

# Aprimoramentos em modelagem geológica implícita com funções distância assinaladas

Roberto Mentzingen Rolo, MScEng

Orientador: Prof. 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

# sumário |

## 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

Incorporação da não estacionariedade de segunda ordem

Refinamento iterativo

## sumário II

Incorporação de informação secundária

### Avaliação da incerteza

Avaliação heurística da incerteza

BOUNDSIM

Simulação direta das distâncias assinaladas

Simulação multi ponto

Boundary simulation

Abordagem hierárquica

Sumário dos métodos de avaliação de incerteza

### Proposta de tese

Problemas

Interpolador

Zona de incerteza

Avaliação da incerteza

Boundary simulation multi categórico

P-field

## sumário III

Simulação plurigaussiana truncada

Validação

Sumário

Cronograma e atividades

Referências bibliográficas

# Introdução

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.

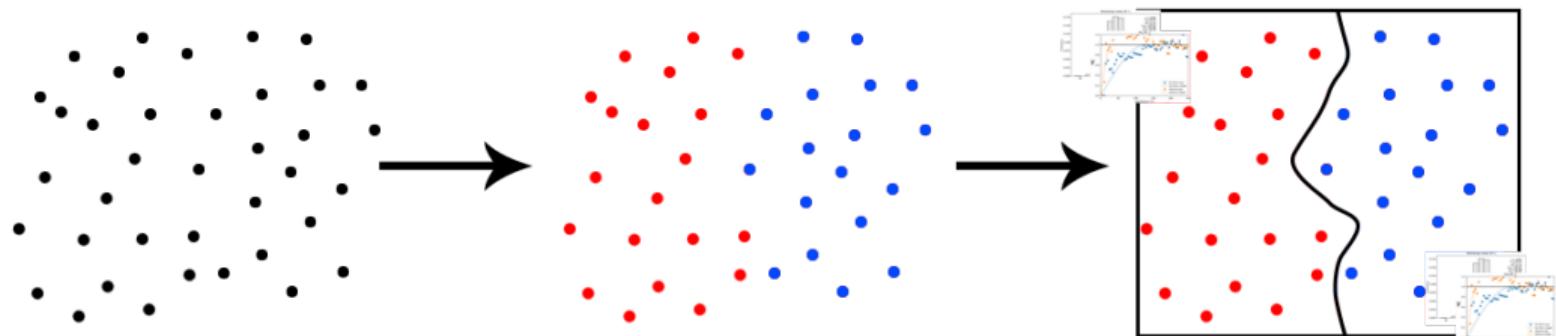


Figura 1: Interpretação e modelagem geológica.

## Metodologia tradicional

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

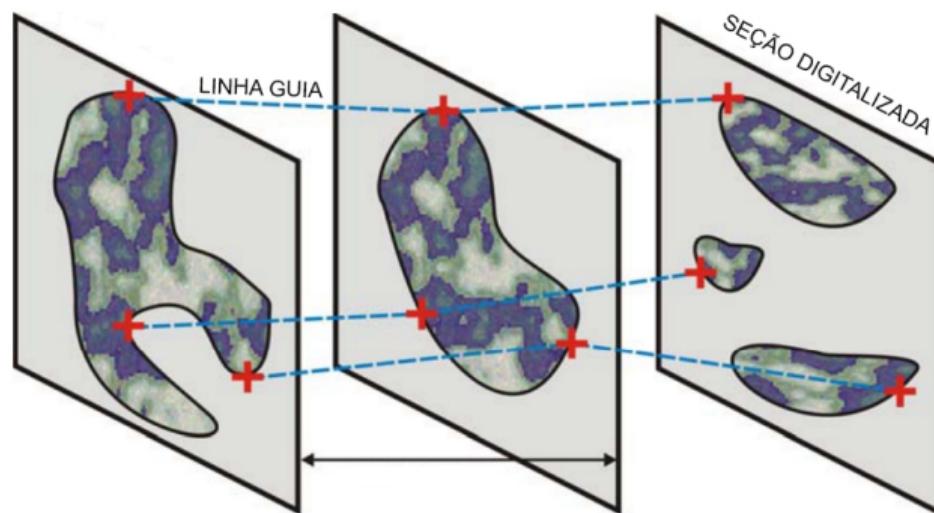


Figura 2: Esquema do método tradicional.

## 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.

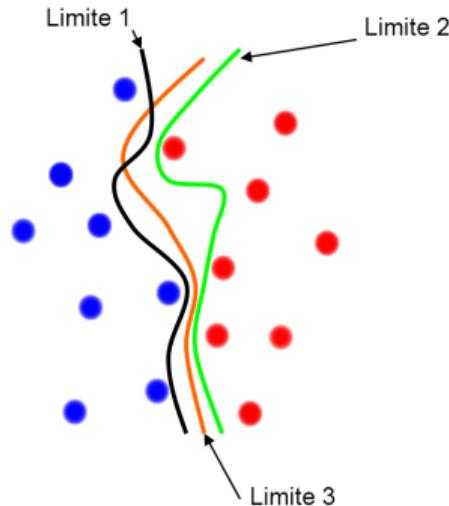


Figura 3: Incerteza do modelo geológico.

# Métodos matemáticos

## *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

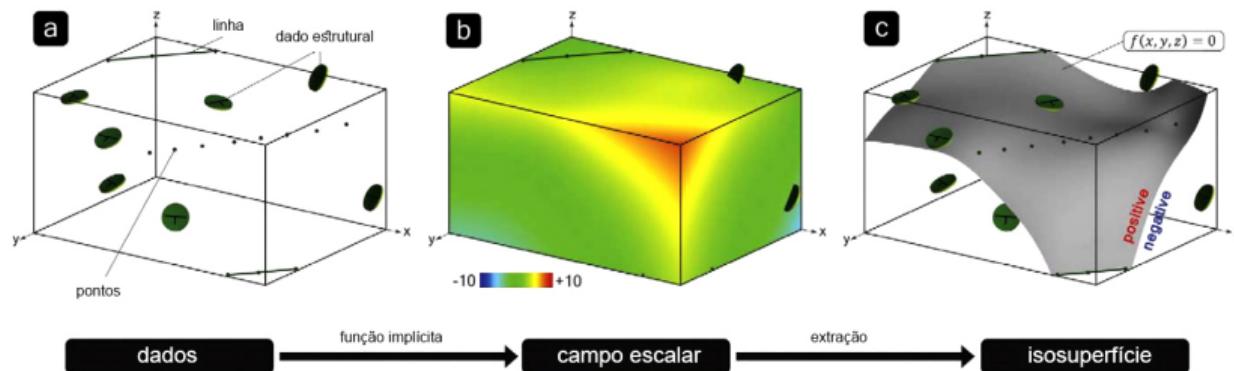
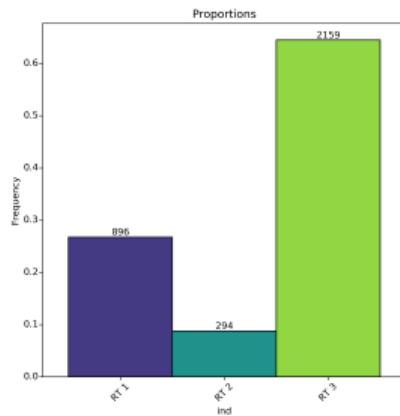


Figura 4: Esquema dos métodos implícitos.

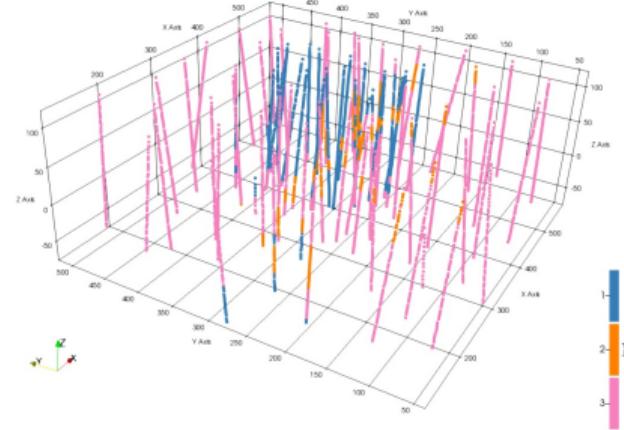
- ▶ Mallet (2004) propõe uma função volumétrica cronológica, levando em consideração a posição estratigráfica das diferentes unidades geológicas;
- ▶ Lajaunie et al. (1997) usam co-krigagem de incrementos em um campo potencial, omitindo a função volume.

# O banco de dados

72 furos totalizando 3349 amostras distribuídas entre 3 diferentes categorias.



(a) Proporções.



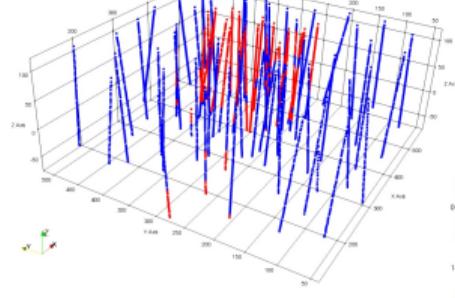
(b) Vista das amostras.

Figura 5: O banco de dados.

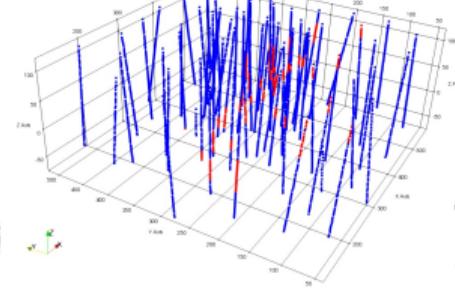
## Codificando as amostras em indicadores

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

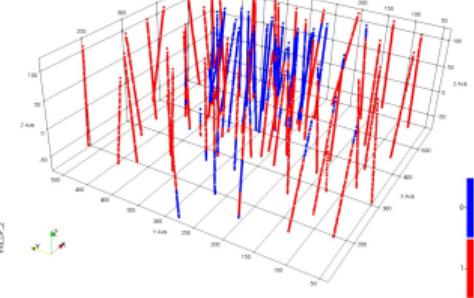
Figura 6: Amostras codificadas em indicadores para cada uma das três categorias do banco de dados.



(a) Categoria 1



(b) Categoria 2



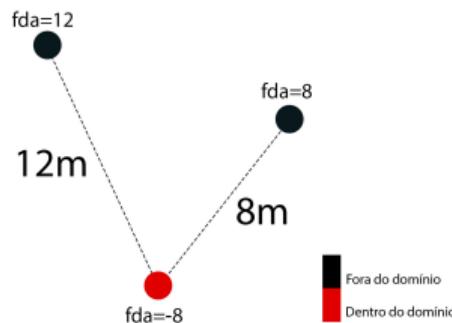
(c) Categoria 3

## Calculando a função distância assinalada

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

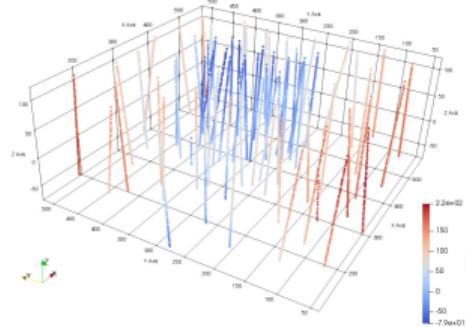
O local  $u_\beta$  corresponde à amostra mais próxima codificada com um indicador diferente de  $u_\alpha$ .

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

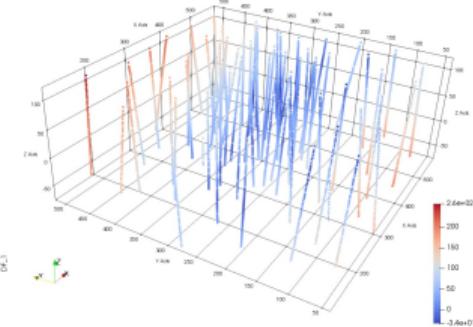


# Calculando a função distância assinalada

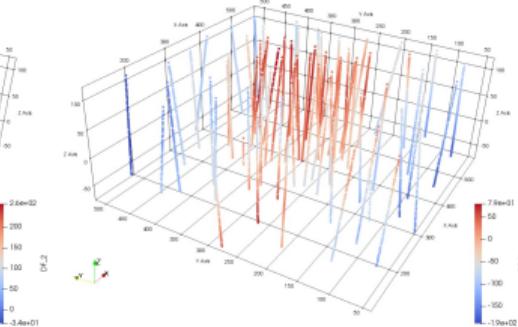
Figura 8: Distâncias assinaladas calculadas para cada uma das categorias do banco de dados.



(a) Categoria 1



(b) Categoria 2



(c) Categoria 3

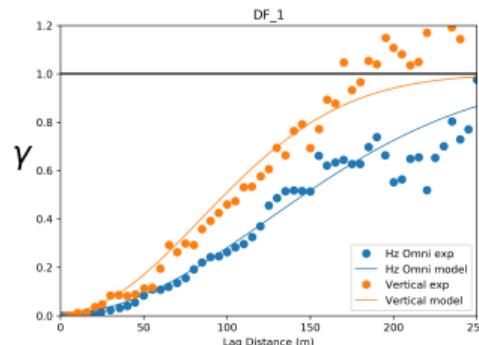
## Variografia das distâncias assinaladas

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 embaraçoso.

