



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Desenvolvimento de *Software* para Estimativa de Reservas Utilizando Métodos Convencionais: Inverso da Distância e Triangulação

Antonio Matheus Silva

Ouro Preto - MG
Dezembro de 2019

ANTONIO MATHEUS SILVA

Desenvolvimento de *Software* para Estimativa de Reservas Utilizando
Métodos Convencionais: Inverso da Distância e Triangulação

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto, como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Minas. **Área de concentração:**
Pesquisa Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro

Ouro Preto - MG
Dezembro de 2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586d Silva, Antonio Matheus .
Desenvolvimento de software para estimativa de reservas utilizando métodos
convencionais [manuscrito]: inverso da distância e triangulação. / Antonio Matheus
Silva. - 2019.
39 f.: il.: color..

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas.

1. Pesquisa mineral. 2. Minas e recursos minerais. 3. Geologia econômica. I.
Destro, Elton. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.013:553

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 13 dias do mês de dezembro de 2019, às 10h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas DEMIN/EM, no Campus Universitário Morro do Cruzeiro, foi realizada a defesa da Monografia de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA ESTIMATIVA DE RESERVAS UTILIZANDO MÉTODOS CONVENCIONAIS: INVERSO DA DISTÂNCIA E TRIANGULAÇÃO”**, pelo aluno **Antônio Matheus Silva**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Elton Destro (orientador)**, **Prof. Dr. José Margarida da Silva e Engº de Minas Jeremias Antônio Soares**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou pela **aprovação** do candidato, com a nota **9,0**, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Prof. Dr. Elton Destro
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador

Ouro Preto, 13 de dezembro de 2019.

Prof. Dr. José Margarida da Silva
Membro da Comissão Avaliadora

Engº de Minas Jeremias Antônio Soares
Membro da Comissão Avaliadora

Antônio Matheus Silva

Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 492 – Trabalho de Conclusão de Curso

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família, principalmente aos meus pais que sempre me apoiaram e me deram conselhos. A minha namorada Alice, por me apoiar e me incentivar a continuar. Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto e seus professores pelos aprendizados, em especial ao meu orientador Elton Destro por me ensinar e guiar ao longo desse trabalho.

RESUMO

A pesquisa mineral é uma etapa imprescindível da mineração, já que é a partir dela que se pode concluir se a lavra de um depósito mineral será viável econômica e tecnicamente. Uma das tarefas da pesquisa mineral é a estimativa das reservas de um depósito mineral, na qual são calculados alguns de seus principais parâmetros como o teor médio do elemento de interesse, o volume e a tonelagem do depósito. Esses cálculos precisam ser o mais preciso possível, já que decisões serão tomadas baseadas nos resultados apresentados. Para realizar a avaliação do depósito, vários métodos são utilizados, os quais são divididos em métodos convencionais, estatísticos e geoestatísticos. No presente trabalho, foi desenvolvido um *software* para estimativa de reservas minerais utilizando dois métodos convencionais: o método do inverso da enésima potência da distância e o método da triangulação. O *software* também possui uma abordagem didático-pedagógica, pois mostra a distribuição dos teores na área avaliada por meio de representações gráficas com escala de cores, além de resultados numéricos das estimativas realizadas e outros recursos gráficos característicos de cada metodologia utilizada. O desenvolvimento do *software* foi feito utilizando a linguagem JavaScript e várias bibliotecas auxiliares, entre elas, a Electron.

Palavras-chave: pesquisa mineral, estimação, *software*, inverso da distância, triangulação.

ABSTRACT

Mineral exploration is a necessary stage to mining, it's from it that is possible to conclude if the exploitation of an ore deposit will be economically and technically viable. One of the mineral exploration tasks is to estimate the mineral deposit's reserves, when will be calculated the main parameters such as the mineral of interest average grade, the volume and tonnage. These calculations need to be as much accurate as possible, because they are data that is going to be used as the base to decision making. There are many methods that can be used to estimate the mineral deposit's reserves, these methods are divided into three types, conventional methods, statistical methods and geostatistical methods. In this project was developed a software to estimate reserves, using two conventional methods, the inverse distance weighting method and the triangulation method. The software has a didactic-pedagogical approach, with a graphical representation of the mineral's grade distribution in a color scale and numerical results. The development was made with JavaScript as the main language and some auxiliary libraries, such as Electron.

Keywords: mineral exploration, estimation, software, inverse distance, triangulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: MÉTODO DAS ISOLINHAS. FONTE: YAMAMOTO, 2001.	5
FIGURA 2: MÉTODO DOS POLÍGONOS. FONTE: GUERRA, 1988.	6
FIGURA 3: MÉTODO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS STANDARD. FONTE: GUERRA, 1988.	7
FIGURA 4: MÉTODO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS. FONTE: GUERRA, 1988.	8
FIGURA 5: MÉTODO DOS TRIÂNGULO. FONTE: YAMAMOTO, 2001.	9
FIGURA 6: MÉTODO DO INVERSO DA DISTÂNCIA COM A ÁREA DIVIDIDA EM OCTANTES. FONTE: GUERRA, 1988.	12
FIGURA 7: MÉTODO DA TRIANGULAÇÃO. FONTE: ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989.	13
FIGURA 8: TELA INICIAL DO SOFTWARE. FONTE: AUTOR.	15
FIGURA 9: INPUT DO USUÁRIO. FONTE AUTOR.	16
FIGURA 10: EXEMPLO DE UM ARQUIVO DE ÁREA. FONTE: AUTOR.	17
FIGURA 11: EXEMPLO DE UM ARQUIVO DE AMOSTRAS. FONTE: AUTOR.	17
FIGURA 12: RESULTADO DA ESTIMATIVA ATRAVÉS DO MÉTODO DO INVERSO DA DISTÂNCIA. FONTE: AUTOR.	18
FIGURA 13: INFORMAÇÃO DO BLOCO AO CLICAR. FONTE: AUTOR.	19
FIGURA 14: RESULTADO PARA UMA ÁREA IRREGULAR. NÚMERO DE COLUNAS: 50; NÚMERO DE LINHAS: 50; ALGORITMO: INVERSO DA DISTÂNCIA; NÚMERO DE SETORES: 4; RAI0: 100; POTÊNCIA: 2. FONTE: AUTOR.	20
FIGURA 15: RESULTADO PARA UMA ÁREA IRREGULAR. NÚMERO DE COLUNAS: 50; NÚMERO DE LINHAS: 50; ALGORITMO: TRIANGULAÇÃO. FONTE: AUTOR.	21
FIGURA 16: RESULTADO OBTIDO UTILIZANDO 4 SETORES. NÚMERO DE COLUNAS: 200; NÚMERO DE LINHAS: 200; ALGORITMO: INVERSO DA DISTÂNCIA; RAI0: 100; POTÊNCIA: 2. FONTE: AUTOR.	22
FIGURA 17: RESULTADO OBTIDO UTILIZANDO 8 SETORES. NÚMERO DE COLUNAS: 200; NÚMERO DE LINHAS: 200; ALGORITMO: INVERSO DA DISTÂNCIA; RAI0: 100; POTÊNCIA: 2. FONTE: AUTOR.	23
FIGURA 18: RESULTADO OBTIDO UTILIZANDO UM RAI0 DE 20. NÚMERO DE COLUNAS: 200; NÚMERO DE LINHAS: 200; ALGORITMO: INVERSO DA DISTÂNCIA; SETORES: 8; POTÊNCIA: 2. FONTE: AUTOR.	24
FIGURA 19: RESULTADO OBTIDO UTILIZANDO UM RAI0 DE 50. NÚMERO DE COLUNAS: 200; NÚMERO DE LINHAS: 200; ALGORITMO: INVERSO DA DISTÂNCIA; SETORES: 8; POTÊNCIA: 2. FONTE: AUTOR.	25
FIGURA 20: RESULTADO OBTIDO UTILIZANDO POTÊNCIA 1. NÚMERO DE COLUNAS: 200; NÚMERO DE LINHAS: 200; ALGORITMO: INVERSO DA DISTÂNCIA; SETORES: 8; RAI0: 100. FONTE: AUTOR.	26
FIGURA 21: RESULTADO OBTIDO UTILIZANDO POTÊNCIA 10. NÚMERO DE COLUNAS: 200; NÚMERO DE LINHAS: 200; ALGORITMO: INVERSO DA DISTÂNCIA; SETORES: 8; RAI0: 100. FONTE: AUTOR.	27
FIGURA 22: RESULTADO OBTIDO COM UMA MALHA 10 X 10. ALGORITMO: TRIANGULAÇÃO. FONTE: AUTOR.	28
FIGURA 23: RESULTADO OBTIDO COM UMA MALHA 200 X 200. ALGORITMO: TRIANGULAÇÃO. FONTE: AUTOR. ...	29

SUMÁRIO

RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVO GERAL	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. MÉTODO DAS ISOLINHAS	4
3.2. MÉTODO DOS POLÍGONOS	6
3.3. MÉTODO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS	7
3.4. MÉTODO DOS TRIÂNGULOS.....	8
3.5. MÉTODO DO INVERSO DA ENÉSIMA POTÊNCIA DA DISTÂNCIA.....	9
3.6. MÉTODO DA TRIANGULAÇÃO.....	10
4. METODOLOGIA.....	11
4.1. MÉTODO DO INVERSO DA ENÉSIMA POTÊNCIA DA DISTÂNCIA.....	11
4.2. MÉTODO DA TRIANGULAÇÃO.....	12
4.3. JAVASCRIPT	14
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5.1. TELA INICIAL	15
5.2. INTERFACE AMIGÁVEL.....	16
5.3. EXIBIÇÃO DOS RESULTADOS	18
5.4. ÁREA DA ESTIMATIVA	20
5.5. INVERSO DA DISTÂNCIA	22
5.6. TRIANGULAÇÃO	28
6. CONCLUSÕES	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa mineral é uma etapa imprescindível da mineração, já que é a partir dela que se pode concluir se a lavra de um depósito mineral será viável econômica e tecnicamente. Uma das tarefas da pesquisa mineral é a estimativa das reservas de um depósito mineral, na qual são calculados alguns de seus principais parâmetros como, por exemplo, a espessura do corpo mineralizado, o teor de um determinado elemento, o volume e tonelagem do depósito. Uma vez que desempenha um papel tão importante, é imprescindível que haja métodos eficientes e confiáveis para a estimativa das reservas minerais.

