

Aprimoramentos em modelagem geológica implícita com funções distância assinaladas

Me. Roberto Mentzingen Rolo
Orientador: Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa, PhD

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

17 de junho de 2019

Estrutura

Introdução

- Interpretação e modelagem geológica
- Método tradicional
- Incerteza do modelo geológico
- Métodos matemáticos
- Métodos implícitos

Modelagem geológica implícita com funções distância assinaladas

- O banco de dados
- Codificando as amostras em indicadores
- Calculando a função distância assinalada
- Variografia das distâncias assinaladas
- Interpolação das distâncias assinaladas
- Visualização do modelo geológico
- Adaptação para múltiplas categorias simultaneamente

Referências bibliográficas

Construir modelos numéricos de longo, médio e curto prazo para avaliação de recursos/reservas e planejamento de mina exige quatro grandes atividades:

1. Coleta e gerenciamento de dados;
2. Interpretação e modelagem geológica;
3. Atribuição de teores;
4. Avaliação e gerenciamento da incerteza geológica e de teores.

Interpretação e modelagem geológica

1. Identificar diferentes domínios;
2. Definir os limites de cada função aleatória estacionária.

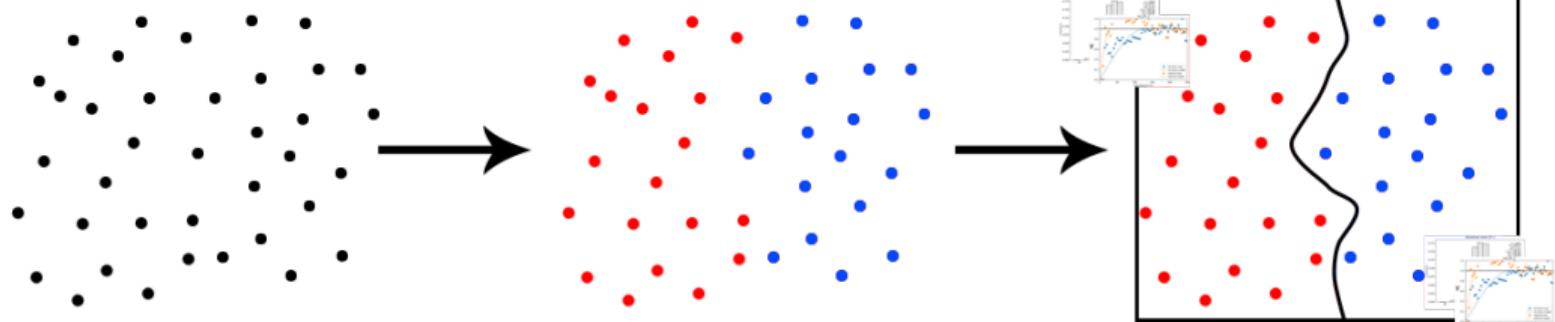


Figura 1: Interpretação e modelagem geológica.

Metodologia tradicional

A abordagem tradicional para a criação de modelos geológicos tridimensionais é através da triangulação de polilinhas.

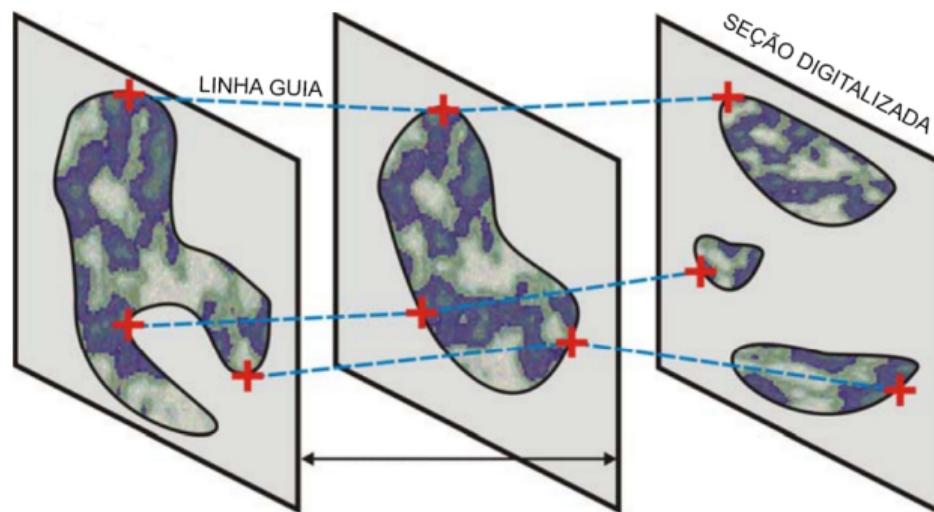


Figura 2: Esquema do método tradicional.

Desvantagens do método tradicional

- ▶ Tedioso e demorado;
- ▶ Exige um profissional especializado e experiente;
- ▶ Geometria dos corpos precisa ser simplificada;
- ▶ Subjetivo;
- ▶ Não replicável;
- ▶ Inflexível;
- ▶ Não avalia a incerteza.

Incerteza do modelo geológico

Em muitos casos, a incerteza do modelo geológico pode ser uma fonte de incerteza crucial e deve ser avaliada.