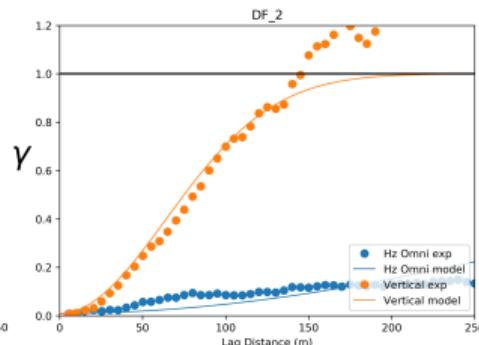
- ▶ Treinar o variograma usando validação cruzada;
- ▶ Tentar modelar interativamente os variogramas experimentais;
- ▶ Calcular e modelar os variogramas para as propriedades de indicadores e transformá-los em um equivalente gaussiano para as distâncias assinaladas;
- ▶ inferir um modelo de covariância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

# Variogramas das distâncias assinaladas

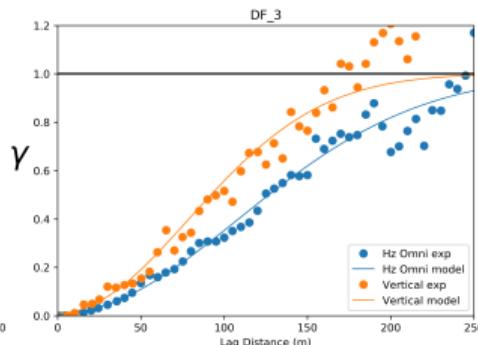
Figura 9: Variogramas experimentais das distâncias assinaladas e modelos para cada uma das categorias do banco de dados.



(a) Categoria 1



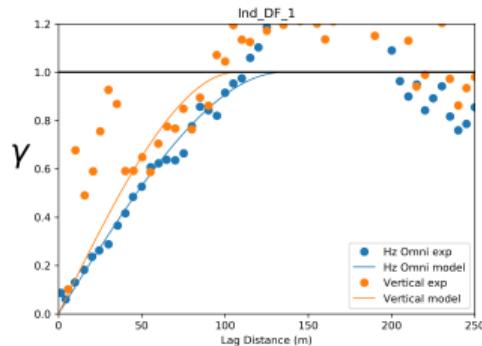
(b) Categoria 2



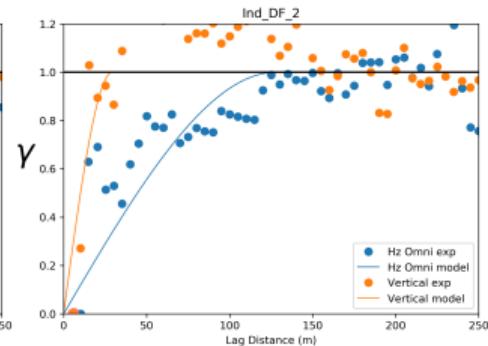
(c) Categoria 3

# Variogramas dos indicadores

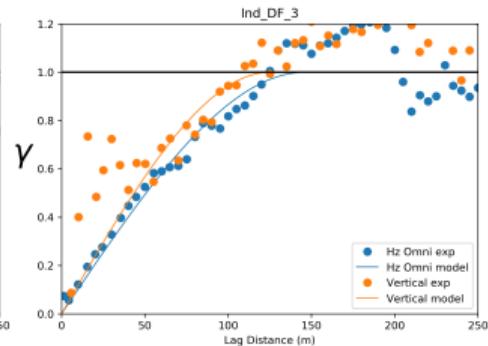
**Figura 10:** Variogramas experimentais dos indicadores e modelos para cada uma das categorias do banco de dados.



(a) Categoria 1



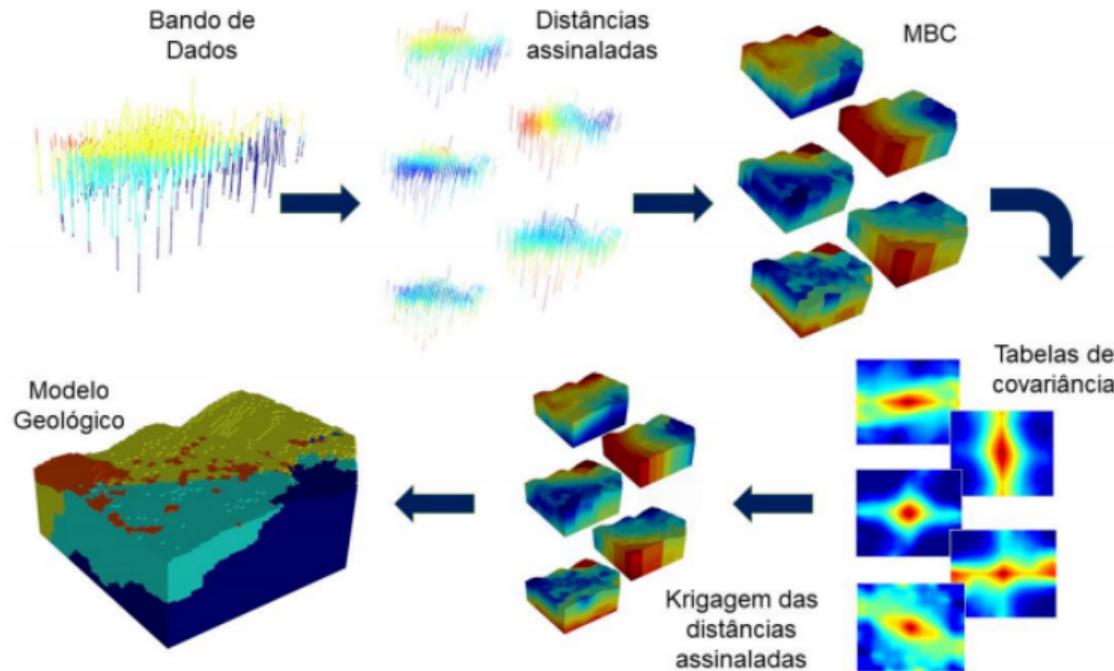
(b) Categoria 2



(c) Categoria 3

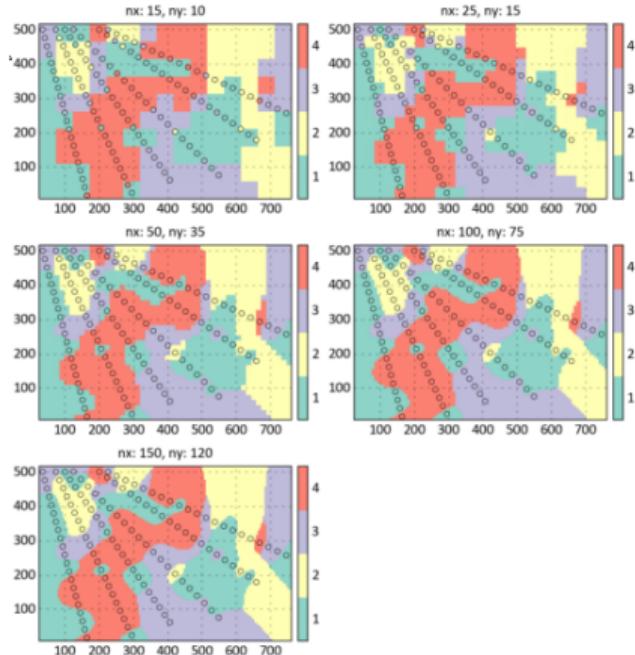
# Alternativa ao cálculo e modelagem dos variogramas

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

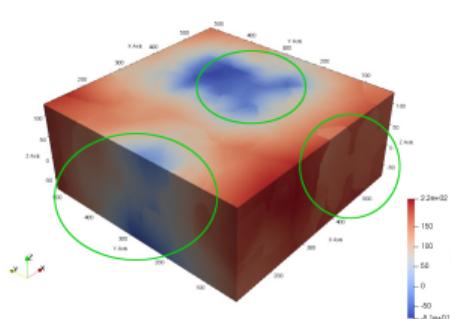
|     | Grosso | Fino   |
|-----|--------|--------|
| nx  | 49     | 97     |
| ny  | 49     | 98     |
| nz  | 51     | 102    |
| sx  | 10m    | 5m     |
| sy  | 10m    | 5m     |
| sz  | 4m     | 2m     |
| num | 122451 | 969612 |

## Métodos de interpolação

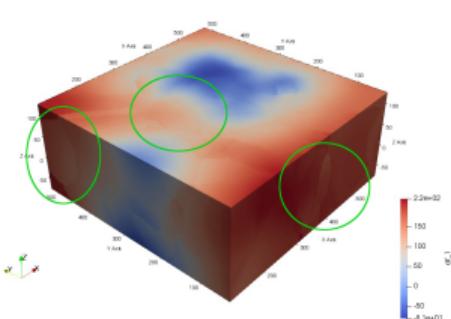
- ▶ Hosseini and Deutsch (2007) utilizaram inverso da distância;
- ▶ Silva (2015) utilizou krigagem ordinária global;
- ▶ Rolo (2017) utilizou krigagem ordinária;
- ▶ Silva and Deutsch (2015) aplicaram *dual kriging*;
- ▶ Boisvert (2013) gerou modelos implícitos através de distâncias assinaladas com 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

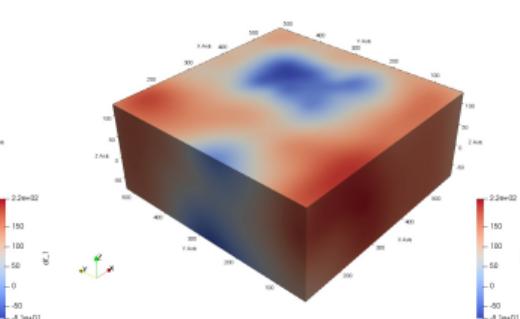
Figura 13: Interpolação das distâncias calculadas por diferentes métodos.



(a) OK com 40 amostras



(b) OK com 100 amostras

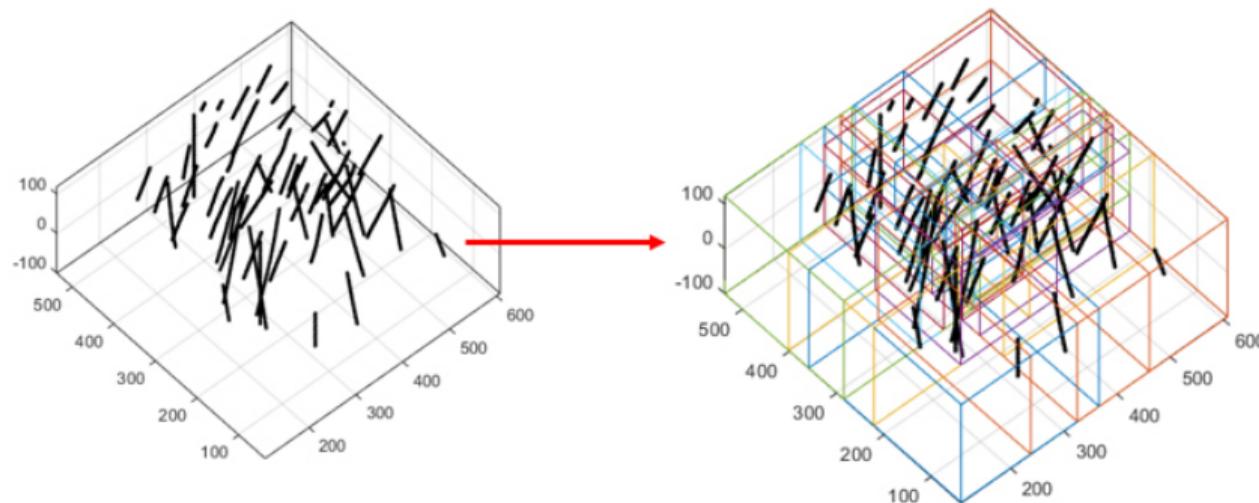


(c) RBF global

## Decomposição do domínio

Transforma um problema volumoso e que demanda muito esforço computacional em diversos problemas menores e eficientes que são, ao final, unidos.

Figura 14: Esquema mostrando o particionamento.



# Benchmark

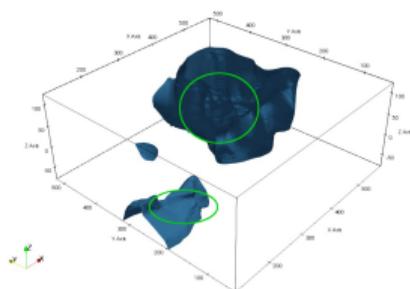
Todos os algoritmos utilizados são da biblioteca GSLib e foram executados em um core i7 7700HQ @ 2.8 GHz com 16 Gb de RAM.

| 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                          |

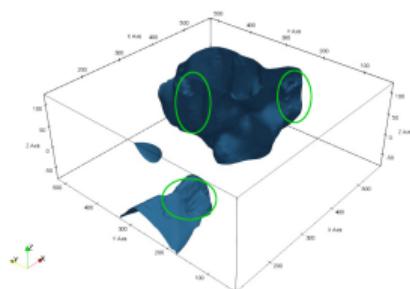
# Visualização do modelo geológico

Um bom palpite inicial para a interface que separa os domínios no espaço, seria a linha (em duas dimensões) ou superfície (em três dimensões) que corresponda ao valor zero da função distância assinalada

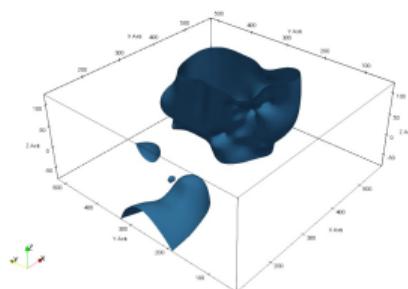
Figura 15: Iso superfícies para a categoria 1 extraída dos diferentes modelos implícitos.



