



Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Curso: Sensoriamento Remoto  
Disciplina: Análise Espacial de Dados Geográficos – SER301

---

# **Avaliação da distribuição espacial de Carbono Orgânico Total em solos do Semiárido por abordagens geoestatísticas**

Discente: Sharon Gomes Ribeiro

# 1. Introdução

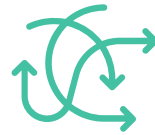
---

- Carbono orgânico total (COT): elemento indicador da qualidade do solo
  - Estabilidade física e melhoria nos parâmetros químicos
  - Substrato energético para a microfauna
  - "Sequestro de C" → reduz liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera
- COT constitui ≈ 58% da estrutura da matéria orgânica do solo
- Práticas de manejo e uso da terra contribuem para variação vertical e horizontal no solo
- **Geoestatística** ➡ forma eficiente de prever e mapear a variabilidade espacial das propriedades do solo

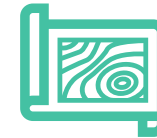
- Pesquisadores têm avaliado propriedades químicas do solo, como matéria orgânica, sob diferentes técnicas de **Krigagem**.



melhor **ferramenta de interpolação** para se obter informações a respeito da **distribuição espacial** das propriedades do solo.



capaz de estimar teores de atributos em **qualquer posição** dentro do terreno com **variância mínima de resíduos**



considera a **dependência espacial** entre amostras vizinhas

## Krigagem Ordinária (KO)

Método de estimativa linear

Identificar e mapear mudanças no teor do atributo

Previsão de valores em locais não observados, a partir de amostras coletadas

## Krigagem Indicativa (KI)

Não linear  
(transforma a variável em indicador binário)

Modelar a incerteza sobre COT em pontos desconhecidos

Probabilidade de ocorrência de determinado valor do atributo

- Parte significativa da região semiárida brasileira naturalmente apresenta baixos teores de carbono orgânico total.
- Conteúdo de COT pode reduzir (60-75%) em solos que passaram por modificações em seu uso.
- Técnicas de interpolação que fornecem a estimativa de distribuição espacial e probabilidade de ocorrência de atributos do solo são fundamentais no gerenciamento do uso da terra.

## 2. Objetivo

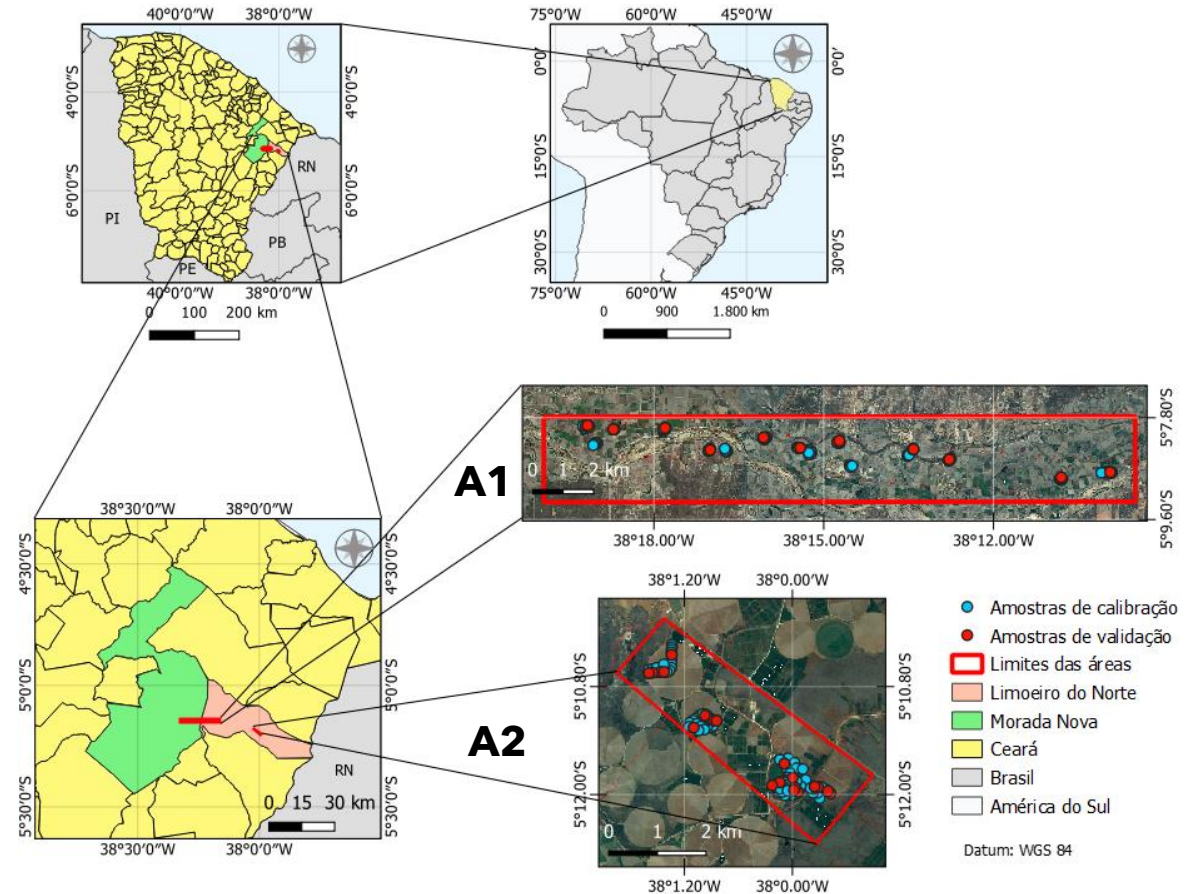
---

Estimativa e avaliação da variabilidade espacial de carbono orgânico total em diferentes solos do Semiárido Nordestino utilizando Krigagem Ordinária e Krigagem Indicativa