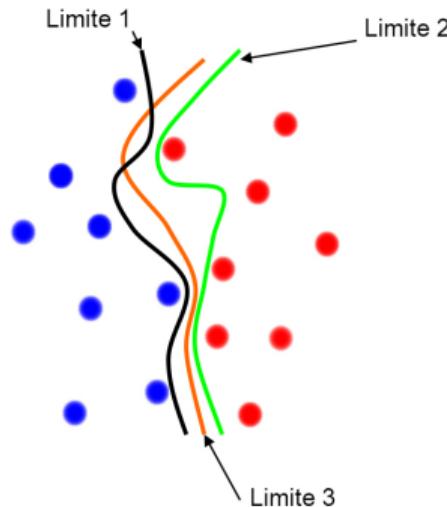


Figura 3: Incerteza do modelo geológico.

Métodos determinísticos

- ▶ Vizinho mais próximo;
- ▶ Krigagem dos indicadores.

Métodos estocásticos

- ▶ Simulação sequencial dos indicadores;
- ▶ Simulação gaussiana/plurigaussiana truncada;
- ▶ Simulação multi ponto;
- ▶ Simulação baseada em objetos;

Métodos implícitos

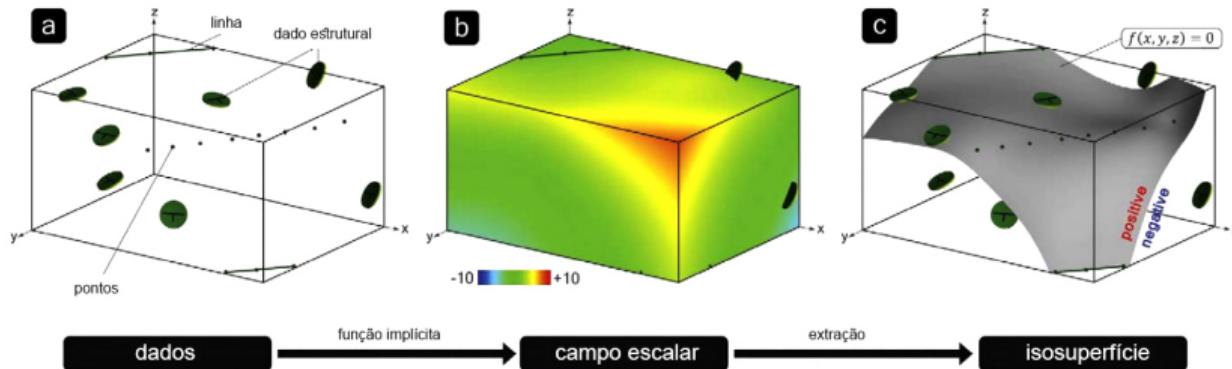
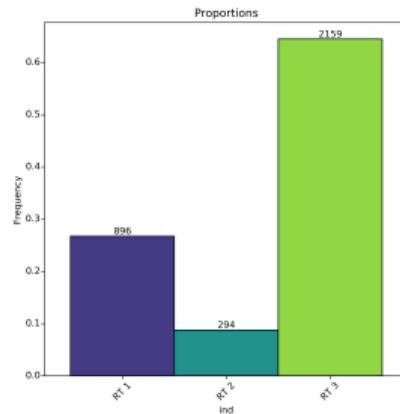


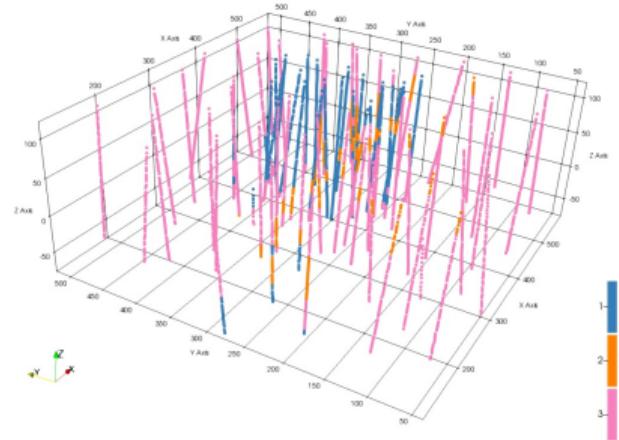
Figura 4: Esquema dos métodos implícitos.

O banco de dados

72 furos totalizando 3349 amostras distribuídas entre 3 diferentes categorias.



(a) Proporções.



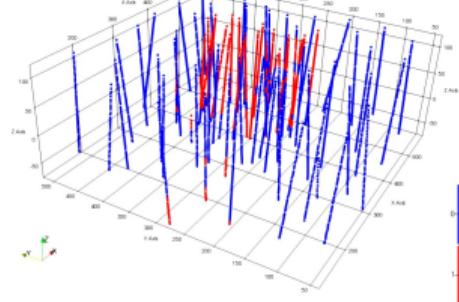
(b) Vista das amostras.

Figura 5: O banco de dados.

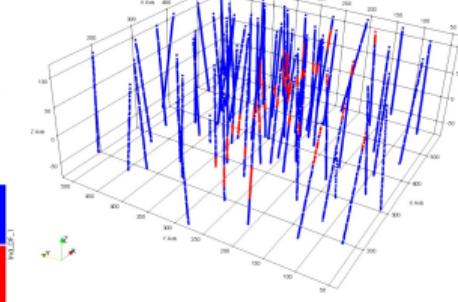
Codificando as amostras em indicadores

$$i_k(u_\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{se } z(u_\alpha) \text{ se pertence ao domínio } k \\ 0, & \text{se } z(u_\alpha) \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

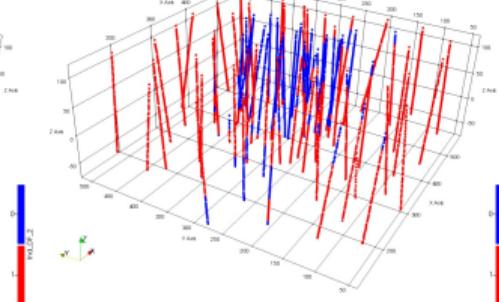
Figura 6: Amostras codificadas em indicadores para cada uma das três categorias do banco de dados.