(a) OK com 40 amostras



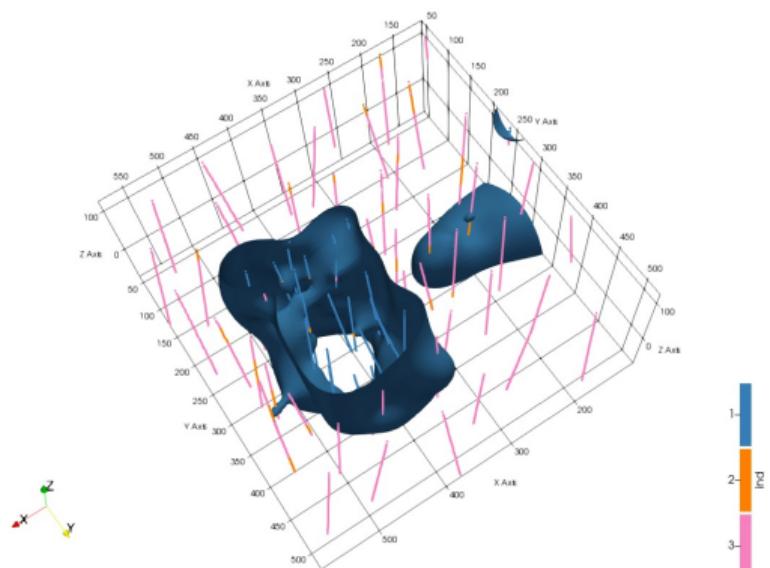
(b) OK com 100 amostras



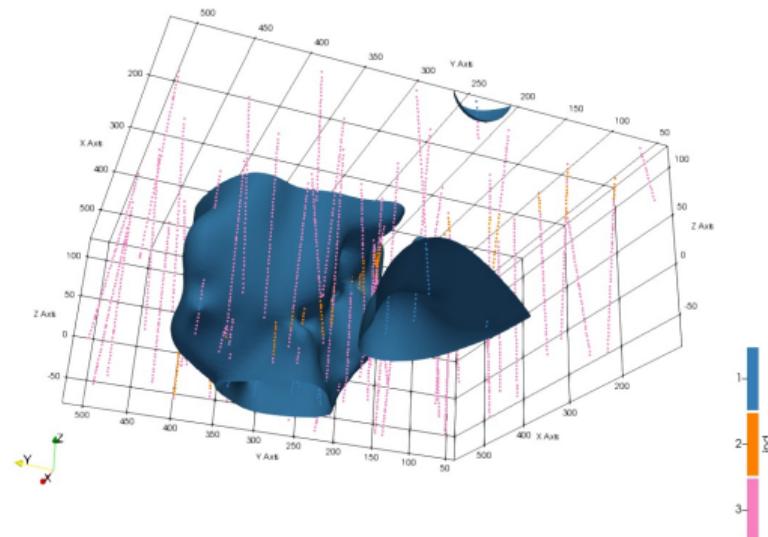
(c) RBF global

# Visualização do modelo geológico

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



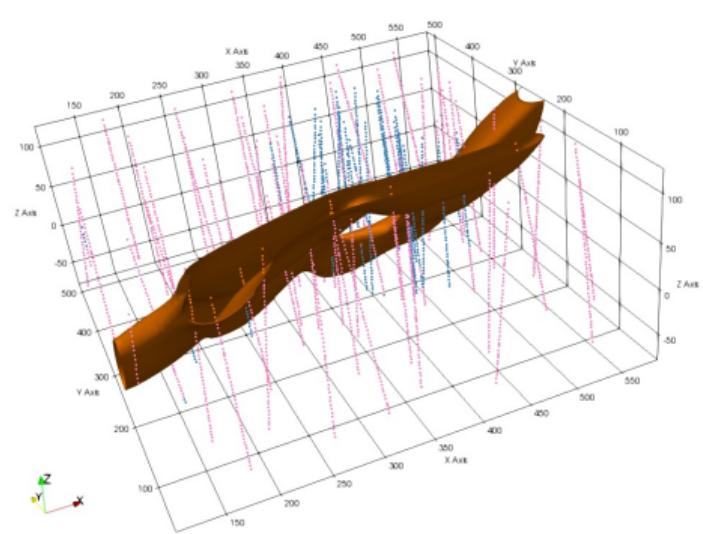
(a) Vista 1



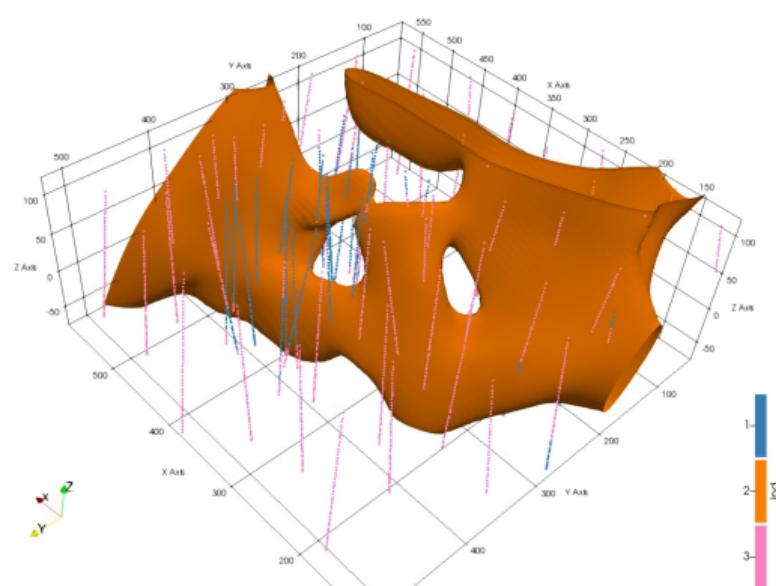
(b) Vista 2

# 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

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

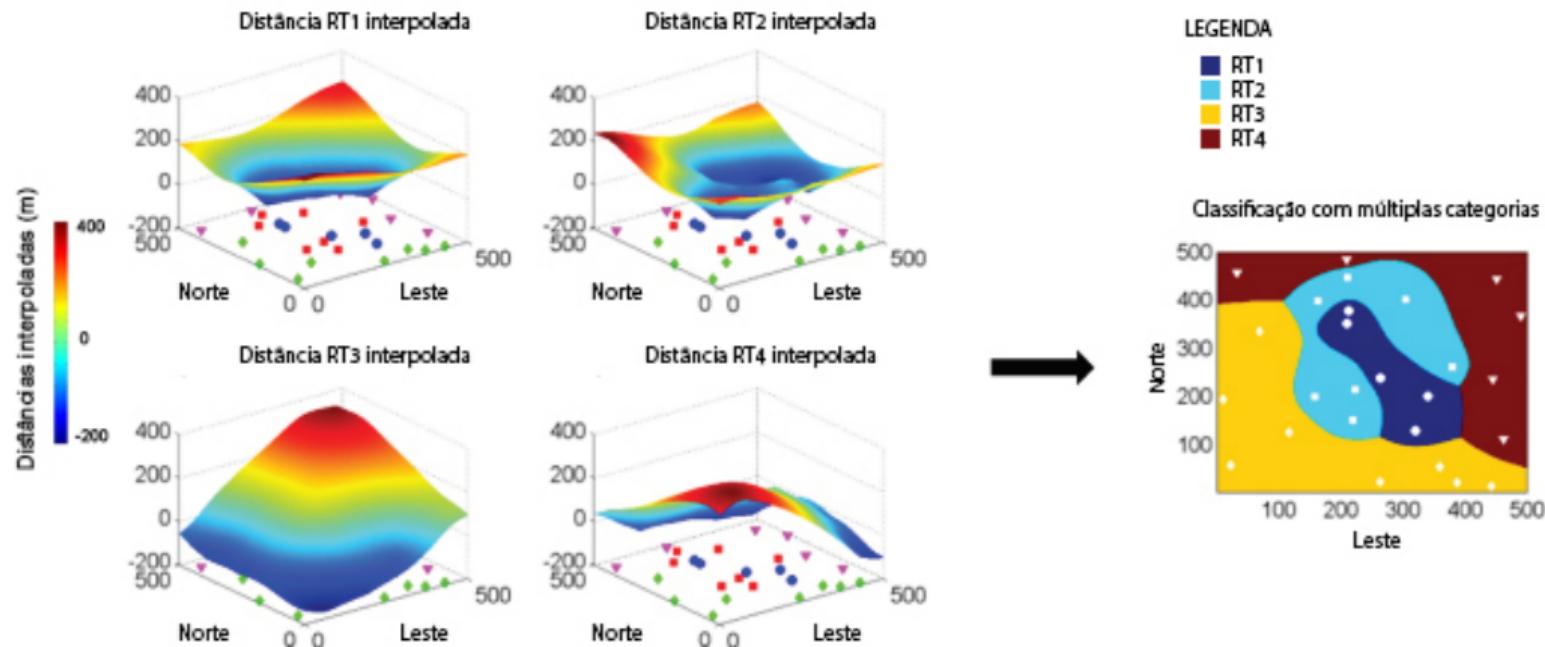
$$d_k(u_\alpha) = \begin{cases} - \| u_\alpha - u_\beta \|, & \text{se } i_k(u_\alpha) = 1 \\ + \| u_\alpha - u_\beta \|, & \text{se } i_k(u_\alpha) = 0 \end{cases} \quad k = 1, \dots, K \quad (4)$$

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

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

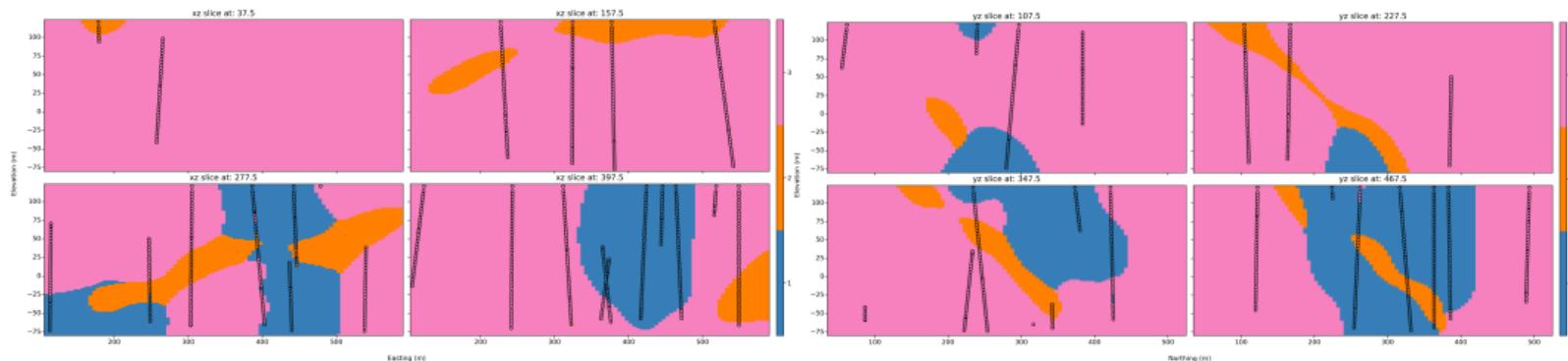
# Adaptação para múltiplas categorias simultaneamente

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



# Adaptação para múltiplas categorias simultaneamente

Figura 19: Modelo geológico multi categórico.

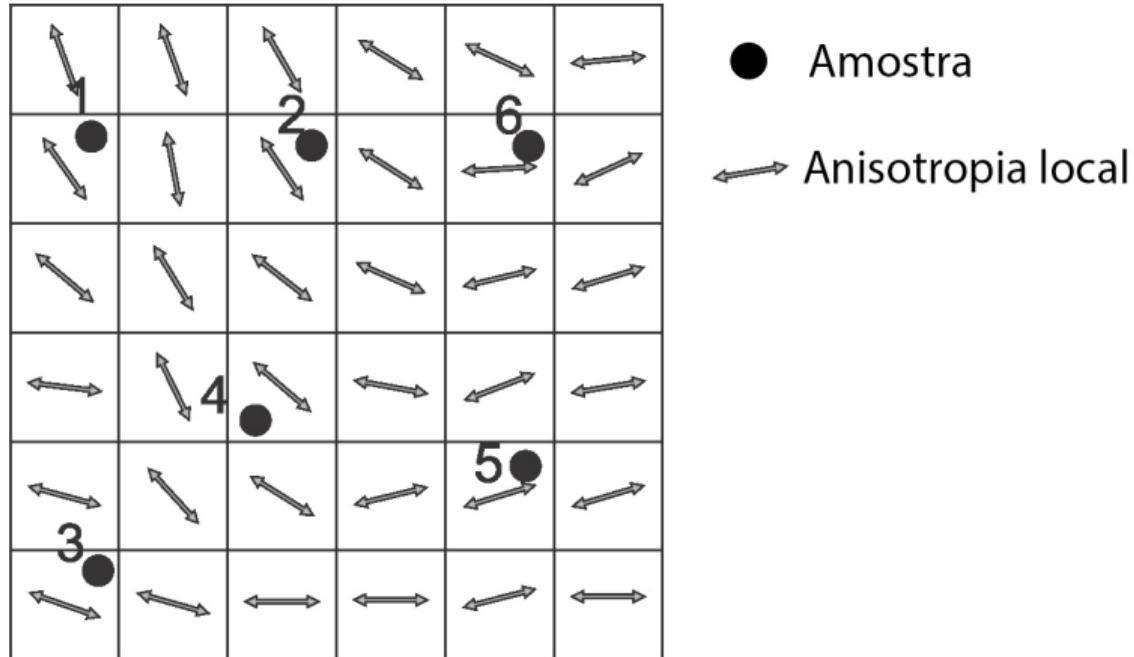


(a) Seções em XZ do modelo implícito gerado por RBF no *grid* fino.