# 3. Material e métodos

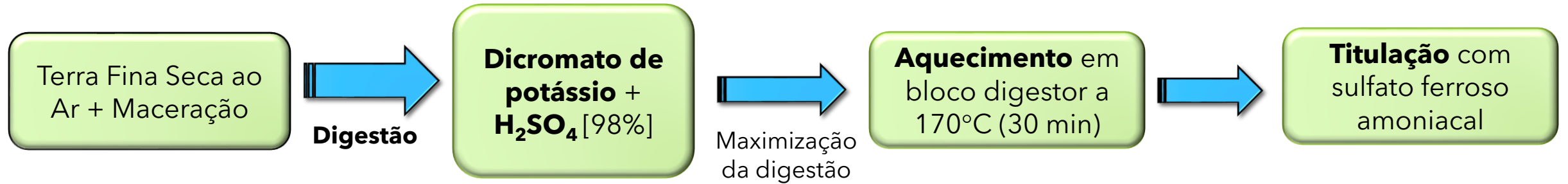
## 3.1 Área de estudo e amostragem

- Perímetros irrigados de Morada Nova (A1) e de Limoeiro do Norte (A2), no Ceará.
- A1: Neossolos Flúvicos com predomínio de areia; A2: Cambissolos, com predomínio de argila
- 183 amostras de solo (0-10 cm)
  - 84 em A1 e 99 em A2



## 3.2 Determinação do Carbono Orgânico do Solo

- Realizada em triplicata, através do procedimento de oxidação por via úmida.



$$A = \left[ \frac{(V_{ba} - V_{am})(V_{bn} - V_{ba})}{V_{bn}} \right] + (V_{ba} - V_{am})$$

$$\text{COT (dag. kg)} = \frac{(A)(\text{molaridade Sulf. Ferroso})(3)(100)}{\text{peso da amostra (mg)}}$$

Em que: A = % de COT com base no volume da solução gasto na titulação da amostra

V<sub>ba</sub> = volume gasto na titulação do branco controle com aquecimento;

V<sub>bn</sub> = volume gasto na titulação do branco controle sem aquecimento;

V<sub>am</sub> = Volume gasto na titulação da amostra;



### 3.3 Análise exploratória

- Estatística descritiva do teor de COT nos dois perímetros: média, mediana, desvio, coeficiente de variação, variância dos dados.
- Avaliação da normalidade pelos testes de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk (*p-value* a 5%).
- Avaliação da distribuição dos pontos no espaço.

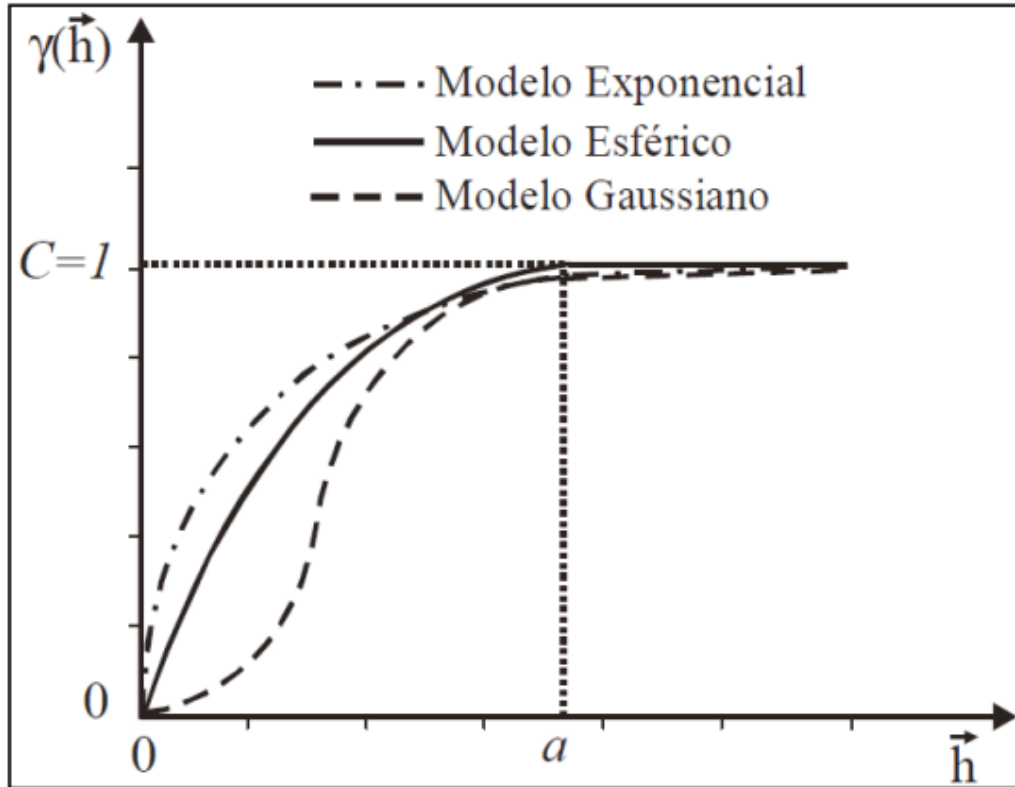
### 3.4 Análise geoestatística

- Semivariograma para variáveis com distribuição normal  $\gamma(h)$ :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

- **n(h)**: nº de pares em uma mesma distância h
- **Z(x<sub>i</sub>)** e **Z(x<sub>i</sub> + h)** : valores do atributo nas posições x<sub>i</sub> e x<sub>i</sub> + h, respectivamente

## ❑ Modelos de semivariogramas testados:



CAMARGO et al. (2004)

Em que,

$\gamma(h)$  = semivariância para uma dada distância  $h$ ;

$h$  = distância (m);

$C$  = variância de dados ou contribuição  $\geq C_0$ ;

$C_0$  = efeito pepita;

$a$  = alcance.

### 3.4.1 Krigagem Ordinária (KO)

- Produção de mapas preditivos de COT em pontos não observados a partir daqueles já amostrados;
- Atribuição de pesos a partir da covariância entre os dados espaciais, sob condição de que a somatória seja igual a 1.

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

- $\hat{Z}(x_0)$ : valor predito para o local  $x_0$  não amostrado;
- $\lambda_i$ : i-ésimo peso associado à variável observada na posição  $x_i$ ;
- $Z(x_i)$ : valores observados em campo.

## 3.4.2 Krigagem Indicativa (KI)

$$I(x_i; z_k) = \begin{cases} 1, & \text{se } Z(x_i) \geq z_k \\ 0, & \text{se } Z(x_i) < z_k \end{cases}$$

- $I(x_i; z_k)$  = variável indicadora binária na posição  $x_i$  para o limiar  $z_k$ ;
- $z_k$  = valor de corte (limiar);
- $Z(x_i)$  = valor observado de COT na posição  $x_i$ .

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [I(x_i; z_k) - I(x_i + h; z_k)]^2$$

- Testados diferentes modelos de semivariogramas para cada valor de corte com as variáveis indicativas (1 e 0)
- Estimativa da probabilidade de ocorrência dos teores de COT em limiares específicos;
- Cada amostra observada foi convertida em variável indicadora a partir de determinado limiar, gerando uma distribuição binária para o conjunto de dados.

