987. pp. 43 - 48.

LEWIS, P.J.. Metallurgical evaluation of an ore resource and its effect on ore reserves. IN: Resources and Reserves Symposium. Sydney: AIMM, 1987. pp 129 - 136.

MACHADO, I. F. . Recursos minerais, política e sociedade. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 410 p.

McKENZIE, B. . Economic guidelines for explotation planning. Rio de Janeiro: DNPM / PLANFAP / MME, 1983. 2 vol. 608p.

MARANHÃO, R. . Introdução à pesquisa mineral. Fortaleza: BNB, 1985. 682p.

- . **NAPIER, J. A.** The effect of cost and price fluctuations on the optimum choice of cutoff grades. Jornal SAIMM: Johannesburg, JUN, 1983. pp 117 - 125.

- . **PASIEKA, Arnoud & SATIROW, George.** Planning and operational cutoff grades based on computerised net present value and net cash flow. CIM BULLETIM: Canadá, Vol 78, Nº 878, JUN, 1985. pp 47 - 54.

- . **PEREIRA, L. A. F.** . Geologia e mineração . IN: II Simposio Brasileiro de Mineração, no. 33. 1972/73. São Paulo: Centro Moraes Rêgo da EPUSP. 1973.

- . **PEREIRA, N. M.** .Seleção de investimentos: critérios básicos e aplicações na indústria de mineração. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola Politécnica/USP, 1975. 109p.

- . **PHILIP, G. M.**. How ore reserves can be overestimated through computational methods. IN: Resources and Reserves Symposium. Sydney: AIMM, 1987. pp 65 - 72.

- . **PINTO, U. R. (Org.)**.Consolidação da legislação mineral e ambiental. Brasília, DMG,1991. 374p.

- . **POMERANZ, Lenina.** Elaboração e análise de projetos. São Paulo: HUCITEC, 1988. 246 p.

- . **PUCCINI, Abelardo et alli.** Engenharia econômica. Rio de Janeiro: Bertrand, 1988. 165p.

- . **REMACRE, A. Z.** . O problema da estimação de reservas recuperáveis na geoestatística. IN: I Congresso Brasileiro de Mineração. Anais. Brasília: IBRAM, 1982.

- . **REMACRE, A. Z. & CORNETTI, M.** .Anavar. Versão 1.0. Unicamp. s.d.

- . REMACRE, A. Z. & CORNETTI, M. . Playkrig. Unicamp. s.d.
- . ROYLE, A. G. Estimating small blocks of ore how to it with confidence. WORLD MINING: s.l.p., APR,1979. pp 55 - 57.
- . ROYLE, A.G. How to use geostatistics for ore. WORLD MINING. s.l.p., FEB, 1977. pp 52 - 56.
- . SABOURIN, R.L. . Aplication of a geostatistical method to quantitatively define various categories of resources. IN:Geostatistics for natural resources categorization (Verly et alii (ed.). Nato ASI. Boston, 1984. pp 201 - 215.
- . SLAVICH, D.M. Project evaluation - a key step to implementation. CIM BULLETIM: Vol 75, N° 843, JUL, 1982. pp 91 - 98.
- . SOUZA. P. A. . Métodos de Avaliação Econômica de Projetos de Exploração Mineral. Dissertação (Mestrado em Geociências). IG/UNICAMP: Campinas, 1994. 219p.
- . SOUZA, P. A. . Avaliação econômica de projetos mineiros. IN: 4o. Curso de Economia Mineral. Belo Horizonte: IBRAM, 1988 - 100p.
- . TAYLOR, H.K.. Discussion on: Mineral deposit evaluation and reserve inventory ... practice. CIM BULLETIM: Canadá, Vol 85, N° 964, OUT, 1992, pp 76 - 77
- . VALENTE, Jorge. Geomatématica - Lições de Geoestatística. Ouro Preto: Fundação Gorceix, 1989. 8 vol - 2180 p.
- . VALENTE, Jorge & GIRODO, Antonio C.. Geoestatística e pesquisa operacional aplicadas a projetos de mina a céu aberto. IN: I Congresso Brasileiro de Mineração. Anais. Brasília: IBRAM, 1985. p. 33 - 42.

- . VALENTE, J.. Lavra a céu aberto ou lavra subterrânea? Como decidir. IN:
I Seminário nacional sobre lavra a céu aberto. Anais. Belo Horizonte: DNPM, 1982.

- . VALLÉE, M. et alii - Quality control requirements for more reliable mineral deposit and reserve estimates. CIM Bulletin: Canadá, vol. 86, no. 969, APR. 1993.

- . VALLÉE, M. & CÔTE, D. . The guide to the evaluation of gold deposits: integrating deposit evaluation and reserve inventory practices. CIM BULLETIM: Canadá, Vol. 85, N°957, FEB, 1992. pp 50 - 61.

- . VANLANDIGHAM, S. L. . Economic evaluation of mineral property. Strondsbourg: Hutchinson Ross, 1983. 385p.

- . WOBER, H.H. & MORGAN, P.J. . Classifications of reserves based on geostatistical and economic parameters. CIM BULLETIM: Canadá, Vol 86, N° 966, JAN, 1993. pp 73 - 76.

- . WORTMAN, D. Mineral deposit evaluation and reserve inventory practice. CIM BULLETIM: Canadá, Vol 86, N° 968, MAR, 1993. pp 144 - 148.