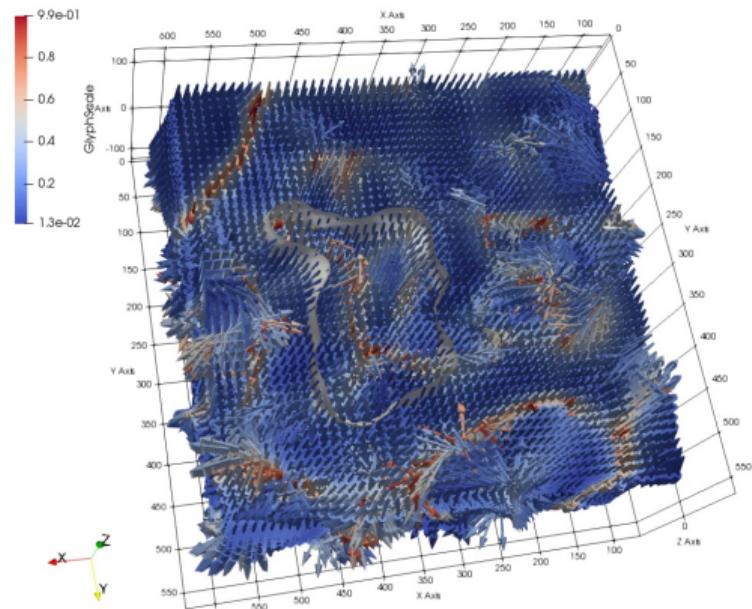
(b) Seções em YZ do modelo implícito gerado por RBF no *grid* fino.

# krigagem com anisotropia local variável

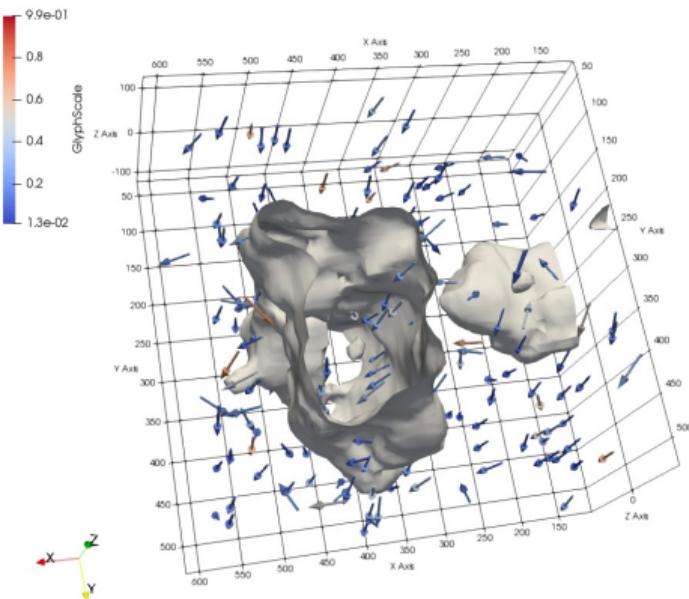
Figura 20: Esquema mostrando os vetores de anisotropia local para cada nó do *grid*.



**Figura 21:** Iso superfície para a categoria 1 extraída de um modelo implícita gerado por krigagem com anisotropia local variável mostrando os vetores.



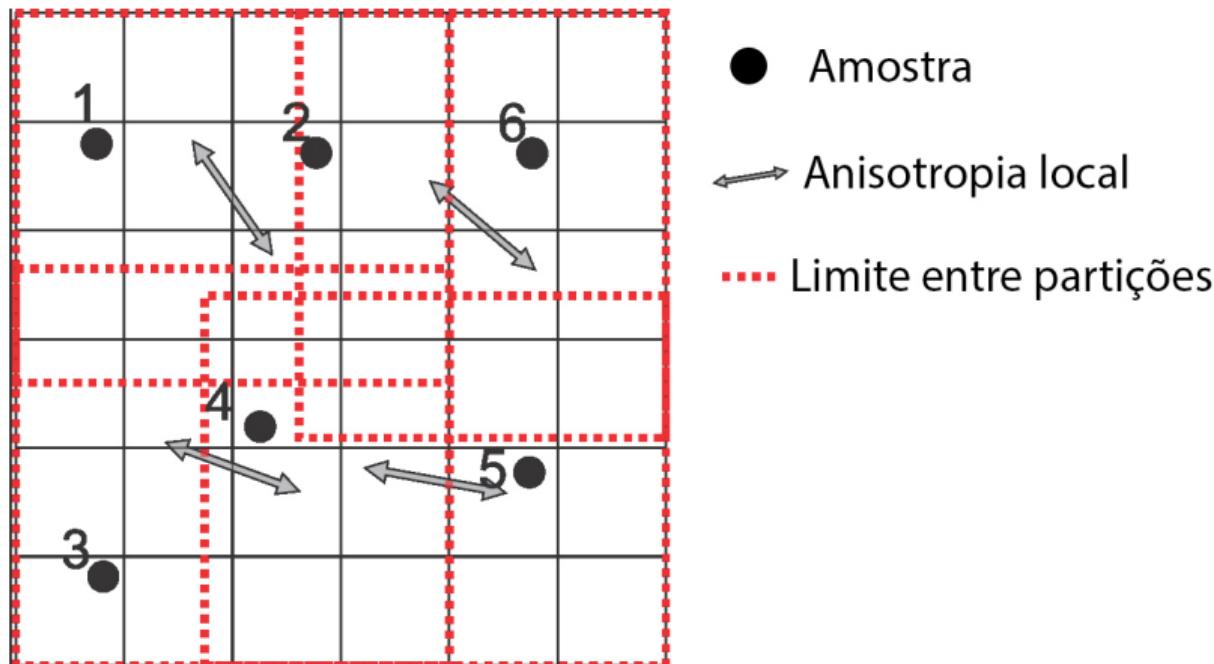
(a) Todos os vetores de anisotropia local



(b) Um vetor a cada 100.000 blocos

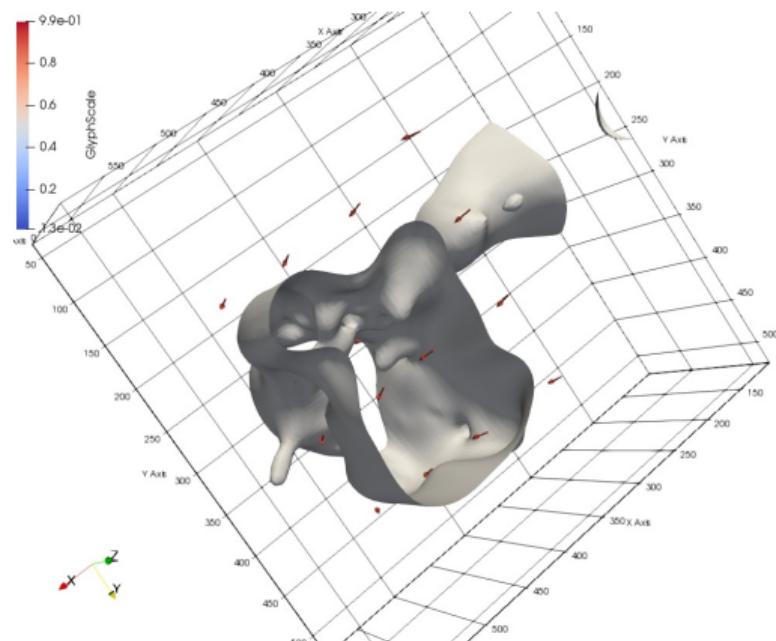
## Funções de bases radiais com anisotropia local variável

Figura 22: Esquema mostrando os vetores de anisotropia local para cada centro de partição.



## Funções de bases radiais com anisotropia local variável

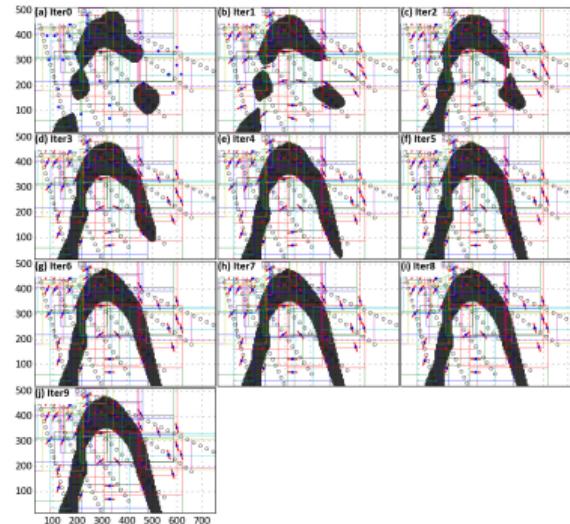
Figura 23: Iso superfície para a categoria 1 extraída de um modelo implícita gerado por krigagem com anisotropia local variável mostrando os vetores.



## Refinamento iterativo

Extrair orientações locais de um modelo criado com anisotropia global e utilizar essas orientações em uma nova interpolação não estacionária resulta em um modelo geológico mais refinado.

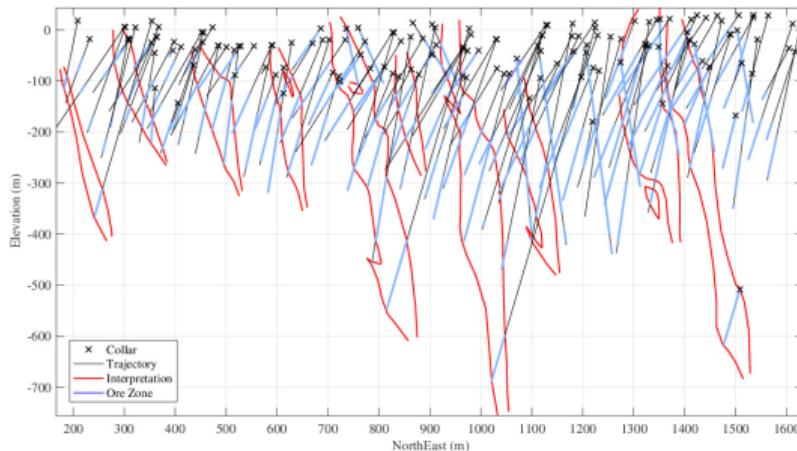
**Figura 24:** Esquema mostrando etapas usando o refinamento iterativo para funções de bases radiais.



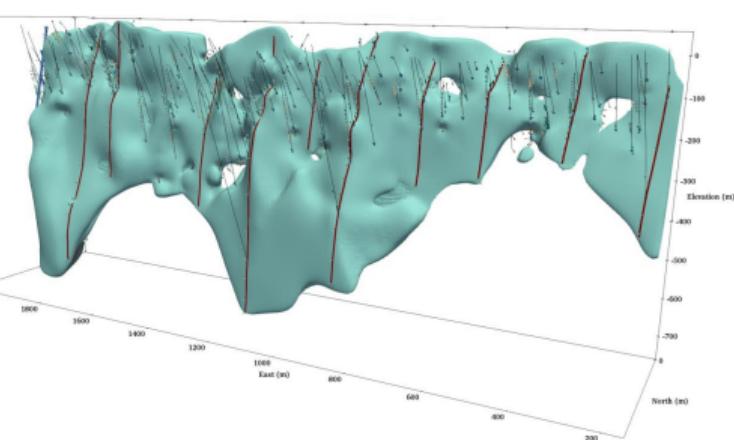
## Incorporação de informação secundária

Manchuck and Deutsch (2018) propõe o uso de uma regressão linear local para integrar modelagem geológica implícita e explícita.

Figura 25: Modelo geológico híbrido criado a partir de furos de sondagem e seções interpretadas.



(a) Seção mostrando furos e seções interpretadas.



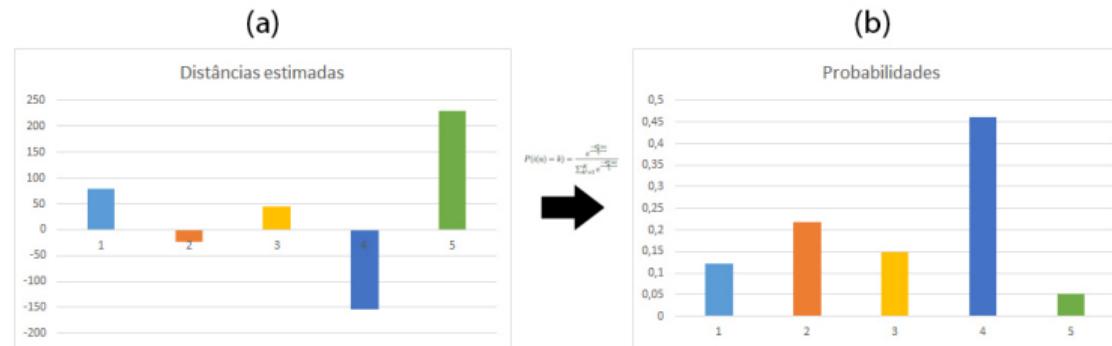
(b) Modelo implícito.