As técnicas de estimativa são divididas em métodos convencionais, estatísticos e geoestatísticos. A principal característica dos métodos convencionais é que são baseados na interpretação espacial dos dados amostrais, ou seja, não levam em consideração as características geológicas do depósito. Além disso, não é possível saber o erro relacionado à estimativa, já que parâmetros estatísticos não são considerados. Porém, são métodos simples, de rápida execução e geram resultados satisfatórios e, por esses motivos, são muitas vezes preferidos aos métodos mais sofisticados, principalmente por empreendimentos de pequeno porte. Além de serem utilizados para estimativa do depósito, muitas vezes os métodos convencionais são utilizados como critério para direcionamento dos trabalhos da fase da pesquisa mineral.

Os métodos estatísticos são métodos que assumem todas as variáveis estimadas como sendo aleatórias e independentes, ou seja, as características do fenômeno formador do depósito mineral como, por exemplo, direções de maior e menor continuidade/variabilidade e anisotropias, não são consideradas. Os métodos estatísticos são mais difíceis de serem executados na prática, já que as amostras, para serem representativas, devem ser coletadas aleatoriamente no depósito; porém, geralmente, isso é inviável de ser realizado. Mas, ao contrário dos métodos convencionais, os métodos estatísticos possibilitam o cálculo do erro relacionado à estimativa.

Já os métodos geoestatísticos são baseados na teoria das variáveis regionalizadas, que são variáveis que possuem tanto o aspecto aleatório quanto espacial, ou seja, as variáveis podem tanto variar de forma aleatória, como de uma forma regular, dependente do fenômeno natural formador do depósito mineral. Além disso, oferecem uma maior precisão, já que são baseados em variogramas que permitem a análise da variabilidade das variáveis de interesse e os erros associados às estimativas. Contudo, os métodos geoestatísticos não são simples de serem executados, pois requerem um conhecimento técnico avançado, não sendo, por isso, utilizados em muitos empreendimentos, principalmente os de pequeno porte.

Todos os métodos, geralmente, exigem um trabalho exaustivo se forem executados manualmente. Dessa forma, métodos computacionais, para executar grande parte dos procedimentos (se não todos os procedimentos) foram desenvolvidos e implementados por *softwares* profissionais, tornando o cálculo da estimativa mais rápido e preciso, já que erros humanos serão menos frequentes. Além disso, os *softwares* permitem uma melhor visualização da

distribuição dos valores das variáveis de interesse, permitindo aos profissionais que necessitam desses dados tomarem melhores decisões.

O *software* desenvolvido neste trabalho também possui características didático-pedagógicas, pois, além de possuir uma interface gráfica amigável com o usuário, os resultados são exibidos de modo a realçar as principais características dos métodos convencionais implementados através do uso de recursos gráficos e numéricos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um *software* para a avaliação de reservas minerais utilizando a linguagem de programação JavaScript e bibliotecas auxiliares.

2.2. Objetivos Específicos

- Implementar algoritmos relacionados a dois métodos convencionais para a avaliação dos depósitos minerais: inverso da enésima potência da distância e triangulação;
- Utilizar recursos gráficos que favoreçam uma interface gráfica amigável com o usuário;
- Exibir os resultados das estimativas de forma numérica e, também, graficamente utilizando, para isso, uma escala de cores para melhor visualização da distribuição dos teores na área de pesquisa;
- Desenvolver um aplicativo que tenha características didático-pedagógicas, através do uso de recursos gráficos que remetem às principais características das técnicas implementadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos convencionais são métodos que utilizam a disposição espacial das amostras no depósito para realizar a estimativa de variáveis de interesse. São métodos simples e rápidos de serem utilizados, além de não requererem grandes investimentos de exploração. Existem também os métodos estatísticos e geoestatísticos, estes dois métodos não serão abordados neste trabalho.

De acordo com Guerra (1988), os métodos convencionais baseiam-se em três critérios para a interpretação dos dados amostrados: **critérios analíticos, naturais ou intrínsecos e empíricos**, descritos a seguir conforme o autor.

Os **critérios analíticos** são divididos em duas formas de como interpretar a continuidade da variável de interesse. Uma das formas de se interpretar é considerar que a variável de interesse se altere de acordo com uma função linear de um ponto amostrado a outro. A outra forma de interpretar é considerar uma área de igual influência para cada ponto amostrado, de maneira que qualquer ponto ao qual se deseje estimar dentro desta área terá as mesmas propriedades do ponto amostrado.

Os **critérios naturais ou intrínsecos** permitem fazer interpretações com base em conhecimentos geológicos da área sendo estimada. Por exemplo, a existência de acamamentos no depósito permite que se possa fazer uma estimativa mais certa sobre a área de influência de um ponto amostrado, já que a transição de camadas, normalmente, está associada à uma mudança na mineralização.

Os **critérios empíricos** são utilizados para generalizar ou extrapolar o valor de uma variável para regiões não amostradas, baseando-se em experiências com depósitos similares ou no processo típico de formação da mineralização em questão.

Os principais métodos convencionais são:

- Isolinhas;
- Polígonos;
- Seções Transversais;
- Triângulos;
- Inverso da Distância;
- Triangulação.

3.1. Método das Isolinhas

O método das isolinhas é baseado no critério da função linear, ou seja, o valor da variável de interesse irá variar conforme uma função linear. O objetivo deste método é a construção de curvas de isovalores, normalmente construídas em intervalos regulares.

A partir de cada ponto amostrado são traçadas retas interligando os pontos amostrados, de forma que seja possível realizar uma interpolação para calcular a posição do valor de interesse na reta. Os pontos calculados de igual valor são, então, ligados e as curvas são construídas. Para calcular o teor médio do depósito, é necessário calcular a área das curvas de isovalores, sendo o teor médio estimado usando a expressão a seguir (GUERRA, 1988):

$$t_m = \frac{t_0 \times A_0 + \frac{t}{2} (A_0 + 2A_1 + 2A_2 + \dots + A_n)}{A_0}$$

Em que:

t_m : teor médio ponderado;

t_0 : teor da maior curva;

t : intervalo de teor constante entre isolinhas;

A_0 : área do corpo mineral delimitada pela isolinhas com teor t_0 ;

A_1 : área do corpo mineral com teor maior que $t_0 + t$;

A_n : área do corpo mineral com teor maior que $t_0 + nt$.

O método das isolinhas é mais adequado para depósitos onde há uma certa regularidade, em que os valores variam gradualmente (YAMAMOTO, 2001), conforme exemplo mostrado na figura 1. A sua aplicação em depósitos erráticos, provavelmente resultará em uma estimativa errônea (GUERRA, 1988).

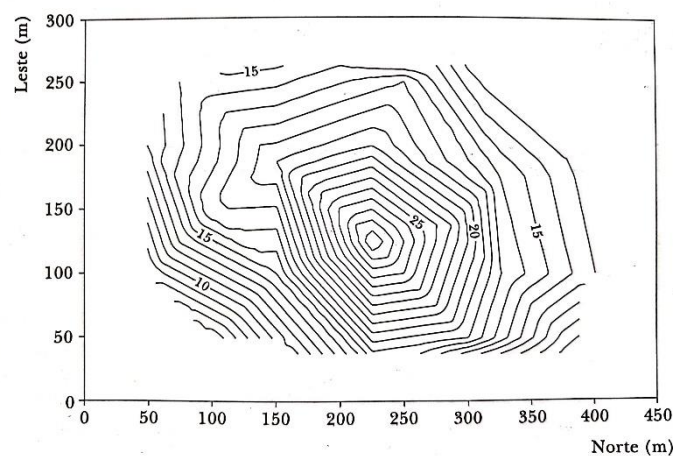


Figura 1: Método das Isolinhas. Fonte: YAMAMOTO, 2001.

De acordo com POPOFF (1966) *apud* Yamamoto (2001), é recomendado utilizar o método das isolinhas para depósitos de água, gás natural e óleo.

Devido a sua forma de apresentação, o método das isolinhas tem como principal vantagem a sua fácil interpretação. Além disso, é ótimo para planejamento mineiro, já que seu resultado não é alterado com a mudança de teores de corte. A principal desvantagem do método das isolinhas é a sua inflexibilidade quanto a novas informações, já que, para incluí-las, será necessária uma nova plotagem. Outra desvantagem é que para se obter resultados mais satisfatórios, é necessária uma certa regularidade na malha de amostragem, como também uma boa densidade de amostras. Além disso, caso o método não seja utilizado com o auxílio de computadores, uma grande quantidade de amostras pode deixar a plotagem difícil de ser executada (GUERRA, 1988).

3.2. Método dos Polígonos

O método dos polígonos utiliza o critério das áreas de igual influência para a interpretação dos dados. O objetivo deste método é construir um polígono para cada amostra, na qual as propriedades da amostra serão generalizadas para todos os pontos contidos no interior do polígono.