## 3.4.2 Krigagem Indicativa

- Estratégias de limiares de COT para cada área de estudo:

A1 – Neossolo Flúvico	A2 – Cambissolo Háplico
$Z(x_i) < 1^{\circ}\text{quartil}$	$Z(x_i) < 1^{\circ}\text{quartil}$
$Z(x_i) < 2^{\circ}\text{quartil}$	$Z(x_i) < 2^{\circ}\text{quartil}$
$Z(x_i) < 3^{\circ}\text{quartil}$	$Z(x_i) < 3^{\circ}\text{quartil}$

Baseada na função  
de distribuição  
acumulada

A1 – Neossolo Flúvico	A2 – Cambissolo Háplico
$Z(x_i) < 6.3 \text{ g.kg}^{-1}$	$Z(x_i) < 12.2 \text{ g.kg}^{-1}$
<b><math>6.3 &lt; Z(x_i) \leq 12.3 \text{ g.kg}^{-1}</math></b>	<b><math>12.2 &lt; Z(x_i) \leq 14.22 \text{ g.kg}^{-1}</math></b>
$Z(x_i) > 12.3 \text{ g.kg}^{-1}$	$Z(x_i) > 14.22 \text{ g.kg}^{-1}$

Baseada nos valores  
ao redor da mediana

### 3.5 Validação cruzada e teste dos modelos

- Método *leave-one-out* foi utilizado após ajuste dos semivariogramas.
- Os parâmetros dos semivariogramas ajustados foram aplicados em dados inéditos (20% do conjunto de dados) e o desempenho foi avaliado a partir das seguintes métricas: **Erro Médio** (ME), **Erro Médio Absoluto** (MAE), **Raiz do Erro Quadrático Médio** (RMSE)
- Durante a validação foi realizada a observação e retirada de *outliers*.

$$RMSE = \sqrt{\sum_1^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / n}$$

$$MSE = \frac{1}{n} \times \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$MAE = \frac{1}{n} \times \sum_1^n |y_i - \hat{y}_i|$$

- $\hat{Y}_i$  = valor previsto na i-ésima observação;
- $Y_i$  = valor medido na i-ésima observação;
- **n** = número de pontos de validação.

## 3.6 Análise espacial do padrão de COT

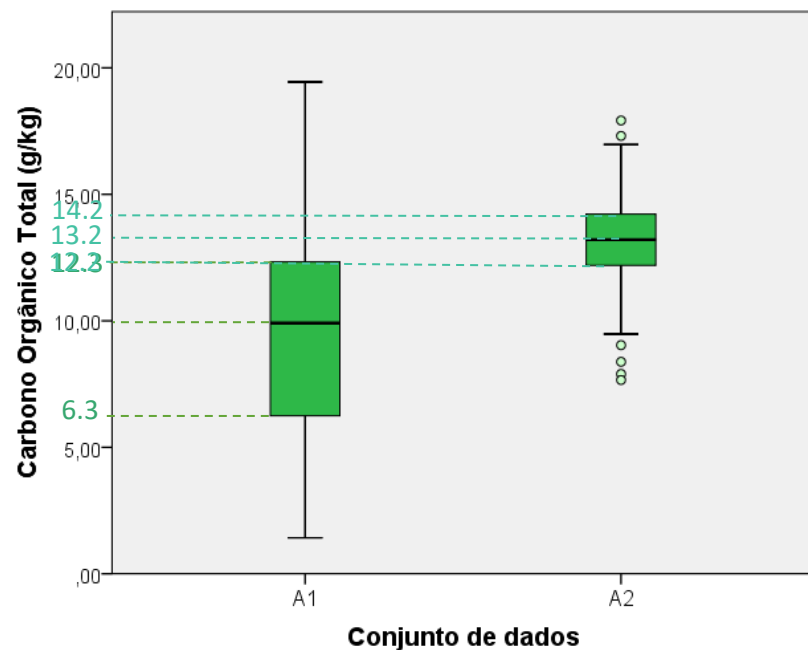
- Foi aplicado um **estimador Kernel** adaptativo com correção de borda para avaliação da intensidade de ocorrência de COT (g/kg) para cada limiar utilizado na KI.
- O procedimento serviu como resultado complementar a fim de melhorar a observação do comportamento espacial dos valores de corte nos perímetros de interesse.

## 3.7 Softwares

- Estatística descritiva, Krigagem Ordinária e Indicativa → Rstudio ("*sp*" e "*gstat*")
- Mapas de probabilidade → Rstudio ("*raster*") e Qgis 3.16
- Validação pixel/ponto → Qgis 3.16

