

ESTIMATIVA DE RESERVA RECUPERÁVEL DE FERRO A PARTIR DE CONDICIONAMENTO UNIFORME

Stephanie Rodrigues Menezes Barbosa, GE21 Consultoria Mineral,
stephanie.barbosa@grupoge21.com

Pedro Henrique Alves Campos, Universidade Federal de Minas Gerais,
pedrocampos@demin.ufmg.br

Porfirio Cabaleiro Rodrigues, GE21 Consultoria Mineral, porfirio.cabaleiro@grupoge21.com

RESUMO

O método de Condicionamento Uniforme (UC) mostra-se como uma alternativa interessante para a determinação global da reserva recuperável de um determinado depósito em relação a métodos convencionais lineares comumente empregados. No presente trabalho, buscou-se aplicar o método UC para a determinação de reserva recuperável de um corpo mineralizado de ferro, comparando-o ao método de Krigagem Ordinária (OK), com o uso do software *Isatis.neo Mining Edition*®. Os resultados e a validação através da Simulação por Bandas Rotativas (TBS) indicam uma menor suavização da curva teor-tonelagem obtido pelo método UC se comparado a obtida pela OK, quando os dados disponíveis possuem grandes espaçamentos. Por fim, um pós-processamento através do Condicionamento Uniforme Localizado (LUC) foi realizado.

Palavras-chave: Condicionamento Uniforme; Krigagem Ordinária

ABSTRACT

The Uniform Conditioning (UC) method is an interesting alternative for the global determination of the recoverable reserves of a given deposit in relation to conventional linear methods used. In the present work, it was sought to apply UC method for the determination of recoverable reserve of a mineralized iron ore body, comparing it to Ordinary Kriging (OK), with the use of the software *Isatis.neo Mining Edition*®. The results and validation through Turning Bands Simulation (TBS) indicate less smoothing of the grade-tonnage curve obtained by the UC method compared to that obtained by OK, especially when the available data have large spacings. Finally, a post-processing through Localized Uniform Conditioning (LUC) was performed.

Keywords: Uniform Conditioning, Ordinary Kriging

INTRODUÇÃO

O sucesso de um empreendimento mineiro depende diretamente da qualidade da estimativa realizada para os materiais contidos na área a ser explotada, uma vez que todas as fases subsequentes de lavra e suas definições serão calcadas nas premissas estabelecidas nesta fase de pesquisa. Métodos geoestatísticos lineares são aplicados exaustivamente na indústria para a realização de estimativas, modelagem e declaração de recursos e reservas. No entanto, as campanhas de sondagem efetuadas durante a fase de exploração mineral e a malha amostral utilizada em alguns casos possuem espaçamentos de grandes dimensões e fornecem suportes, ou seja, unidades amostrais básicas, quase pontuais, gerando estimativas que podem ser muito suavizadas devido à escassez de dados. Nesse contexto, a utilização de blocos cujas dimensões se assemelham a malha de amostragem para a realização de estimativas é inadequada do ponto de vista da operação seletiva de lavra, apesar de apresentarem baixas variâncias. Oposto a isso, a estimativa de blocos significativamente menores, conhecidos como Unidades Seletivas de Lavra (SMUs), definidos de acordo com o método de lavra proposto para a reserva e da busca por seletividade, pode não apresentar a acurácia e precisão necessárias para as fases subsequentes da cadeia mineral.

Métodos geoestatísticos não lineares mostram-se como alternativas para estimativas nas quais as soluções por técnicas lineares, como a Krigagem Ordinária ou a Krigagem Simples, não são as melhores opções, em função das características dos dados amostrais disponíveis. Frequentemente, tais métodos são utilizados para a resolução de casos em que se deseja conhecer a distribuição de uma variável em um depósito ao invés de apenas determinar seu valor em um local determinado ou situações em que os dados não produzem estimativas lineares confiáveis por serem extremamente assimétricos. O Condicionamento Uniforme (UC) é um método não linear utilizado para a estimativa da distribuição de uma variável no suporte SMU, baseado no teor do painel estimado. O painel também é conhecido como bloco tecnológico e apresenta dimensões definidas de acordo com a malha amostral. As SMUs são frações desse bloco maior, ou seja, cada painel comporta um número limitado de Unidades Seletivas de Lavra, sendo essas determinadas a partir do método de lavra e os equipamentos a serem utilizados.

A ideia principal sustentada por este método é a estimativa da reserva acima do teor de corte previamente determinado, possibilitando uma projeção mais confiável a partir da adequação de suporte entre amostras, blocos SMUs e painéis. Neste caso, assume-se que o teor do painel é conhecido com base na estimativa por Krigagem Ordinária (OK). Essa estimativa mostra-se mais confiável do que a Krigagem feita para as SMUs em função do espaçamento dos dados. Para correta transformação entre os diferentes suportes amostrais a serem utilizados no UC, esse método utiliza o Modelo Discreto Gaussiano (DGM) como algoritmo para mudança de suporte. Através da função de anamorfose gaussiana, ele será responsável por apresentar o coeficiente de mudança de suporte entre blocos SMUs e painéis. Diante de tais premissas, torna-se possível estimar a quantidade de metal acima do teor de corte dentro de cada painel, determinado a partir de considerações para estimativa de reserva. Uma limitação apresentada pelo UC relaciona-se ao fato de que as SMUs estimadas com teor acima do teor de corte não possuem a localização determinada dentro do painel neste método, apenas a proporção dentro deste.

No presente estudo, a aplicação do método de Condicionamento Uniforme para a determinação de reserva recuperável de um corpo mineralizado de ferro será investigada com o objetivo de traçar suas vantagens e desvantagens se comparado ao método geoestatístico linear de Krigagem Ordinária.

METODOLOGIA

O presente trabalho baseia-se na aplicação do método geoestatístico não linear conhecido como Condicionamento Uniforme em seus fundamentos principais, descritos por Hansmann [1], através do *software* Isatis.neo Mining Edition®, desenvolvido e distribuído pela *Geovariances*. A metodologia utilizada consiste principalmente nas seguintes etapas: preparação de dados e análise estatística, variografia, estimativa do painel, anamorfose gaussiana, mudança de suporte, aplicação do Condicionamento Uniforme e pós-processamento de resultados via Condicionamento Uniforme Localizado, de acordo com o proposto por Abzalov [2].

Preparação de Dados e Estatísticas Básicas

Os dados utilizados são representativos de uma mina real situada no Quadrilátero Ferrífero e foram obtidos a partir de uma campanha de sondagem com malha irregular de espaçamentos que variam de 50x50 metros a 300x300 metros. Foram utilizados 9 furos de sondagem no total para a área analisada, com 153 amostras ferríferas, e também o domínio que compreende a mineralização de ferro.

Para a realização do Condicionamento Uniforme, faz-se necessária a regularização dos dados amostrais. Desta forma, a compositagem foi realizada para um comprimento de compósitos de 6 metros, sendo o comprimento mínimo analisado de 4,5 metros. A Figura 1 exemplifica a distribuição espacial dos compósitos utilizados e a Figura 2 mostra o gráfico com a distribuição de teores de ferro nos compósitos a serem analisados, sendo que esses foram modificados por função em relação aos dados originais, de modo a evitar associações com a operação real.