Os polígonos são construídos a partir da interseção das retas perpendiculares aos pontos médios das conexões entre o ponto central e os pontos adjacentes (figura 5). Se existirem pontos amostrados isolados, é utilizado uma distância máxima para evitar o enviesamento da estimativa.

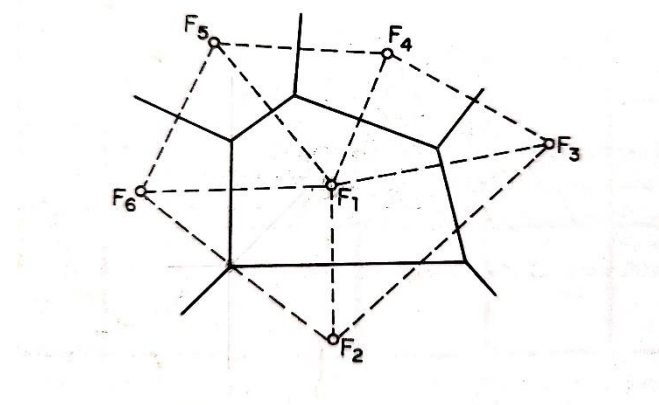


Figura 2: Método dos Polígonos. Fonte: GUERRA, 1988.

Uma forma alternativa de estimar os valores a partir dos polígonos é fazer uma ponderação em que o valor central do polígono recebe 50% do peso, e 50% é distribuído igualmente entre os valores adjacentes (CAMISANI-CALZOLARI, 1983 *apud* ANNELS, 1991).

Os pontos amostrais que se encontram na fronteira da área sendo estimada podem não ter dados suficientes para construir um polígono de influência. Nesses casos, é sugerido por POPOFF (1966) *apud* Yamamoto (2001) que se obtenha a distância média de influência dentro da área

sendo estimada e, então, seja completado o polígono desses pontos com um arco de raio igual à essa distância média.

O uso do método dos polígonos é sugerido para depósitos regulares, como os tabulares e lenticulares. Uma das vantagens do método é que, diferente do método das isolinhas, ele é flexível a novas informações, não sendo necessário a construção de todos os polígonos novamente. Além disso, oferece resultados bastante satisfatórios, caso o depósito seja regular (GUERRA, 1988).

A principal desvantagem do método é que valores discrepantes/*outliers* podem enviesar o resultado obtido. Uma prática comum para evitar esse problema é tomar como valor do polígono a média da amostra discrepante e, pelo menos, duas amostras adjacentes, ou a média ponderada da amostra discrepante e as amostras adjacentes (THOMAS,1985).

3.3. Método das Seções Transversais

O método das seções transversais é dividido em dois sub-métodos, um deles interpretando a distribuição das variáveis como uma função linear e, outro, interpretando a distribuição através das áreas de igual influência, sendo denominados Método *Standard* e Método Linear, respectivamente. O objetivo deste método, no geral, é estimar a variável de interesse através da construção de blocos, os quais são delimitados direta ou indiretamente por seções e estas, por sua vez, podem ser horizontais, verticais ou inclinadas (GUERRA, 1988). Os volumes são estimados através da ponderação das amostras coletadas em cada seção (MUTMANSKY e HARTMAN, 2002).

No Método *Standard*, o bloco é definido como sendo o volume entre duas seções adjacentes; para blocos nas periferias, utiliza-se apenas uma seção (GUERRA, 1988). Já que o método *Standard* utiliza a lei linear para interpretar, as propriedades dentro do bloco variam linearmente de uma seção para a outra.

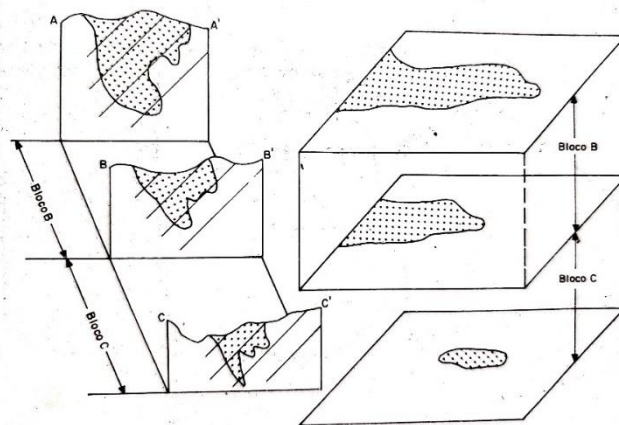


Figura 3: Método das Seções Transversais Standard. Fonte: GUERRA, 1988.

No Método Linear, o bloco é definido como sendo o volume entre as duas semidistâncias entre a seção e as duas seções adjacentes. E, como o método linear utiliza a lei das áreas de igual influência, cada bloco terá as mesmas propriedades que a seção contida nesse (GUERRA, 1988).

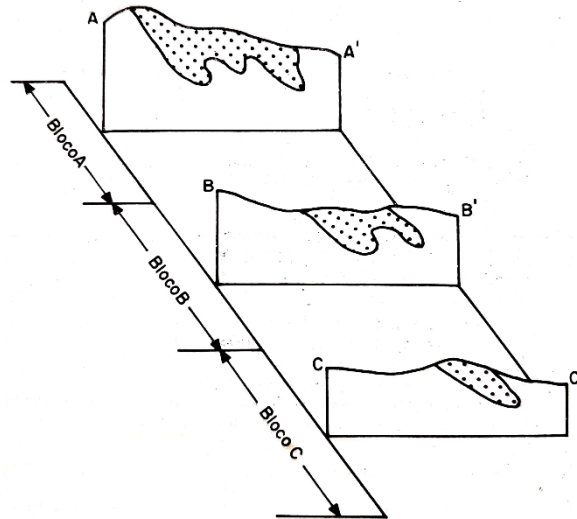


Figura 4: Método das Seções Transversais. Fonte: GUERRA, 1988.

O método das seções transversais é mais adequado para corpos bem definidos e de grandes dimensões, com pequenas variações de teor e espessura. Caso contrário, o método resultará em estimativas errôneas. A principal vantagem do método é que pode ser utilizado tanto na horizontal, na vertical ou inclinado. Porém é necessário que se tenha uma boa densidade de furos que atravessam todo o depósito, da capa à lapa, com espaçamentos regulares e trabalhos distribuídos igualmente por todas as seções. Caso os espaçamentos não sejam regulares, ou as seções não estejam paralelas umas às outras, será necessária uma série de correções que podem complicar a utilização do método (GUERRA, 1988).

3.4. Método dos Triângulos

O método dos triângulos segue o critério das áreas de igual influência. Neste método, a malha de amostragem é preenchida por triângulos os quais são construídos através da interligação de pontos amostrados adjacentes.

A forma como os triângulos são construídos é dependente da forma como a malha de amostragem foi construída: caso a malha seja regular, o retículo de triângulos será hexagonal com furo central, ou quadrangular com furo central, porém, se a malha de amostras for irregular, o retículo de triângulos será construído de tal maneira que os triângulos possuam a menor área possível (GUERRA, 1988).

De acordo com Yamamoto (2001), a construção dos triângulos tende a ser enviesada por interpretações subjetivas. Para evitar isso, algoritmos como a Triangulação de Delaunay podem ser utilizados, já que por serem baseados em regras específicas, sempre será gerado uma mesma malha de triângulos para um mesmo conjunto de dados amostrais.

A estimação das áreas individuais é feita através da média ponderada dos três pontos que compõem os triângulos, considerando o fator de ponderação como sendo o comprimento dos furos (MUTMANSKY e HARTMAN, 2002).

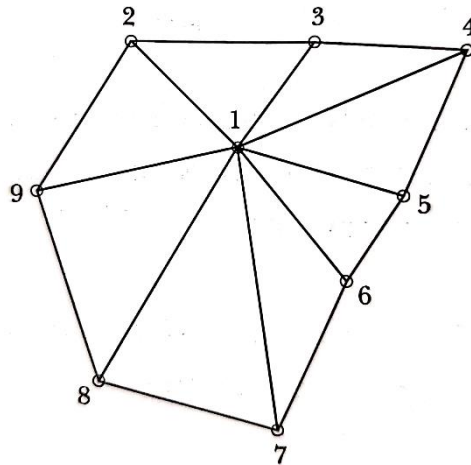


Figura 5: Método dos Triângulos. Fonte: YAMAMOTO, 2001.

O método é aconselhado para depósitos sedimentares, em que a variável de interesse muda gradativamente (POPOFF, 1966 *apud* YAMAMOTO, 2001).

A principal vantagem do método é sua forma simples de cálculo. Porém, o método apresenta baixa acurácia, como também pode gerar o enviesamento da estimativa, já que as amostras mais periféricas do retículo terão menor influência sobre a estimativa total, em comparação às amostras mais centrais. Além disso, caso a malha de amostragem seja irregular, serão necessárias várias correções (GUERRA, 1988).

3.5. Método do Inverso da enésima Potência da Distância

O método do inverso da distância é um método que utiliza uma função linear (para potência igual a um) ou não para fazer as estimativas. A principal premissa do método é que pontos amostrados a uma maior distância do ponto que se quer estimar devem exercer uma menor influência sobre o valor sendo estimado. Baseando-se nessa premissa, os valores são avaliados através da ponderação do valor dos pontos amostrados pelo inverso da enésima potência da distância (GUERRA, 1988).

Entre os métodos convencionais, ele é o método que fornece os resultados mais acurados, além de ser relativamente simples de se calcular, seja de forma manual, ou computacionalmente (GUERRA, 1988).

3.6. Método da Triangulação

O método da triangulação é baseado tanto no princípio da área de influência, como no princípio da função linear. O método se baseia na construção de uma malha de triângulos sobre a área, os quais são construídos pela interligação entre pontos amostrados. Com a malha de triângulos construída, qualquer ponto que se queira estimar dentro de um dos triângulos será estimado de acordo com a função do plano do triângulo no qual o ponto está inserido.

