



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS / FACULDADE DE GEOLOGIA
I CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNOLOGIAS E SUAS ESPECIALIZAÇÕES

COMPARANDO DIFERENTES PROCEDIMENTOS DE AMOSTRAGENS PARA AVALIAÇÃO DE RECURSOS DE BAUXITA.

Orientador: Prof. Dr. Evaldo Raimundo Pinto da Silva

Aluno: André Luiz Viana Cruz

Belém-PA

2015

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	6
1.1.	Localização.....	6
2.	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA.....	8
2.1.	Metodologia.....	8
2.2.	MODELO GEOESTATÍSTICO.....	11
2.2.1.	Fundamentos Teóricos.....	11
2.2.2.	Semivariograma.....	12
2.2.3.	Calculo do Semivariograma.....	13
2.2.4.	Krigagem.....	14
2.2.5.	Validação Cruzada.....	16
3.	CARACTERIZAÇÃO DO DEPÓSITO.....	18
4.	TRATAMENTO DOS DADOS DA ÁREA DE INTERESSE.....	22
4.1.	Análise Univariada.....	22
4.2.	Modelagem da continuidade espacial.....	23
4.3.	Krigagem.....	26
4.4.	Avaliação dos Resultados Obtidos.....	29
5.	CONCLUSÕES.....	31
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Figura 01 – Localização da área estudada no Plato Capiranga	7
Figura 02 - Mapa de localização das amostras na área de estudo.....	9
Figura 03 – Semivariograma e seus principais elementos.	13
Figura 04 - Parâmetros para o cálculo do semivariograma.....	14
Figura 05 – Representação da área de influência da krigagem.	15
Figura 06 – Perfil Geológico.....	18
Figura 07 – Histograma de frequência (A) e frequência acumulada (B) de Al_2O_3 com dados de Sonda	22
Figura 08 – Histograma de frequência (A) e frequência acumulada (B) de Al_2O_3 com dados de Poço	23
Figura 09 – Histograma de frequência (A) e frequência acumulada (B) de Al_2O_3 com dados de Canaleta	23
Tabela 01 – Valores de sill e efeito pepita para cada metodologia	23
Figura 10 - Variogramas das amostras de sonda.....	24
Figura 11 - Variogramas das amostras de poços.....	25
Figura 12 - Variogramas das amostras de canaletas	25
Tabela 02 – Alcance dos variogramas para cada metodologia	26
Figura 13 - Modelo geológico das amostras de sonda	26
Figura 14 – Histograma do Modelo geológico das amostras de sonda	27
Figura 15 - Modelo geológico das amostras de poços	27
Figura 16 – Histograma do Modelo geológico das amostras de poço	28
Figura 17 - Modelo geológico das amostras de canaletas	28
Figura 18 - Histograma do Modelo geológico das amostras de canaletas.....	29
Tabela 03 - Teores de alumina disponível estimada para os três modelos geológicos	30

A minha esposa Samara Cruz e meus filhos João Pedro e Maria Isabel, pelo carinho, paciência, dedicação e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente a minha esposa Samara Cruz pela paciência nos meus momentos ausentes.

Aos meus pais que sempre me incentivaram a estudar.

Ao meu orientador que mesmo a distância conseguiu me orientar de forma clara, direta e objetiva na finalização do meu trabalho.

A toda a equipe da geologia de mina da Alcoa em especial a geóloga Marta Oliveira e ao Tec. Clodoaldo Castro, pela parceira diária das atividades na mina.

A Alcoa pela confiança no trabalho e pelo apoio.

1. INTRODUÇÃO

De forma geral, a avaliação de depósitos minerais é baseada em estimativas de volume de minério e de teor para transformar recurso em reserva. Assim sendo, os procedimentos de amostragem do minério influenciarão sobremaneira na confiabilidade dos teores obtidos e, em última análise, nas reservas medidas. Por sua vez, a confiabilidade dos resultados da amostragem do minério depende de vários fatores, tais como: as características da mineralização, a qualidade da amostragem, a análise das amostras e a manipulação.

Neste trabalho, vamos discutir três metodologias de amostragem, poço, sonda e canaleta, adotadas para determinar recursos na exploração de bauxita, analisando os resultados obtidos poderemos saber qual o mais assertivo para ser utilizado em uma fase de exploração. Para atingir esse objetivo, usaremos as ferramentas de geoestatísticas, o variograma é uma poderosa ferramenta de análise geoestatística, o qual fornece um método quantitativo de análise dos resultados. A curva variográfica expressa à variação de correlação espacial entre dois pontos no espaço, quando a distância de separação entre eles aumenta, permitindo a construção de modelos geológicos (François-Bongarçon, 2004).

E ao final, teremos com base nos estudos estatísticos a elaboração de três modelos geológicos distintos para cada uma das metodologias, assim como os resultados de teores.

1.1. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo situa-se na margem direita do rio Amazonas, no município de Juruti, extremo oeste do Estado do Pará (Figura 01). Está compreendida entre as coordenadas UTM 560.000 e 596.000 Leste e 9.712.000 e 9.760.000 Norte ou, em coordenadas geográficas, entre 2°09'35" e 2°36'19" de Latitude Sul e 55°08'11" e 56°27'37" de Longitude Oeste. Trata-se de uma área de exploração de bauxita da Companhia ALCOA-AWA, denominada de do Platô Capiranga.

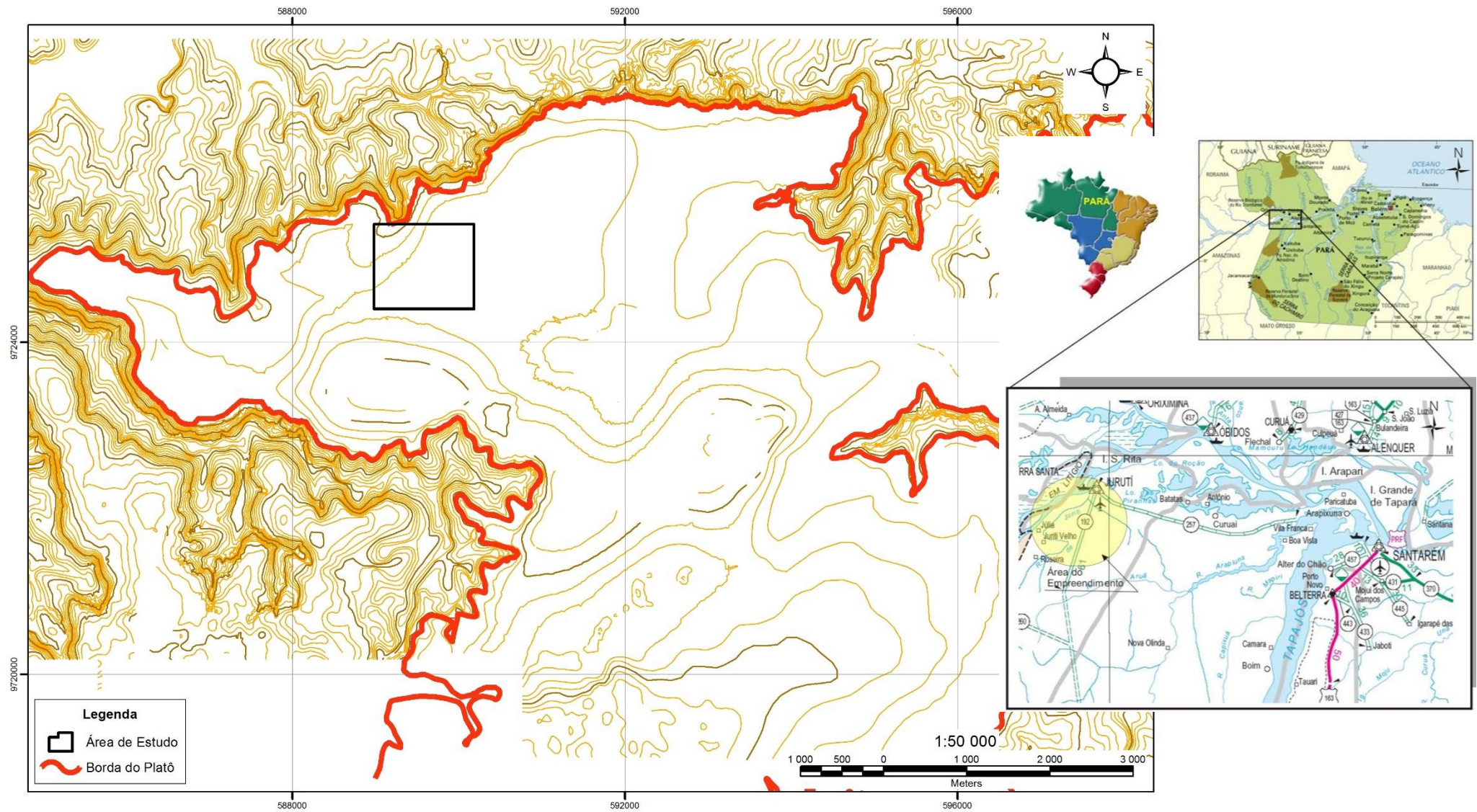


FIGURA 01 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA NO PLATO CAPIRANGA

Fonte: Modificado PAE Alcoa

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

No processo de avaliação de depósitos minerais, devido aos custos elevados da sondagem, a quantidade de furos é normalmente limitada e a distribuição dos mesmos no alvo de interesse deve ser corretamente definida (Ribeiro, *et al.*, 2012).

Este estudo tem como objetivo definir, por meio de avaliações geoestatísticas, o melhor método de amostragem para a quantificação do depósito de bauxita do platô Capiranga. Para isso utilizou-se amostras de sondagens, poços e canaletas coletadas na área de interesse.

Nas avaliações consideraram-se apenas os teores de alumina aproveitável do minério, muito embora, para uma melhor análise do depósito recomenda-se a utilização dos teores de sílica reativa e recuperação.

Segue abaixo uma sucinta apresentação da metodologia e do fluxo de trabalho:

- Validação do banco de dados;
- Análise estatística da variável;
- Modelagem dos limites tridimensionais do minério (modelo geológico);
- Definição e utilização do método de estimativa adequada;
- Validação, análise crítica e apresentação dos resultados.