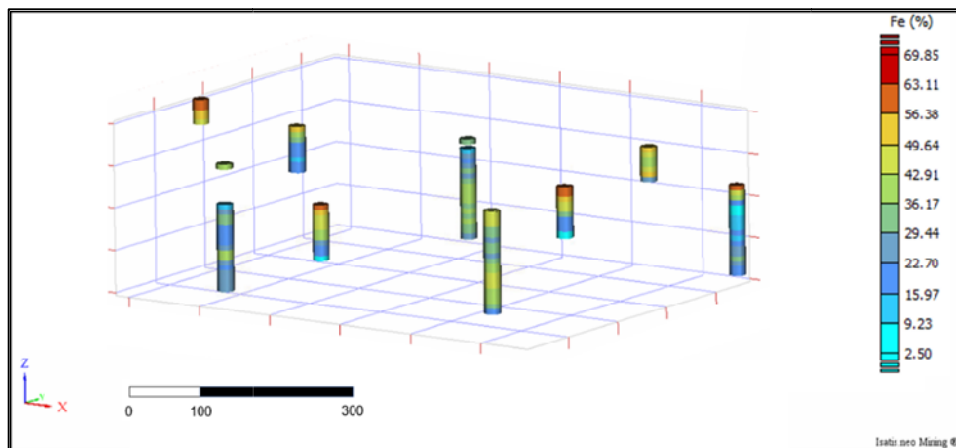


Figura 1: Distribuição Espacial de Compósitos (Vista em Perspectiva)

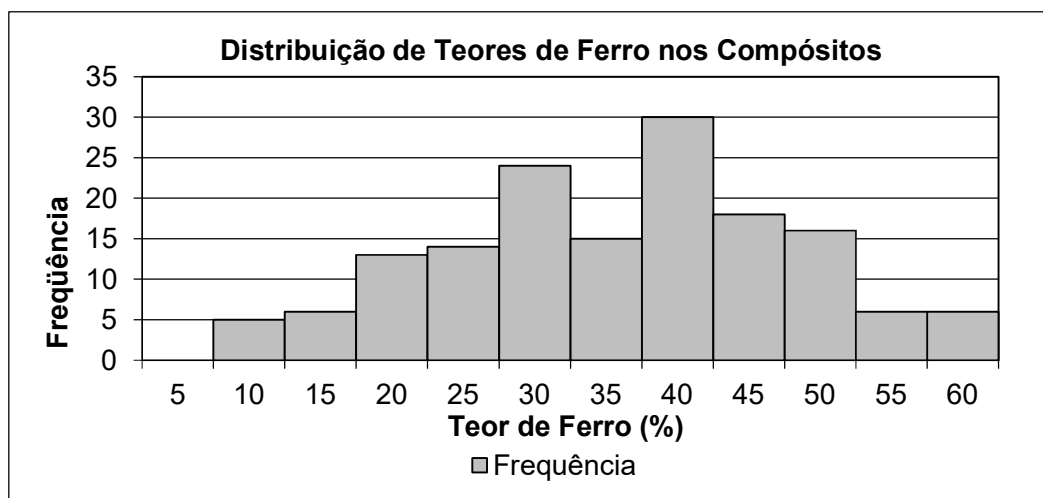


Figura 2: Distribuição de Teores de Ferro nos Compósitos

A técnica de desagrupamento por células, de acordo com o descrito por Yamamoto e Landim [3], também foi utilizada para a preparação dos dados. Considerando a variação dos pesos de desagrupamento de acordo com o tamanho da célula escolhida, analisou-se a média ótima diante do intervalo apresentado de possíveis células para evitar a maior influência de regiões mais densamente amostradas do que outras. O intervalo de células variou de 50x50x6 metros a 300x300x6 metros. De acordo com Pycrz e Deustch [4], o procedimento mais usual para se escolher o tamanho adequado de célula se baseia na escolha daquela que minimiza ou maximiza a média desagrupada. Geralmente, na mineração, tende-se a trabalhar com o tamanho que minimiza a média, de modo que seja reduzida a influência da amostragem agrupada em regiões de alto teor. Desta forma, o tamanho escolhido que minimizava a média para os dados analisados foi de 287 x 287 x 6 metros. As Tabelas 1 e 2 abaixo apresentam as principais estatísticas para os compósitos antes e após o desagrupamento.

Tabela 1: Estatísticas dos Compósitos para a Variável Fe

Estatísticas - Compósitos Variável Fe	
Média	33,36
Média Geométrica	30,73
Média Harmônica	27,48
Desvio padrão	12,09
Variância	146,10
Curtose	2,45
Assimetria	-0,05
Mínimo	7,04
Máximo	59,88
Contagem	153

Tabela 2: Estatísticas dos Compósitos Desagrupados para a Variável Fe

Estatísticas - Compósitos Desagrupados
--

Variável Fe	
Média	32,23
Média Geométrica	29,25
Média Harmônica	25,87
Desvio padrão	12,91
Variância	166,80
Curtose	2,21
Assimetria	0,11
Mínimo	7,04
Máximo	59,88
Contagem	153

A última etapa da preparação de dados refere-se à normalização da função de distribuição acumulada (CDF) da variável que representa o teor de ferro global do depósito para a função de distribuição acumulada gaussiana, uma vez que a utilização do Modelo Discreto Gaussiano para a mudança de suporte no Condicionamento Uniforme exige que os dados estejam transformados em seu equivalente gaussiano. A Figura 3 mostra o gráfico de ajuste dos dados pontuais à sua forma gaussiana pela função conhecida como Anamorfose Gaussiana obtido no *software* Isatis.neo Mining Edition ®.

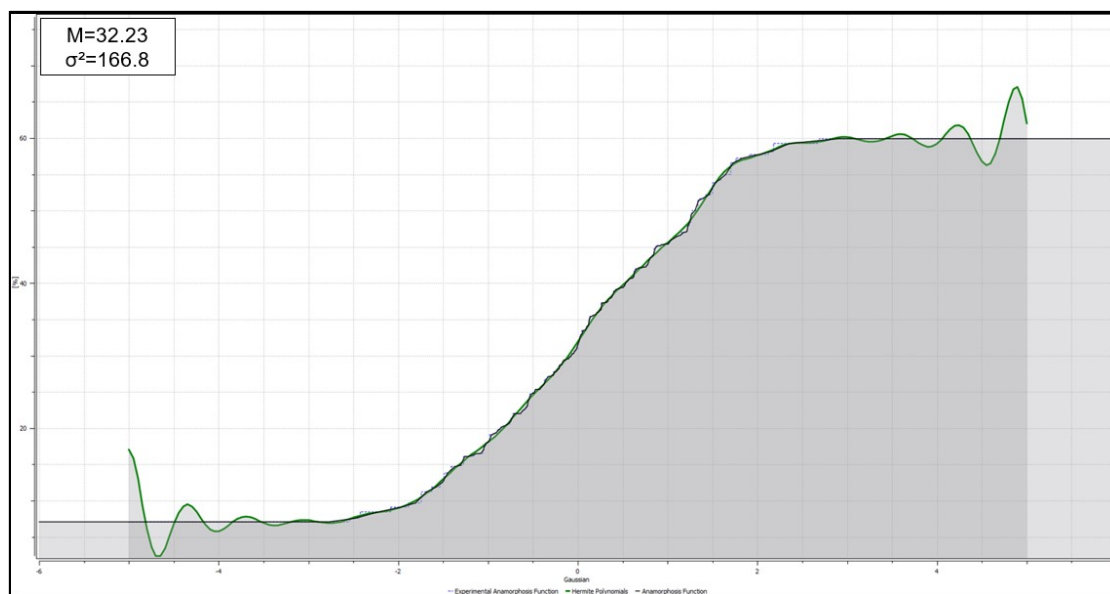


Figura 3: Ajuste por Anamorfose Gaussiana de Dados Pontuais da Variável Fe

EDA e Variografia

Para a etapa de Análise Exploratória dos Dados, foram construídos os gráficos *Box-plots* e *QQ-plots* para a variável ferro posteriormente a transformação dos dados para sua forma gaussiana, através da função de anamorfose. Na Figuras 4 e 5, são apresentados o gráfico de probabilidades (*QQ-plot*) e o gráfico de caixa (*box-plot*) para a variável Fe.