Uma das vantagens do método é que ele produz resultados mais contínuos, o que, normalmente, condiz mais fielmente com a geologia do depósito. Porém, com este método não é possível realizar extrapolações, o que pode ocorrer com o método do inverso da distância. Além disso, a construção dos triângulos pode se tornar bastante trabalhosa e de difícil implementação computacional (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

4. METODOLOGIA

Após ter sido feita a revisão bibliográfica dos principais métodos convencionais utilizados para a estimativa de reservas, os métodos do inverso da distância e da triangulação foram escolhidos para serem implementados no *software*.

4.1. Método do Inverso da enésima Potência da Distância

Como descrito na seção 3.5, o método do inverso da distância é um método de interpolação de variáveis de interesse, que utiliza o inverso da enésima potência da distância como o peso atribuído para cada amostra que está dentro de um raio de influência do ponto sendo estimado. A estimativa é feita utilizando a seguinte fórmula:

$$u(x) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(x)u_i}{\sum_{i=1}^N w_i(x)}, \quad \forall i$$
$$w_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p}$$

Em que:

u : valor da variável de interesse;

w : ponderação pelo inverso da distância;

x : ponto sendo estimado;

x_i : ponto amostral i .

Uma das principais desvantagens do método do inverso da distância é que, utilizando o cálculo convencional, a posição relativa das amostras não é considerada. Dessa forma, se houver uma concentração de amostragem em certa região, o resultado da estimativa será enviesado por estas amostras, pois elas terão uma maior influência sobre o resultado final.

Um dos métodos para se contornar essa desvantagem, e que também é o método utilizado no *software* implementado neste trabalho, é dividir a região em torno do ponto a ser estimado em setores, por exemplo, quadrantes ou octantes. Após a divisão da região, é determinado o número de amostras que serão consideradas em cada setor na estimativa (normalmente, as amostras consideradas são as que se encontram mais próximas do ponto sendo estimado).

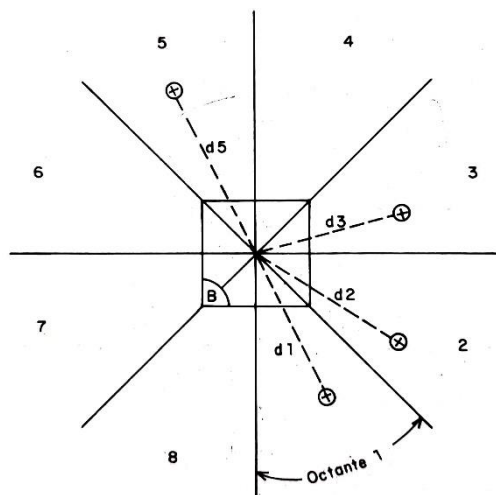


Figura 6: Método do Inverso da Distância com a área dividida em octantes. Fonte: GUERRA, 1988.

Outro problema a ser destacado é que a distância do ponto sendo estimado e a amostra considerada não pode ser próxima de zero, pois poderia causar um *overflow* (um erro na divisão). Uma maneira de contornar esse problema é utilizar uma distância constante baseada nas dimensões do bloco sendo estimado para substituir a distância próxima de zero (MUTMANSKY e HARTMAN, 2002). Ainda segundo estes autores, normalmente, o raio de influência e a potência da distância utilizada são obtidos através de um procedimento de tentativa e erro.

4.2. Método da Triangulação

Da mesma forma como o método do inverso da distância, o método da triangulação gera resultados mais contínuos, mais próximo da realidade. O princípio no qual o método se baseia é o cálculo da variável de interesse dentro da área de um plano, que é definido por três amostras. A equação básica do plano é:

$$z = ax + by + c$$

Em que:

z: valor da variável de interesse;

x: posição leste – oeste do ponto de interesse;

y: posição norte – sul do ponto de interesse.

Dado que os pontos pelo qual o plano passa possuem suas propriedades definidas, é possível obter a equação do plano através da solução do sistema abaixo:

$$ax_1 + by_1 + c = z_1$$

$$ax_2 + by_2 + c = z_2$$

$$ax_3 + by_3 + c = z_3$$

Como o método utiliza triângulos para realizar a estimativa (figura 7), o resultado fica condicionado à escolha dos triângulos, gerando resultados diferentes para malhas triangulares diferentes. Para minimizar essas diferenças, existem algoritmos utilizados para a seleção dos triângulos.

Um dos algoritmos mais utilizados para a seleção dos triângulos é a triangulação de Delaunay, que produz triângulos que são o mais próximo possível de triângulos equiláteros. O algoritmo começa com a construção dos polígonos de influência de cada amostra e, então, através dos polígonos, é feita a verificação para encontrar todos os grupos de 3 polígonos de influência que compartilham um mesmo vértice, os quais constituirão os triângulos de Delaunay, a partir de seus respectivos pontos amostrais.

A estimativa pela triangulação também pode ser calculada a partir da geometria formada entre os três pontos amostrados e o ponto a ser estimado, através de uma combinação linear ponderada utilizando a seguinte equação:

$$v_o = \frac{A_{OJK} \times v_I + A_{OIK} \times v_J + A_{OIJ} \times v_K}{A_{IJK}}$$

Em que:

v : valor da variável de interesse conforme figura 7.

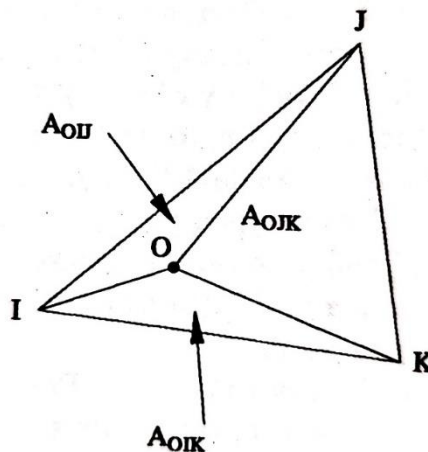


Figura 7: Método da Triangulação. Fonte: ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989.

Uma das maiores desvantagens do método da triangulação é que não é possível realizar extrapolações, pois as únicas regiões em que é possível fazer a estimativa se encontra dentro da malha de triângulos.

4.3. JavaScript

JavaScript é uma linguagem de programação que foi desenvolvida por Brendan Eich. Introduzida em 1995 pela Netscape como uma forma de adicionar programas a navegadores, o JavaScript hoje é adotado por todos os grandes navegadores existentes. Além disso, JavaScript evoluiu tanto nos últimos anos, que passou a ser utilizados em outras plataformas além dos navegadores, sendo a mais notável dessas plataformas o projeto Node.js (HAVERBEKE, 2018), o qual foi extensivamente utilizado no *software* desenvolvido neste trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O *software* desenvolvido neste trabalho será apresentado com a finalidade de auxiliar os usuários na sua utilização.

5.1. Tela Inicial


A tela do *software* é dividida em duas partes: uma com as opções do método utilizado na estimativa e, outra, com o resultado encontrado da avaliação realizada, conforme mostra a figura 8.

The screenshot shows a software interface with a dark blue header bar containing the text 'TCC' and a menu with 'File', 'Edit', 'View', 'Window', and 'Help'. The main area is split into two vertical panels. The left panel, titled 'Opções', has a pink background and contains several input fields: two for file selection ('Seleccione o arquivo de área' and 'Seleccione o arquivo de furos'), 'Número de colunas' (50), 'Número de linhas' (50), 'Algoritmo' (Inverso da Distância), 'Número de setores' (4), 'Raio' (100), and 'Potência' (2). A 'Calcular' button is at the bottom. The right panel, titled 'Resultado', is white and contains a progress bar at the bottom right with a red fill and the text 'Estimativa global: %'.

Figura 8: Tela inicial do software. Fonte: autor.

5.2. Interface amigável

O usuário possui diversas opções para realizar a estimativa, porém dois arquivos de entrada de dados são obrigatórios: Selecione o arquivo de área e Selecione o arquivo de furos (figura 9).



The image shows a user interface titled "Opções" (Options) with a pink background. It contains several input fields and a button:

- Two large text input fields: "Selecione o arquivo de área" and "Selecione o arquivo de furos". An arrow points to these fields with the text "Input do usuário para o arquivo da área e o arquivo de amostras."
- Input field: "Número de colunas: 50"
- Input field: "Número de linhas: 50"
- Dropdown menu: "Algoritmo: Inverso da Distância" with a downward arrow.
- Dropdown menu: "Número de setores: 4" with a downward arrow.
- Input field: "Raio: 100"
- Input field: "Potência: 2"
- Button: "Calcular"

Figura 9: Input do usuário. Fonte autor.

Os arquivos de entrada devem possuir a extensão `.csv` para que o *software* desenvolvido possa fazer a leitura adequada, e devem ser criados utilizando outros *softwares* (como o *Excel*) e salvos no formato exigido. O arquivo da área deve possuir as coordenadas dos vértices que constituem a área a ser avaliada, as quais devem ser inseridas no arquivo considerando a posição dos pontos em sequência horária ou anti-horária. Além disso, os pontos devem possuir dois atributos, 'x' e 'y', como mostrado na figura 10.

```
x,y
0,200
50,200
50,300
130,300
130,400
200,400
200,100
130,100
130,0
70,0
70,70
0,70
```

Figura 10: Exemplo de um arquivo de área. Fonte: autor.

```
x,y,value
30,30,50
60,60,60
120,120,55
100,70,40
150,150,70
60,150,25
150,40,10
180,180,40
```

Figura 11: Exemplo de um arquivo de amostras. Fonte: autor.