# 4. Resultados

## 4.1 Estatísticas descritivas sobre o teor de carbono orgânico no solo

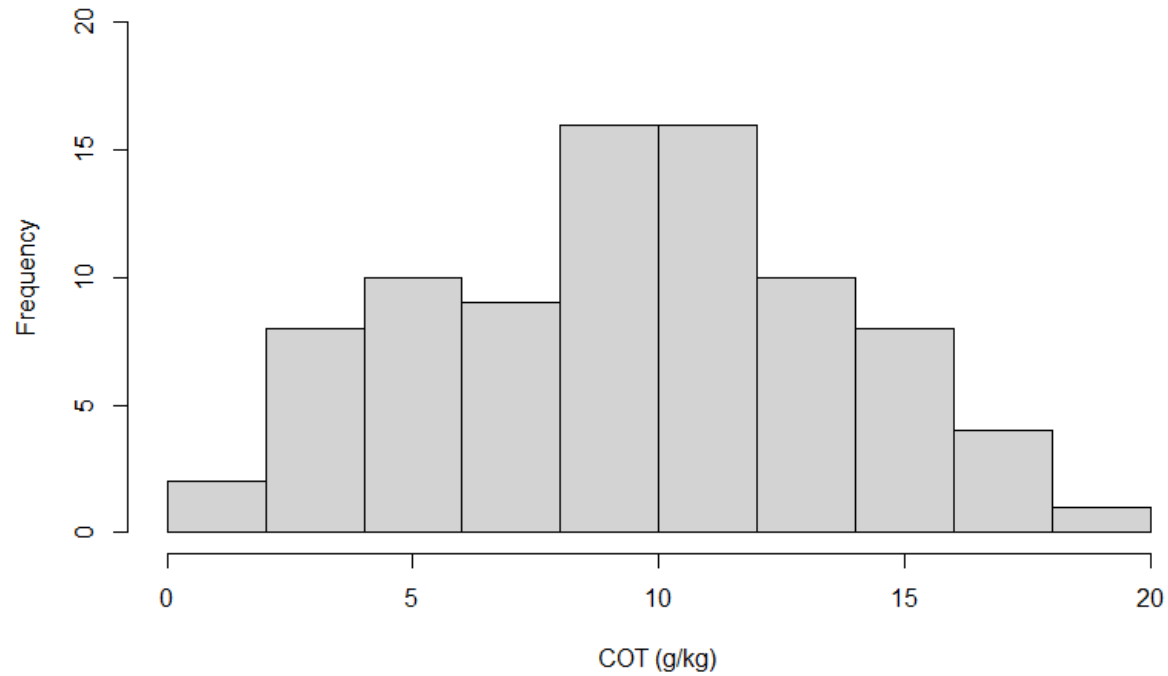


Parâmetros estatísticos	COT (g.kg <sup>-1</sup> )	
	A1	A2
Média	9.501	13.150
Mediana	9.910	13.210
Erro padrão	0.444	0.193
Desvio padrão	4.069	1.921
CV (%)	42.826	14.609
Variância da amostra	16.556	3.691
Curtose	-0.593	0.684
Assimetria	-0.031	-0.314
Intervalo	18.020	10.260
Mínimo	1.420	7.660
Máximo	19.440	17.920
Kolmogorov Smirnov	0.9048	0.6577
Shapiro Wilk	0.4604	0.2616