2.1. METODOLOGIA

Foi selecionada uma área de aproximadamente 113,09 ha, dentro da mina de bauxita no local denominado platô Capiranga. (Figura 02).

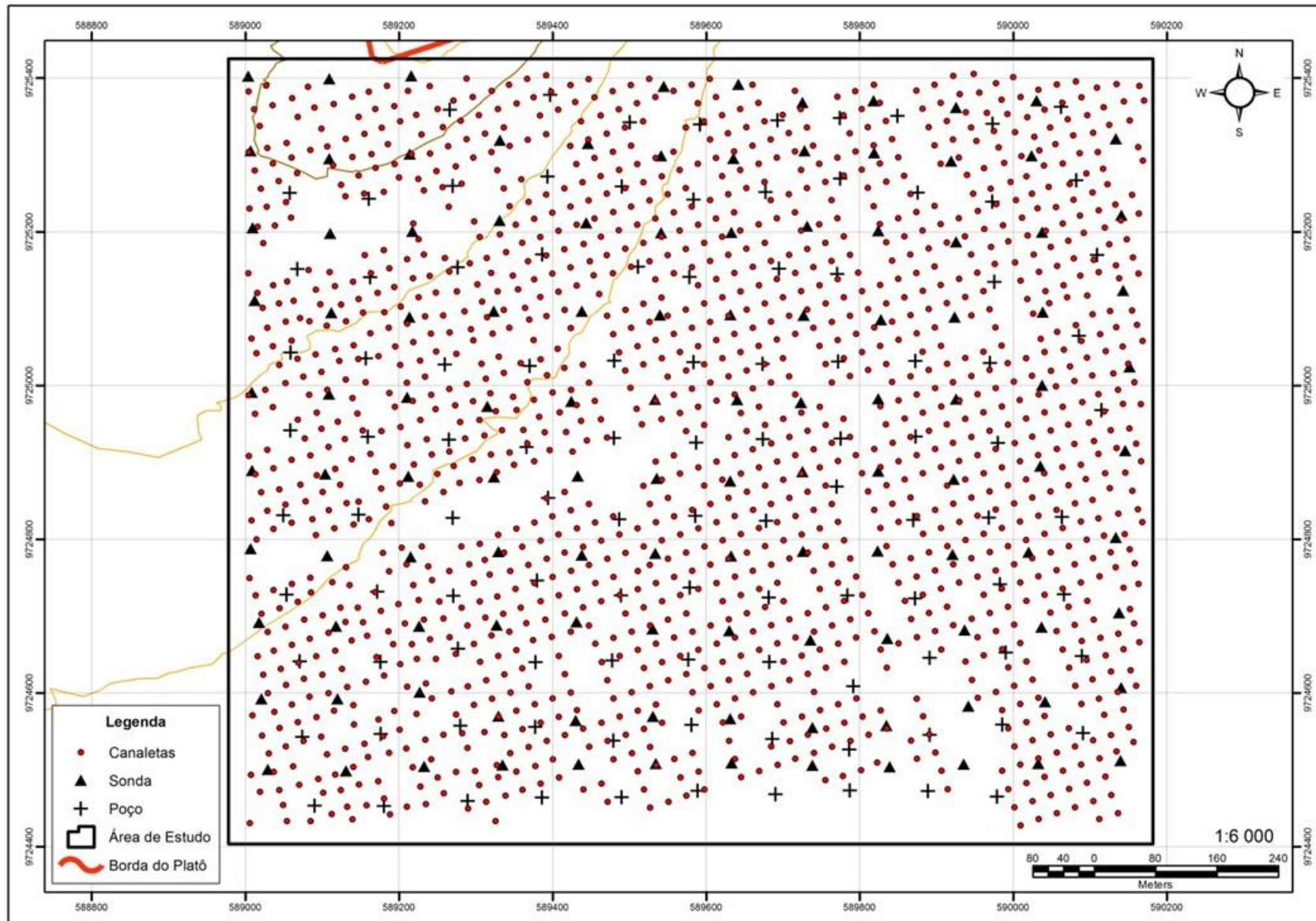


FIGURA 02 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS NA ÁREA DE ESTUDO

O banco de dados com base no teor de alumina disponível (Al_2O_3Av) foi criado utilizando amostras de 106 poços, 117 furos de sonda, ambos com malha de 100m e 1.490 amostras de canaletas, com malha de 25m.

Optou-se por mantê-los separados, pois estes apresentam metodologias e informações distintas. No caso das canaletas, estas contêm apenas as informações do minério, por vezes pode ocorrer a laterita ou argila variegada, uma vez que são amostras da frente de lavra. No banco de canaletas ocorrem todas as frações, porém os resultados de análises são apenas da alumina aproveitável, sílica reativa e ferro, variáveis de interesse e que ajudam controlar o processo de lavra.

Os furos apresentam todas as frações e todos os óxidos e, geralmente, todas as litologias. Já o poço apresenta apenas a fração #20 mesh e os óxidos totais, faltando então alumina aproveitável e sílica reativa, que foram calculadas matematicamente.

Todos os dados foram tratados e as incoerências ocorridas foram identificadas ao longo da validação, devidamente corrigidas. Contudo, seguem algumas considerações importantes sobre as características do banco de dados utilizado no modelamento geológico.

No banco de dados de furos de sonda e canaleta, foi criado o campo "*Fração Global*" a partir das frações #20 e #400 mesh, onde está representa o total da massa e dos teores do minério lavado.

Para o cálculo desta, as recuperações das duas frações (#20 e #400 mesh) foram somadas. Já os teores foram calculados pela média ponderada das três frações utilizando como ponderador a recuperação. Um exemplo dos cálculos realizados para a variável recuperação e teor por faixa granulométrica pode ser visto a seguir.

a) Definição da Recuperação Global:

$$RCG = RC1 + RC2$$

Onde:

RCG: Recuperação Global;

RC1: Recuperação na Faixa 20#;

RC2: Recuperação na Faixa 400#.

b) Definição do Teor Global de Alumina Total:

$$\mathbf{ATG} = \frac{(AT1 * RC1 + AT2 * RC2)}{(RC1 + RC2)}$$

Onde:

ATG: Teor Global de Alumina Total;

AT1: Teor de Alumina Total na Faixa 20#;

AT2: Teor de Alumina Total na Faixa 400#.

O procedimento mostrado acima para determinação do teor global, também foi adotado para os demais elementos (AAG, STG, SRG, FEG, TIG, PPG), porém para este trabalho, foi considerada somente a variável alumina aproveitável.

Toda essa base de dados foi importada para o *software* SGeMS (*Stanford Geostatistical Earth Modeling Software*) para análise estatística incluindo o estudo de probabilidade por histogramas e, finalmente, a análise estrutural dos variogramas. Usando a variável alumina aproveitável foi modelado um variograma para cada método de amostragem, de modo que, baseado nos variogramas e usando como método de estimativa a krigagem ordinária, foram gerados 3 modelos geológicos para cada método referente a variável alumina aproveitável (Isaaks & Srivastava, 1989).

2.2. MODELO GEOESTATÍSTICO

2.2.1. Fundamentos Teóricos

Muitos pensam que a geoestatística é simplesmente a utilização de técnicas estatísticas na geologia, mas isto não é verdade. A geoestatística é muito importante na geologia, pois, ela tem inúmeras funções que podem auxiliar na execução de projetos e no melhor entendimento de determinadas áreas para qualquer estudo que se queira fazer. Com a geoestatística é possível transformar observações geológicas em números, ou seja, fazer com que as observações de campo ou até mesmo amostragens de determinadas substâncias possam ser quantificadas e posteriormente passarem por um processo estatístico, a fim de interpreta-las de uma maneira mais eficiente; tendo essa quantificação das observações geológicas, é possível então interpolar e extrapolar esses dados criando mapas e gráficos com objetivo de melhorar a visualização destes dados, sendo possível também quantificar os erros que um determinado estudo ou projeto possa ter.

2.2.2. Semivariograma

Quando a amostragem envolve duas ou mais direções, o instrumento indicado na estimativa da dependência entre amostras é o variograma (Silva, 1988). O variograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, que permite representar, quantitativamente, a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Huijbregts, 1975).

Os variogramas expressam, deste modo, o comportamento espacial da variável regionalizada ou de seus resíduos e mostram o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, as direções de anisotropia e a continuidade do dado com relação à distância (Gringarten & Deutsch 2001).

De acordo com Journé e Huijbregts (1978), a função variograma, denominada de $2\gamma(h)$, é a esperança matemática do quadrado da diferença entre pares de pontos separados por uma distância (h).

Equação 1

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\}$$

Diferente de outras áreas de estatística aplicada, as quais usam normalmente a covariância e as funções de correlação para caracterizar continuidade, a geoestatística utiliza o momento de inércia, chamando essa ferramenta de variograma. O variograma é função do vetor h (módulo e direção).

Equação 2

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum (v_i - v_j)^2$$

Essa equação é também definida como semivariograma, pois é dividida por dois. Costuma-se utilizar o mesmo nome tanto para variograma quanto para o semivariograma. O variograma é comumente feito em várias direções e qualquer que for a direção ele irá depender somente da distância.

O variograma possui alguns elementos importantes, figura 04, como:

- Alcance (*range*): Distância até onde existe correlação entre os pontos. Um maior alcance está relacionado com uma maior continuidade.
- Patamar (*sill*): é o nível onde o variograma se estabiliza. A partir deste ponto, considera-se que não haja mais dependência entre as observações.

- Efeito pepita (*nugget*): valor inicial, que representa a diferença medida, onde a distância tende a zero. Ele é uma soma dos erros experimentais e dos erros de medição.
- Contribuição (C1): é a diferença entre o patamar e o efeito pepita, ou seja, quanto de informação os pares de pontos, dentro de uma determinada distância h , estão fornecendo.