Além dos atributos 'x' e 'y', o arquivo dos pontos amostrados deve possuir o atributo 'value', com o valor da variável de interesse para cada ponto (figura 11).

5.3. Exibição dos resultados

O resultado será exibido na parte direita da tela tanto graficamente, quanto quantitativamente (figura 12).

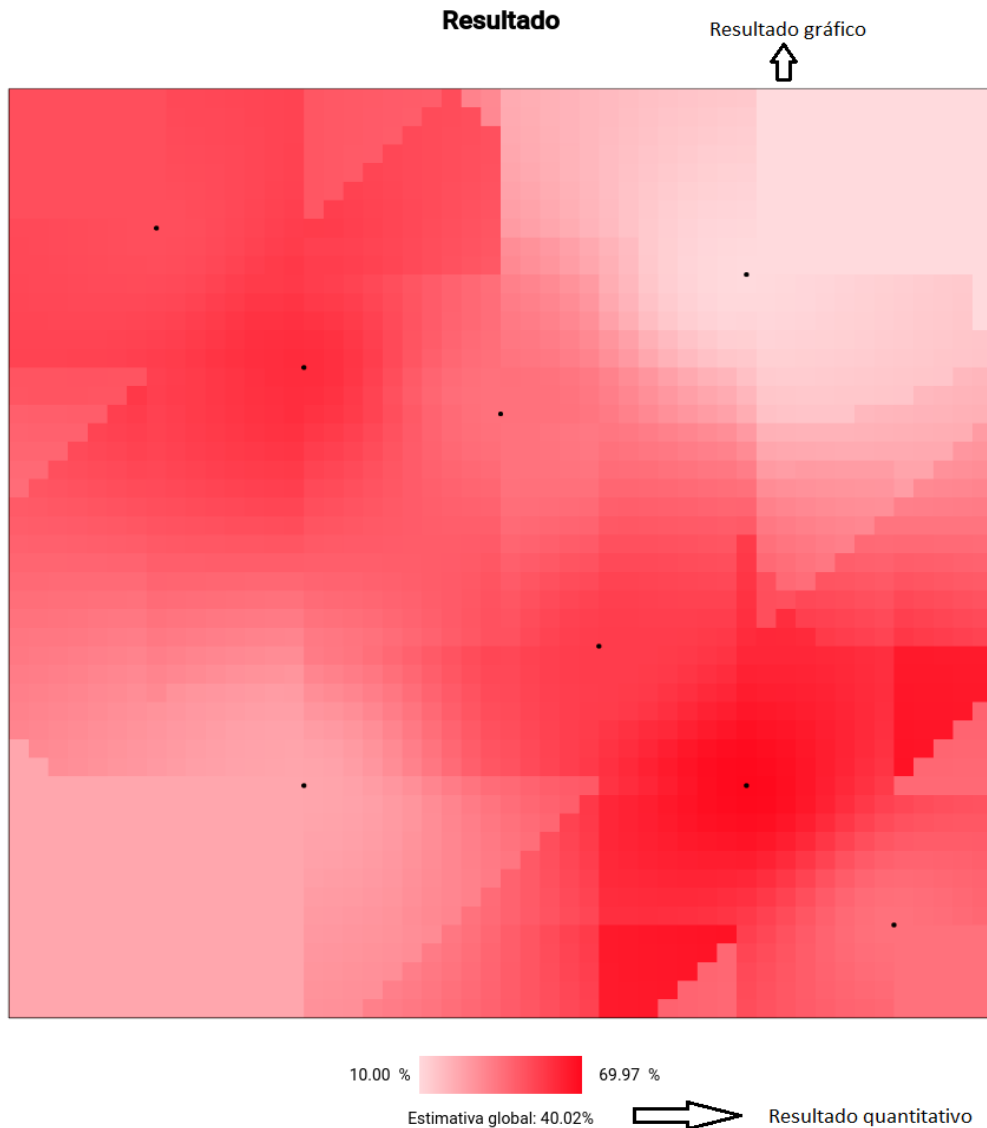


Figura 12: Resultado da estimativa através do método do inverso da distância. Fonte: autor.

Além de exibir o resultado nas formas numérica e gráfica, o *software* permite ao usuário observar o valor de cada bloco da área estimada ao clicar sobre eles, como pode ser observado na figura 13.



Figura 13: Informação do bloco ao clicar. Fonte: autor.

5.4. Área da Estimativa

Com o *software* desenvolvido, é possível avaliar a reserva de áreas regulares (como retângulos) ou não (figuras 14 e 15).

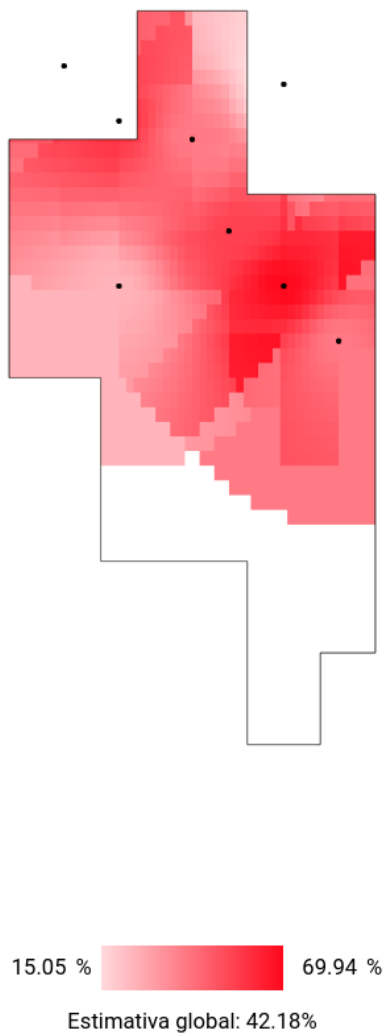


Figura 14: Resultado para uma área irregular. Número de colunas: 50; Número de linhas: 50; Algoritmo: Inverso da Distância; Número de setores: 4; Raio: 100; Potência: 2. Fonte: autor.

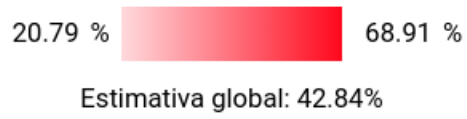
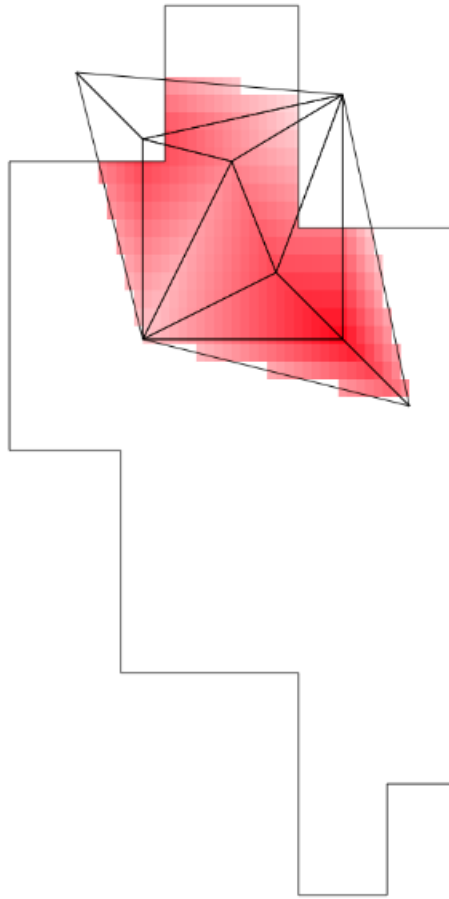


Figura 15: Resultado para uma área irregular. Número de colunas: 50; Número de linhas: 50; Algoritmo: Triangulação. Fonte: autor.

5.5. Inverso da Distância

Utilizando o método do inverso da distância, o usuário pode modificar o número de setores, o raio de influência e a potência à qual a distância será elevada.

O número de setores (seção 4.1) é utilizado para evitar que o resultado seja enviesado por aglomerações de amostras em uma região. O *software* permite a escolha de 4 ou 8 setores, nos quais a amostra mais próxima do ponto sendo estimado será selecionada. As figuras 16 e 17 ilustram a influência do número de setores.