# Avaliação heurística da incerteza

Transformação das distâncias em probabilidades.

$$P(i(u) = k) = \frac{e^{\frac{-d_k^*(u)}{\gamma}}}{\sum_{k'=1}^K e^{\frac{-d_k^*(u)}{\gamma}}} \quad (7)$$

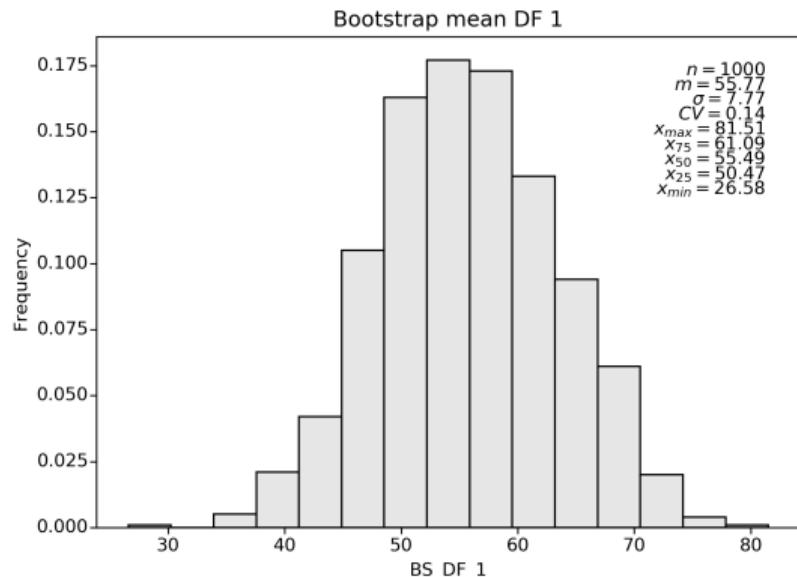
Figura 26: Distâncias estimadas em (a) e transformadas em probabilidades em (b) para um mesmo bloco, com cinco categorias.



# BOUNDSIM

Krigagem simples com médias tomadas do histograma da média.

**Figura 27:** Histograma do bootstrap espacial da média das distâncias assinaladas para a categoria 1.



| Percentil | Blocos dentro |
|-----------|---------------|
| 10        | 109886        |
| 50        | 110446        |
| 90        | 111069        |

## Simulação direta das distâncias assinaladas

Simulação direta e classificação dos blocos baseada na menor distância simulada.  
O primeiro passo é o cálculo do coeficiente U:

$$U(u) = \frac{\max\{D_{min}\} - \min\{d_k^*(u)\}_{k=1}^K}{\max\{D_{min}\} - \min\{D_{min}\}} \quad (8)$$

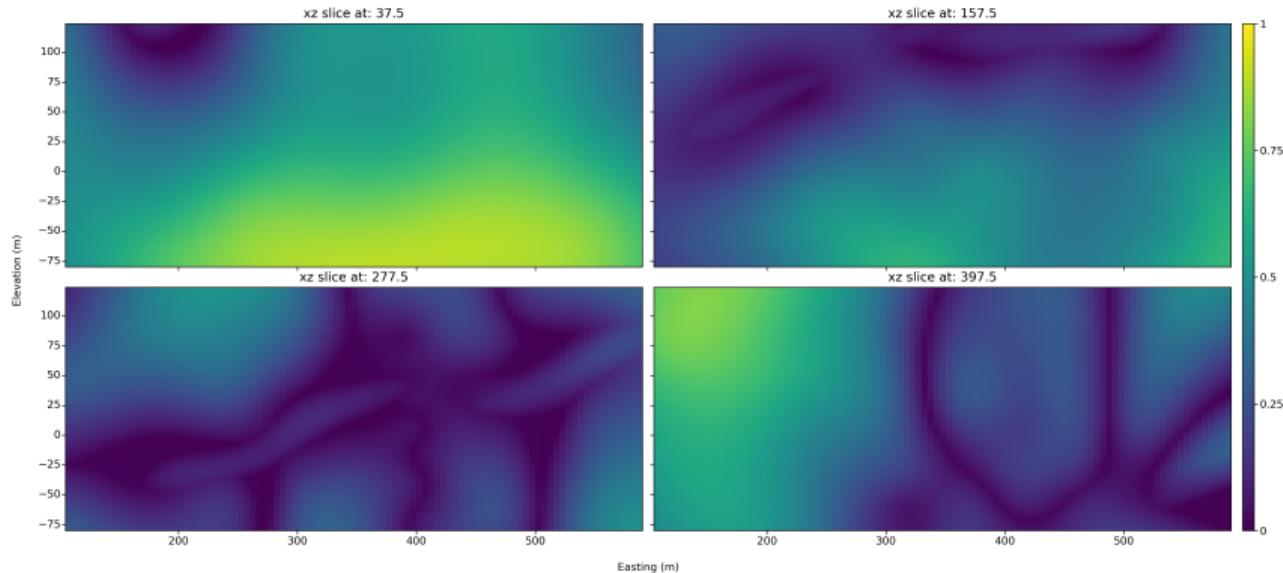
Onde:

$$D_{min} = \{\min\{d_k^*(u_1)\}, \dots, \{\min\{d_k^*(u_n)\}\}_{k=1}^K\} \quad (9)$$

E  $d_k^*(u)$  é a distância estimada no local  $u$  para a categoria  $k$ .

# Simulação direta das distâncias assinaladas

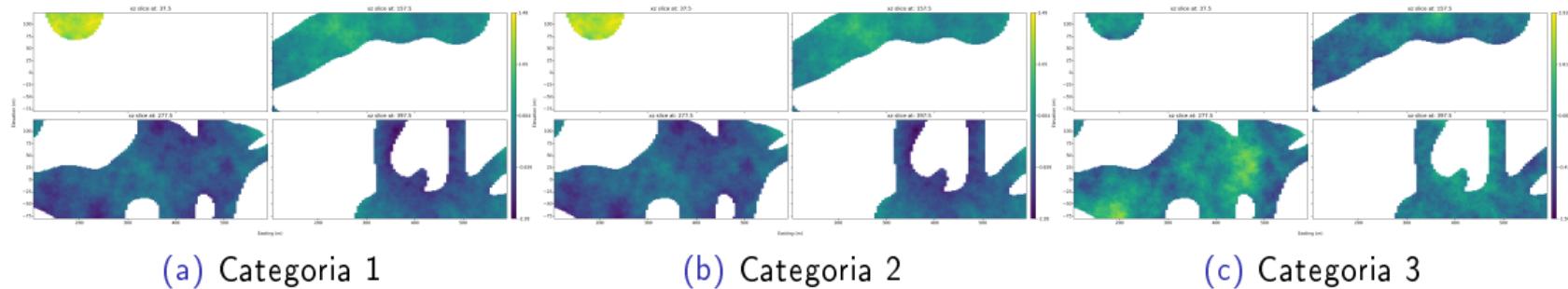
Figura 28: Coeficiente U calculado para todos os nós do grid.



# Simulação direta das distâncias assinaladas

Simulação das distâncias na zona de incerteza:

Figura 29: Distâncias simuladas na zona de incerteza para as categorias do banco de dados.



(a) Categoria 1

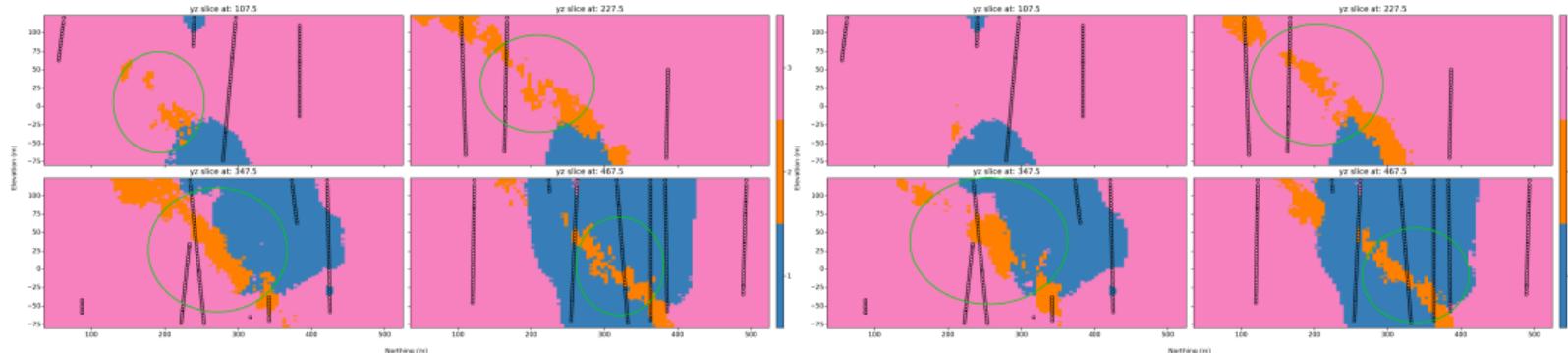
(b) Categoria 2

(c) Categoria 3

# Simulação direta das distâncias assinaladas

Classificação dos blocos.

Figura 30: Diferentes realizações do modelo geológico.



(a) Realização 1

(b) Realização 2

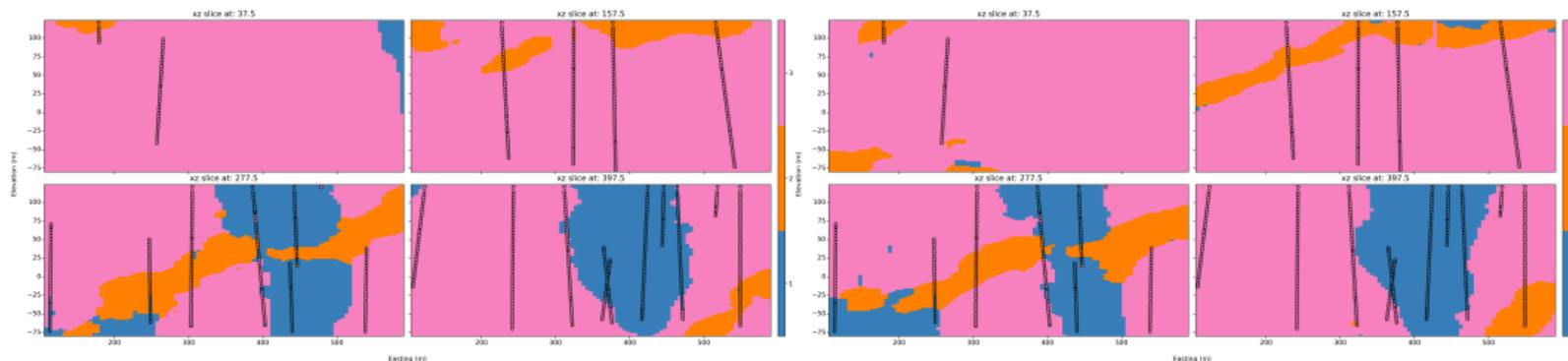
## Simulação direta das distâncias assinaladas

1. Cálculo das distâncias assinaladas para todas as amostras e categorias;
2. Variografia das distâncias no espaço original para todas as categorias;
3. Interpolação das distâncias;
4. criação do modelo com base na menor distância interpolada;
5. Criação da zona de incerteza;
6. Transformação Gaussiana das distâncias;
7. Variografia das distâncias no espaço gaussiano para todas as categorias;
8. Geração de múltiplos modelos baseados na menor distância simulada;
9. Validação e pós processamento das realizações.

# Simulação multi ponto

MPS em uma TI gerada pela interpolação das distâncias assinaladas.

Figura 31: Diferentes realizações do modelo geológico.



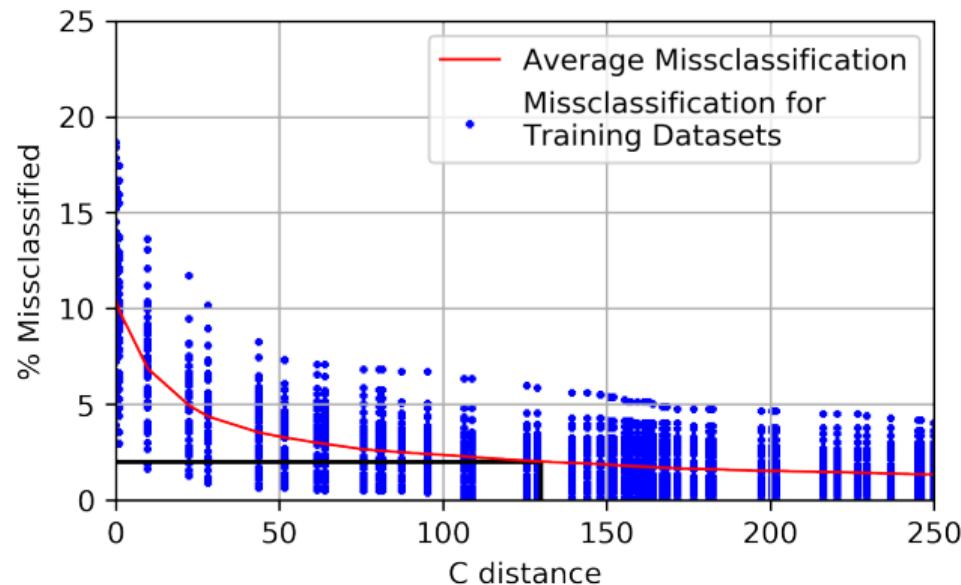
(a) Realização 1

(b) Realização 2

## Boundary simulation

Calibração do parâmetro C:

Figura 32: Calibração do parâmetro C para a categoria 1.