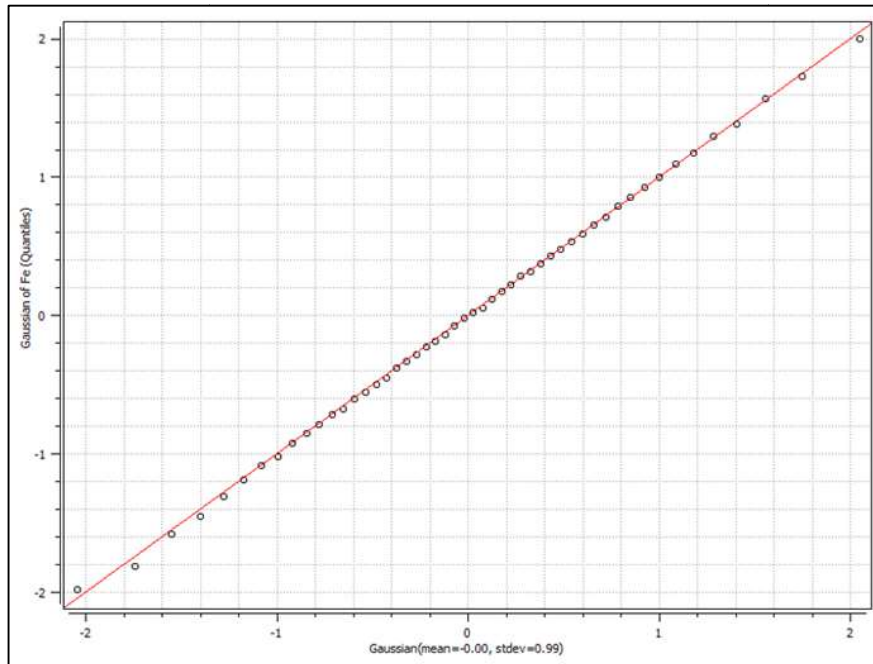


Figura 4: *QQ-plot* para a variável gaussiana Fe

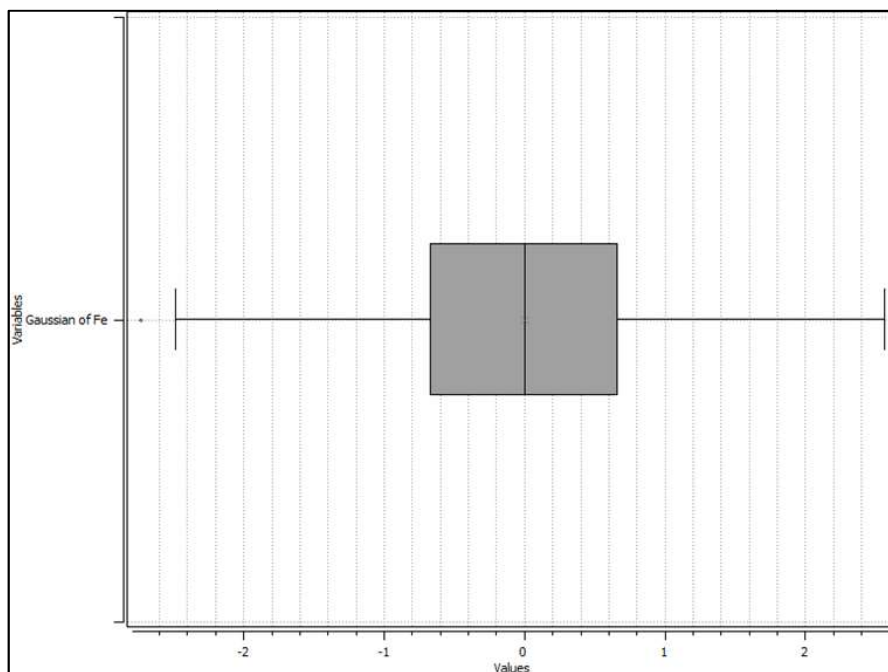


Figura 5: *Box-plot* para a variável gaussiana Fe

É possível verificar a média igual a zero para a variável gaussiana no gráfico da Figura 4, assim como o desvio padrão unitário. No gráfico de probabilidades para a variável Fe, observa-se a assimetria positiva relativamente baixa da distribuição, também calculada e reportada na Tabela

2 com valor de 0,11. O gráfico *box-plot* da Figura 4 confirma-se a relativa baixa assimetria dos dados para a variável e é possível observar graficamente os valores mínimos e máximos de teor. Além disso, um único valor de outlier é mostrado para a variável após sua transformação gaussiana.

A partir dos compósitos desagrupados e após a transformação gaussiana, foi realizada a análise variográfica. Os variogramas foram calculados a partir do plano de referência em relação à direção e mergulho do corpo de azimute 45°, *plunge* de -2° e mergulho de -25°.

Os variogramas experimentais estão de acordo com os parâmetros de direção descritos na Tabela 3. Já o modelamento variográfico foi realizado para os dados gaussianos utilizando-se os parâmetros contidos na Tabela 4. Foram consideradas duas estruturas esféricas de acordo com a geologia local. Uma estrutura está associada a deformação devido à intrusão máfica e a outra estrutura está ligada a gênese causada pela dissolução hidrotermal.

Tabela 3: Parâmetros de Direção do Variograma Experimental

Variogramas Experimentais Parâmetros de Direção				
Atitudes	Direção	Mergulho	Contra-Mergulho	Downhole
	N45°, Plunge -2°	N-44.1°, Dip -25°	N130.7°, Dip - 64.9°	-
Intervalo entre Amostra - Lag (m)	50	50	50	3
Distância Máxima (m)	500	500	500	60
Tolerância do Lag (%)	42	90	30	
Nº de Lags a ser refinado	0	5	0	
Subdivisão de Lags (m)	5	15	5	
Tolerância Angular (°)	90	45	90	
Largura de Corte de Planos (m)	110	250	500	
Altura de Tolerância Angular (°)	30	30	30	
Altura de Corte de Planos (m)	3	3	18	

Tabela 4: Parâmetros de Ajuste Variográfico

Parâmetros de Ajuste Variográfico							
Alvo	C0	C1	A1	C2	A2	Fator Eixo-Menor	Fator Semi-Eixo
Direção	0,1	0,6	200	0,3	300	1,31	3,52
Mergulho	0,1	0,6	200	0,3	300	1,31	3,52
Contra-Mergulho	0,1	0,6	50	0,3	60	1,31	3,52
Downhole	0,1	0,6	133	0,3	200	1,31	3,52

Foram feitos os variogramas de acordo com as atitudes do corpo, seguindo sua direção, mergulho e contra-mergulho. Além disso, o variograma *downhole* também foi construído para análise do efeito pepita. Observa-se que o efeito pepita não possui valor muito alto, como exemplificado pelo variograma *downhole*. As Figuras 6 a 9 a seguir mostram os variogramas na direção do corpo, no mergulho do corpo, no contra-mergulho do corpo e o *downhole*, respectivamente.