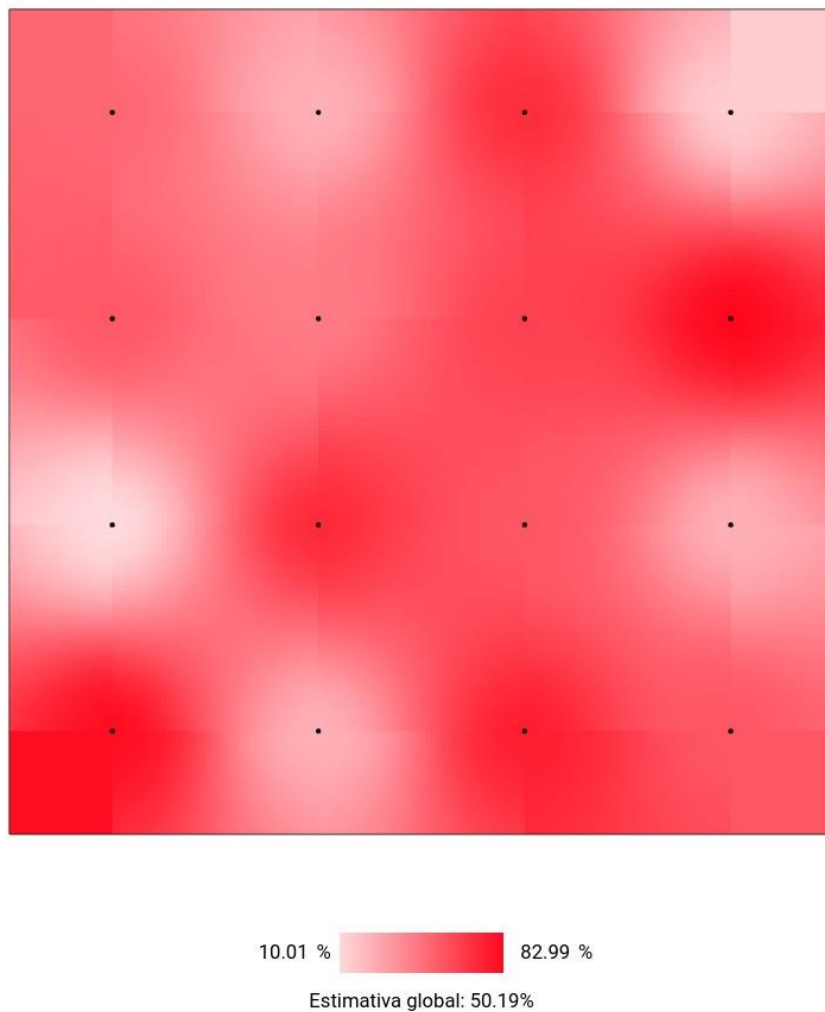


Figura 16: Resultado obtido utilizando 4 setores. Número de colunas: 200; Número de linhas: 200; Algoritmo: Inverso da Distância; Raio: 100; Potência: 2. Fonte: autor

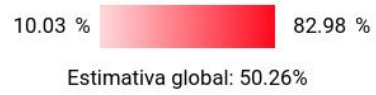
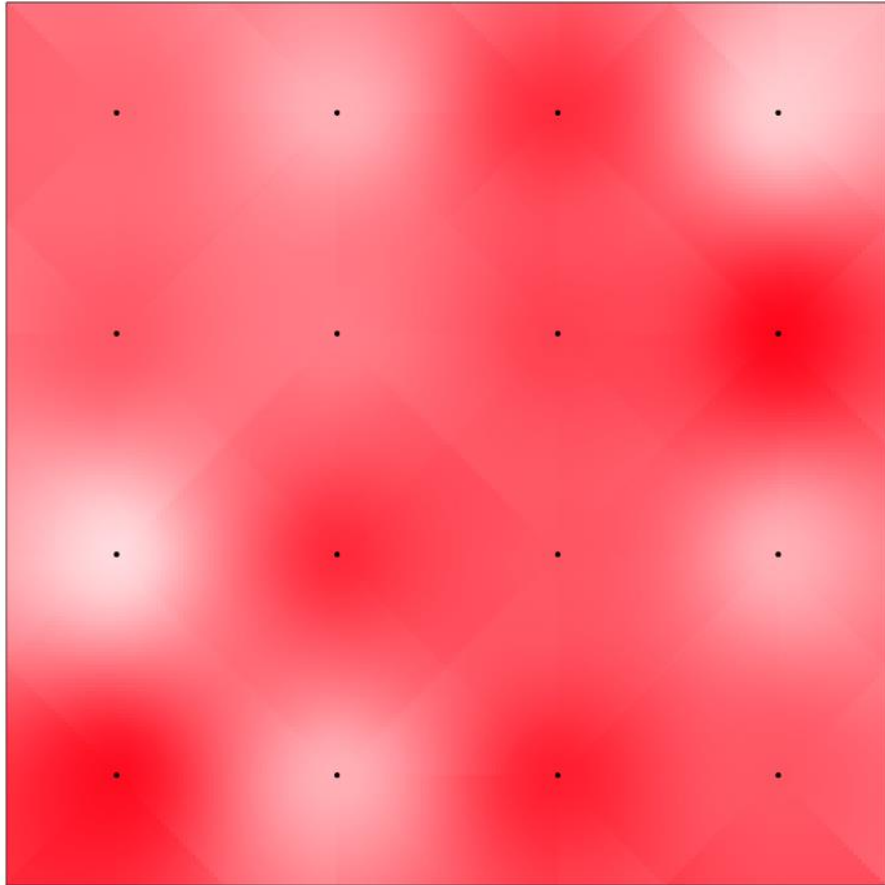


Figura 17: Resultado obtido utilizando 8 setores. Número de colunas: 200; Número de linhas: 200; Algoritmo: Inverso da Distância; Raio: 100; Potência: 2. Fonte: autor.

Já o raio de influência é utilizado para verificar se uma determinada amostra será considerada ou não para a estimativa do teor de um ponto. As figuras 18 e 19 exemplificam o efeito que a mudança do raio de influência gera.

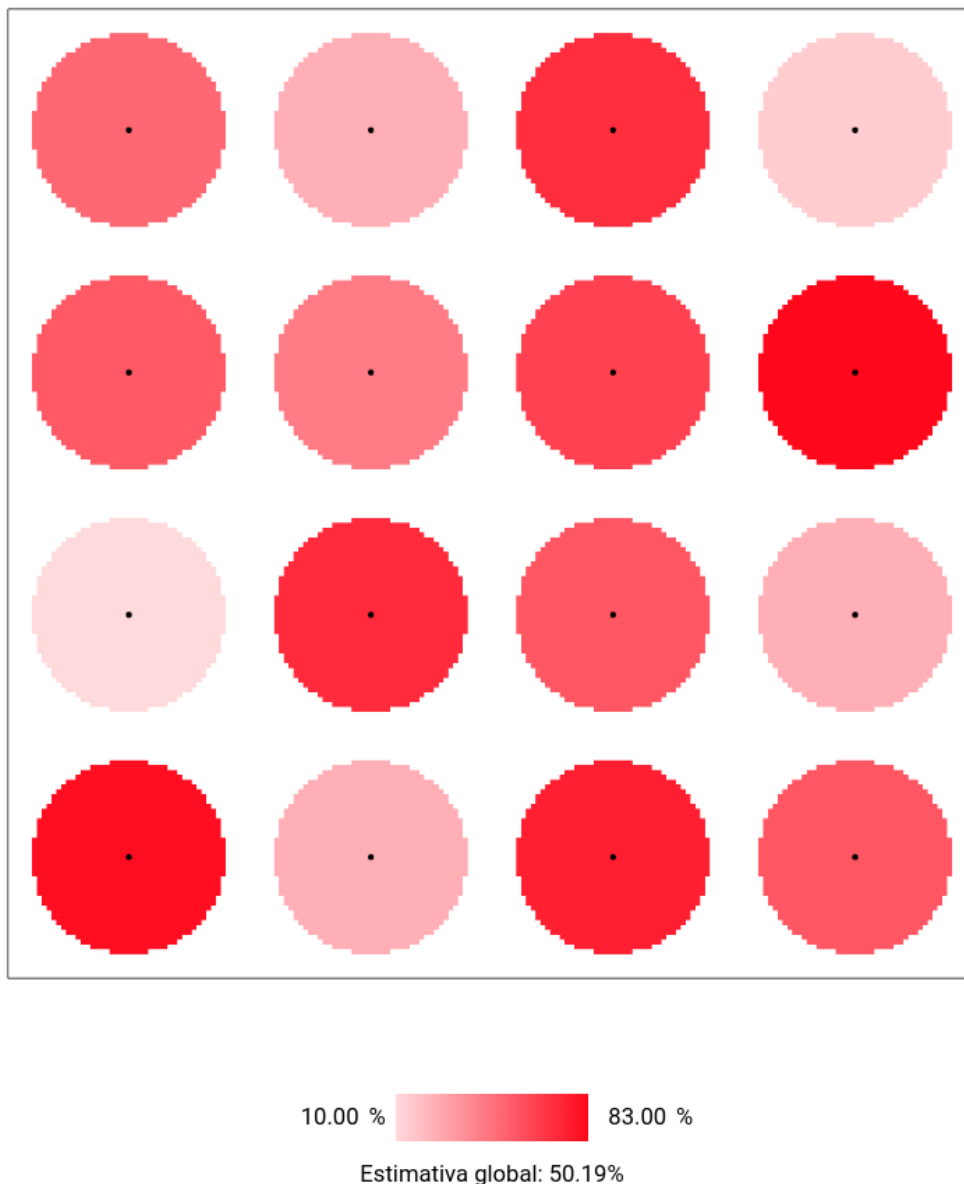
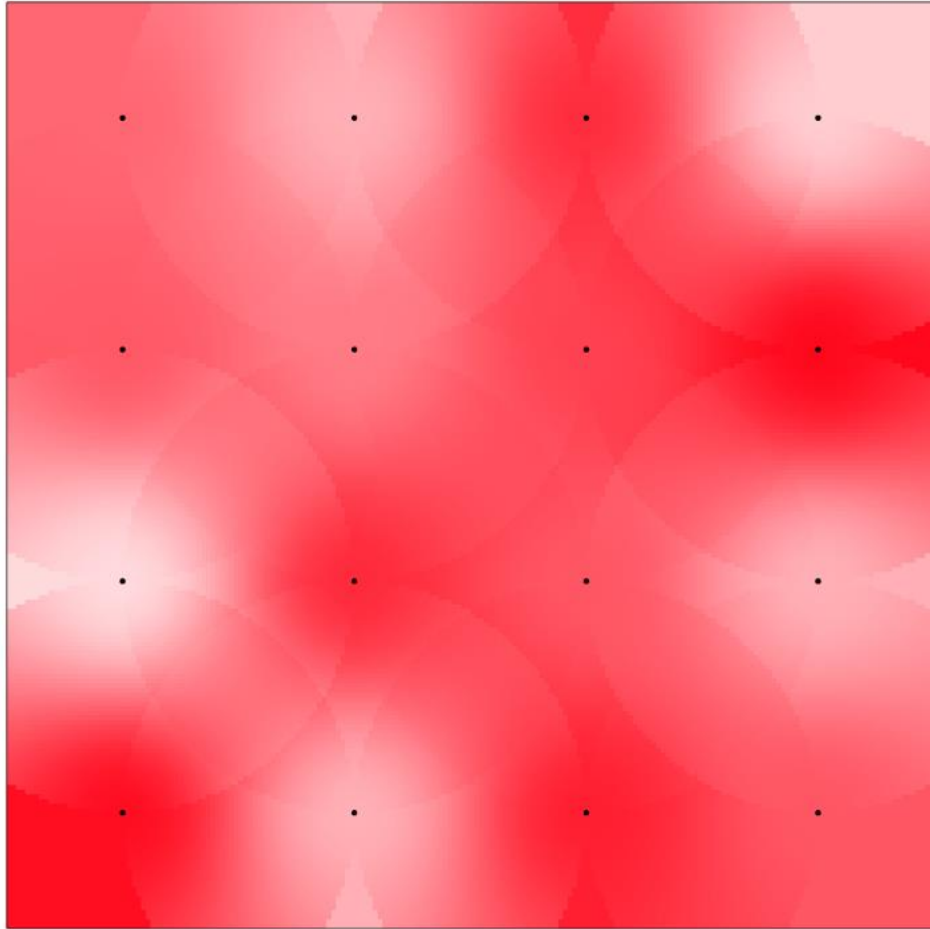