## Boundary simulation

$$d_k(u_\alpha) = \begin{cases} -\|u_\alpha - u_\beta\| - C, & \text{se } u_\alpha \text{ pertence ao domínio} \\ +\|u_\alpha - u_\beta\| + C, & \text{se } u_\alpha \text{ não pertence ao domínio} \end{cases} \quad (10)$$

Para que a simulação seja realizada de forma uniforme entre  $-C$  e  $+C$ , o desvio padrão  $y'(u)$ , deve ser simulado e transformado pela relação:

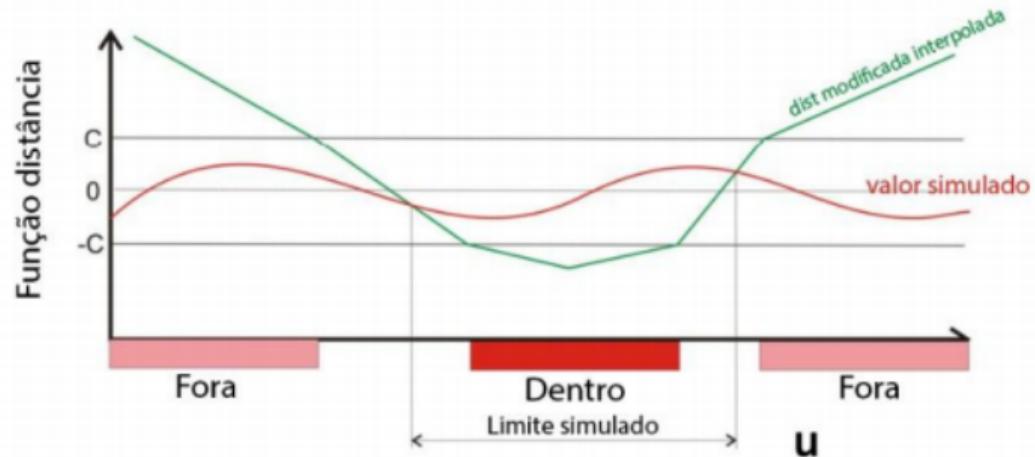
$$df'(u) = 2 * C * G^{-1}(y'(u)) - C \quad (11)$$

onde:  $df'(u)$  é o valor da função distância simulada,  $y'(u)$  o valor normal padrão da simulação não condicional, e  $G^{-1}$  representa a determinação do valor da distribuição acumulada padrão normal correspondente a  $y'(u)$ . Para garantir que os valores pertençam a região estabelecida, os valores são multiplicados por  $2C$  e subtraídos de  $C$ .

## Boundary simulation

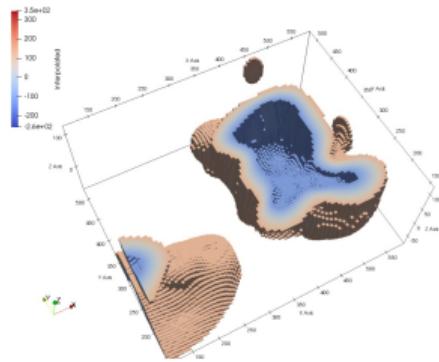
Classificação dos blocos.

Figura 33: Classificação dos locais comparando valores estimados e simulados.

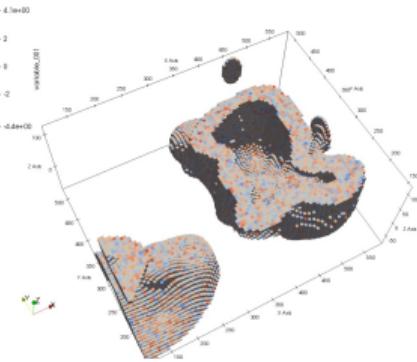


# Boundary simulation

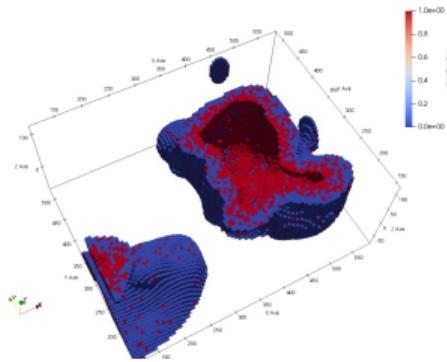
Figura 34: Interpolação, simulação e classificação na zona de incerteza.



(a) Distâncias interpoladas



(b) Distâncias simuladas

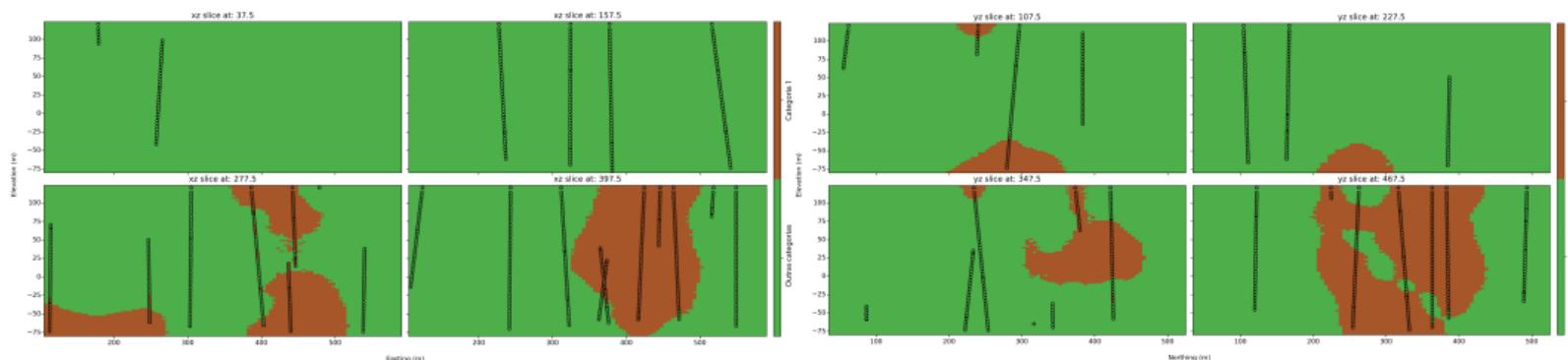


(c) Classificação

# Boundary simulation

Blocos classificados.

Figura 35: Seções verticais de uma realização para a categoria 1.



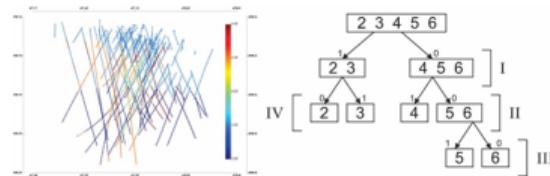
(a) Seção em XY

(b) Seção em YZ

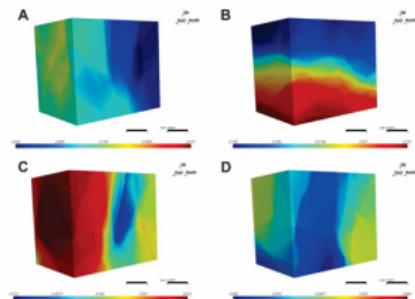
# Abordagem hierárquica

Figura 36: Esquema do método mostrando os passos necessários.

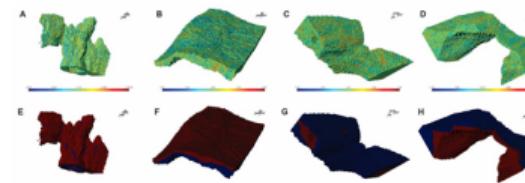
## 1-Definição dos grupos



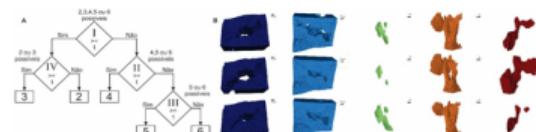
## 2-Interpolação das distâncias assinaladas modificadas para cada grupo



## 3-Definição da zona de incerteza para cada grupo e simulação das distâncias



## 4-Definição do modelo geológico aplicando a mesma regra do passo 1 em cada realização



# Sumário dos métodos de avaliação de incerteza

| Método              | Simplicidade | Velocidade | Multi categórico | Realismo geológico | Controle da incerteza | Controle do tipo de contato |
|---------------------|--------------|------------|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Heurístico          | simples      | rápido     | sim              | não                | sim                   | não                         |
| Boundsim            | simples      | rápido     | não              | sim                | não                   | não                         |
| Simulação direta    | complexo     | demorado   | sim              | não                | sim                   | não                         |
| MPS                 | simples      | rápido     | sim              | sim                | não                   | não                         |
| Boundary simulation | simples      | rápido     | não              | sim                | sim                   | sim                         |

## Problemas I

- ▶ Não estacionariedade da função distância assinalada torna a modelagem dos variogramas arbitrária e questionável;
- ▶ É preciso encontrar um balanço entre número de nós e resolução necessária. A resolução do *grid* influencia diretamente a avaliação de incertezas;
- ▶ A escolha do interpolador muitas vezes é subjetiva e confusa;
- ▶ Na presença de múltiplos domínios, principalmente em ambientes geológicos complexos, é necessário a aplicação de uma lógica de precedência de estruturas ao invés de simplesmente tomar a menor distância assinalada para a criação de modelos realistas;
- ▶ Em alguns métodos a definição da zona de incerteza é subjetiva e não segue nenhuma regra matemática ou geológica, em outros a definição da zona de incerteza é extremamente laboriosa e complicada;
- ▶ Estruturas geológicas específicas, como lentes ou diques, podem desaparecer, ou não serem bem reproduzidas nos modelos implícitos;

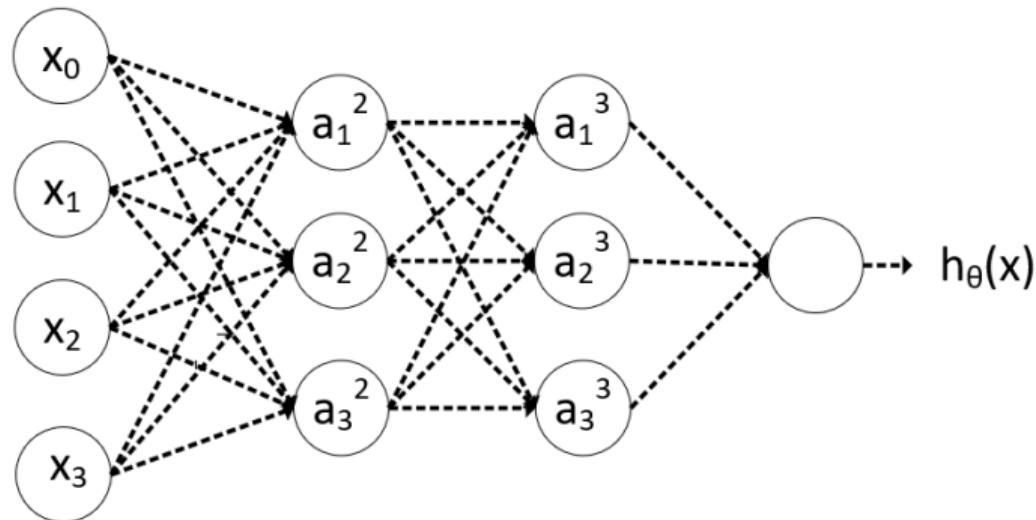
## Problemas II

- ▶ É necessário checar se os modelos implícitos honram a geologia do depósito e serão úteis para o processo de avaliação de recursos/reservas.

## Interpolador

Redes neurais trabalham em um sistema binário de zeros e uns e por isso podem se basear nas propriedades da função sigmóide.

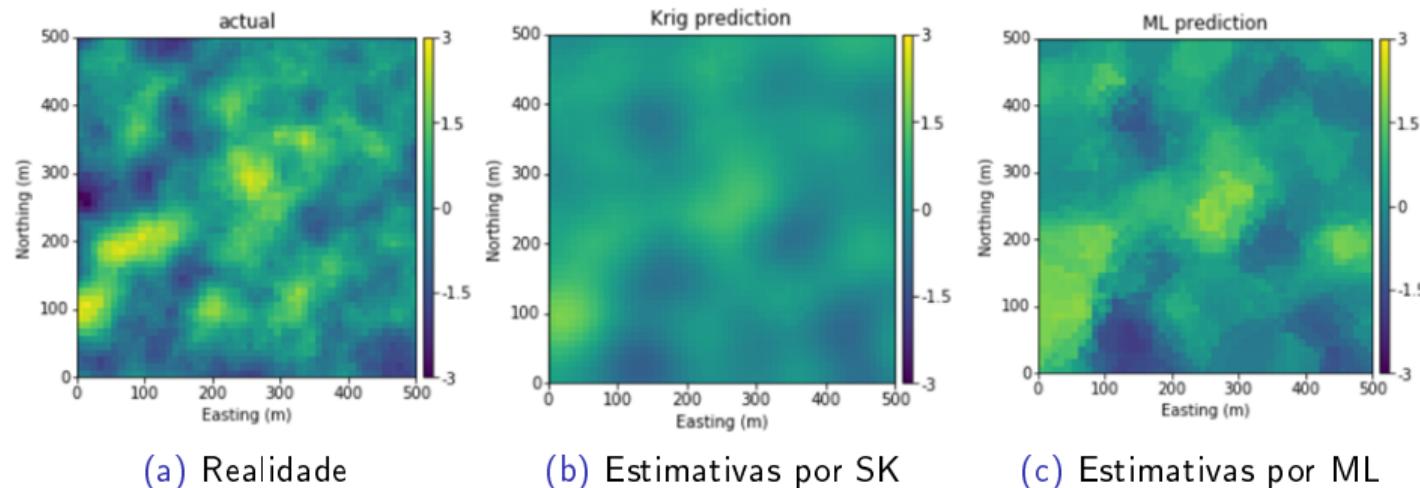
Figura 37: Rede neural.