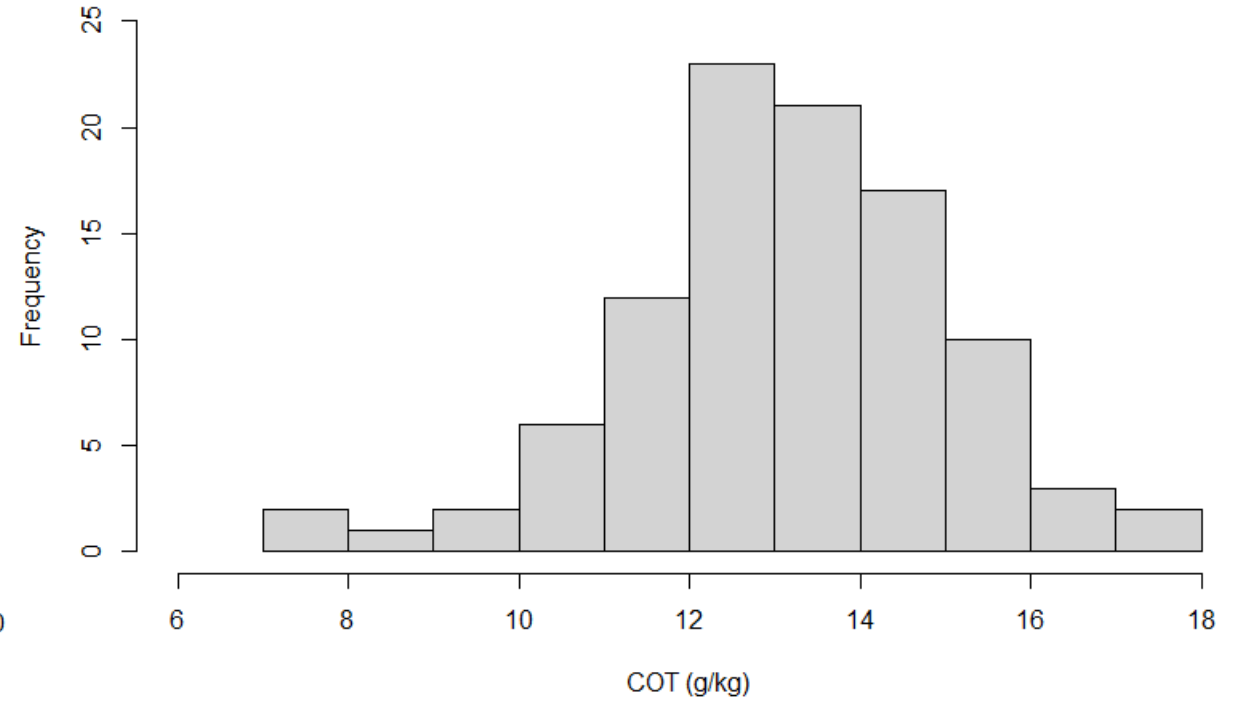


## 4.2 Normalidade dos dados

Histograma A1



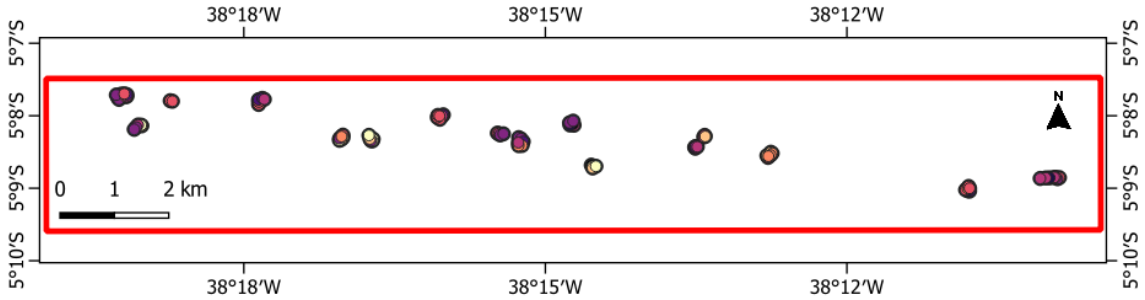
Histograma A2



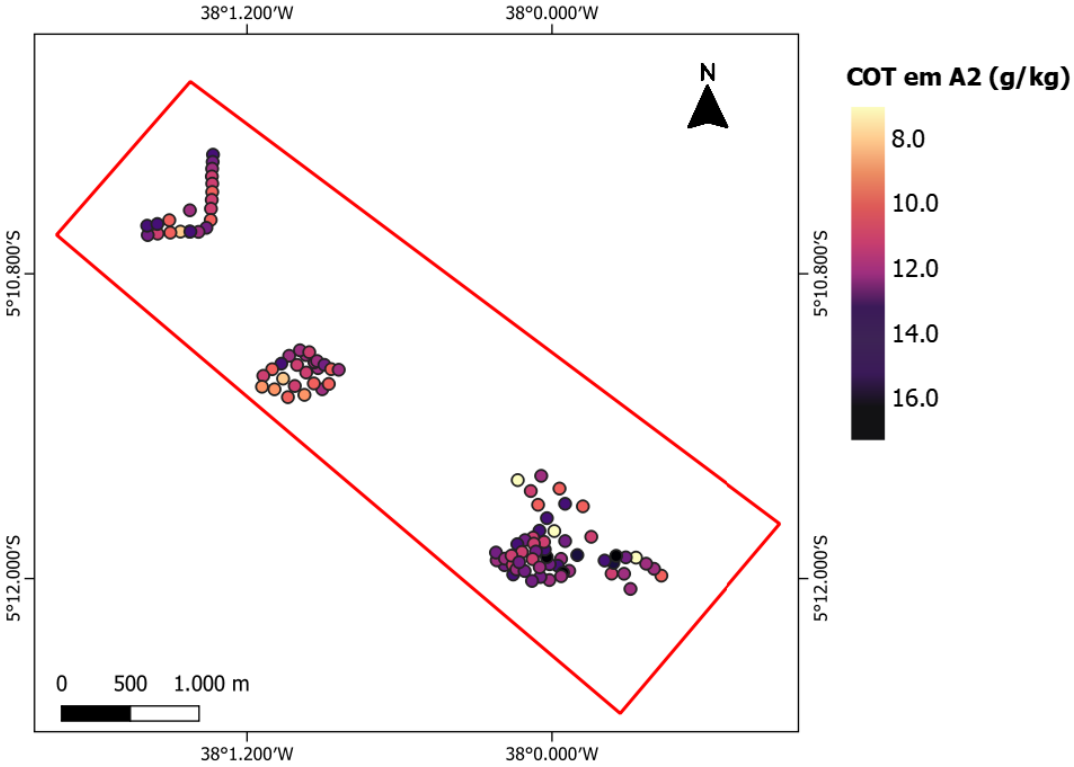
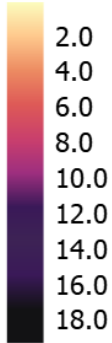
	A1	A2
Assimetria	-0.031	-0.314

Distribuição simétrica ( $-1 < \text{Ass.} < 1$ )

# 4.3 Distribuição dos pontos de COT



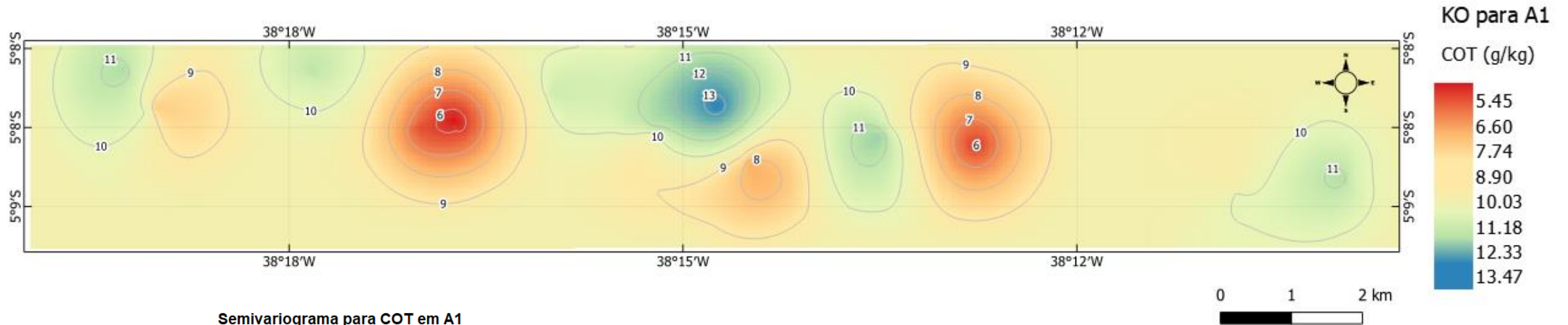
COT em A1 (g/kg)



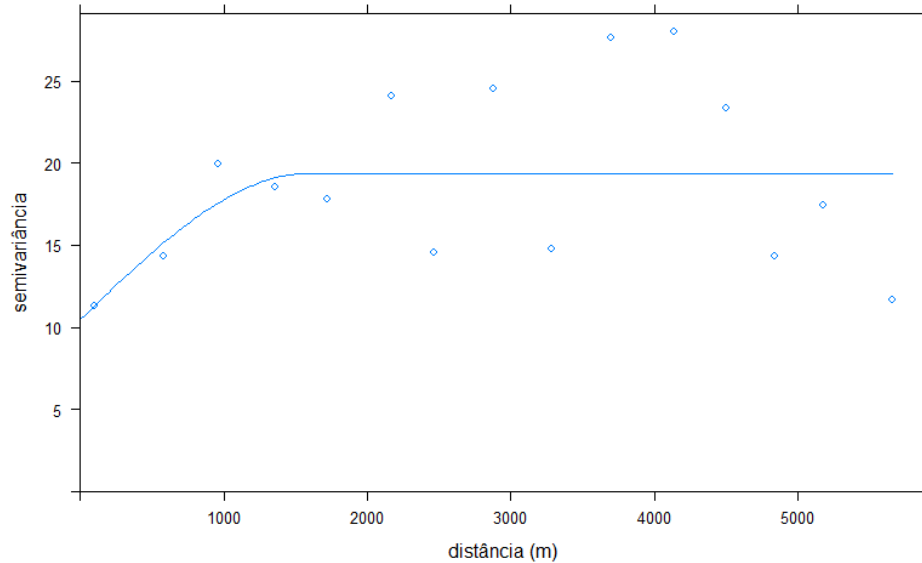
COT em A2 (g/kg)