(a) Categoria 1



(b) Categoria 2



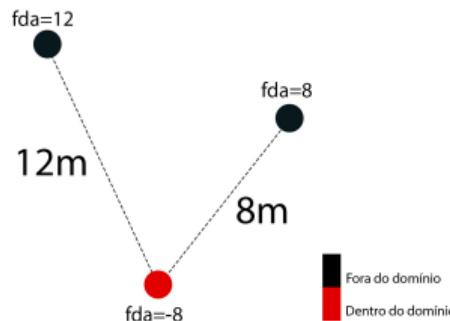
(c) Categoria 3

Calculando a função distância assinalada

$$d_k(u_\alpha) = \begin{cases} - \| u_\alpha - u_\beta \|, & \text{se } u_\alpha \text{ pertence ao domínio} \\ + \| u_\alpha - u_\beta \|, & \text{se } u_\alpha \text{ não pertence ao domínio} \end{cases} \quad (2)$$

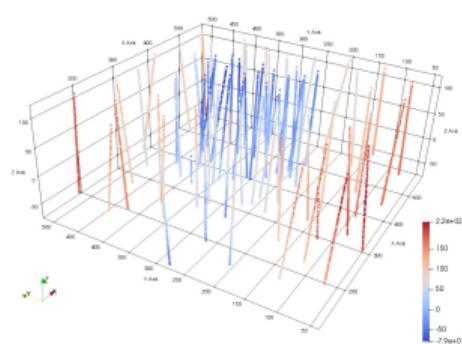
O local u_β corresponde à amostra mais próxima codificada com um indicador diferente de u_α .

Figura 7: Ilustração esquemática mostrando o cálculo das distâncias assinaladas.

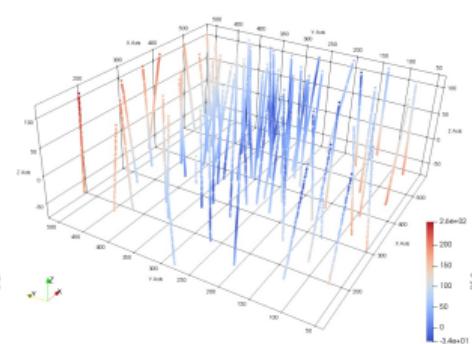


Calculando a função distância assinalada

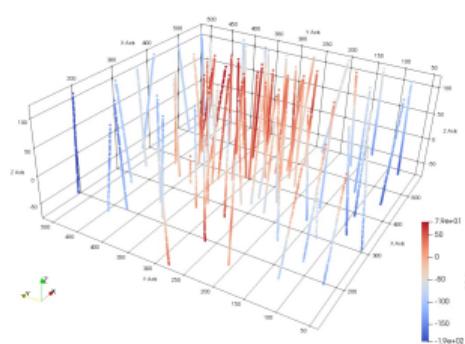
Figura 8: Distâncias assinaladas calculadas para cada uma das categorias do banco de dados.



(a) Categoria 1



(b) Categoria 2



(c) Categoria 3

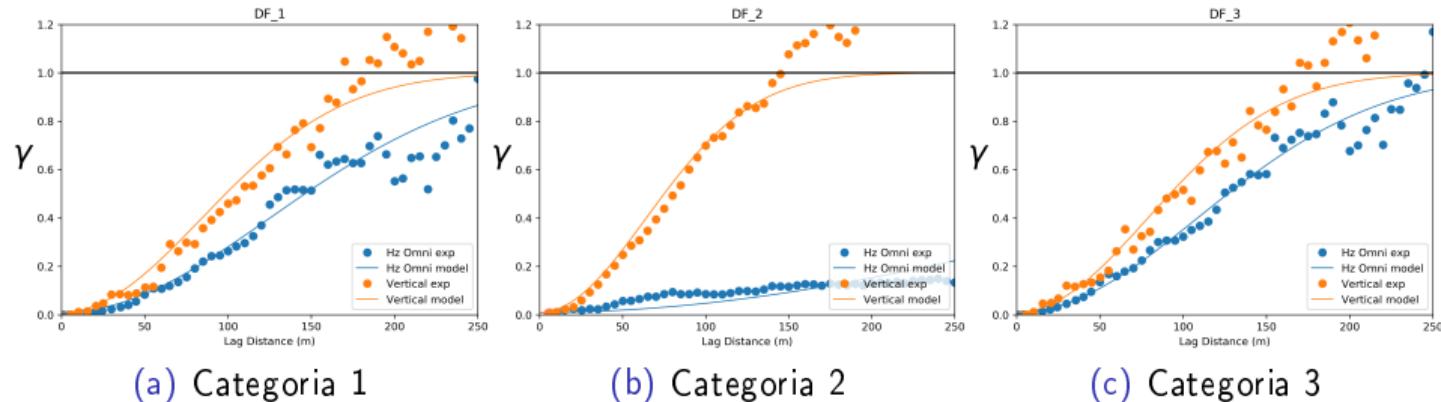
Variografia das distâncias assinaladas

Distâncias assinaladas não são estacionárias, o variograma não se estabiliza em um patamar. Além disso, o caráter extremamente contínuo das distâncias torna a identificação analítica das direções principais um processo embarracoso.