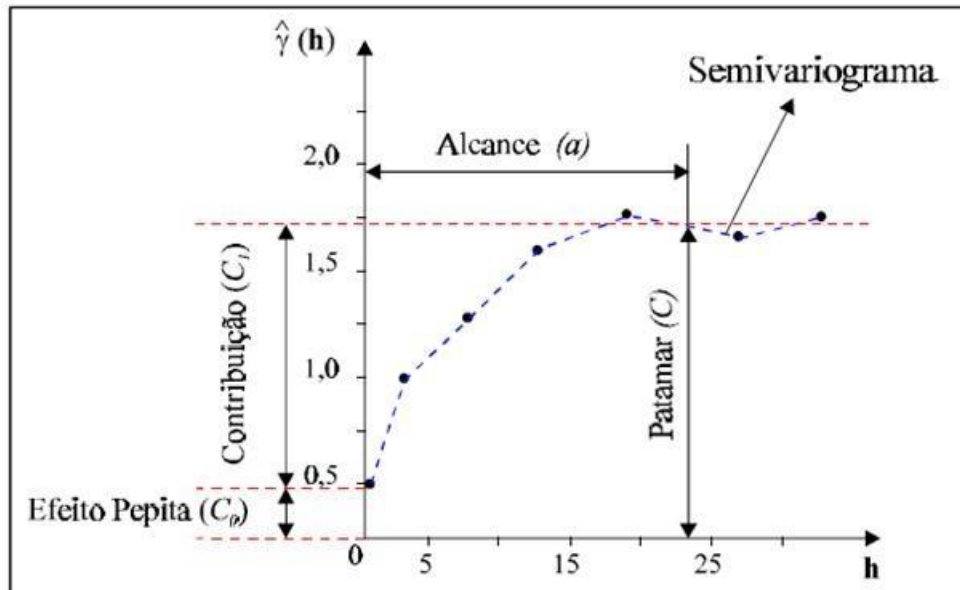


FIGURA 03 – SEMIVARIOGRAMA E SEUS PRINCIPAIS ELEMENTOS.

Fonte: Camargo, 1998.

2.2.3. Cálculo do Semivariograma

De acordo com (Deutsch, 2002), na análise variográfica em reservatórios de petróleo é necessário definir duas direções no plano horizontal (maior e menor direção preferencial) e uma direção na vertical que é perpendicular a direção de maior alcance.

A Figura 05 ilustra os parâmetros necessários para o cálculo do variograma.

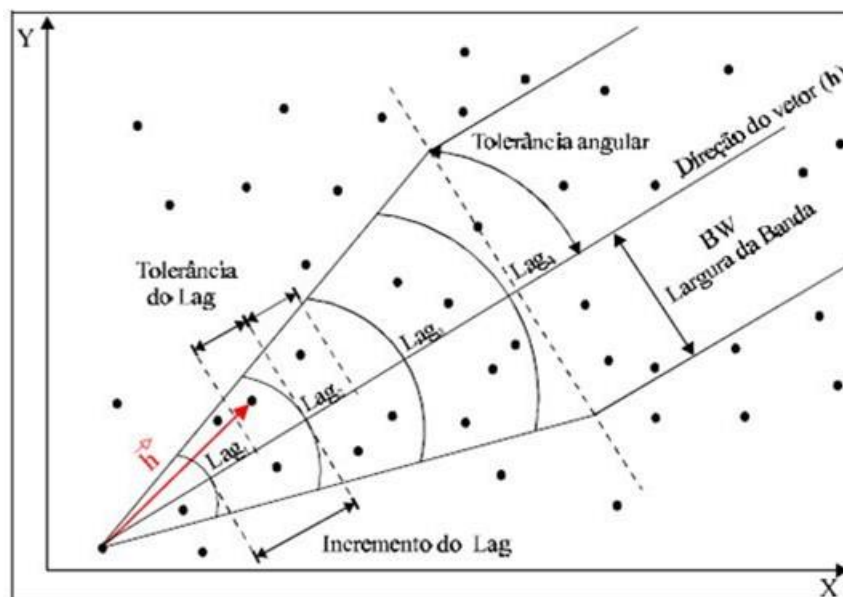


FIGURA 04 - PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO SEMIVARIOGRAMA.

Fonte: Adaptado de Deutsch & Journel, 1998.

Tomando como exemplo a Figura 04, define-se o lag (distância pré-definida usada no cálculo do semivariograma) e uma certa tolerância de lag. O lag e sua tolerância correspondem a um intervalo de distâncias no qual serão medidas todos os pares de amostras existentes. Usando como exemplo um incremento de lag de 200 metros com tolerância de 100 metros e em uma direção de 40° com tolerância angular de 20°, significa que qualquer par de observações cuja distância esteja compreendida entre 300m e 500m e entre 20° e 60° será incluído no cálculo do variograma. Este cálculo se repete para todos os lags e para todas as direções que se quer analisar.

2.2.4. Krigagem

Na maioria dos trabalhos de geologia a análise geoestatística não gera só um modelo de dependência espacial, mas também tenta prever valores em pontos não amostrados, através de mapas de isolinhas ou de superfícies, fazendo com que possa observar o comportamento da variável em uma região maior. Para determinar estes pontos não amostrados é necessário o uso de um interpolador como a *krigagem*.

A krigagem foi desenvolvida por Matheron na França na década de 60, e tem este nome em homenagem ao engenheiro de minas Daniel G. Krige, que foi o pioneiro a introduzir o uso de médias móveis para evitar superestimativa sistemática de reservas de mineração (Delfiner; Delhomme, 1975). Este método foi desenvolvido inicialmente para

resolver problemas de mapeamentos geológicos, mas com seu sucesso o seu uso se expandiu rapidamente sendo usado em diversas áreas da geociência.

Este interpolador se destaca dos demais devido ao fato de que ele fornece na maioria dos casos dados com estimativas não tendenciosas e com variância mínima. Este método é conhecido na literatura como um interpolador do tipo BLUE, que significa *Best Linear Unbiased Estimator*, melhor estimador não enviesado, isso significa que o erro de estimação seja mínimo (variância mínima) e não enviesado (distância média entre valores estimados e originais seja igual à zero).

De acordo com (Camargo; Fucks; Câmara, 2004) a krigagem atribui pesos para as amostras de valores conhecidos que irão estimar os pontos desconhecidos. Na krigagem o peso decorre da relação entre a distância da observação e o ponto de interesse, a continuidade espacial e o arranjo geométrico do conjunto amostral, figura 05. Portanto, para estimar as ponderações atribuídas às diferentes amostras, realiza-se uma análise espacial pautada no semivariograma experimental e considera as direções na interpolação: isotropia e anisotropia.

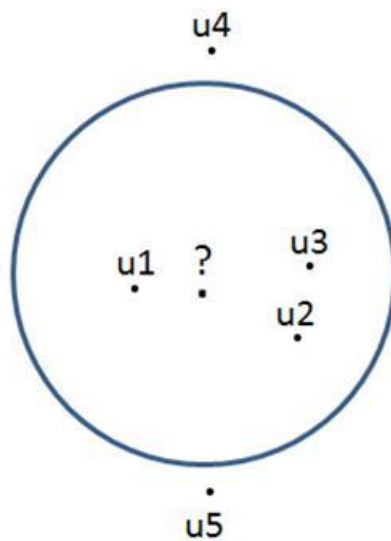


FIGURA 05 – REPRESENTAÇÃO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DA KRIGAGEM.

Este interpolador utiliza a seguinte equação:

Equação 3

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

Onde:

- λ_i = Pesos atribuídos com base nos dados do semivariograma
- $z(x_i)$ = Pontos não amostrados.

Os pesos atribuídos a cada amostra estão relacionados com a distância de cada uma em relação ao ponto estimado, bem como a dependência espacial entre as amostras dada pelo variograma. Esses pesos provêm da resolução de um sistema linear de equações denominado sistema de equações de krigagem (Yamamoto, 2001).

Equação 4

$$\begin{cases} \sum_j \lambda_j C(x_i - x_j) - \mu = C(x_0 - x_i) \text{ para } i=1, n \\ \sum_j \lambda_j = 1 \end{cases}$$

Que pode ser representada também sob a forma matricial como (Yamamoto, 2001).

Equação 5

$$\begin{bmatrix} C(x_1 - x_1) & C(x_1 - x_2) & \dots & C(x_1 - x_n) & 1 \\ C(x_2 - x_1) & C(x_2 - x_2) & \dots & C(x_2 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ C(x_n - x_1) & C(x_n - x_2) & \dots & C(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_0 - x_1) \\ C(x_0 - x_2) \\ \vdots \\ C(x_0 - x_n) \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Esse sistema de equações deve ser resolvido para cada ponto estimado a menos que o arranjo espacial das amostras seja regular e a distância entre os pontos permaneça a mesma (Davis, 1986).

2.2.5. Validação Cruzada

No ajuste de semivariogramas experimentais, sempre existe certo grau de incerteza sobre as hipóteses de estacionaridade assumidas, modelos selecionados, parâmetros ajustados e qualidade da krigagem. Essa incerteza representa o erro da estimativa que pode ser avaliado pelo processo de validação cruzada (*cross validation*) (Isaaks; Srivastava, 1989).

Segundo Davis (1987), a validação cruzada é usada para encontrar o melhor modelo entre os estudados. Delfiner (1976) a apresenta, nesse enfoque, quando a usa para buscar

por uma função de covariância generalizada, para ser usada no seu procedimento de estimação entre um número finito de modelos.

Cada ponto medido é excluído e seu valor estimado com os dados, ou seja, ela estima os valores da variável em estudo sobre os mesmos pontos amostrados e compara os novos valores com os dados medidos. Quanto mais próximo a média ficar em torno do zero, melhor é a estimação. A validação cruzada não prova que o modelo de variograma escolhido esteja correto, mas prova que ele não é grosseiramente incorreto. Outra maneira de validar os dados seria plotar os valores estimados pela krigagem confrontando os valores verdadeiros sobre uma reta de regressão, quanto maior for a correlação entre os dados, melhor o nível da estimativa.

3. CARACTERIZAÇÃO DO DEPÓSITO

No Brasil as bauxitas são formadas a partir de diferentes tipos de rochas e sobre tudo sobre condições climáticas que vão do equatorial úmido até o subtropical e mesmo temperado dando origem a diferentes tipos de depósitos.

Os depósitos de bauxita da Amazônia oriental enquadram-se como do tipo “*blanket*” (Patterson, 1967), formados “*in situ*” por processos de intemperismo sobre rochas sedimentares clásticas, em condições climáticas tropicais úmidas. Estes depósitos caracterizam-se por apresentar espessura de ordem métrica, alcançando e ultrapassando raramente 10 metros e por apresentarem acentuadas variações laterais nos teores de Al, Si e Fe.