# 4.3 Krigagem Ordinária



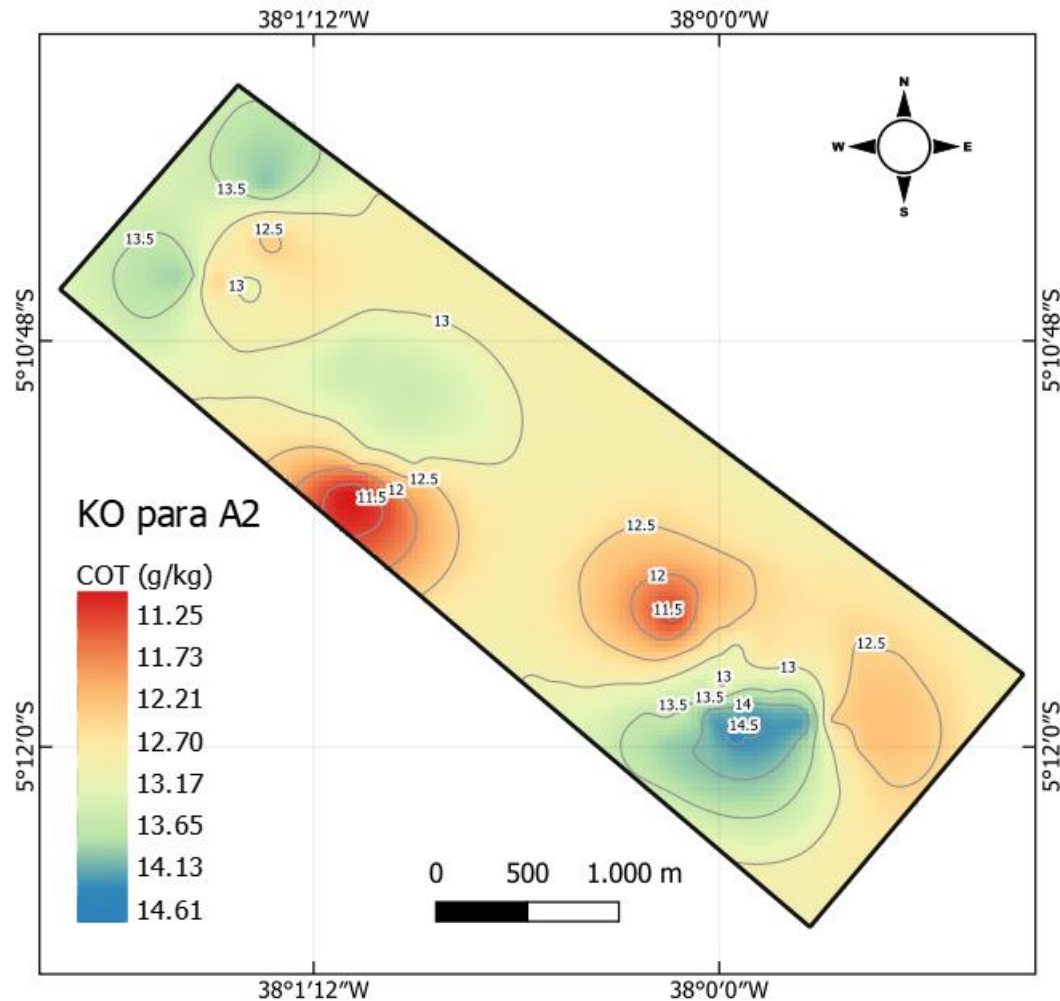
Semivariograma para COT em A1



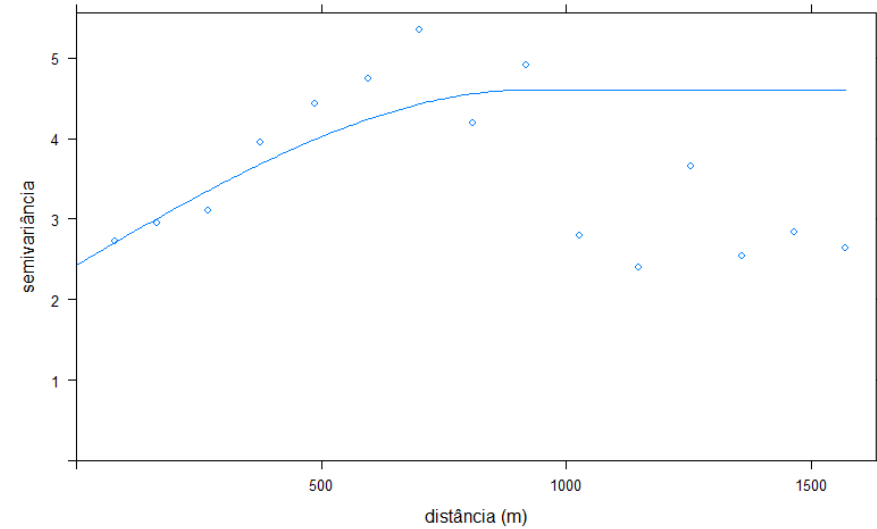
- Modelo: Esférico
- Efeito pepita ( $C_0$ ) = 10,464
- Patamar ( $C_0 + C$ ) = 19,355
- Alcance = 1584,14 m

RMSE (g/kg)	MAE (g/kg)	MSE (g/kg)
2.22	0.688	4.92

## 4.3 Krigagem Ordinária



Semivariograma para COT em A2



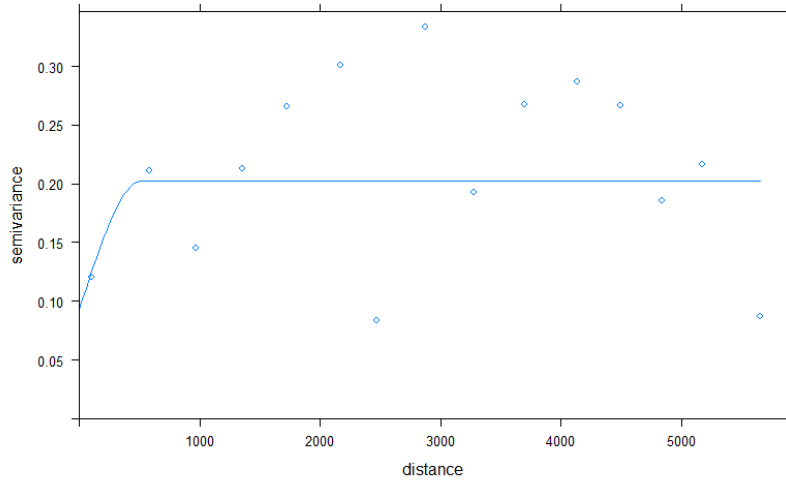
- Modelo: Esférico
- Efeito pepita ( $C_0$ ) = 2,431
- Patamar ( $C_0 + C$ ) = 4,604
- Alcance = 926,5 m

RMSE	MAE	MSE
(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)
<b>1.23</b>	0.36	1.50