- ▶ Treinar o variograma usando validação cruzada;
- ▶ Tentar modelar interativamente os variogramas experimentais;
- ▶ Calcular e modelar os variogramas para as propriedades de indicadores e transformá-los em um equivalente gaussiano para as distâncias assinaladas;
- ▶ inferir um modelo de covariância plausível visualmente a partir das amostras ou de mapas delineados a mão.

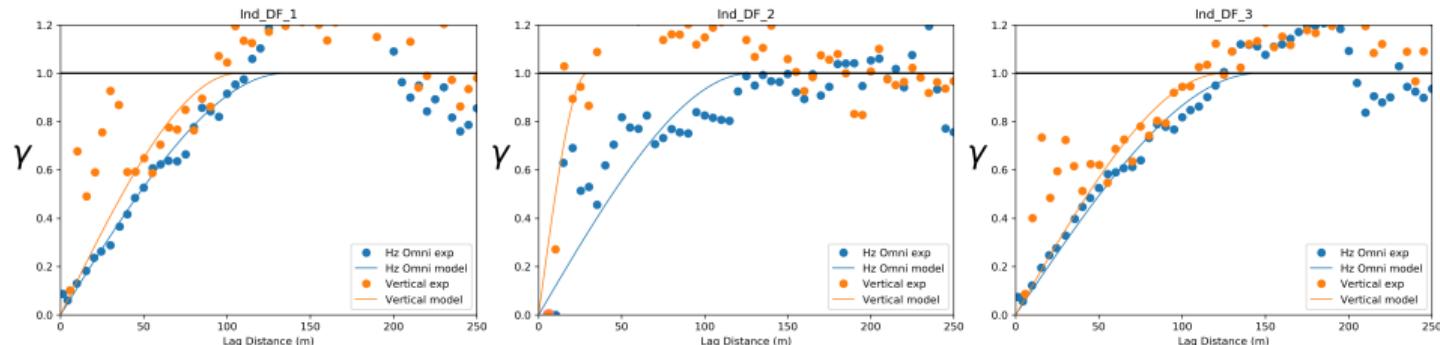
Variogramas das distâncias assinaladas

Figura 9: Variogramas experimentais das distâncias assinaladas e modelos para cada uma das categorias do banco de dados.



Variogramas dos indicadores

Figura 10: Variogramas experimentais dos indicadores e modelos para cada uma das categorias do banco de dados.