Na macro-área Juruti, os depósitos correspondentes aos platôs Central, Capiranga, Mauari e Guaraná desenvolveram-se sobre a Formação Alter do Chão, de idade neocretácica, gerando um perfil geológico bastante persistente, com horizontes de bauxita relativamente bem definidos e contínuos.

Assim como os depósitos de Trombetas, estes apresentam, posicionado no topo da sequência, um perfil de laterização no qual podem ser identificadas três zonas distintas: argila Belterra, zona de laterita concrecionária e zona saprolítica. A zona de laterita, por sua vez, pode ser subdividida em três sub-zonas: bauxita nodular, laterita e bauxita maciça.

O perfil litológico típico do depósito de Juruti é apresentado na Figura 06.

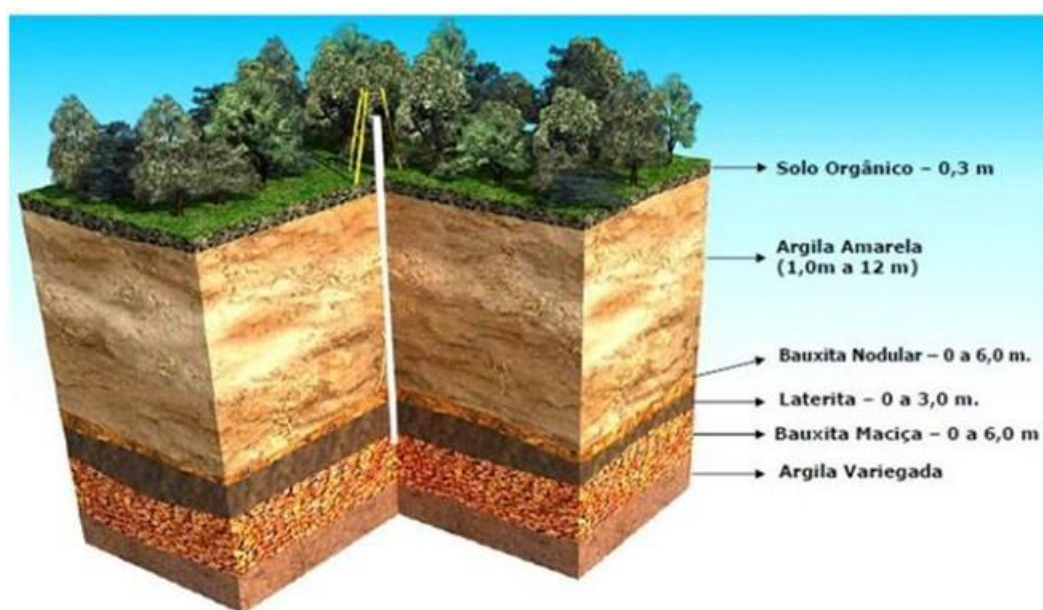


FIGURA 06 – PERFIL GEOLÓGICO

Descreve-se abaixo, de uma forma sucinta, o perfil deste depósito. Assim, do topo para a base, tem-se:

Argila Belterra (argila): consiste numa cobertura de argila caulínica, amarelada, bem uniforme e permeável, cuja espessura varia de zero a doze metros nos centros dos Platôs.

Bauxita Nodular: representado por um horizonte descontínuo, chegando a atingir seis metros de espessura, consiste em nódulos de gibbsita, finamente cristalina, de tamanhos variáveis, distribuídos em uma matriz caulínica. São comuns neste horizonte nódulos ferruginosos que conferem elevados teores nas análises de Fe_2O_3 .

Os nódulos, que representam de 50 a 70% desse horizonte descontínuo, tem forma desde irregular até arredondados e variam de pisólitos individuais até agregados cimentados que podem pesar até mais de 9 kg. São formados por uma massa microcristalina de gibbsita (65 a 75%) e caulinita (15% a 20%) e secundariamente goethita, hematita, argilas, anatásio e quartzo, enquanto que os pisólitos ferruginosos são principalmente compostos por uma mistura de goethita, limonita e caulinita.

A tendência, neste horizonte, é o aumento do conteúdo de ferro (Fe_2O_3) com a profundidade. Como regra geral, os pequenos nódulos apresentam, após o processo de lavagem do material, um teor mais elevado em SiO_2 do que os maiores nódulos, devido a sua maior superfície relativa exposta à contaminação de argila.

Laterita: corresponde a um horizonte de baixa sílica, com espessura de zero a três metros e consideráveis variações na dureza, textura, cor, relação ferro-alumina e conteúdo de sílica. Em alguns locais, esse material pode ser classificado como bauxita ferruginosa, face ao seu alto teor em Al_2O_3 .

A laterita corresponde essencialmente a um horizonte pedológico, representado por uma matriz de material ferruginoso ou gibbsítico, contendo em ordem decrescente gibbsita, hematita, goethita, anatásio, caulinita e quartzo.

A parte superior desse horizonte, no contato com a bauxita nodular, é formada por grandes nódulos, cimentados por óxido de ferro. Existe uma graduação da bauxita nodular para a laterita e desta para o horizonte superior de bauxita maciça, mas essa faixa de transição raramente excede a 30cm.

O nível de laterita pode ser subdividido em três sub-horizontes: uma laterita ferruginosa com argila castanha e elevado teor de Fe_2O_3 (35 a 40%), seguida por um sub-horizonte de material com textura de brecha, contendo argila amarelada, que não é cimentado com o sub-horizonte inferior, tendendo a se quebrar em grandes fragmentos ao longo dos planos preenchidos por argila. Como característica principal, apresenta SiO_2 e Fe_2O_3 bastante elevados. O sub-horizonte inferior, maciço e mais duro, também apresenta uma textura brechóide. Os nódulos são cimentados por gibbsita microcristalina, rósea a vermelha. Este nível apresenta um alto teor de Fe_2O_3 e um baixo teor de SiO_2 .

Nem sempre estes subhorizontes, cujos contatos são graduais, estão presentes ao longo de uma mesma seção.

Bauxita Maciça (bauxita): este horizonte, com espessura variando de zero a seis metros, é essencialmente constituído de gibbsita (45% a 85%), hematita (6% a 40%), caulinita (6% a 32%). Sempre apresenta uma gradação com o horizonte superior pela substituição gradativa do Fe_2O_3 por SiO_2 . A dureza, textura e coloração variam com o teor de ferro e conteúdo em argila.

Tipicamente, o topo da camada de bauxita maciça é formado por uma capa dura de bauxita ferruginosa, quartzosa, de coloração vermelha, com elevado conteúdo de Fe_2O_3 (20 a 30 %) e com espessura variando de 0,3 a 2,0 m (média de 1,0 m).

A parte intermediária desta camada é formada por bauxita com diversos tipos de textura, sem zoneamento preferencial, ocorrendo variações tanto laterais como verticais, as quais refletem na composição química do minério. Esta bauxita denominada bauxita celular (também denominada zona esponjosa ou *spongy zone*) apresenta septos de bauxita cristalizada, com células vazias ou preenchidas também por gibbsita, substituída por argila caulínica à medida que se aproxima do horizonte superior da argila variegada. Apresenta um baixo teor de Fe_2O_3 (8 a 12%) e baixa sílica.

Na base, a bauxita toma a forma de "*pipes*" ou nódulos, que adentram a argila variegada e recebem o nome de bauxita colunar.

A Passagem da bauxita maciça para o horizonte inferior é gradual e o contacto é muito ondulado.

Em algumas áreas, notadamente nas bordas dos platôs, a bauxita exibe alto conteúdo em argila que ocorre preenchendo os seus espaços vazios sendo que os teores de Fe_2O_3 são bem mais elevados.

Argila Variegada: consiste num horizonte composto de argilas caulínicas de cores variegadas, em geral avermelhadas a rosadas, com trechos esbranquiçados e matizes arroxeadas, contendo, eventualmente, alguma gibbsita. Localmente, apresenta concreções alongadas de bauxita colunar, compostas de gibbsita microcristalina em posição vertical neste horizonte argiloso.

Bolsões de argila caulínica, com pequenos blocos e nódulos de bauxita com variadas texturas, ocorrem em toda a sequência dos depósitos.

O principal horizonte mineralizado, de valor econômico, é a bauxita maciça que apresenta, lateralmente, variações de espessura e dos seus conteúdos mineralógicos. Isto, em termos de avaliação geoestatística, corresponde a variogramas com elevadas amplitudes, indicando que a correlação espacial entre amostras ocorre em grandes extensões.

4. TRATAMENTO DOS DADOS DA ÁREA DE INTERESSE

4.1. ANÁLISE UNIVARIADA

A estatística é a ciência que apresenta processos próprios para coletar, apresentar e interpretar adequadamente conjuntos de dados seja eles numéricos ou não. Seu objetivo é apresentar informações sobre dados em análise para que se tenha maior compreensão dos fatos que os mesmos representam.

Uma ótima maneira de começar uma análise estatística é pela construção dos histogramas de frequência (PDF) e histogramas de frequência acumulada (CDF), que são acompanhados de média, desvio padrão, valor máximo, valor mínimo, coeficiente de variação, mediana, quartil inferior e superior.

As Figuras 07, 08 e 09 mostram os histogramas de frequência e histogramas de frequências acumuladas dos dados de Al_2O_3 nos três métodos de amostragem.

O conjunto amostral da sonda é composto por 117 amostras. Os dados variam de 38,74 a 54,35% Al_2O_3 . A média dos teores de Al_2O_3 é de 48,40%. A mediana dos teores está em 48,79%. O desvio padrão dos teores de Al_2O_3 é de 3,04%. A variância das amostras é de 9,28%.