# 4.4 Krigagem Indicativa

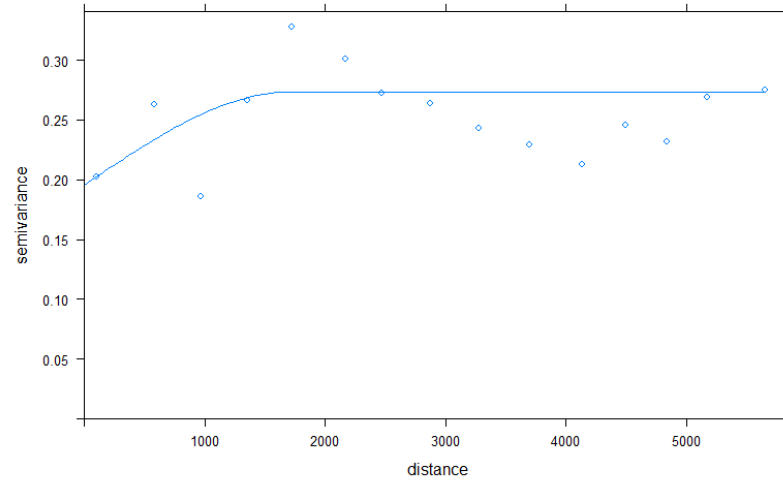
➤ A1

Semivariograma para COT < 6.3 g/kg



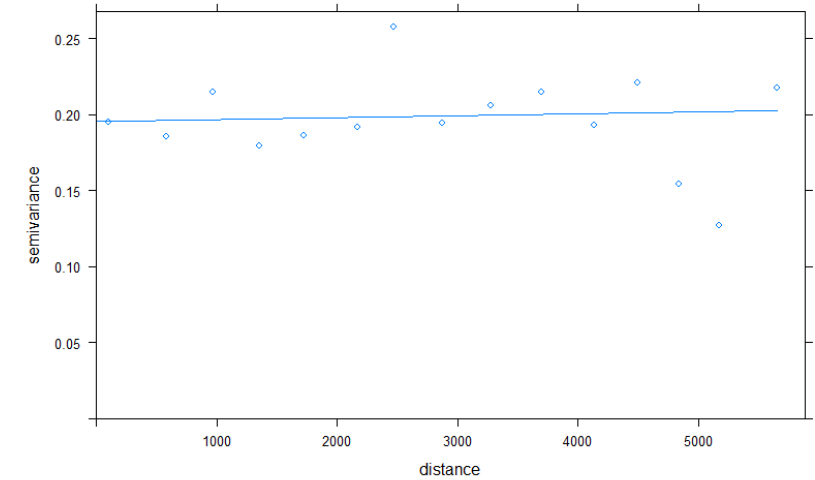
- Modelo: Esférico
- Efeito pepita ( $C_0$ ) = 0,093
- Patamar ( $C_0 + C$ ) = 0,2025
- Alcance = 516,4 m

Semivariograma para COT entre 6.3 - 12.3 g/kg



- Modelo: Esférico
- Efeito pepita ( $C_0$ ) = 0,195
- Patamar ( $C_0 + C$ ) = 0,273
- Alcance = 1714,02 m

Semivariograma para COT > 12.3 g/kg

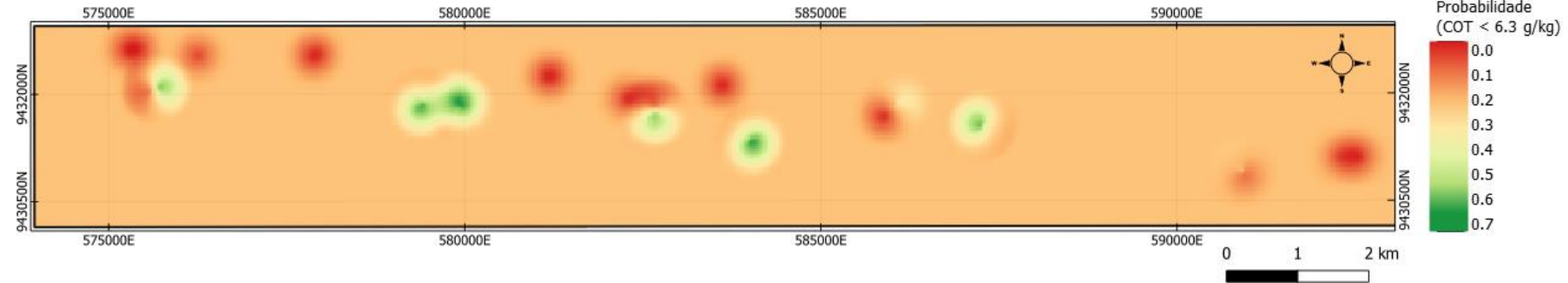


- Efeito pepita puro
- Independência espacial (distribuição casual e variabilidade não explicada)*

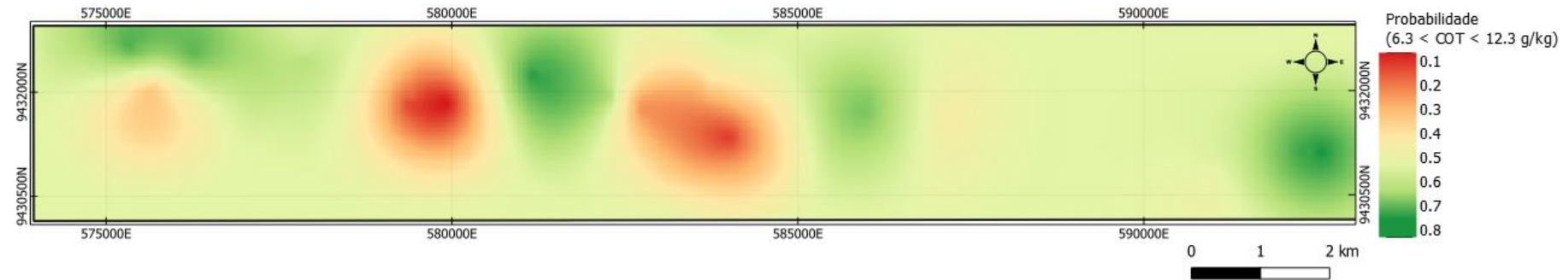
## 4.4 Krigagem Indicativa

➤ A1

<b>COT &lt; 6.3 g/kg</b>	<b>Esférico</b>
<b>RMSE (g/kg)</b>	<b>3.53</b>
<b>MSE (g/kg)</b>	<b>12.44</b>
<b>MAE (g/kg)</b>	<b>0.022</b>