# Interpolador

Samson and Deutsch (2018) desenvolveram um algoritmo, usando TensorFlow.

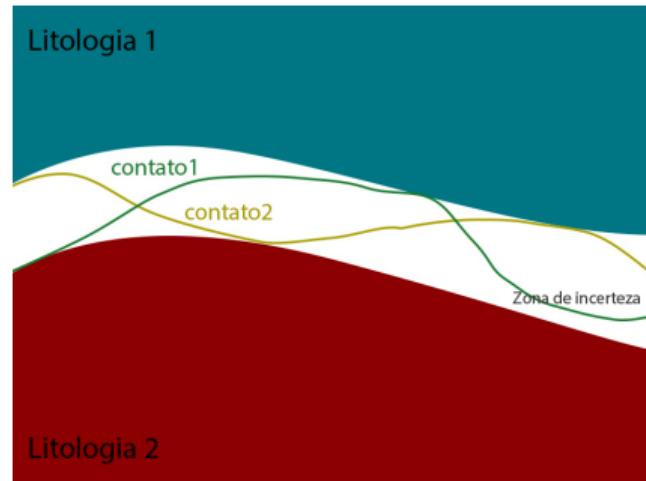
Figura 38: Comparação de modelos gerados por diferentes métodos de estimativas.



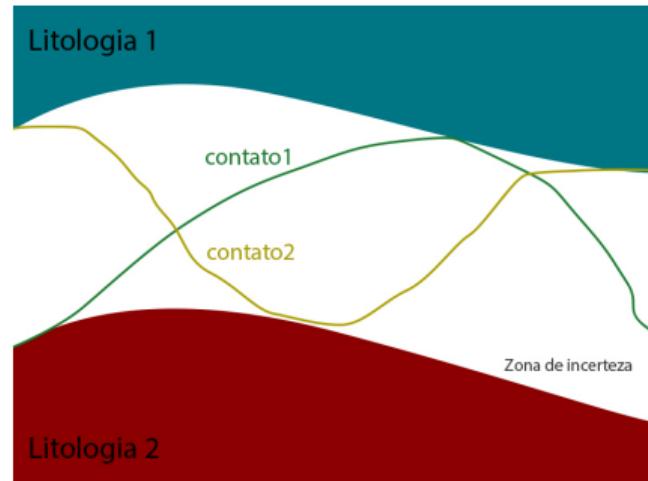
## Zona de incerteza

Gerar múltiplas realizações com a finalidade de avaliar a incerteza de modelos geológicos em todos os nós do *grid* é desperdício de tempo e poder computacional, já que no interior dos domínios não há incerteza.

Figura 39: Zonas de incerteza e contatos.



(a) Zona de incerteza 1



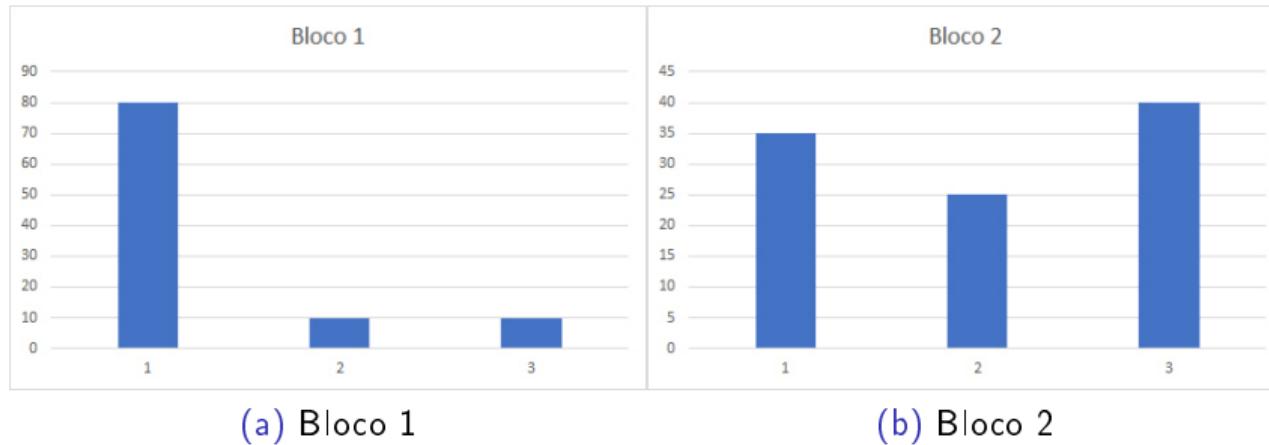
(b) Zona de incerteza 2

## Zona de incerteza

Em física, a entropia é uma medida do grau de desordem em um sistema.

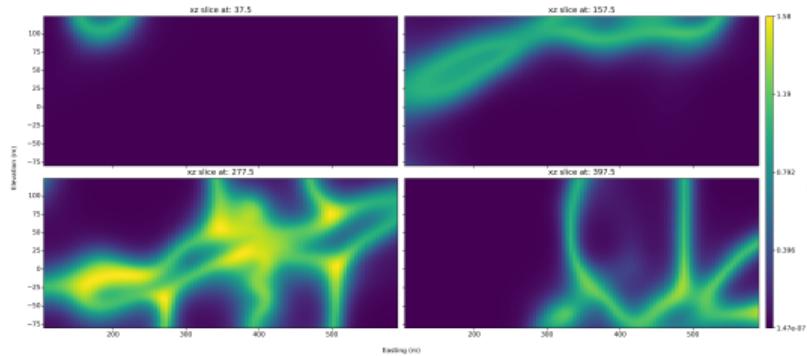
$$H(X) = H(p_1, \dots, p_n) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (12)$$

Figura 40: Probabilidades de cada categoria em dois diferentes blocos.

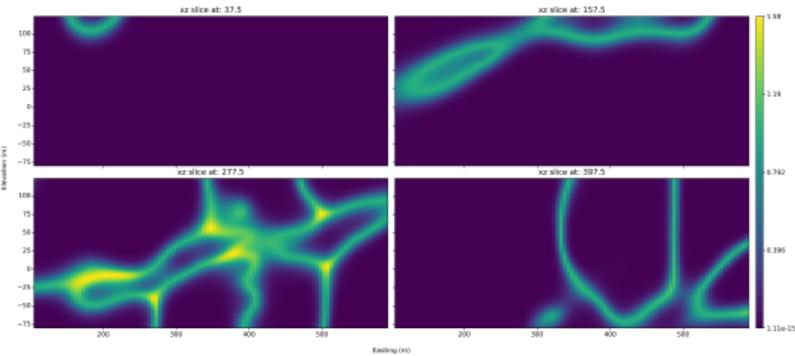


# Zona de incerteza

Figura 41: Entropias calculadas para diferentes valores de  $\gamma$ .



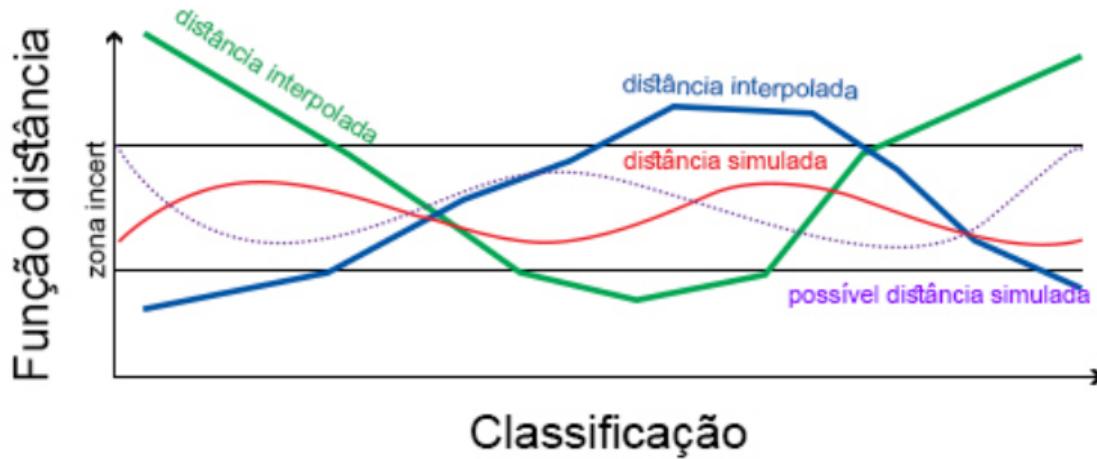
(a)  $\gamma = 20$



(b)  $\gamma = 10$

# Boundary simulation multi categórico

Figura 42: Comparação multi categórica.

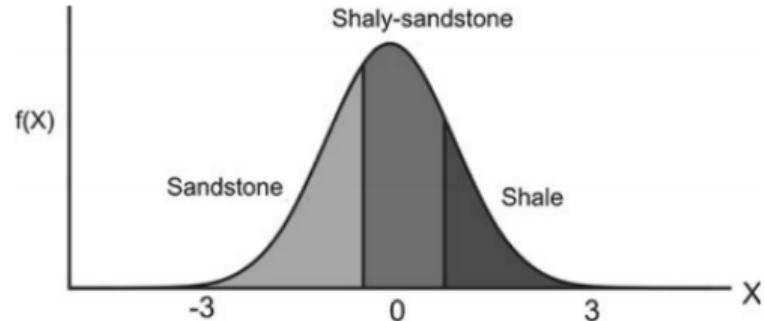


## P-field

Uma alternativa à simulação não condicional das distâncias na zona de incerteza são os campos de probabilidade (*P-field*). A ideia central desse método de simulação é dissociar a tarefa de estimar distribuições de probabilidades locais para geração de múltiplas realizações equiprováveis Froidevaux (1993). Uma premissa é de que as distribuições locais são conhecidas, o que é uma premissa razoável, já que as distribuições locais podem ser calculadas transformando distâncias em probabilidades.

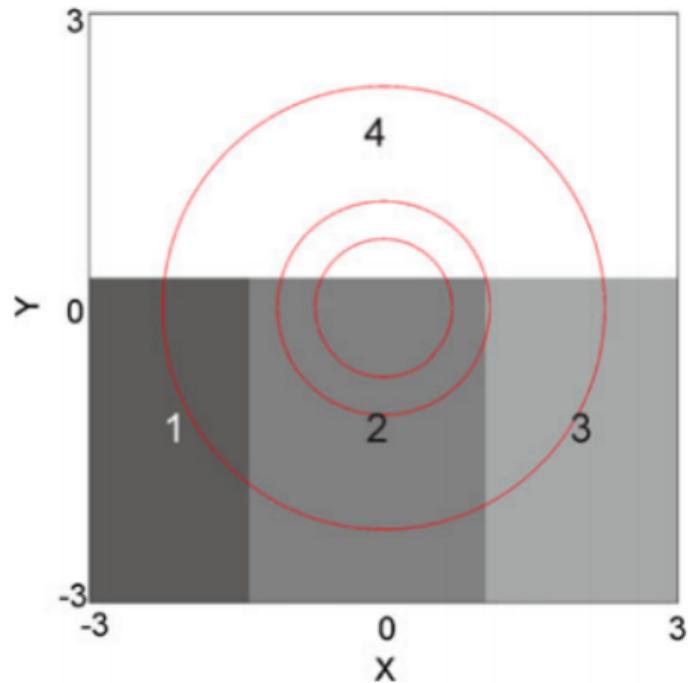
## Simulação plurigaussiana truncada

Figura 43: Esquema da SGT. Note que as litologias sandstone e shale não aparecerão juntas nas realizações.



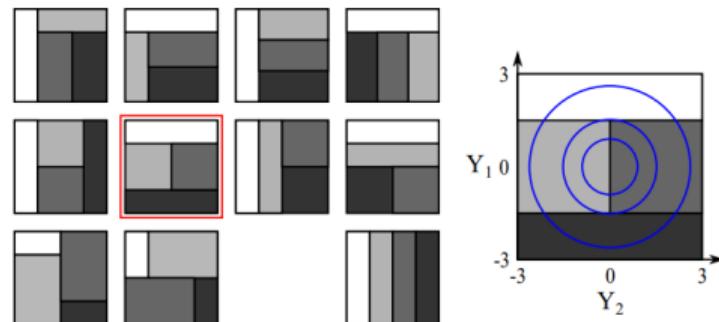
## Simulação plurigaussiana truncada

Figura 44: Esquema da SPT. Note que as litologias 1 e 3 não aparecerão juntas nas realizações.



# Simulação plurigaussiana truncada

Figura 45: Diferentes templates, para o caso de duas variáveis latentes e quatro categorias.