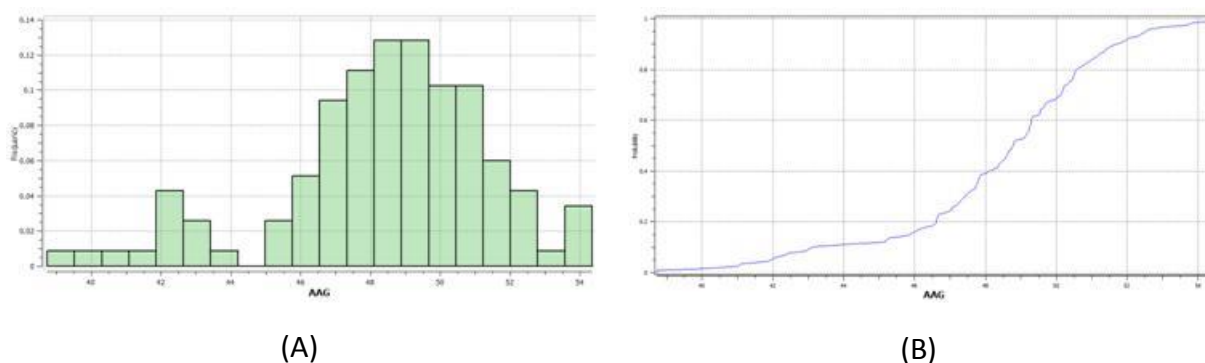


FIGURA 07 – HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA (A) E FREQUÊNCIA ACUMULADA (B) DE Al_2O_3 COM DADOS DE SONDA

O conjunto amostral dos poços é composto por 106 amostras. Os dados variam de 44,83 a 50,62% Al_2O_3 . A média dos teores de Al_2O_3 é de 48,34%. A mediana dos teores está em 48,55%. O desvio padrão dos teores de Al_2O_3 é de 1,36%. A variância das amostras é de 1,86%.

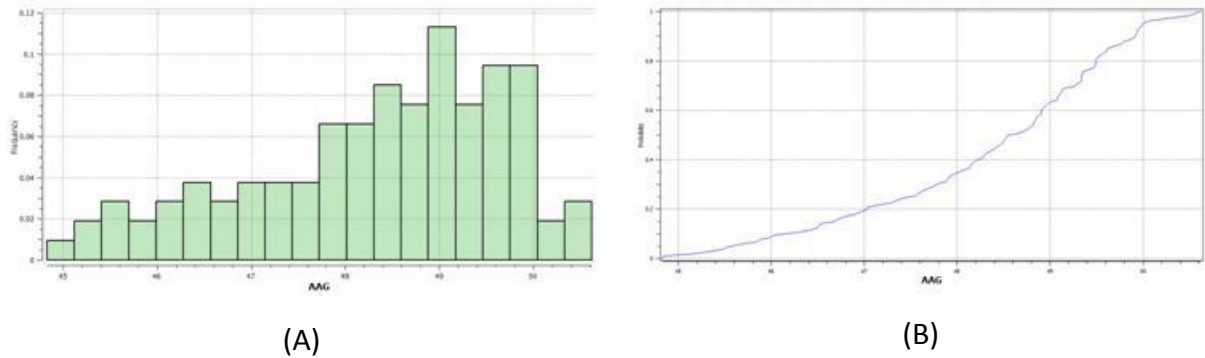


FIGURA 08 – HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA (A) E FREQUÊNCIA ACUMULADA (B) DE Al_2O_3 COM DADOS DE POÇO

O conjunto amostral das canaletas é composto por 1490 amostras. Os dados variam de 33,67 a 56,39% Al_2O_3 . A média dos teores de Al_2O_3 é de 48,47%. A mediana dos teores está em 48,65%. O desvio padrão dos teores de Al_2O_3 é de 3,14%. A variância das amostras é de 9,91%.

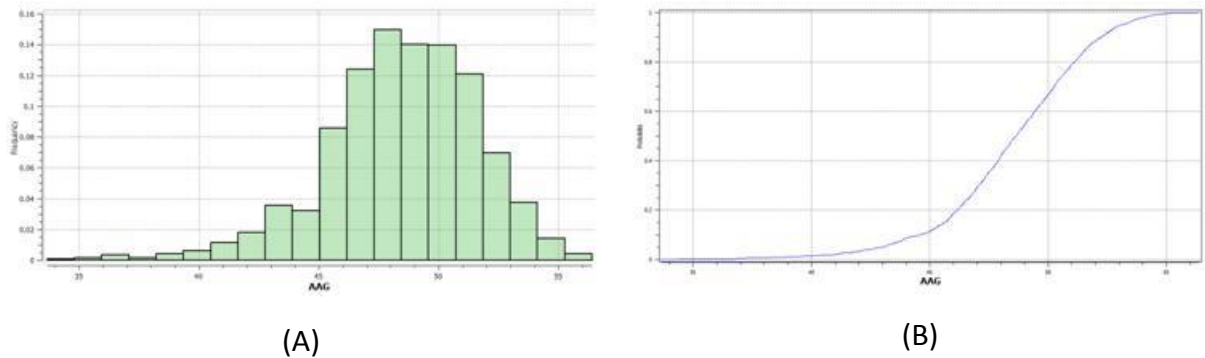


FIGURA 09 – HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA (A) E FREQUÊNCIA ACUMULADA (B) DE Al_2O_3 COM DADOS DE CANALETA

4.2. MODELAGEM DA CONTINUIDADE ESPACIAL

Para a escolha do melhor modelo variográfico foram utilizadas oito direções de medição, começando em azimute 0 e aumentando 22,5°, com uma tolerância de 22,5° a cada leitura, obtendo-se os alcances, para cada uma das direções. O alcance representa a distância em que o variograma atinge seu platô, chamado sill, que representa a variância total dos dados e o efeito pepita representa a descontinuidade do variograma. O valor de sill e o efeito pepita utilizado neste trabalho variou para cada metodologia de amostragem utilizada, conforme mostrado na tabela 01.

Método de amostragem	Sill	Efeito Pepita
Sonda	6,2	3,5
Poços	0,9	1
Canaletas	2,9	7

TABELA 01 – VALORES DE SILL E EFEITO PEPITA PARA CADA METODOLOGIA

Para fazer o modelo semivariográfico dos dados foi escolhido o tipo esférico, tanto por ser o mais utilizado em geoestatística para uma, duas ou três dimensões, como por ter um comportamento linear para distâncias próximas à origem.

Como estamos tratando de um depósito isotrópico, foi escolhida a direção omnidirecional, para ser possível pegar todas as amostras em todas as direções separadas pelo lag escolhido para cada um dos três tipos de amostragens, representando a continuidade espacial das amostras, assim como, o maior número de pares, sendo mais fácil para interpretar a estrutura do depósito. Para a escolha dos parâmetros para modelar o variograma, além do tipo de amostragem, as malhas também foram levadas em consideração para a escolha do lag, para canaleta foi escolhido lag de 25 e tolerância de 12,5 e para sonda e poço lag 100 e a tolerância de 50.

Os variogramas para cada metodologia de amostragem, furos, poços e canaletas são respectivamente, apresentados nas Figuras 10, 11 e 12.