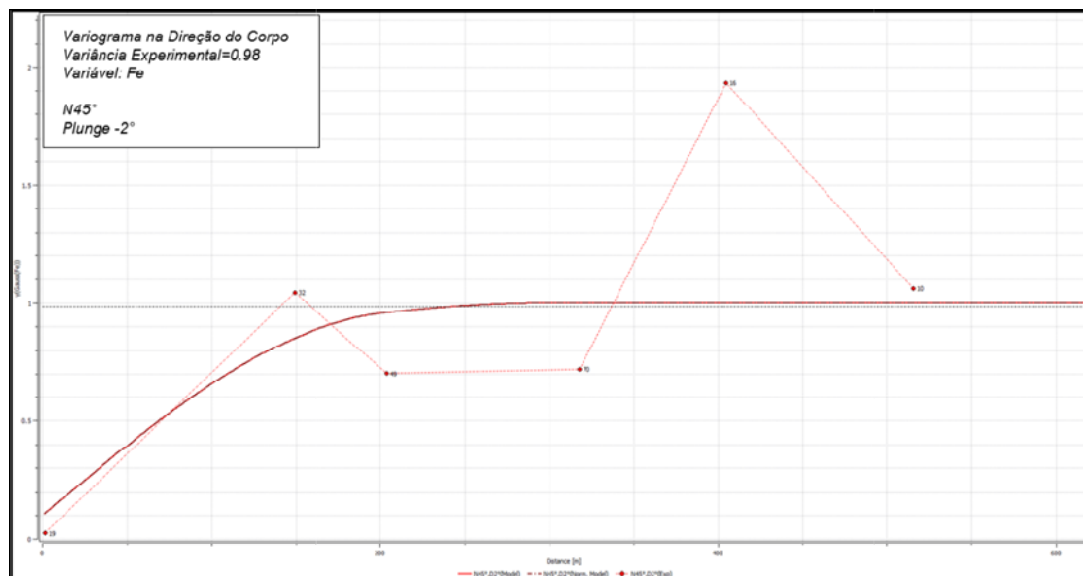


Figura 6: Variograma na Direção do Corpo

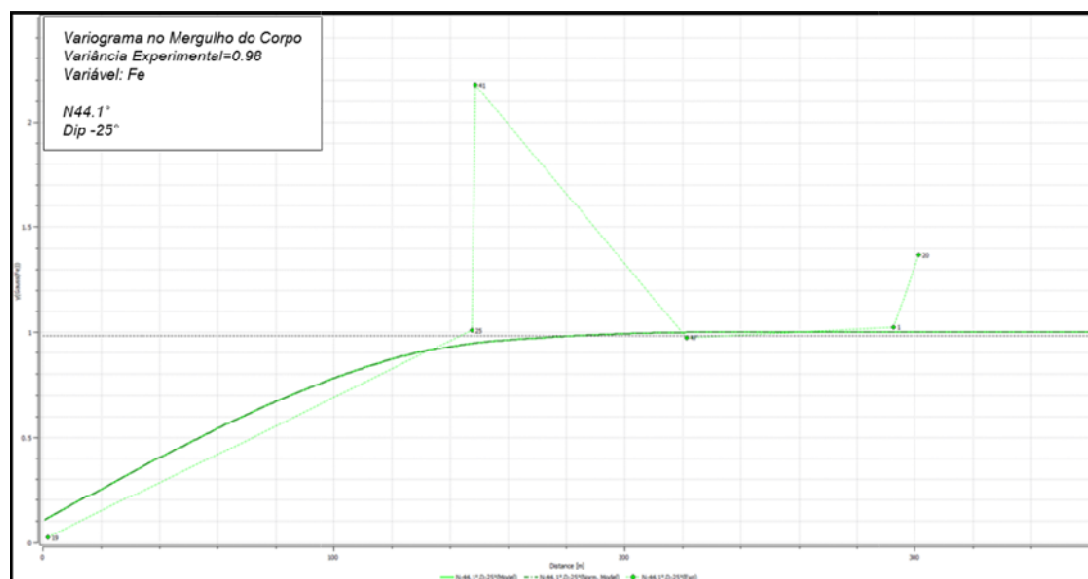


Figura 7: Variograma no Mergulho do Corpo

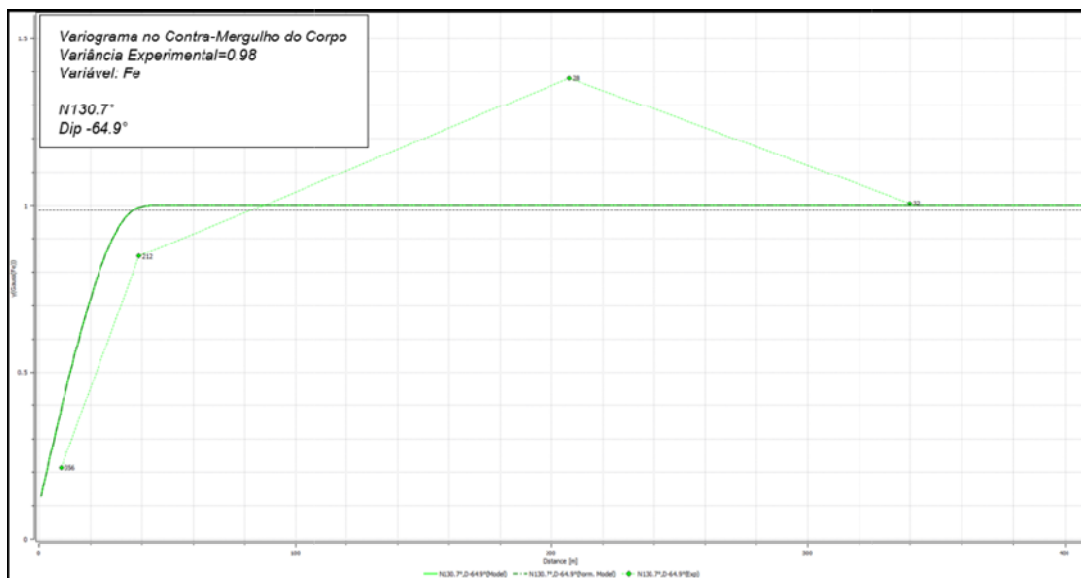


Figura 8: Variograma no Contra-Mergulho do Corpo

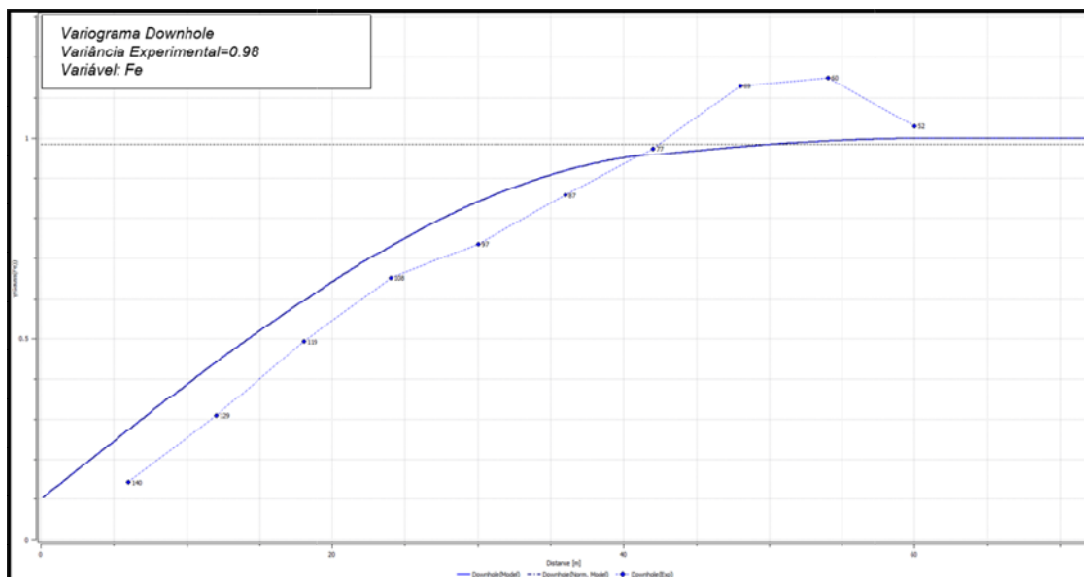


Figura 9: Variograma Downhole

Estimativa do Painel

Após a análise e modelagem variográfica, foi possível realizar a estimativa do painel por Krigagem Ordinária sob os dados de exploração, como base para o método de Condicionamento Uniforme. O painel possui dimensões de 50x50x12 metros e os pontos de discretização escolhidos tiveram como referência a menor covariância de blocos. O valor utilizado foi de 5x5x6 pontos em cada direção. A vizinhança de busca da Krigagem Ordinária relaciona-se diretamente com o elipsóide de busca utilizado para a variografia. Os principais

parâmetros utilizados para definição da vizinhança de Krigagem estão descritos na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5: Parâmetros de Vizinhança para Krigagem Ordinária

Parâmetros de Vizinhança	
Rotação	Direção: 45° Plunge: -2° Mergulho: -25°
Raio do Elipsóide	U=300m V=229m W=85m
Setores Angulares	4
Nº Ótimo de Amostras por Setor	12
Nº mínimo de Amostras	1
Fator de Tamanho Médio - Elipsóide	1
Fator de Tamanho Maior - Elipsóide	1,33

Anamorfose Gaussiana e Mudança de Suporte

Para possibilitar a mudança de suporte, passando da escala de pontos para blocos, é necessário que os dados sejam ajustados previamente à função de anamorfose gaussiana. Segundo Neufeld [5], o objetivo principal desta transformação dos dados se traduz no controle da forma e da variabilidade da distribuição em escalas maiores. A função de anamorfose gaussiana é uma combinação de polinômios de Hermite que, aplicados com a finalidade de mudança de suporte, calcula parâmetros de correlação entre todos os tamanhos sendo analisados: pontos, SMUs e painéis.

Deste modo, realizou-se o procedimento para a mudança de suporte para SMU, a partir dos dados pontuais previamente ajustados também pela função de anamorfose gaussiana. A Figura 10 exemplifica o gráfico de ajuste obtido, assim como o coeficiente r de mudança de suporte para a escala SMU.