Figura 18: Resultado obtido utilizando um raio de 20. Número de colunas: 200; Número de linhas: 200; Algoritmo: Inverso da Distância; Setores: 8; Potência: 2. Fonte: autor.



10.00 % 83.00 %
Estimativa global: 50.19%

Figura 19: Resultado obtido utilizando um raio de 50. Número de colunas: 200; Número de linhas: 200; Algoritmo: Inverso da Distância; Setores: 8; Potência: 2. Fonte: autor.

Por fim, a potência da distância determinará o peso que as amostras possuem sobre a estimativa do teor de um ponto. É importante notar que o uso de potências mais elevadas gera resultado muito próximo do que seria obtido com o uso do método dos polígonos (as figuras 20 e 21 ilustram isso).

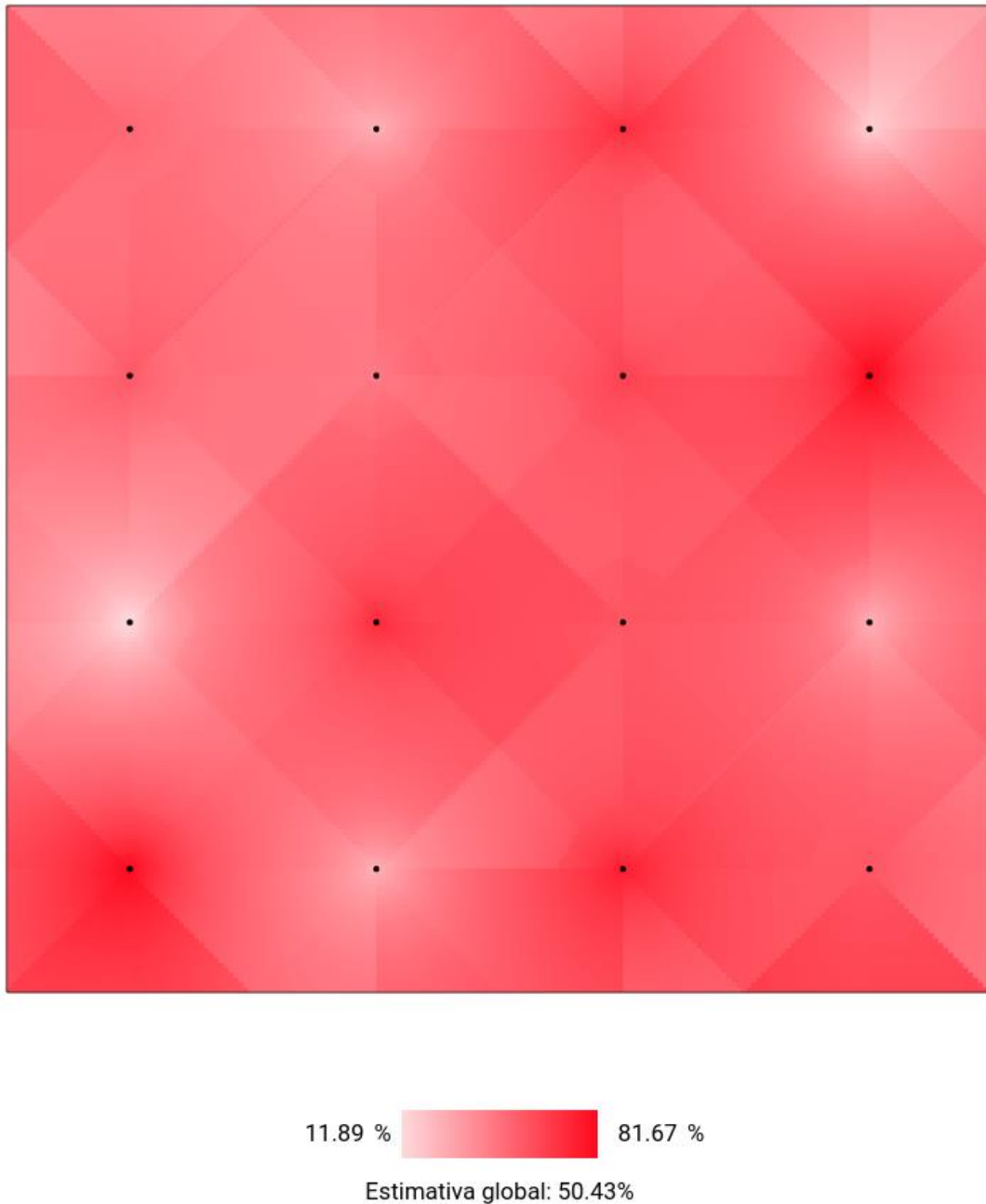
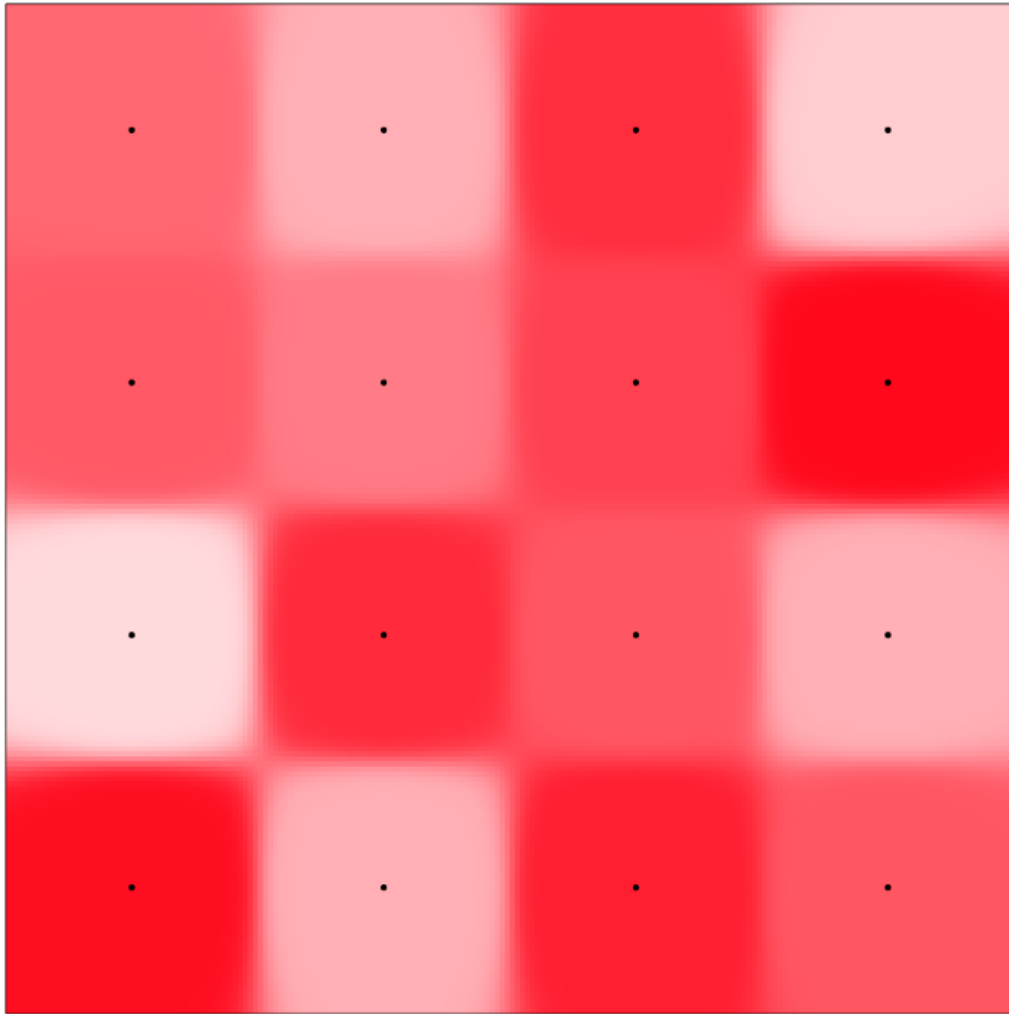


Figura 20: Resultado obtido utilizando potência 1. Número de colunas: 200; Número de linhas: 200; Algoritmo: Inverso da Distância; Setores: 8; Raio: 100. Fonte: autor.