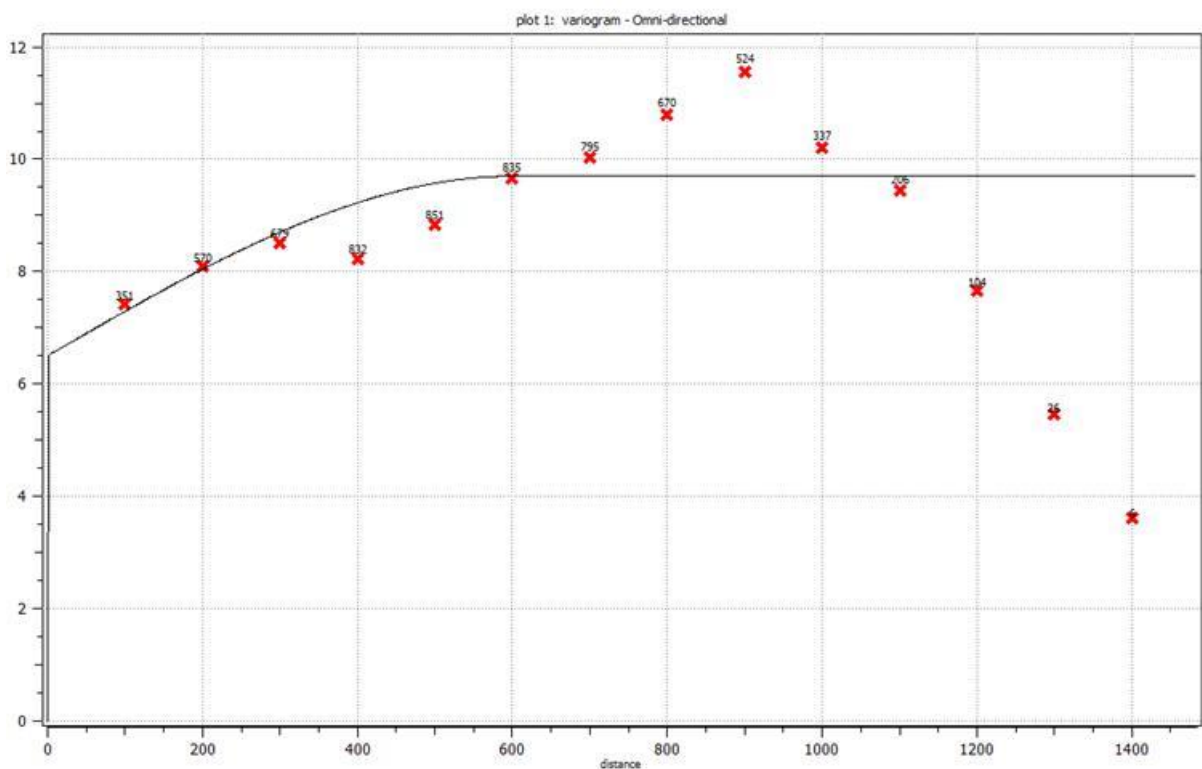


FIGURA 10 - VARIOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE SONDA

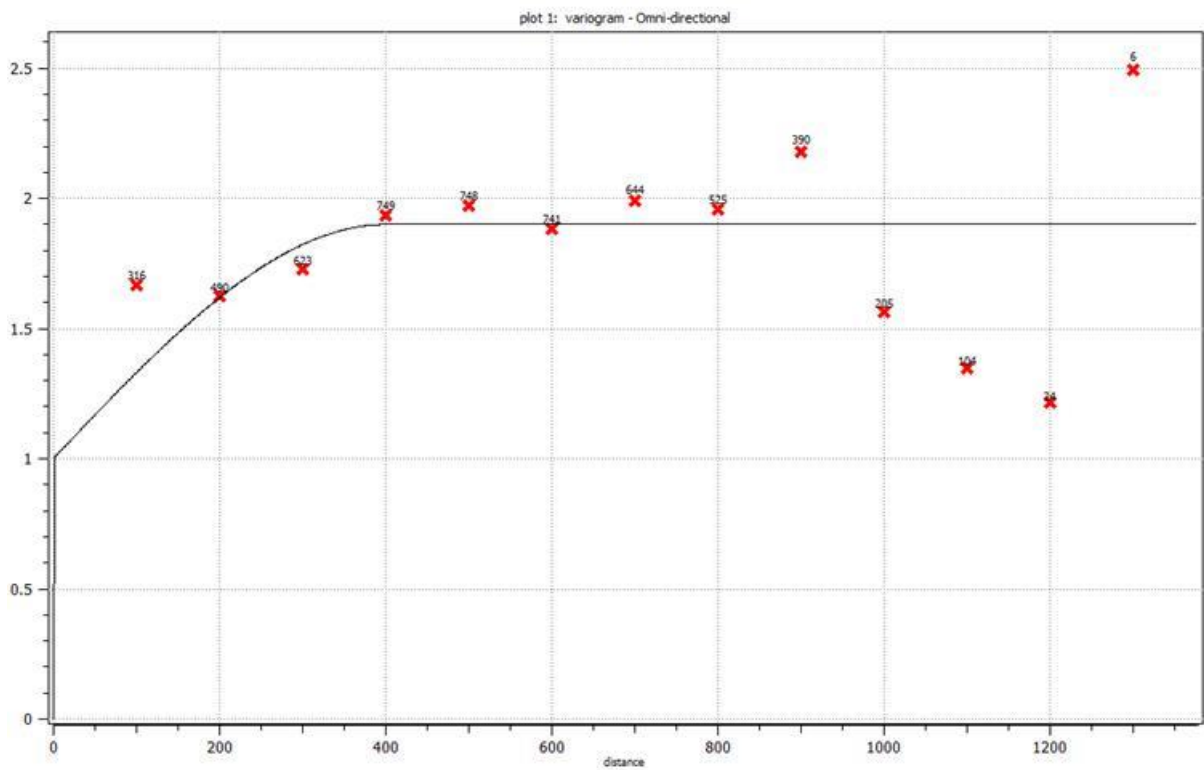


FIGURA 11 - VARIOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE POÇOS

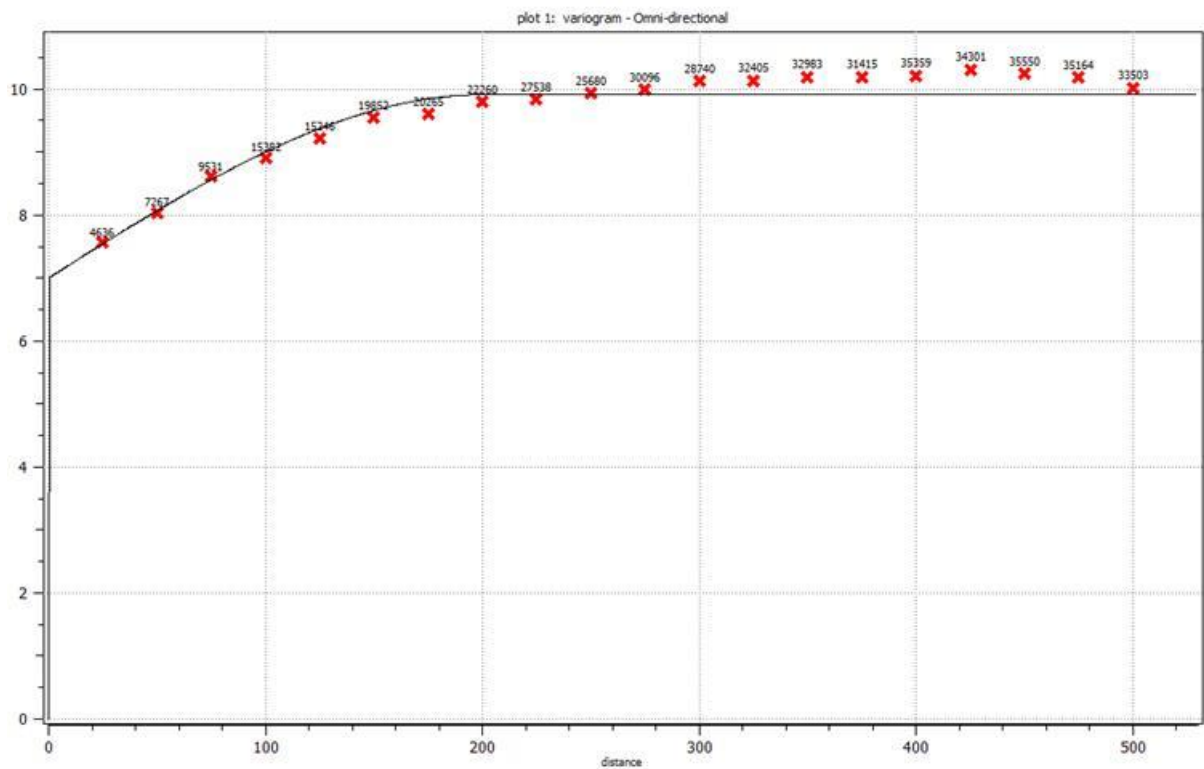


FIGURA 12 - VARIOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CANALETAS

Com o modelamento variográfico para cada uma das três metodologias, foi obtido o alcance máximo de similaridade das amostras apresentados na tabela 02.

Método de amostragem	Alcance do variograma
Sonda	600
Poços	400
Canaletas	200

TABELA 02 – ALCANCE DOS VARIOGRAMAS PARA CADA METODOLOGIA

4.3. KRIGAGEM

Com a análise variográfica, foi possível então integrar os dados obtidos nos parâmetros da krigagem e então fazer uma estimativa para os dados de Al_2O_3 para as três metodologias de amostragem, poço, sonda e canaleta, além disso, foram gerados histogramas do modelo, como mostram as figuras de 13 a 18. A variação de alumina disponível é visualizada nos mapas, onde as áreas em vermelho indicam os maiores teores e as áreas em azul os menores teores, conforme escala de cor ao lado de cada mapa.