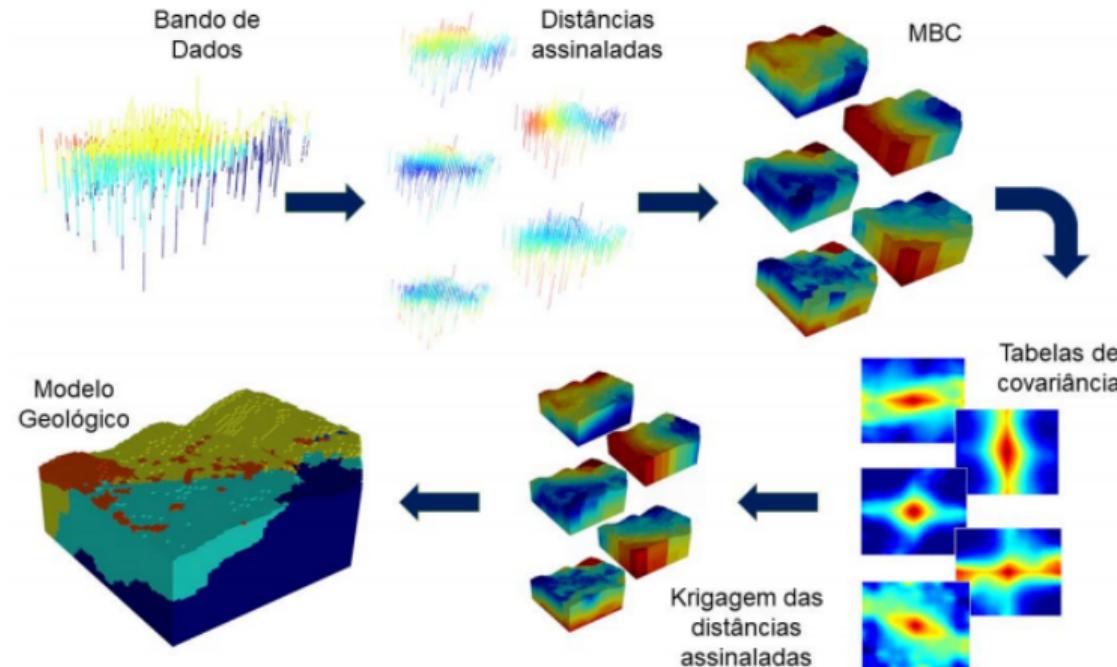
(a) Categoria 1

(b) Categoria 2

(c) Categoria 3

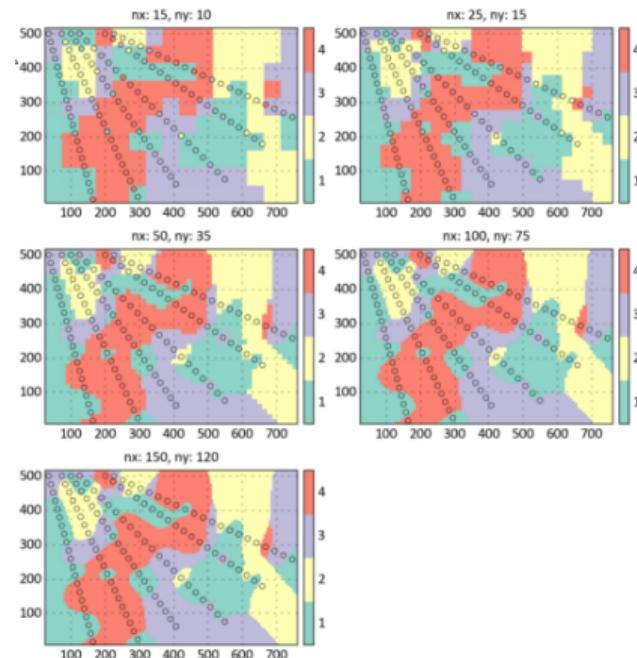
Alternativa ao cálculo e modelagem dos variogramas

Figura 11: Fluxograma da modelagem geológica implícita usando tabelas de covariância.



Resolução do grid

Figura 12: Efeito da resolução do *grid* na reprodução de estruturas geológicas.



Grids criados

	Grosso	Fino
nx	49	97
ny	49	98
nz	51	102
sx	10m	5m
sy	10m	5m
sz	4m	2m
num	122451	969612

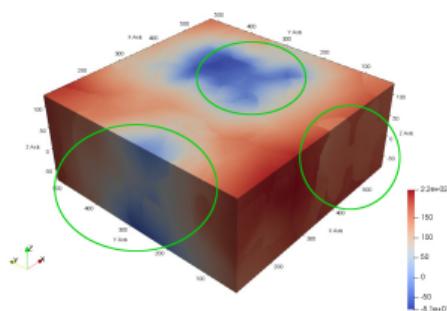
Tabela 1: Parâmetros dos *grids* de definição dos modelos geológicos implícitos.

Métodos de interpolação

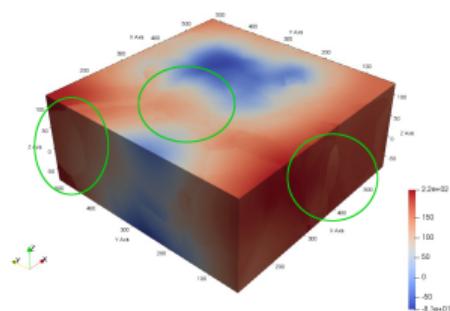
- ▶ Hosseini and Deutsch (2007) utilizaram inverso da distância;
- ▶ Silva (2015) utilizou krigagem ordinária global;
- ▶ Rolo (2017) utilizou krigagem ordinária;
- ▶ Silva and Deutsch (2015) aplicaram *dual kriging*;
- ▶ Boisvert (2013) gerou modelos implícitos através de distâncias assinaladas com anisotropia variável local (*Locally varying anisotropy kriging - LVA*);
- ▶ Manchuck and Deutsch (2018) propuseram a utilização de mínimos quadrados móveis para incorporar interpretação manual e avaliar incerteza.

Métodos de interpolação

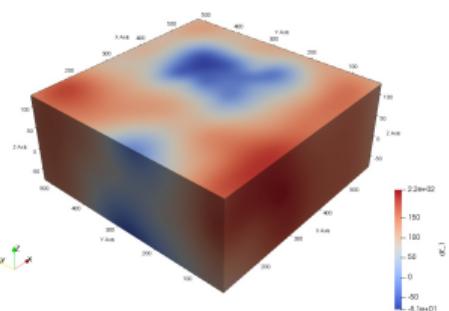
Figura 13: Interpolação das distâncias calculadas por diferentes métodos.



(a) OK com 40 amostras



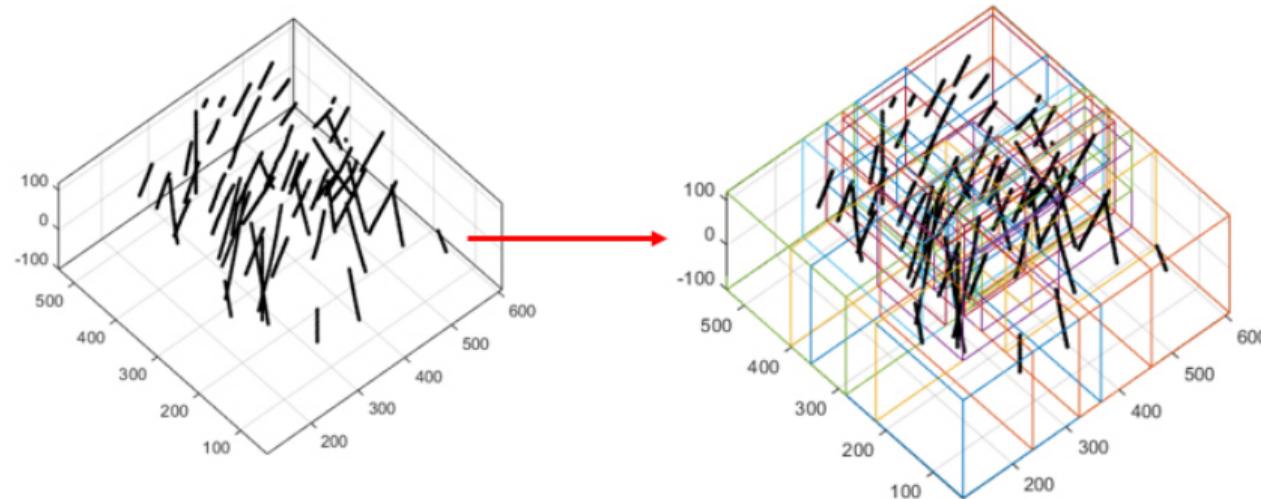
(b) OK com 100 amostras



(c) RBF global

Decomposição do domínio

Figura 14: Particionamento.