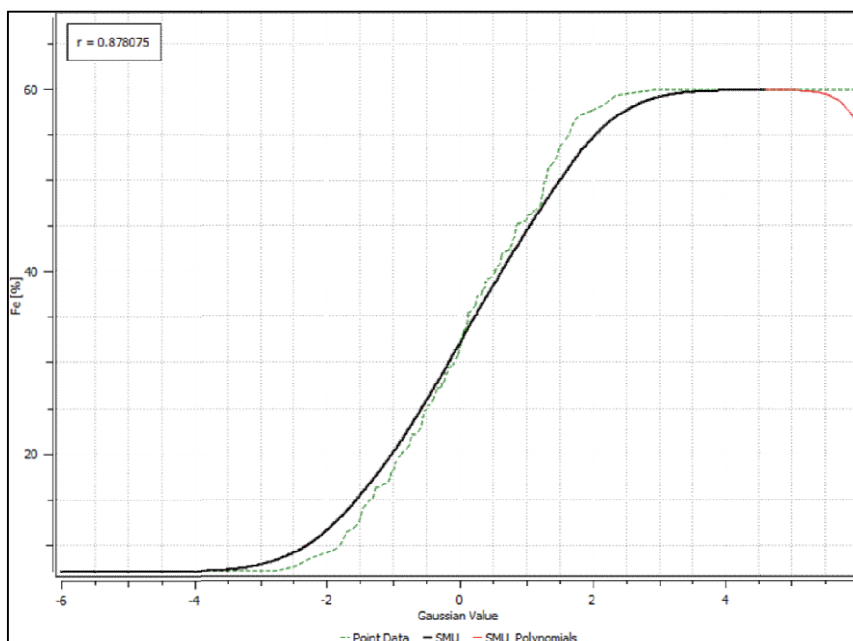


Figura 10: Mudança de Suporte para a escala SMU

Condicionamento Uniforme

A partir da estimativa do painel e da mudança de suporte realizada para os dados amostrais e para os blocos SMUs, foi possível aplicar o método de Condicionamento Uniforme. Inicialmente, definiram-se os valores de teores de corte a serem utilizados para os cálculos. Também foi definido o número de iso-frequências analisadas para a estimativa. As iso-frequências tem como objetivo o ajuste a dispersão local de variância dos painéis ao realizar sua mudança de suporte. A mudança de suporte dos painéis é feita dentro do algoritmo que executa o Condicionamento Uniforme no software Isatis.neo Mining Edition ®. A Tabela 6 mostra os principais parâmetros utilizados para a estratégia de UC.

Tabela 6: Parâmetros de Definição para UC

Parâmetros de Definição para Condicionamento Uniforme	
Tamanho do Painel	50m x 50m x 12m
Número de Painéis na Zona Mineralizada	734
Tamanho do SMU	25m x 25m x 6m
Número de SMUs na Zona Mineralizada	5872
Discretização	5 x 5 x 6
Cut-Off Máximo (%)	60
Cut-Off Mínimo (%)	0
Número de Iso-frequências	1

Realizou-se, então, o Condicionamento Uniforme, estimando o percentual de tonelagem, teor e metal contido acima dos teores de corte propostos.

Pós-processamento: Condicionamento Uniforme Localizado

O algoritmo de pós-processamento conhecido como Condicionamento Uniforme Localizado foi realizado permitindo o mapeamento dos resultados do Condicionamento Uniforme por painel de acordo com os blocos SMUs dentro destes. Como o LUC segue diretamente os preceitos estabelecidos pelo método UC, os parâmetros definidos na Tabela 6 foram mantidos. Além destes, definiu-se a opção de normalização da tonelagem para a proporção de blocos no painel.

Validação por Simulação por Bandas Rotativas

Para realização da validação através do método de Simulação por Bandas Rotativas (TBS), aplicaram 400 bandas, utilizando os mesmos parâmetros de vizinhança empregados para a estimativa da distribuição condicional do teor de ferro no Condicionamento Uniforme. O número total de realizações equiprováveis para TBS foi de 50.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Após a preparação e análise dos dados, aplicou-se o método de Condicionamento Uniforme e Condicionamento Uniforme Localizado sobre a zona mineralizada do depósito para determinação de reserva e análise comparativa em relação ao método geoestatístico linear de Krigagem Ordinária. A análise completa dos resultados obtidos será interpretada em 4 etapas: discussão sobre as mudanças de suporte realizadas, a interpretação do Condicionamento Uniforme realizado globalmente para o depósito se comparado à Krigagem Ordinária, a validação por Simulação por Bandas Rotativas e o ranqueamento determinado pelo Condicionamento Uniforme Localizado.

Análise sobre a Mudança de Suporte

Para a realização do Condicionamento Uniforme e o posterior pós-processamento por Condicionamento Uniforme Localizado através do ranqueamento das Unidades Seletivas de Lavra, conduziu-se a mudança de suporte, partindo-se da escala de pontos e transformando-a para a escala de painéis com dimensões de 50x50x12 metros e SMUs de 25x25x6 metros. A Figura 11 exemplifica as duas escalas de blocos analisadas em vista de planta, para a zona mineralizada considerada.

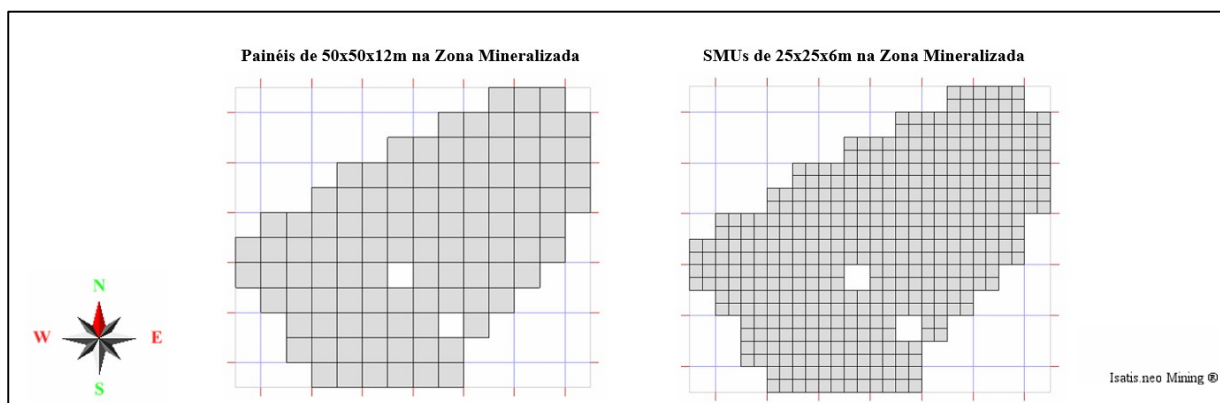


Figura 11: Escalas de Blocos utilizadas no Condicionamento Uniforme - Painéis e SMUs

O ajuste dos dados de acordo com a função de Anamorfose Gaussiana e o Modelo Discreto Gaussiano proposto por Matheron [6] foi realizado em três etapas, cada uma dessas para um diferente suporte. O primeiro ajuste diz respeito a transformação dos dados originais para sua forma gaussiana. A Figura 3 apresentou o gráfico que atesta a bivariada gaussiana, identificando uma distorção nos polinômios de Hermite apenas fora dos intervalos considerados para a transformação, sendo de forma geral um ajuste aderente aos valores reais dos teores dos compósitos amostrais, de acordo com Coombes [7].

Em seguida, tem-se a mudança de suporte para a escala de blocos SMUs e painéis. Para tais transformações, dois coeficientes representam essa mudança. O coeficiente r' relaciona a mudança entre a escala de pontos para os painéis e o coeficiente r representa a relação entre o suporte SMU e os pontos. A razão entre r' e r fornece a correlação da mudança de suporte.

O coeficiente r é calculado a partir da estimativa da variância pelo modelamento variográfico. A Figura 10 mostra o gráfico de ajuste da função de Anamorfose Gaussiana para a escala SMU. O alto valor de r indica uma alta correlação entre os teores dos dados pontuais e os teores para os blocos SMUs. Já o coeficiente r' é calculado diretamente a partir da variância da Krigagem Ordinária realizada para os painéis. A Tabela 7 apresenta os principais resultados para a mudança de suporte realizada. É possível observar que a variância de dispersão diminui consideravelmente com o aumento no tamanho do suporte considerado, sendo a variância na escala de pontos muito superior a variância de dispersão para os painéis, uma vez que, nesse último caso, os teores tendem para a média da população e se tornam mais simétricos em relação à mesma.