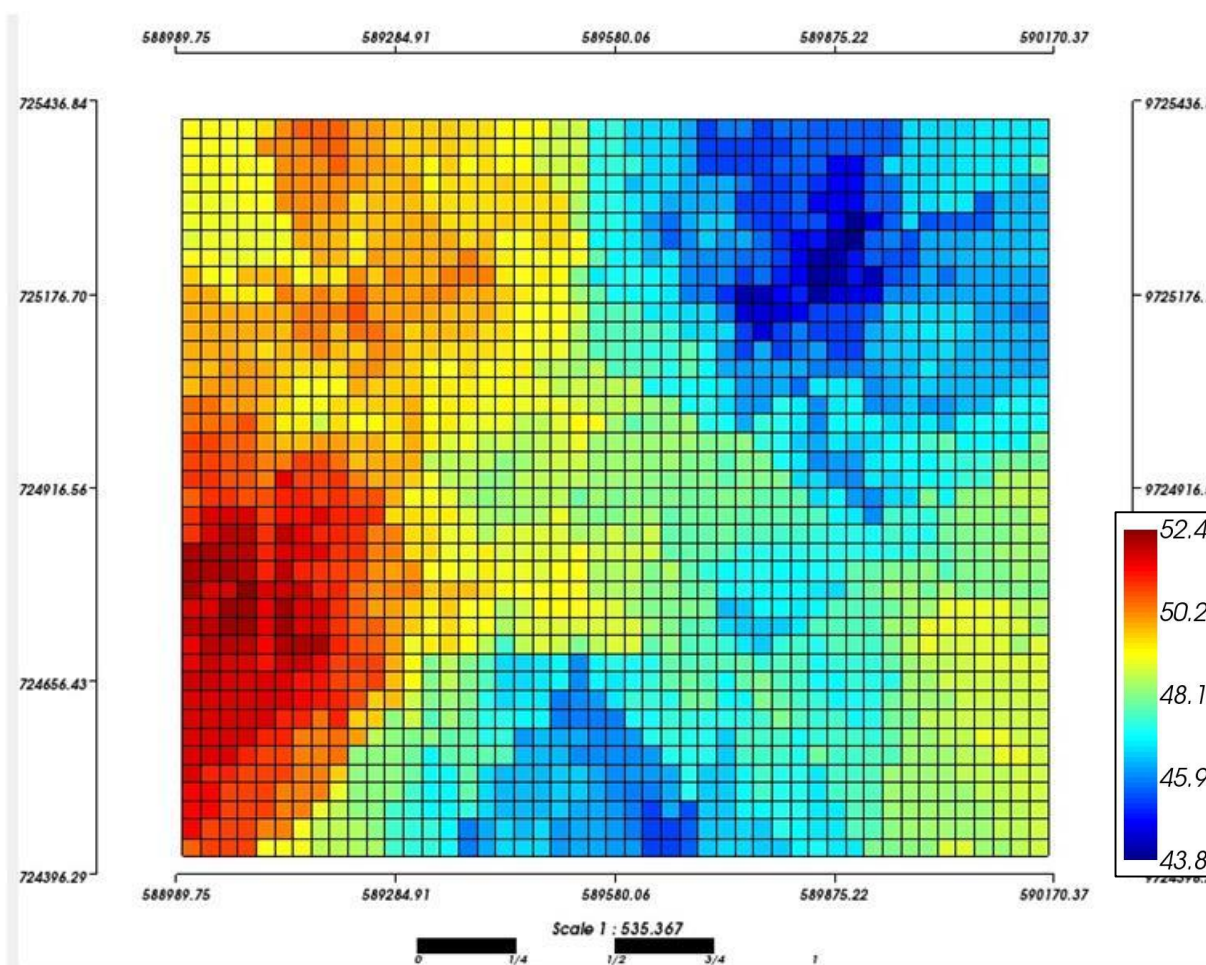


FIGURA 13 - MODELO GEOLÓGICO DAS AMOSTRAS DE SONDA

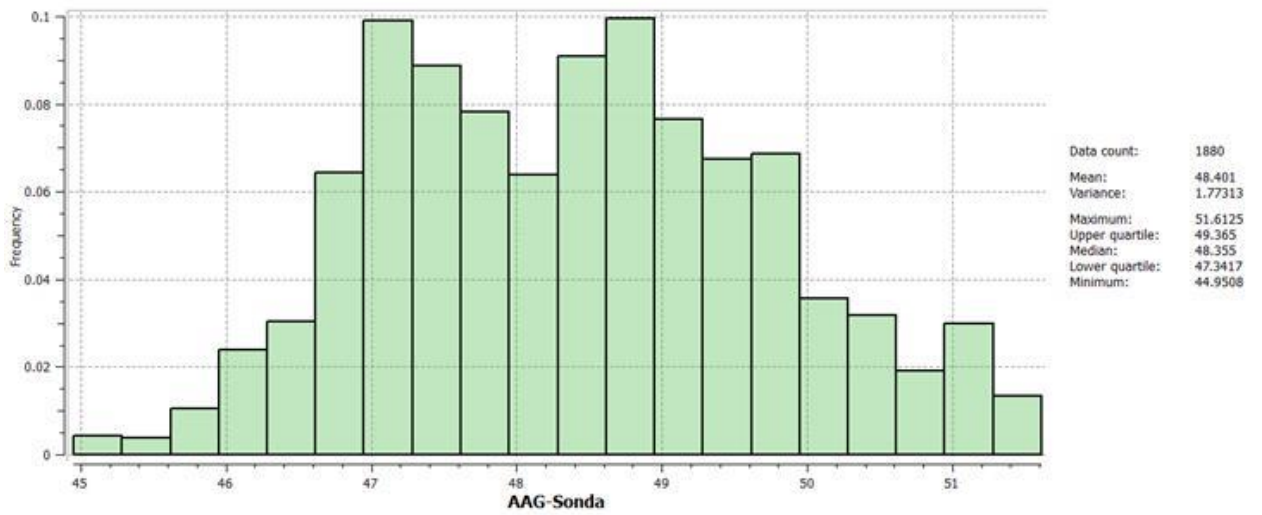


FIGURA 14 – HISTOGRAMA DO MODELO GEOLÓGICO DAS AMOSTRAS DE SONDA

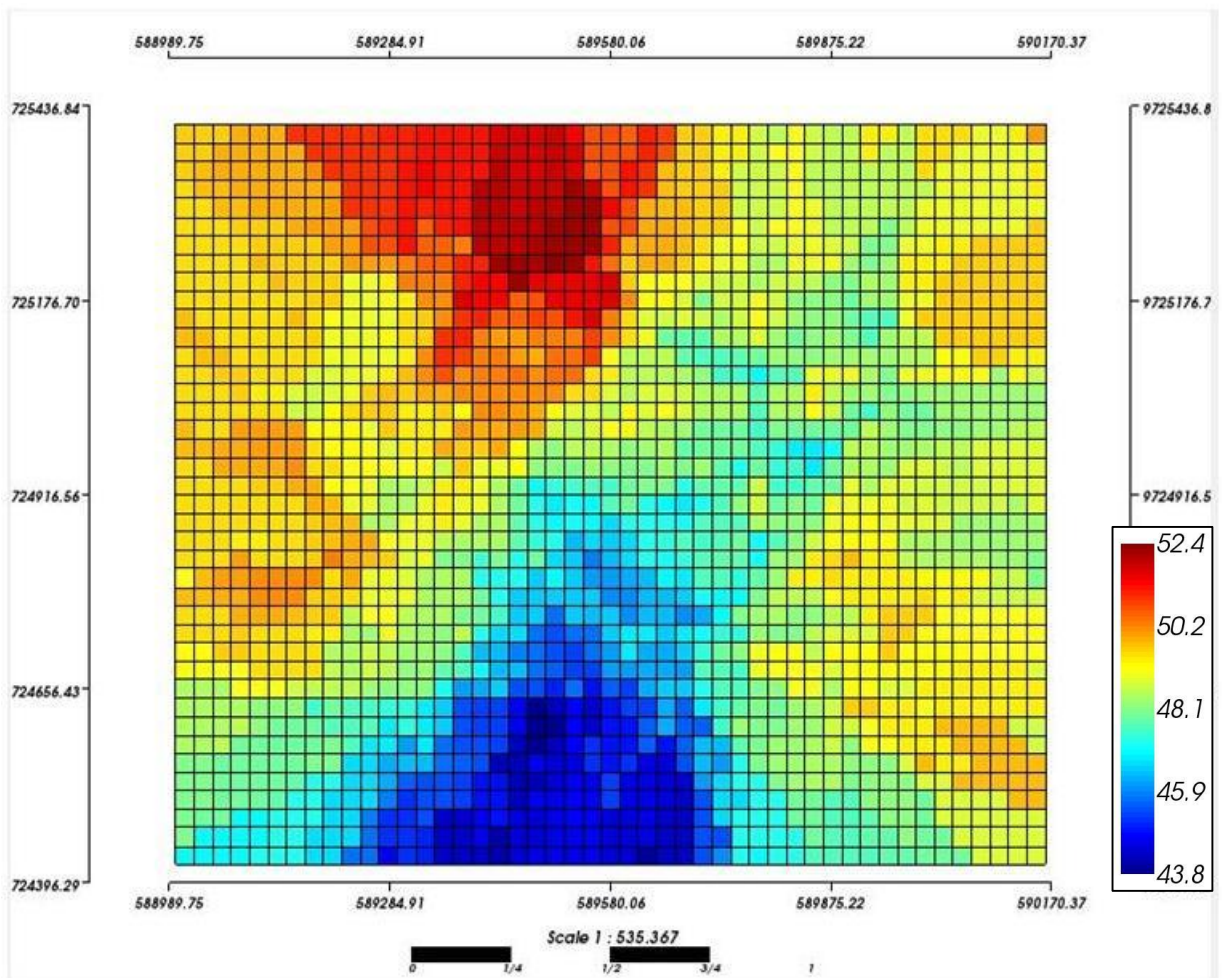


FIGURA 15 - MODELO GEOLÓGICO DAS AMOSTRAS DE POÇOS

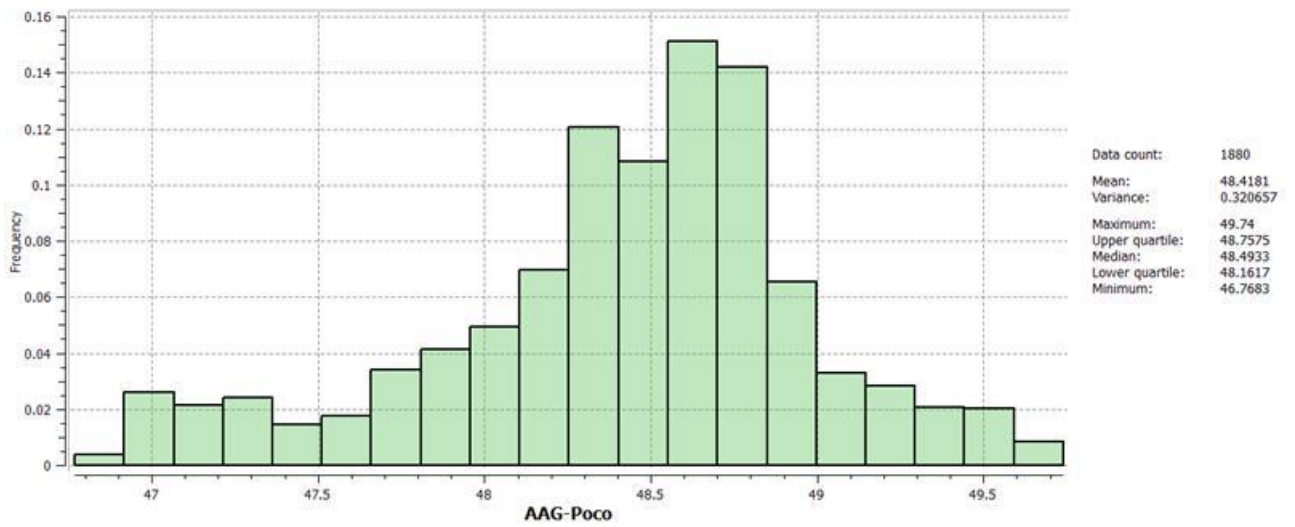


FIGURA 16 – HISTOGRAMA DO MODELO GEOLÓGICO DAS AMOSTRAS DE POÇO

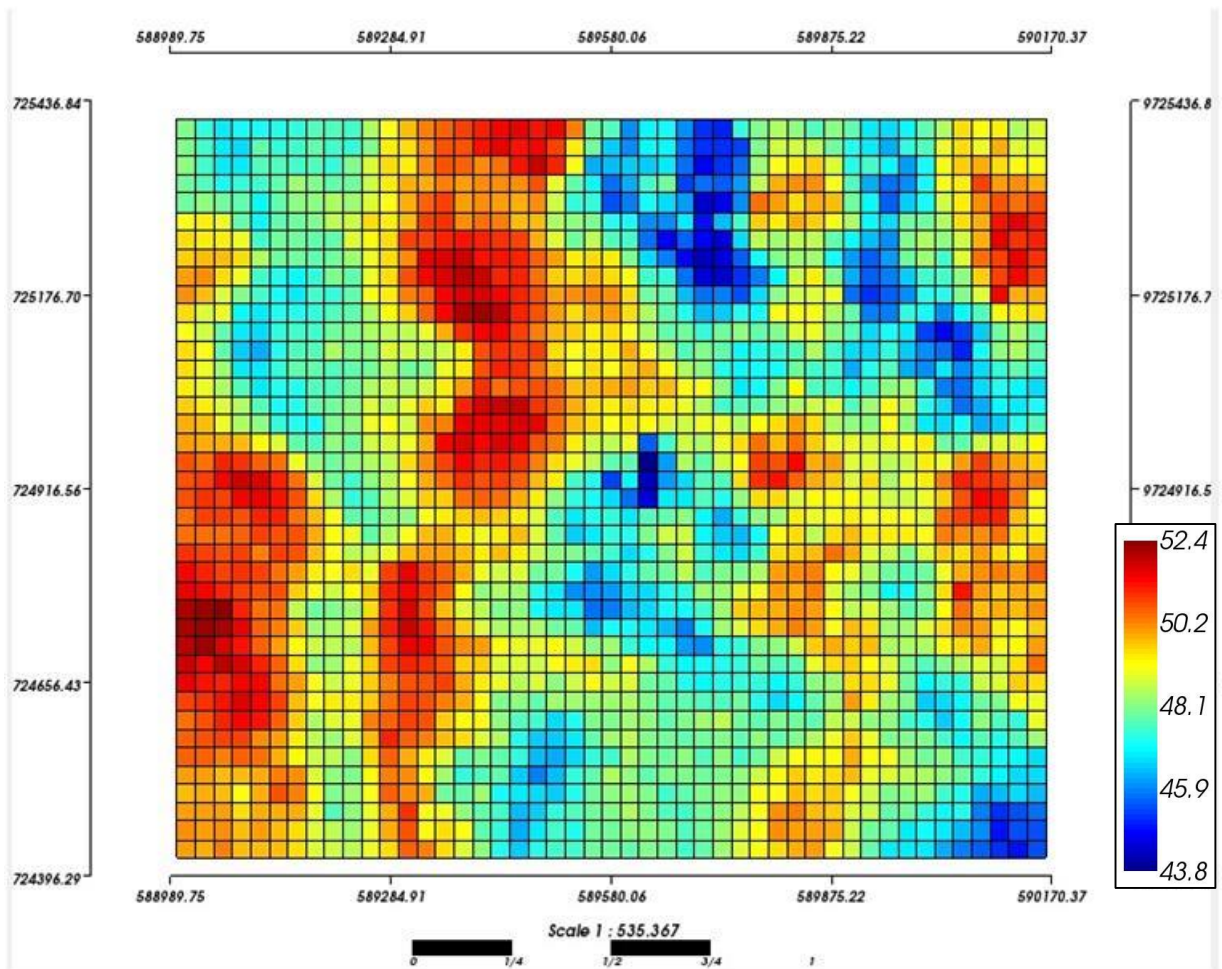


FIGURA 17 - MODELO GEOLÓGICO DAS AMOSTRAS DE CANALETAS

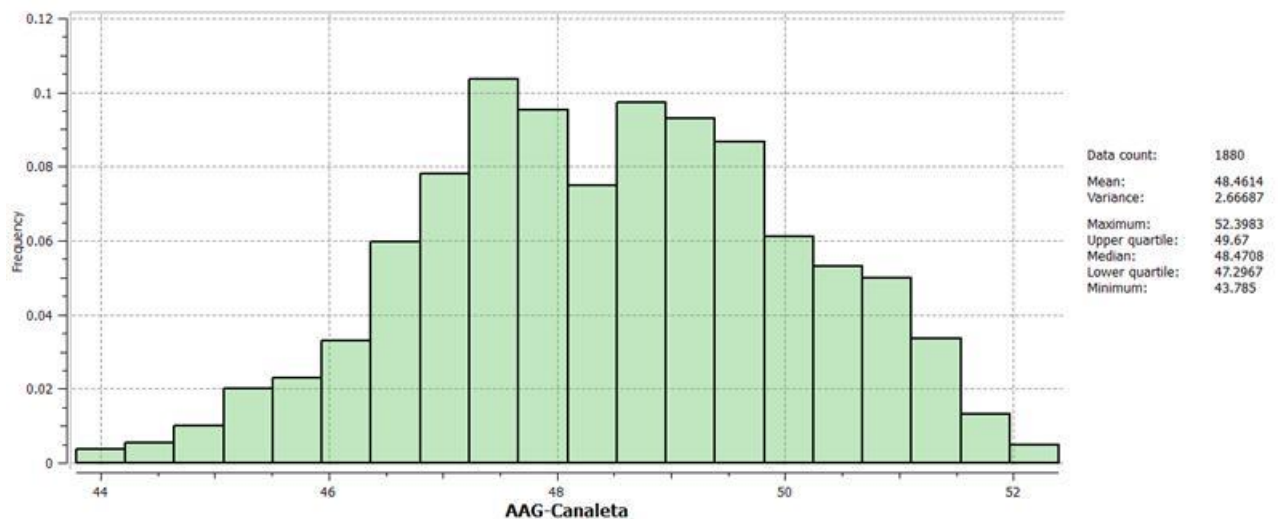


FIGURA 18 - HISTOGRAMA DO MODELO GEOLÓGICO DAS AMOSTRAS DE CANALETAS

4.4. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A análise estatística básica é o primeiro passo que se deve dar para qualquer estudo estatístico, com ele é possível identificar adensamentos de amostragem, médias, desvios padrões e outra infinidade de parâmetros que serão muito úteis para as próximas etapas de qualquer projeto.

A escolha dos métodos de amostragem foi determinada primeiramente pela fase que se encontrava o projeto, na pesquisa foram utilizados poços, para posteriormente um melhor detalhamento da área foram realizadas sondagens em alvos pré-determinados na campanha de poços e por último são realizadas canaletas na frente de lavra para acompanhamento dos teores e espessura de minério.

Os três histogramas dos diferentes métodos de amostragem existe uma assimetria positiva, é possível identificar também alguns valores bem distantes da média, afetando assim o desvio padrão.

A análise variográfica é uma técnica muito interessante, pois ela faz com que sejam atribuídas características geológicas para as estimativas e não somente fatores geométricos que é o caso da estatística clássica.

Essas características são incorporadas na krigagem, um interpolador muito utilizado no mundo da geociência, pois ela utiliza informações de caráter geológico para fazer a sua interpolação.

Depois de variografar os dados dos métodos de amostragem, o modelo é estimado por krigagem, os teores de alumina disponível médio para cada um dos modelos geológico da área em estudo são apresentados na Tabela 03.

Método de amostragem	Média dos teores de alumina disponível (%)
Sonda	48.40
Poços	48.41
Canaletas	48.46

TABELA 03 - TEORES DE ALUMINA DISPONÍVEL ESTIMADA PARA OS TRÊS MODELOS GEOLÓGICOS

Em todos os três modelos pode se observar que os teores médios de Al_2O_3 , ficaram bem próximos, mas como dito anteriormente para um detalhamento melhor temos que adensar a malha de amostragem, com sonda, trado ou mesmo canaletas no caso de frente de lavra. Em uma etapa de pesquisa onde os recursos são limitados uma amostragem por poço pode dar um conhecimento geológico satisfatório da área em estudo e assim, determinar possíveis alvos para adensar a malha de amostragem.

5. CONCLUSÕES

Por mais contínuos que sejam os fenômenos geológicos, sempre existirão incertezas (globais e locais) em relação às estimativas. Suas magnitudes dependerão da variabilidade amostral local.