Benchmark

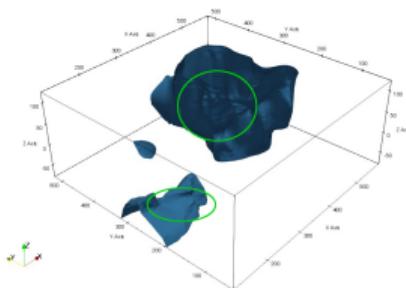
Todos os algoritmos utilizados são da biblioteca GSlib e foram executados em um core i7 7700HQ @ 2.8 GHz com 16 Gb de RAM.

Método	Tempo grid grosso	Tempo grid fino	Classificação errônea grosso	Classificação errônea fino
krigagem global isotrópica	28min		121	
krigagem global anisotrópica	30min 34s		282	
krigagem ordinária anisotrópica (40)	1min 3s	38min	137	135
krigagem ordinária anisotrópica (100)		45min 51s		181
RBF isotrópico	21.5s		57	
RBF anisotrópico		1min 22s		38
Particionado RBF anisotrópico		1min 2s		39
Particionado RBF artefatos	16.5s			29
LVA OK			8	
LVA RBF				8
Krigagem dos indicadores		33min 27s		2

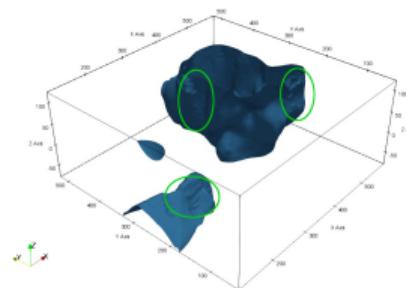
Tabela 2: *Benchmark* dos diferentes métodos de interpolação.

Visualização do modelo geológico

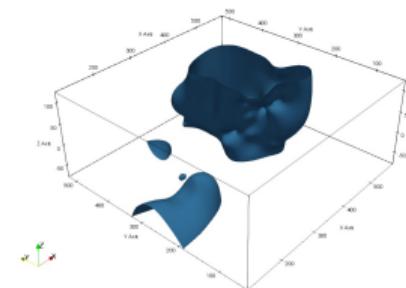
Figura 15: Iso superfícies para a categoria 1 extraída dos diferentes modelos implícitos.



(a) OK com 40 amostras



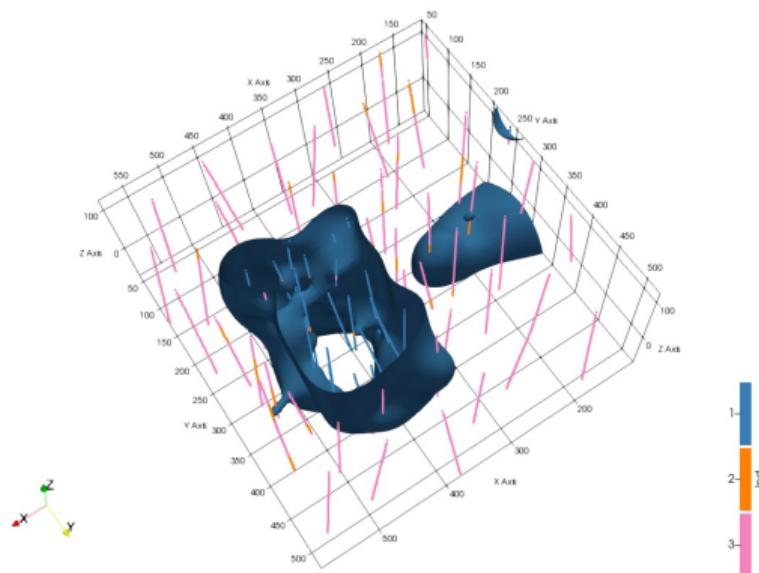
(b) OK com 100 amostras



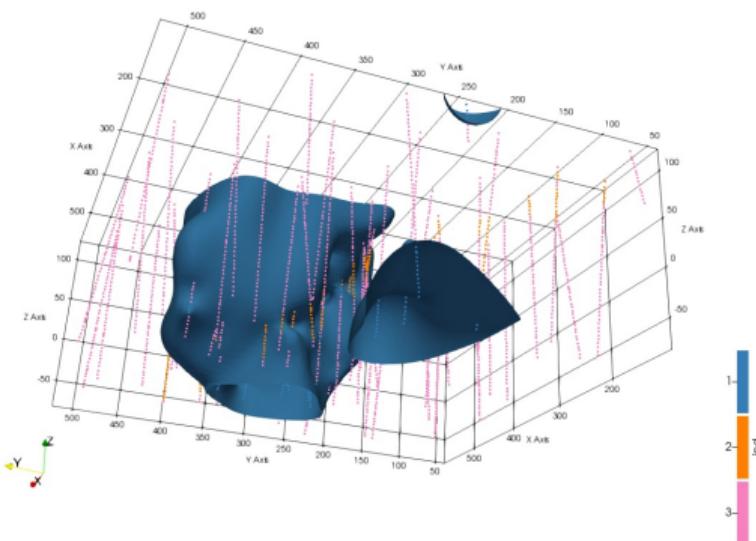
(c) RBF global

Visualização do modelo geológico

Figura 16: Iso superfície extraída do modelo implícito interpolado por RBF para a categoria 1.