Tabela 7: Resultados da Mudança de Suporte

Resultados de Mudança de Suporte	
Variância Experimental	166,8% ²
Variância de Dispersão - SMU	127,3 % ²
Variância de Dispersão - Paineel	61,8% ²
Coefficiente de Mudança de Suporte (r) - SMU	0,88
Coefficiente de Mudança de Suporte (r') - Paineel	0,61
Correlação de Mudança de Suporte (r'/r)	0,69

Estimativa do Paineel por Krigagem Ordinária

Para uma avaliação global da reserva recuperável, realizou-se em primeiro lugar, a estimativa dos painéis por Krigagem Ordinária. De acordo com os parâmetros de vizinhança e as

definições para aplicação da Krigagem Ordinária e do UC definidos nas Tabelas 5 e 6 respectivamente, foi possível conduzir a análise dos resultados obtidos para esse método. Os resultados da OK estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados da Krigagem Ordinária para o Painel

Resultados da Krigagem Ordinária para o Painel	
Teor de Ferro (%)	33,36
Desvio Padrão (%)	7,74
Variância (% ²)	59,93
Variância de Estimativa (% ²)	61,39
Inclinação da Reta de Regressão (Z Z*)	0,64
Eficiência de Krigagem	0,15

A Krigagem Ordinária apresentou um valor intermediário do parâmetro de Inclinação da Regressão (SR) que deveria ser próximo de 1 para indicar o não viés condicional entre o real valor do painel e o valor estimado. Já a Eficiência de Krigagem (KE) que mostra a relação entre a variância de Krigagem para os painéis estimados e a variância real dos painéis apresentou um baixo valor, indicando um alto valor da variância de Krigagem. As principais causas para os resultados de Krigagem apresentados são:

- Baixa densidade de dados frente à extensão do domínio;
- Espaçamento amostral aberto e irregular, sendo o maior tamanho de malha da mesma ordem do maior alcance variográfico;
- Escolha da dimensão do painel próximo ao menor espaçamento de malha apresentado.

O modelamento variográfico realizado foi definido a partir de conhecimentos prévios da área em que se encontram os dados, traduzindo as características geológicas com um modelamento que se assemelha ao observado para a região como um todo. A Figura 12 mostra o domínio mineralizado e os furos utilizados.

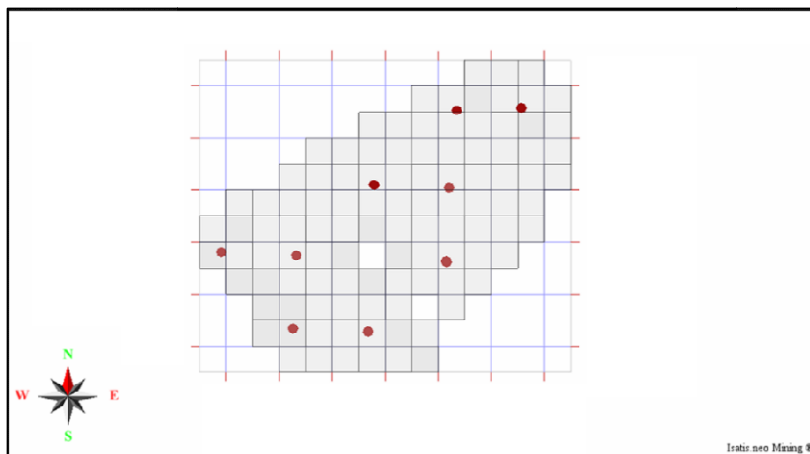


Figura 12: Furos de sondagem do banco de dados em relação ao domínio mineralizado

Tais parâmetros não podem ser analisados individualmente sem que sejam observados os objetivos da estimativa. Ainda que a Inclinação da Reta de Regressão mais próxima de 1 signifique a ausência de viés condicional, em uma situação desse tipo a estimativa poderia ser mais facilmente resolvida pela Krigagem Simples (SK) e, portanto, seria também mais suavizada. Já no caso de uma KE ideal cujo valor fosse igualmente a SR, mais próximo de 1, a estimativa indicaria um baixíssimo grau de suavização, uma vez que a variância de Krigagem seria muito próxima a variância real dos blocos. Na situação apresentada, a baixa Eficiência de Krigagem significa que a variância de estimativa retornou valores altos perante a variância real do painel, em função dos espaçamentos amostrais. Em ambos os casos “ideais”, os resultados revelariam que a OK ou até a SK seriam métodos adequados para estimativa do teor de ferro e a análise por Condicionamento Uniforme não seria interessante. Portanto, diante das características do banco de dados apresentado, principalmente em relação a quantidade de dados disponíveis, a Krigagem Ordinária realizada condiz com o esperado para a utilização no método do Condicionamento Uniforme em que apresenta um valor intermediário do parâmetro da Inclinação da Reta de Regressão.

Comparativo entre a Krigagem Ordinária e o Condicionamento Uniforme para o Suporte de Blocos SMUs e Validação por TBS

A Figura 13 apresenta o gráfico das curvas de Teor-Tonelagem da Krigagem Ordinária realizada para os blocos de 25x25x6 metros, do Condicionamento Uniforme considerando as SMUs de 25x25x6 metros de acordo com os parâmetros estabelecidos nas Tabelas 5 e 6, além da validação utilizando o método de Simulação por Bandas Rotativas.

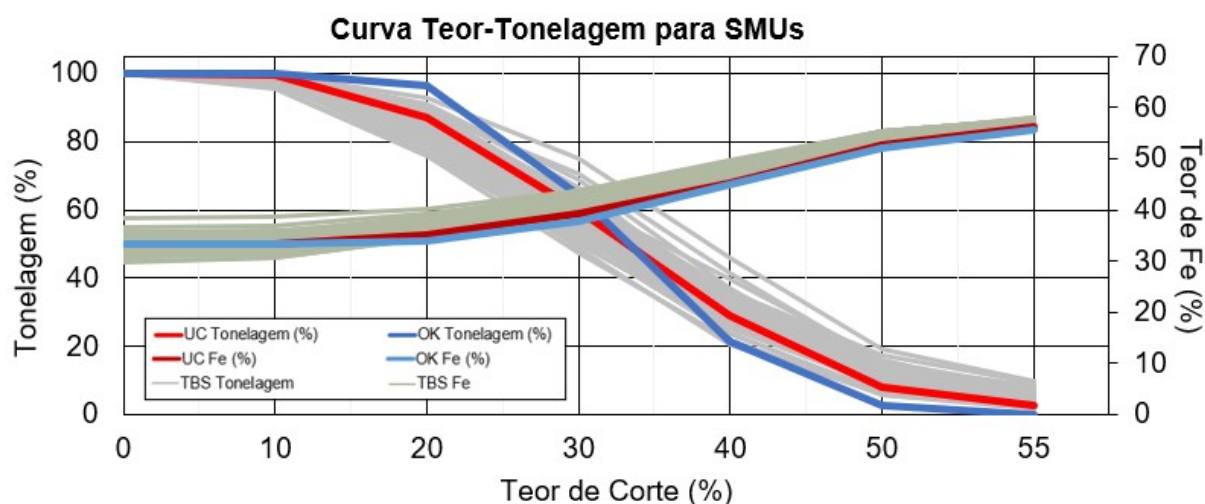


Figura 13: Gráfico de Curva Teor/Tonelagem entre OK, UC e TBS

Em termos globais, a reserva recuperável prevista pelo UC estima maiores tonelagens para uma maior seletividade, em relação à OK. Também é possível identificar no gráfico, na faixa dos baixos teores de corte, o efeito de “desaparecimento de toneladas” (ou *vanishing tons*, em inglês), descrito por Hansmann [1], que ocorre na Krigagem Ordinária, em que existe uma super

estimativa de volume causada pelo viés condicional ou por sua suavização, atestado para o caso analisado pelo valor da Inclinação da Reta de Regressão. Quando esse fenômeno ocorre, áreas cuja expectativa era de se lavrar altas concentrações são posteriormente verificadas com baixos teores, durante sua efetiva extração. O fenômeno não é observado da mesma maneira na curva de tonelagem do UC, uma vez que a distribuição condicional de blocos menores dentro dos painéis, os blocos SMUs, é responsável por manter a relação teor/tonelagem do suporte maior, condicionando-a aos blocos menores que devem produzir uma estimativa mais acurada.

Além disso, percebe-se que acima do teor de corte de aproximadamente 35%, os percentuais de massa são superiores no Condicionamento Uniforme com o aumento da seletividade em relação a OK, em função da suavização evidenciada para o último método conforme observado no parâmetro de Inclinação da Reta de Regressão (SR). Portanto, para situações como a apresentada pelo banco de dados em que a cobertura de dados não é expressiva, o Condicionamento Uniforme apresenta resultados melhores do que a Krigagem Ordinária.