Uma das metas desse trabalho consistia em comparar a eficiência da amostragem de poços com relação a amostragem de sonda e canaleta. A diferença entre elas era a malha amostral e por possuir uma malha de amostragem mais detalhada (25 x 25m), os dados de canaletas foram considerados um *target* na análise do método de amostragem de poço.

Como pode ser observado nas figuras 15 e 17 que são os mapas geológicos de poço e canaleta respectivamente, observa-se que as áreas que apresentam os maiores valores de teores para alumina aproveitável no mapa de poço são corroboradas no mapa de canaleta, indicando que a amostragem de poço foi bem eficiente para a determinação das áreas com maiores teores para alumina aproveitável, sendo assim, para uma fase de pesquisa geológica onde os recursos muitas vezes são limitados, a amostragem usando poço pode ser uma opção para a determinação de áreas alvos para que possa ser detalhada em uma segunda fase de pesquisa usando outros métodos de amostragem.

Convém lembrar, que somente a variável alumina aproveitável foi analisada nesse estudo e que para ter um estudo mais detalhado a respeito da viabilidade econômica do depósito deverão também ser analisadas as variáveis, sílica reativa e espessura.

Para pesquisa geológica, métodos de amostragem, por poço pode ser uma opção satisfatório, a ser realizado anteriormente a uma amostragem detalhada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, FERNANDO P. **Relatório Final de Pesquisa de Bauxita – Município de Juruti – Estado do Pará**. Processos DNPM 850.010/91 e 850.011/91. SANDEL – 1996.
- COSTA, M. L. 1991. **Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia**. Rev. Brasil. Geoc., 21(2): 146-160.
- DAEMON, R. F. 1975. **Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas**. Rev. Brasil. Geoc., 5: 78-84.
- DENNEN, W. H. & NORTON, H. A. 1977. **Geology and Geochemistry of bauxite deposits in the lower Amazon basin**. Econ. Geol., 72: 82-89.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. GSLIB: **Geostatistical software library and user's guide**. New York: Oxford University Press, 1997. (Applied Geostatistics Series). ISBN 9780195100150.
- DNPM - **Departamento Nacional de Produção Projeto Radam - Levantamento de Recursos Naturais** [Book]. - Belém : [s.n.], 1976. - Vol. 5.
- FARRAN, KALIL A. de ALCÂNTARA *et alli*. **Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental – Projeto Juruti – Estado do Pará**. CNEC, 2004
- GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. (Applied Geostatistics Series). ISBN 9780195115383.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1990. ISBN 9780195050134.
- KOTSCHOUBEY, B. 1988. **Geologia do Alumínio**. In: Principais Depósitos Minerais do Brasil, Brasil/MME-DNPM-CVRD. Brasília. 1988. v. 3, p:599-619.
- LUCAS, Y. 1997. **The bauxite of Juruti**. In: Brazilian Bauxites. Eds. A. Carvalho; B. Boulange; A. J. Melfi; Y. Lucas. USP/FAPESP/ORSTOM. São Paulo, Paris. pp.107-136.
- Plano de Aproveitamento Econômico**, projeto Juruti, Omnia Minerios, Senior Engenharia, 2005
- MONTORO, E.R.; PORCIÚNCULA, E.W.; OTTONI, M.L.(1993), **Estatística Aplicada a Processos Críticos** – Publicação ALCOA.
- YAMAMOTO, J. K. **Geoestatística: conceitos + aplicações**. São Paulo. 2013. Oficina de textos.