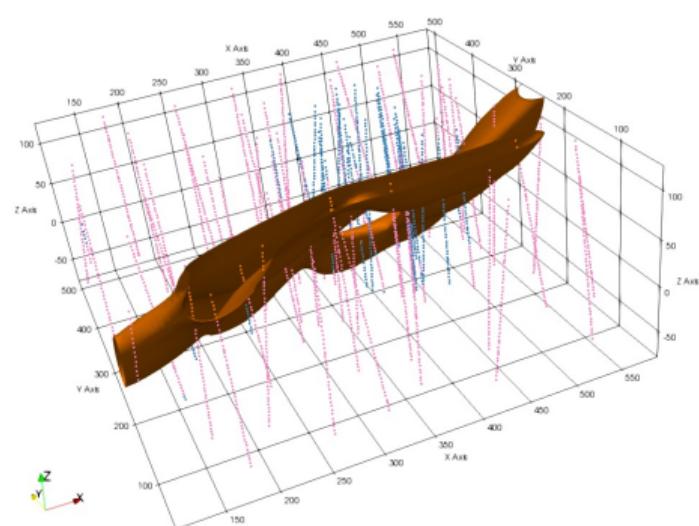
(a) Vista 1



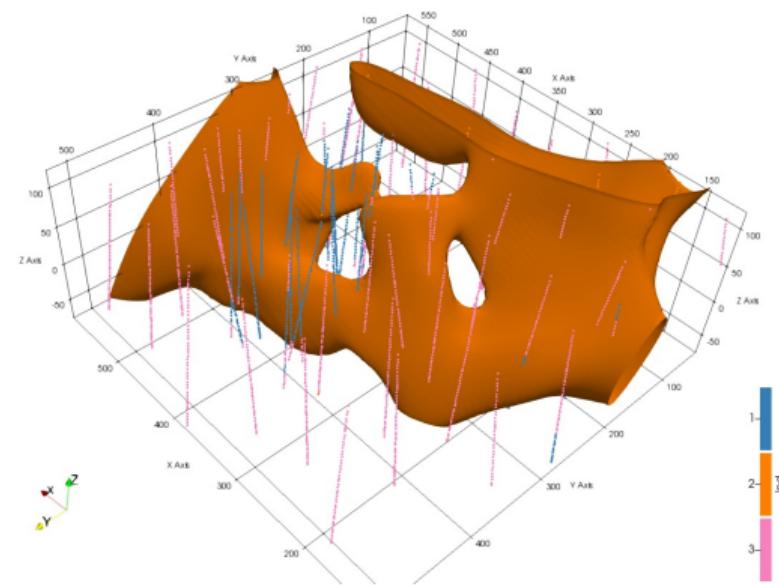
(b) Vista 2

Visualização do modelo geológico

Figura 17: Iso superfície extraída do modelo implícito interpolado por RBF para a categoria 2.



(a) Vista 1



(b) Vista 2

Adaptação para múltiplas categorias simultaneamente

$$i_k(u_\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{se } z(u_\alpha) = k \\ 0, & \text{se } z(u_\alpha) \text{ caso contrário} \end{cases} \quad k = 1, \dots, K \quad (3)$$