A validação pelo método de Simulação por Bandas Rotativas indicou que a distribuição condicional do teor de ferro calculada pelo método de Condicionamento Uniforme se aproxima mais às realizações da simulação em relação a estimativa por Krigagem Ordinária, de modo geral. Observa-se que, para os percentuais de massa previstos para cada um dos teores de corte, a Krigagem Ordinária possui intervalos fora das bandas que representam as realizações enquanto a curva do UC está compreendida completamente dentro das bandas. Já para a distribuição de teores relativos aos determinados teores de corte, é possível notar que tanto os resultados da OK quanto os resultados da UC estão no limite mínimo do identificado nas realizações da simulação em boa parte, sendo o UC mais aderente ao método TBS.

Tomando-se como referência os resultados obtidos nas estimativas validadas para dois bancos de dados diferentes estudados no trabalho escrito por Hansmann [1], entende-se que, quanto mais a distribuição apresentar uma forma normal e quanto maior a densidade amostral, melhor será o Condicionamento Uniforme em relação à Krigagem Ordinária, ainda que esse último método apresente uma performance razoável frente ao espaçamento do banco de dados.

Análise do Pós-processamento por Condicionamento Uniforme Localizado

A performance do Condicionamento Uniforme Localizado para um único painel também foi analisada. O LUC prevê o ranqueamento e atribuição do teor de cada uma das Unidades Seletivas de Lavra de acordo com a estimativa feita pela Krigagem Ordinária para os painéis, de acordo com Abzalov [2]. Como forma de identificar essa premissa, um painel foi escolhido para verificação de seu teor, juntamente com a análise da média dos teores das SMUs pertencentes a este. O painel de identificador 6081 possui um teor médio de ferro de 53,71% e desvio padrão de 4,72%. A Figura 14 abaixo mostra o gráfico com os teores de ferro estimados pelo LUC para as SMUs dentro do painel 6081.

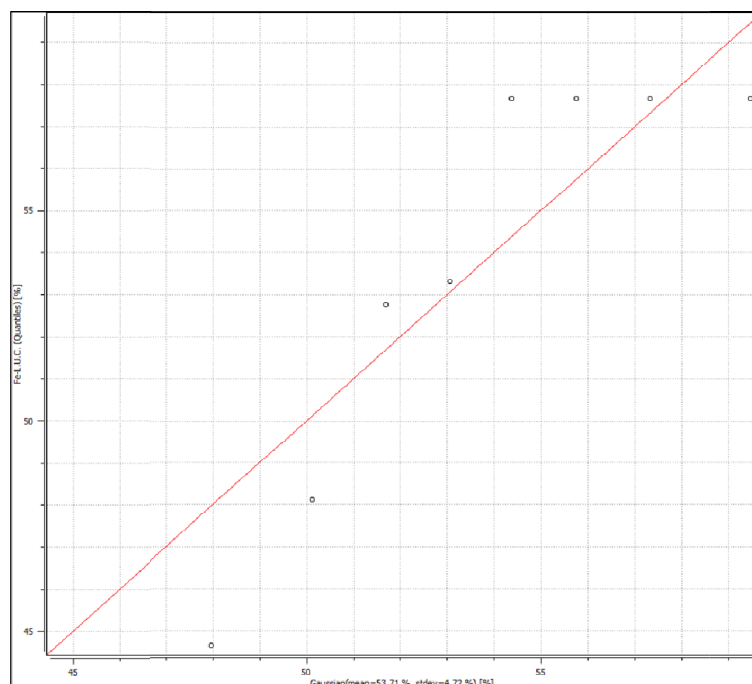


Figura 14: Gráfico QQ-plot comparativo entre o painel 6081 e SMUs

Cada painel possui 8 Unidades Seletivas de Lavra, em função das dimensões escolhidas de acordo com o método de lavra adequado para a operação e para garantir a seletividade. Conforme evidenciado pelo gráfico da Figura 14, é possível observar que a média dos valores das SMUs corresponde ao valor exato calculado para o painel pela Krigagem Ordinária. O fato de que a média dos teores das SMUs contidas em um determinado painel retorna o mesmo teor estimado para aquele mesmo painel exemplifica que as relações teor-tonelagem da UC realizada para o painel são preservadas. O Condicionamento Uniforme leva em consideração que a estimativa do painel por OK resulta em um menor viés condicional do que uma Krigagem Ordinária feita para blocos na escala de uma SMU, sendo que essa premissa visa garantir uma solução que associe um baixo viés condicional e uma maior acuracidade com a realização da distribuição condicional dos blocos SMUs dentro dos painéis.

Os resultados comparativos entre a Krigagem Ordinária dos blocos SMUs e a estimativa feita pelo LUC estão descritos nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9: Resultados da Krigagem Ordinária para as SMUs

Resultados da Krigagem Ordinária para a SMU	
Teor de Ferro (%)	33,39
Desvio Padrão (%)	7,97
Variância (% ²)	63,44
Variância de Estimativa (% ²)	63,97
Inclinação da Regressão (Z Z*)	0,64
Eficiência de Krigagem	0,43

Tabela 10: Resultados do LUC para as SMUs

Resultados do LUC para a SMU	
Teor de Ferro (%)	33,36
Desvio Padrão (%)	10,62
Variância (% ²)	112,80

Identifica-se uma maior variância na estimativa conduzida pelo LUC para as Unidades Seletivas de Lavra em relação a variância produzida pela OK, evidenciando uma maior suavização produzida pela Krigagem Ordinária conforme o esperado em função do espaçamento dos dados em relação ao tamanho de bloco considerado. Como o ranqueamento das SMUs dentro de cada painel e sua atribuição de teor estão diretamente condicionadas a estimativa dos painéis de maiores suportes feitas pela OK, entende-se que o LUC produzirá uma estimativa menos suavizada para blocos menores e mais seletivos para o planejamento de mina, levando em consideração os resultados da OK menos enviesados, atingindo dois objetivos igualmente importantes que apenas a OK não conseguirá obter. A Figura 15 a seguir exemplifica o comparativo entre os histogramas da Krigagem Ordinária e do LUC para as Unidades Seletivas de Lavra. Observa-se que a distribuição de teores para o LUC é mais achatada em relação a distribuição da OK, que aparece mais concentrada na região de teores médios, atestando o maior desvio-padrão e, conseqüentemente, variância para o primeiro método frente ao segundo.

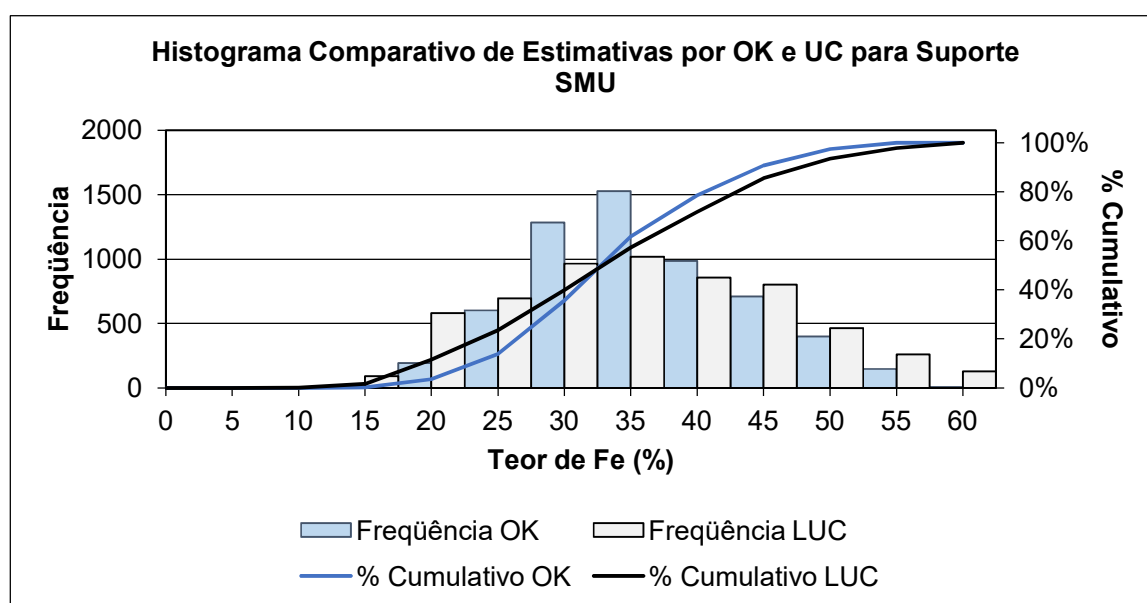


Figura 15: Histograma comparativo entre as estimativas por OK e LUC

O LUC não é responsável por tornar a estimativa por UC mais acurada, uma vez que a relação teor-tonelagem prevista no UC é respeitada no Condicionamento Uniforme Localizado. Entende-se que o LUC e sua precisão estão relacionados à quantidade de dados disponíveis, ou seja, quanto mais dados, melhor a estimativa. No entanto, o mesmo preceito é válido para a Krigagem Ordinária, e portanto, a estimativa linear também seria adequada e menos complexa.