10.00 %  83.00 %

Estimativa global: 50.19%

Figura 21: Resultado obtido utilizando potência 10. Número de colunas: 200; Número de linhas: 200; Algoritmo: Inverso da Distância; Setores: 8; Raio: 100. Fonte: autor.

5.6. Triangulação

O uso do método da triangulação permite somente modificar a malha. Apesar de este método utilizar triângulos como base para a estimativa, não é necessário que o usuário construa os triângulos manualmente, pois eles são definidos automaticamente pelo *software* através da Triangulação de Delaunay (figuras 22 e 23).

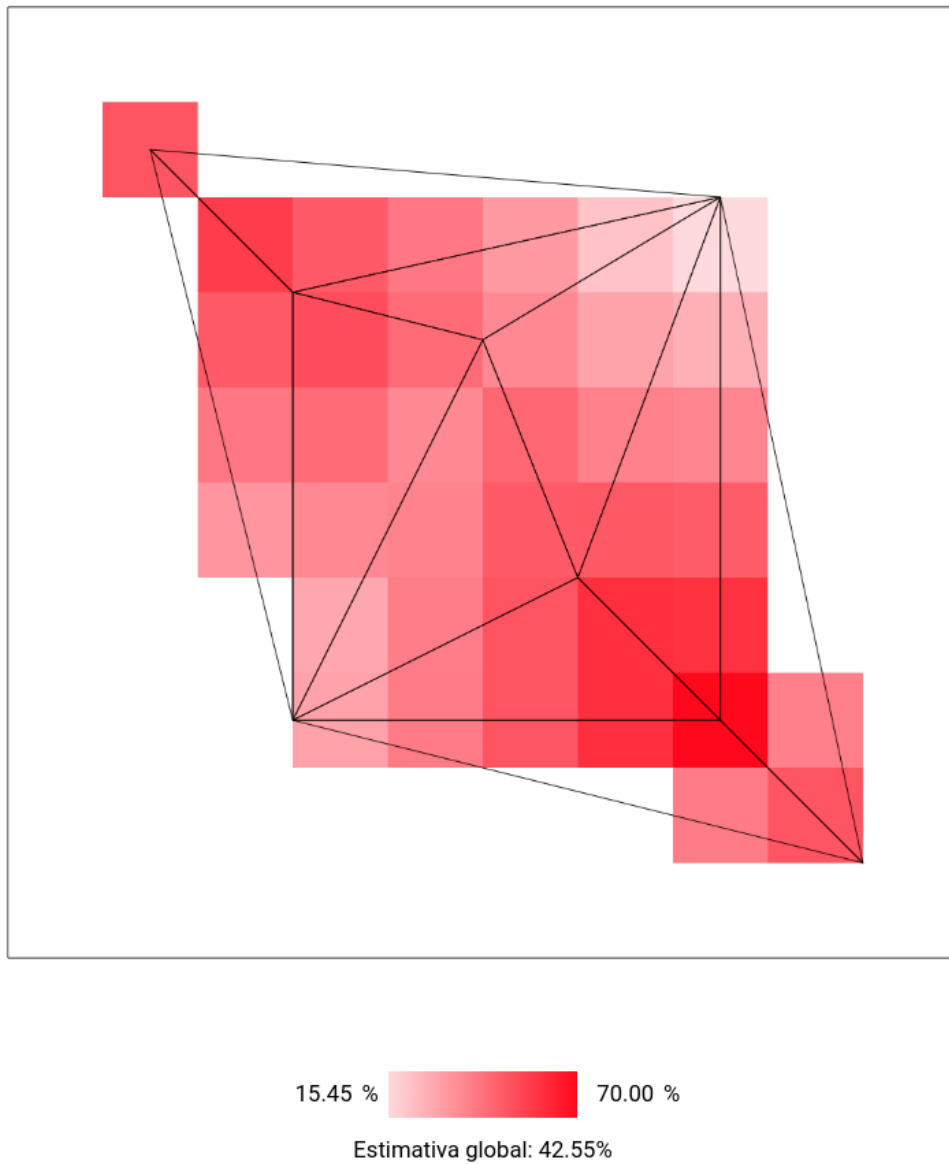
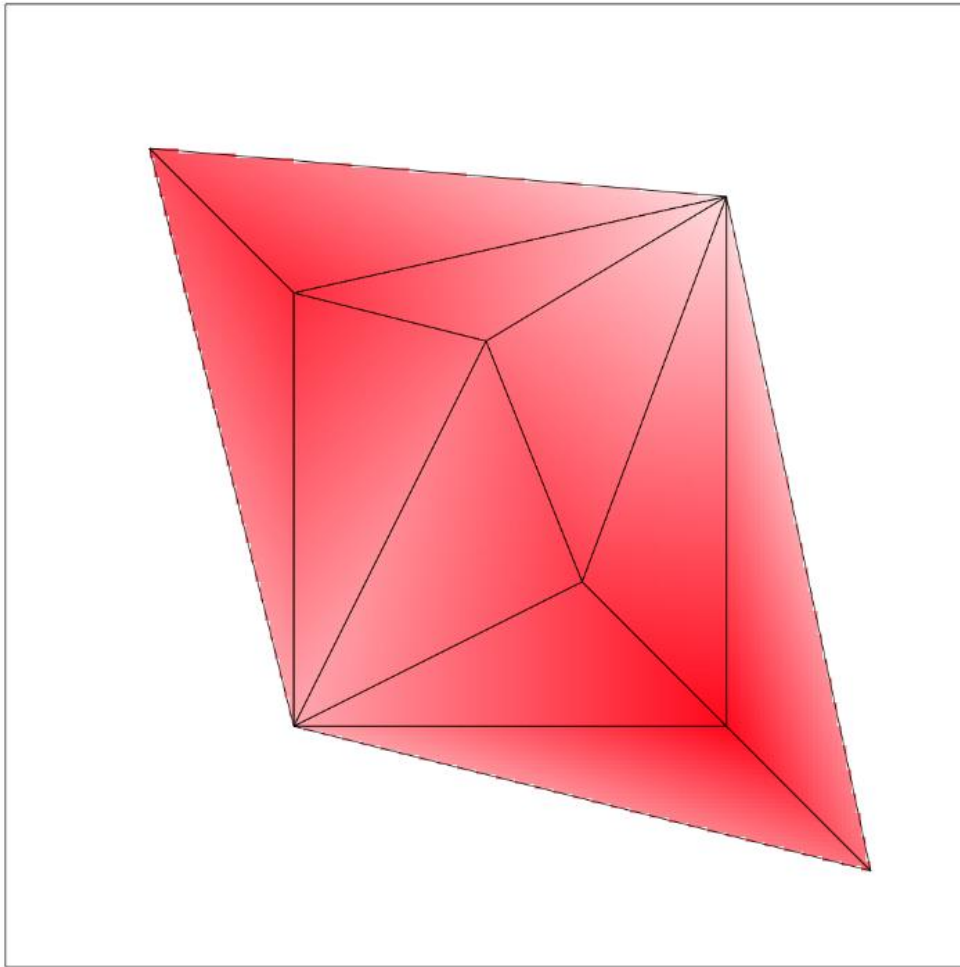


Figura 22: Resultado obtido com uma malha 10 x 10. Algoritmo: Triangulação. Fonte: autor.



10.39 %  69.75 %

Estimativa global: 41.85%

Figura 23: Resultado obtido com uma malha 200 x 200. Algoritmo: Triangulação. Fonte: autor.

6. CONCLUSÕES

O *software* desenvolvido neste trabalho utilizou a linguagem de programação JavaScript e bibliotecas auxiliares. Os algoritmos relacionados aos métodos convencionais do inverso da enésima potência da distância e da triangulação foram implementados e os resultados das análises de cenários-teste foram discutidos.

O aplicativo permite que o usuário interaja com o mesmo através de uma interface gráfica amigável, a partir da qual é possível selecionar opções que modificam os parâmetros para a realização das estimativas. Estas opções são exibidas ao usuário de acordo com o algoritmo selecionado.

O *software* exibe o resultado graficamente através de um mapa de cores o qual representa a distribuição dos teores na área de pesquisa. Para interpretar o mapa, uma escala de cores é gerada abaixo da área estudada, com o menor e o maior valor estimados como extremos da escala. Além disso, logo abaixo da escala de cores, é apresentado o valor da estimativa global. Por fim, é permitido ao usuário explorar os dados avaliados de cada bloco através de um clique sobre ele, sendo mostrada a posição do centro do bloco e o valor da estimativa.

O aplicativo desenvolvido também possui um caráter didático-pedagógico, pois representa de forma gráfica e numérica as principais características dos métodos cujos algoritmos foram implementados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNELS, A. E. **Mineral deposit evaluation: a practical approach**. Chapman & Hall, London, 1991, 436 p.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística Operacional**. DNPM, Brasília, 1988, 145 p.

HAVERBEKE, M. **Eloquent JavaScript, 3rd Edition: A Modern Introduction to Programming**. No Starch Press, 2018, 472 p.

HARTMAN, H. L. e MUTMANSKY, J. M. **Introductory mining engineering**. 2nd edition, John Wiley e Sons, 2002, 592 p.

ISAAKS, E. H. e SRISVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. Oxford University Press, New York, 1989, 561 p.

MARANHAO, R. J. L. **Introdução a pesquisa mineral**. BNB, Fortaleza, 1982, 680 p.

THOMAS, L. J. **An introduction to mining: exploration, feasibility, extraction, rock mechanics**. Methuen of Australia, Australia, 1985, 471 p.

YAMAMOTO, J. K. **Avaliação e classificação de reservas minerais**. Edusp: FAPESP, São Paulo, 2001, 226 p.