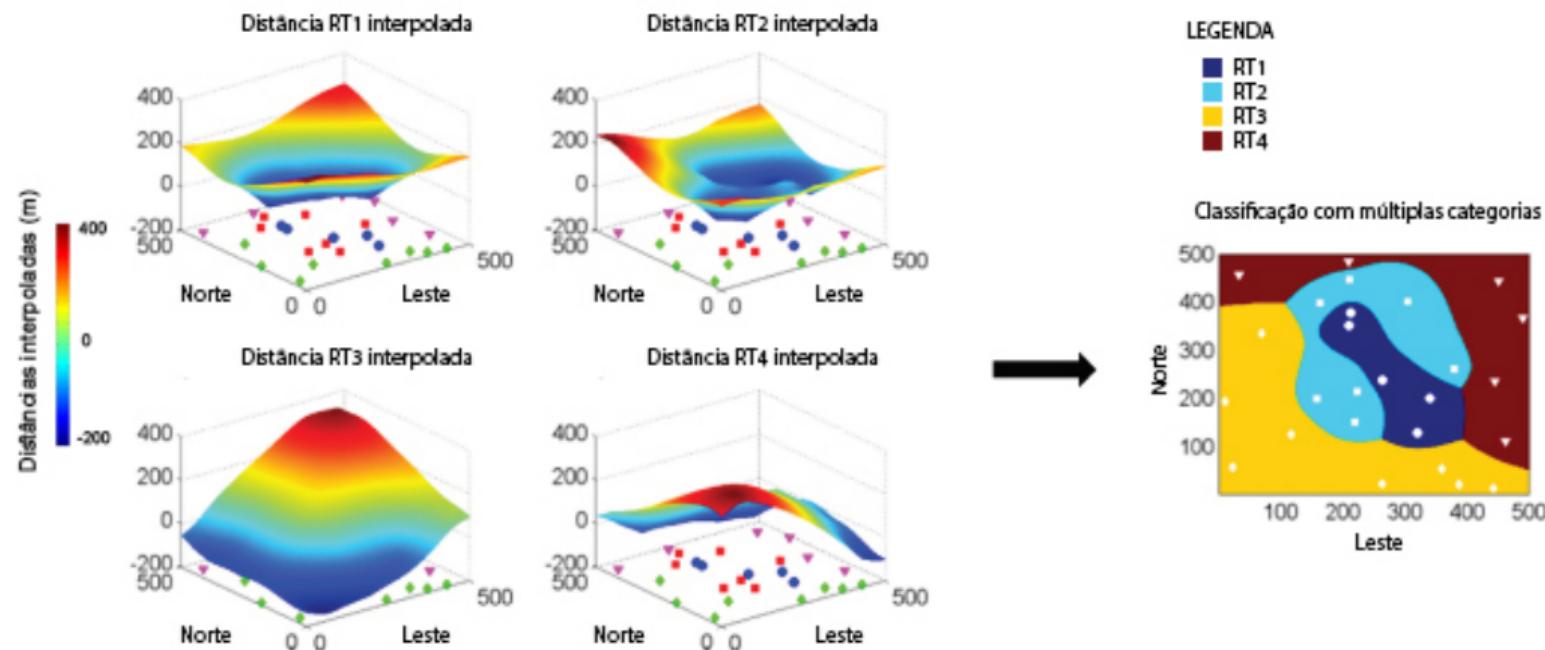
$$d_k(u_\alpha) = \begin{cases} -\|u_\alpha - u_\beta\|, & \text{se } i_k(u_\alpha) = 1 \\ +\|u_\alpha - u_\beta\|, & \text{se } i_k(u_\alpha) = 0 \end{cases} \quad k = 1, \dots, K \quad (4)$$

$$d_k^*(u) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha(u) d_k(u_\alpha) \quad k = 1, \dots, K \quad (5)$$

$$i^*(u) = k' \text{ de modo que } d_{k'}^* = \min\{d_k^*(u)\}_{k=1}^K \quad (6)$$

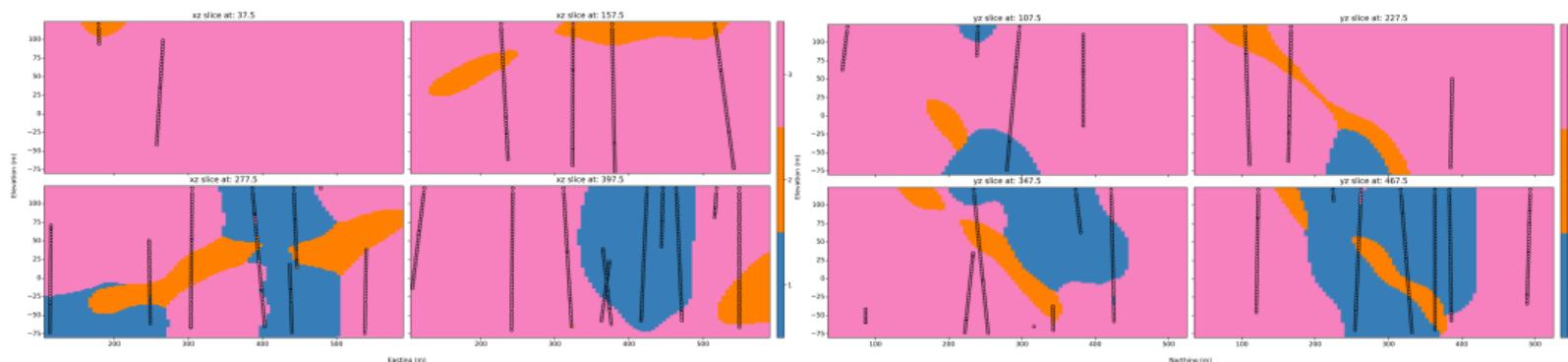
Adaptação para múltiplas categorias simultaneamente

Figura 18: Esquema para criação de um modelo implícito multi categórico.



Adaptação para múltiplas categorias simultaneamente

Figura 19: Modelo geológico multi categórico.



(a) Seções em XZ do modelo implícito gerado por RBF no *grid* fino.

(b) Seções em YZ do modelo implícito gerado por RBF no *grid* fino.

Referências bibliográficas

- Boisvert, J. (2013). Automatic geological modeling with iterative refinement. *CCG Annual Report*.
- Hosseini, A. and Deutsch, C. V. (2007). A distance function based algorithm to quantify uncertainty in areal limits. *CCG Annual Report*.
- Manchuck, J. and Deutsch, C. (2018). MIs for boundary interpretations with uncertainty. *CCG Annual Report*.
- Rolo, R. (2017). Modelagem geológica implícita com funções distância assinaladas. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Silva, D. and Deutsch, C. (2015). Speeding up the signed distance implicit geologic modeling method for multiple rock types. *CCG Annual Report*.
- Silva, D. M. A. (2015). *Enhanced geologic modeling with data-driven training images for improved resources and recoverable reserves*. PhD thesis, University of Alberta.