## Regras de truncagem I

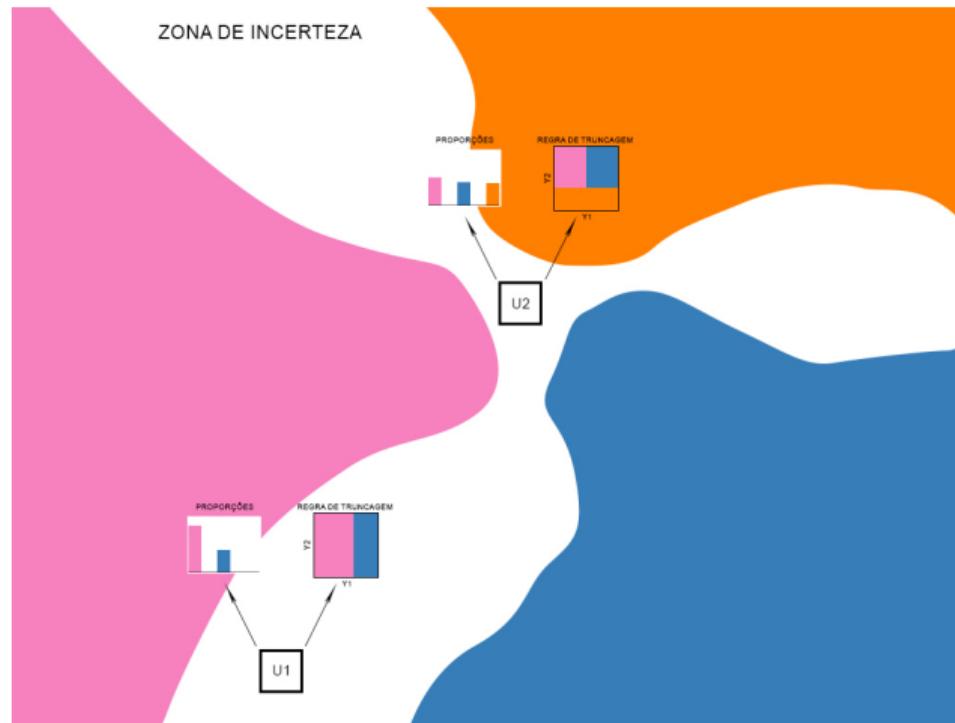
- ▶ Allard et al. (2012) introduziram o *assignation diagram*, que automaticamente constrói a regra de truncagem para o caso bivariado usando regressão baseada em kernel em variáveis auxiliares;
- ▶ Sadeghi and Boisvert (2012) usaram *simulated annealing* para otimizar a regra de truncagem. A função objetivo é a minimização da classificação errônea entre as probabilidades de transição calculadas de realizações e das probabilidades de transição calculadas a partir dos dados.
- ▶ Deutsch and Deutsch (2014) usaram *multidimensional scaling* (MDS) para definir regras de truncagem complexas com o foco em reproduzir as probabilidades de transição. Essa metodologia pode ser aplicada para qualquer número de variáveis gaussianas.
- ▶ Astrakova et al. (2015) propuseram uma metodologia semelhante a de Deutsch and Deutsch (2014) usando entropia bayesiana máxima em conjunto com *simulated annealing* para otimizar a regra de truncagem bigaussian;

## Regras de truncagem II

- ▶ Madani and Emery (2015) e Silva and Deutsch (2016) propuseram uma abordagem hierárquica para definir a regra de truncagem em espaços multi dimensionais.

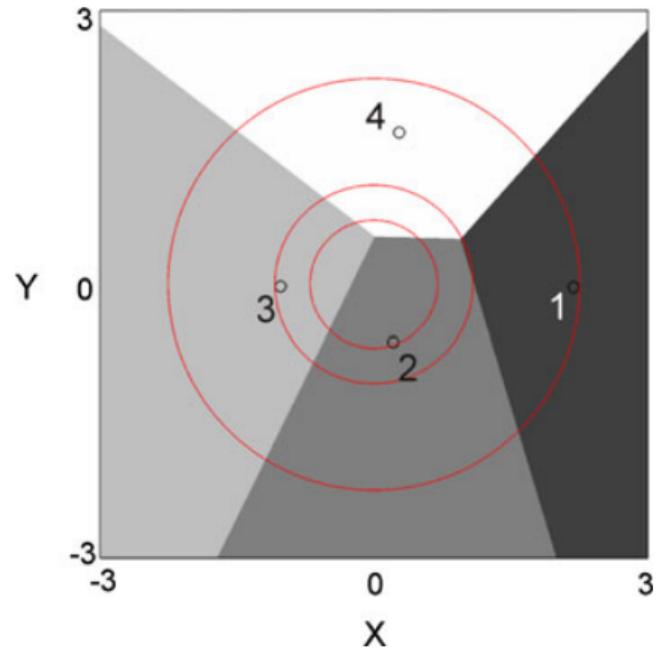
## Regra dinâmica de truncagem

Figura 46: Diferentes regras de truncagem definidas para cada bloco a partir das probabilidades calibradas e calculadas.



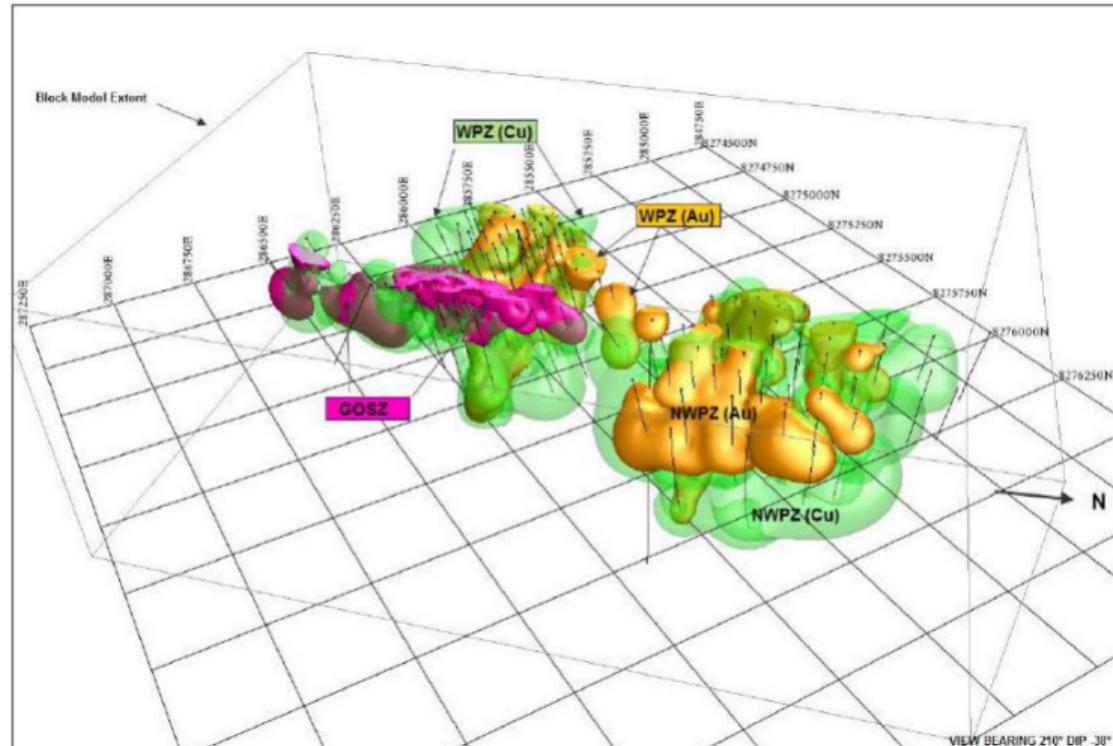
## Regra de truncagem via MDS

Figura 47: Esquema do uso de MDS para definição da regra de truncagem.



# Validação

Figura 48: Modelo implícito ruim, com a presença de estruturas e formas indesejadas ("blobs").



# Sumário

Em suma, essa tese propõe desenvolver e investigar:

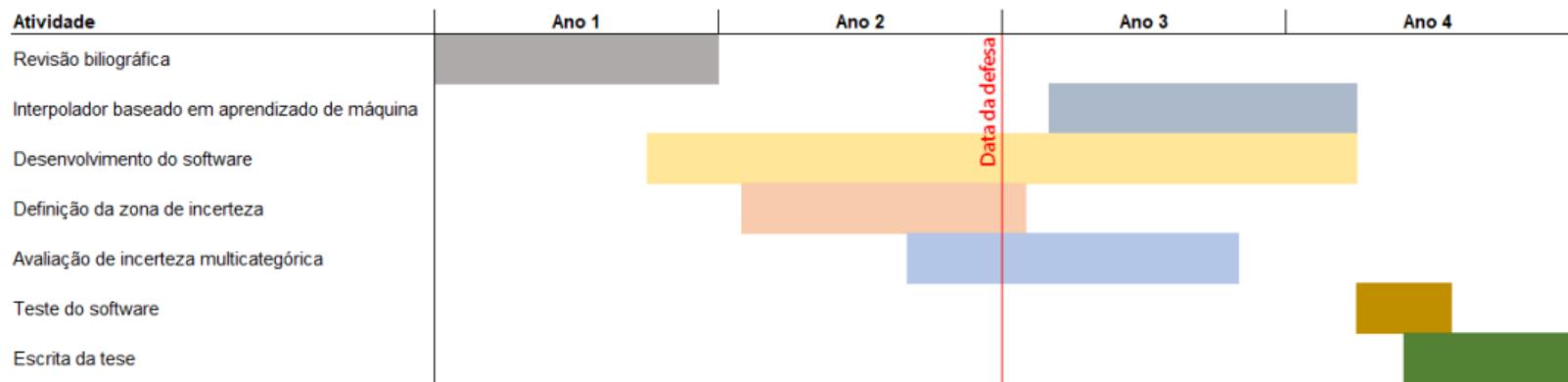
- ▶ Um interpolador baseado em redes neurais independente de variograma para a variável distância assinalada;
- ▶ Uma metodologia para calibração e definição de uma zona de incerteza multi categórica estatisticamente justa, livre de viés e que seja de fato incerta;
  - ▶ Calibração do parâmetro  $\gamma$ ;
  - ▶ Truncagem no campo de entropia.
- ▶ Uma metodologia para avaliação da incerteza que gere múltiplas realizações de modelos geológicos multi categóricos dentro da zona de incerteza, sem ruído e com a possibilidade de controlar a natureza dos contatos.
  - ▶ Definição de uma regra de truncagem local para cada bloco.
  - ▶ Definição de um modelo de covariância para cada variável latente, que seja representativo.
- ▶ Uma metodologia para validação de modelos geológicos implícitos.
  - ▶ Identificação automática de estruturas indesejadas.

## Progresso de desenvolvimento

- ▶ Cálculo das distâncias assinaladas ✓
- ▶ Validação cruzada ✓
- ▶ Interpolação tradicional por RBF ✓
- ▶ Interpolação baseada em redes neurais
- ▶ Calibração do parâmetro  $\gamma$  a partir das amostras ✓
- ▶ Calibração do parâmetro  $\gamma$  (nova abordagem)
- ▶ Cálculo das probabilidades ✓
- ▶ Cálculo da entropia ✓
- ▶ Definição do *cutt-off* no campo de entropia
- ▶ Simulação da variável contínua auxiliar
- ▶ Definição da regra de truncagem local
- ▶ Algoritmo de validação visual

# Cronograma

Figura 49: Cronograma de atividades.



## Referências bibliográficas |

- Allard, D., D'Or, D., Biver, P., and Froidevaux, R. (2012). Non-parametric diagrams for plurigaussian simulations of lithologies. In *9th international geostatistical congress, Oslo, Norway*, volume 1115.
- Astrakova, A., Oliver, D. S., and Lantuéjoul, C. (2015). Truncation map estimation based on bivariate probabilities and validation for the truncated plurigaussian model. *arXiv preprint arXiv:1508.01090*.
- Boisvert, J. (2013). Automatic geological modeling with iterative refinement. *CCG Annual Report*.
- Deutsch, J. L. and Deutsch, C. V. (2014). A multidimensional scaling approach to enforce reproduction of transition probabilities in truncated plurigaussian simulation. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 28(3):707–716.
- Froidevaux, R. (1993). Probability field simulation. In *Geostatistics tróia'92*, pages 73–83. Springer.

## Referências bibliográficas II

- Hosseini, A. and Deutsch, C. V. (2007). A distance function based algorithm to quantify uncertainty in areal limits. *CCG Annual Report*.
- Lajaunie, C., Courrioux, G., and Manuel, L. (1997). Foliation fields and 3d cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation. *Mathematical Geology*, 29(4):571–584.
- Madani, N. and Emery, X. (2015). Simulation of geo-domains accounting for chronology and contact relationships: application to the río blanco copper deposit. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 29(8):2173–2191.
- Mallet, J.-L. (2004). Space–time mathematical framework for sedimentary geology. *Mathematical geology*, 36(1):1–32.
- 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.

## Referências bibliográficas III

- Sadeghi, S. and Boisvert, J. (2012). Optimizing thresholds in truncated pluri-gaussian simulation. *CCG Annual Report*.
- Samson, M. and Deutsch, C. (2018). Estimation with machine learning. *CCG Annual Report*.
- Silva, D. and Deutsch, C. (2015). Speeding up the signed distance implicit geologic modeling method for multiple rock types. *CCG Annual Report*.
- Silva, D. and Deutsch, C. (2016). Hierarchical approach to truncated plurigaussian simulation. *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.