O modelo de blocos gerado a partir da estimativa por Condicionamento Uniforme Localizado representa uma alternativa viável e prática para o planejamento de mina em relação ao UC, uma vez que o ranqueamento é utilizado para localização dos teores às SMUs que são mais interessantes para o planejamento mais assertivo e seletivo, além da utilização de mais fácil manuseio se comparado à um modelo que utiliza percentuais de massa por bloco e percentuais de teores. A Figura 16 mostra a distribuição de teores de ferro para a zona mineralizada nas duas escalas de blocos consideradas: painéis e SMUs.

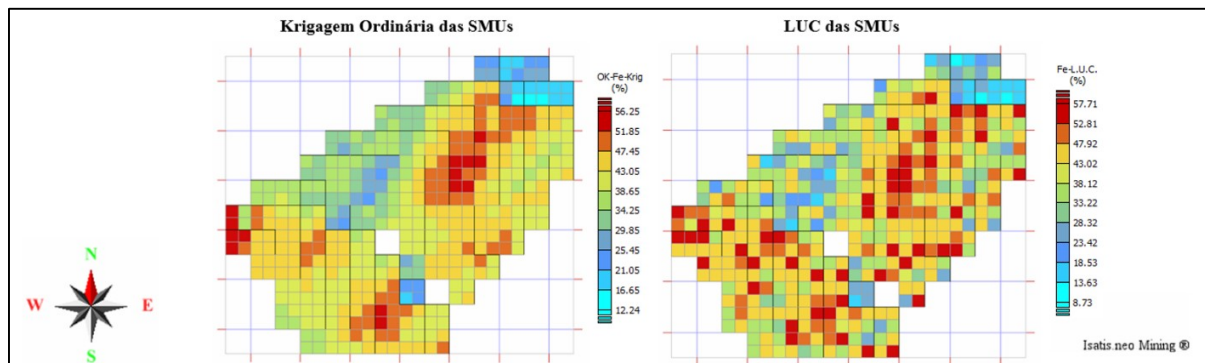


Figura 16: Distribuição de teores na escala SMU a partir dos métodos OK e LUC

Outra representação da suavização da estimativa por OK em relação a estimativa por LUC é o diagrama de dispersão mostrado na Figura 17. As duas estimativas apresentam um fator de correlação de 0,85, que indica uma forte correlação. É possível observar que para um teor estimado de 20% para o LUC possui um teor de cerca de 27% para a estimativa por OK, evidenciando o efeito da suavização na região de baixos teores em que uma maior tonelagem é considerada acima dos teores de corte mais baixos, enquanto para teores mais elevados nota-se o inverso desse fenômeno. Para um teor de 50% de Fe no LUC, o seu correspondente na OK possui um teor de Fe de aproximadamente 48%, sendo a causa equivalente a observada na curva de teor tonelagem entre a Krigagem Ordinária e o Condicionamento Uniforme, uma vez que o LUC respeita a relação tonelagem-teor definida na UC.

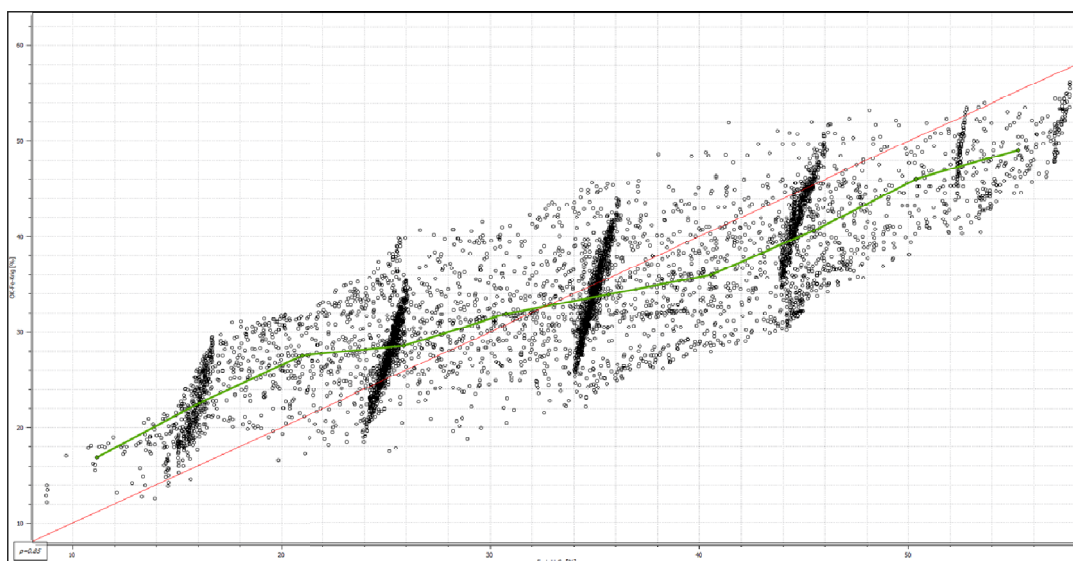


Figura 17: Gráfico *Scatter-plot* entre teores estimados por LUC e pela OK

CONCLUSÃO

A partir da análise de resultados, entende-se que, para dados muito espaçados, o Condicionamento Uniforme configura-se como um método interessante para a determinação global da reserva recuperável de um determinado depósito em relação a métodos convencionais lineares comumente empregados como a Krigagem Ordinária. Para o banco de dados analisado, uma operação real de ferro no Quadrilátero Ferrífero, o espaçamento irregular e aberto da malha amostral para a área analisada fez com que a estimativa pela Krigagem Ordinária retornasse resultados de baixa confiabilidade, medidos pelos parâmetros de Eficiência de Krigagem e Inclinação da Reta de Regressão. A aplicação do UC, partindo-se da premissa de satisfação da condição da bivariada Gaussiana para a transformação dos dados e correção de suporte, trouxe resultados satisfatórios. O Condicionamento Uniforme realizado para painéis de 50x50x12 metros, tamanho do menor espaçamento amostral irregular para a área, e Unidades Seletivas de Lavra de 25x25x6 metros exemplificou a suavização da OK para os suportes considerados, a partir da análise da curva teor-tonelagem entre a estimativa de teores para a OK e pela UC. A validação através do método de Simulação por Bandas Rotativas mostrou que os resultados do UC são mais aderentes às realizações equiprováveis em relação à Krigagem Ordinária.

O Condicionamento Uniforme Localizado utilizado como um pós-processamento ao UC segue as mesmas premissas que o último método, sem adição de acuracidade ao mesmo ao realizar o ranqueamento das SMUs de acordo com as classes de teor definidas. O uso do Condicionamento Uniforme Localizado representa uma alternativa mais adequada para o planejamento de lavra em relação ao UC, uma vez que o ranqueamento é utilizado para localização dos teores ao suporte SMU. O LUC também exibe menor suavização em relação à Krigagem Ordinária realizada para blocos SMUs, uma vez que mantém as relações teor-tonelagem previamente calculadas pelo Condicionamento Uniforme.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HANSMANN, K. (2016). **When should uniform conditioning be applied?** The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. v. 116. p. 645-654.
2. ABZALOV, M. Z. (2014) **Localized uniform conditioning (LUC): method and application case studies.** The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. v. 114. p. 205-211.
3. YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. (2013). **Geoestatística: conceitos e aplicações.** Oficina de Textos.
4. DEUTSCH, C. V.; PYRCZ, M. J. (2002). **Geostatistical Reservoir Modeling.** 2ª ed, Oxford University Press.
5. NEUFELD, C. T. (2005). **Guide to Recoverable Reserves with Uniform Conditioning.** Centre for Computational Geostatistics, Guidebook Series v. 4.
6. MATHERON, G. (1963). **Principles of Geostatistics.** Economic Geology. v. 58, p. 1246-1266.
7. COOMBES, J. (2016). **I'd like to be OK with MIK, UC:** A Critique of Mineral Resource Estimation techniques. Coombes Capability.