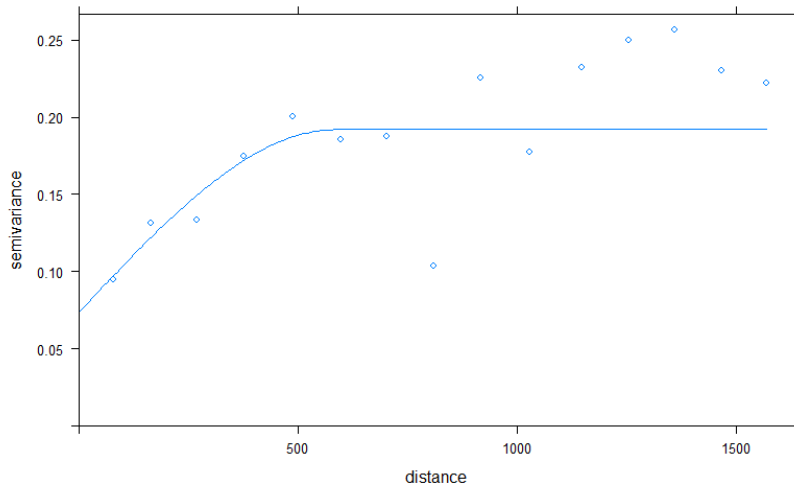
<b>6.3 &lt; COT &lt; 12.3 g/kg</b>	<b>Esférico</b>
<b>RMSE (g/kg)</b>	<b>3.69</b>
<b>MSE (g/kg)</b>	<b>13.62</b>
<b>MAE (g/kg)</b>	<b>0.048</b>



## 4.4 Krigagem Indicativa

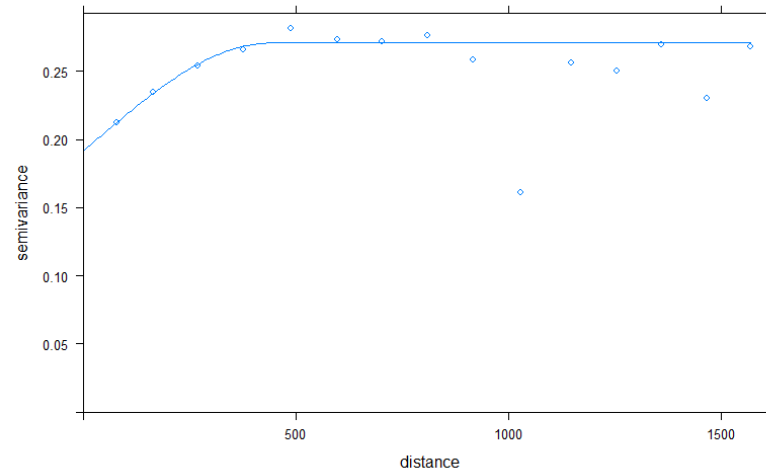
➤ A2

Semivariograma para COT < 12.2 g/kg



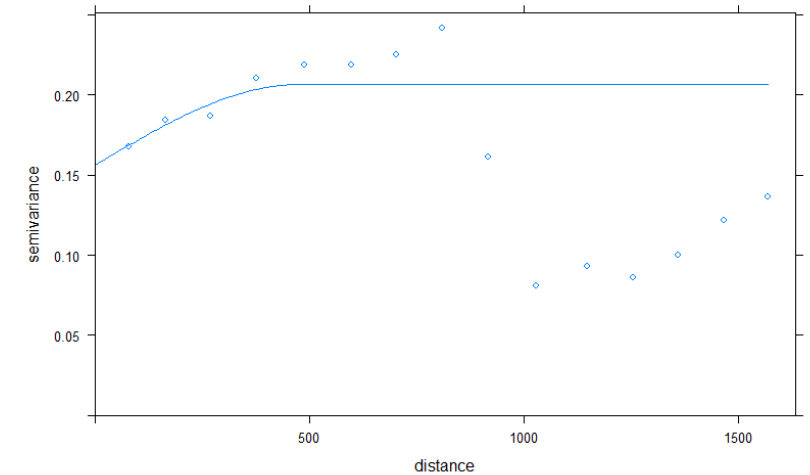
- Modelo: Esférico
- Efeito pepita ( $C_0$ ) = 0,0736
- Patamar ( $C_0 + C$ ) = 0,1920
  - Alcance = 585,3 m

Semivariograma para COT entre 12.2 - 14.22 g/kg



- Modelo: Esférico
- Efeito pepita ( $C_0$ ) = 0,1915
- Patamar ( $C_0 + C$ ) = 0,2705
  - Alcance = 439,9 m

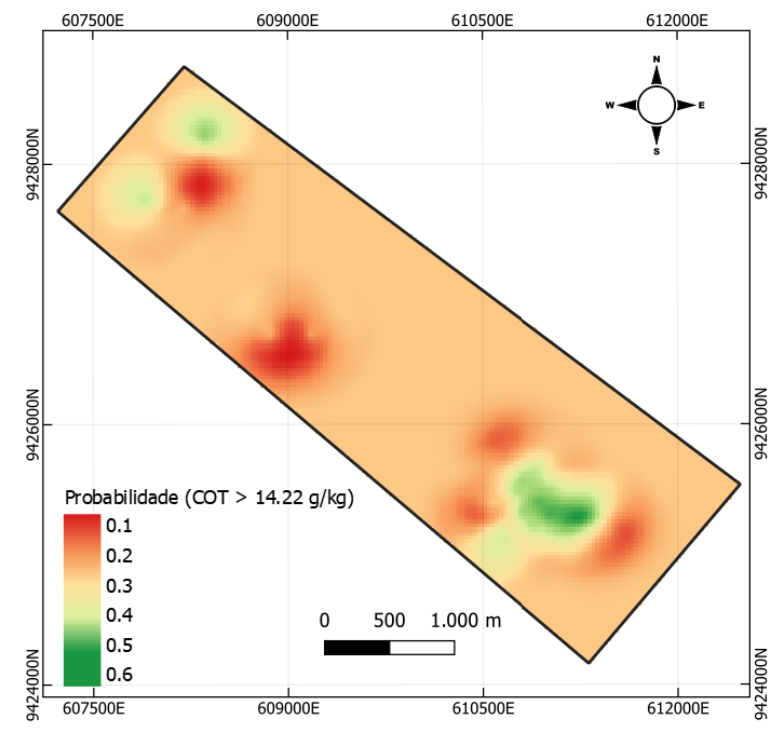
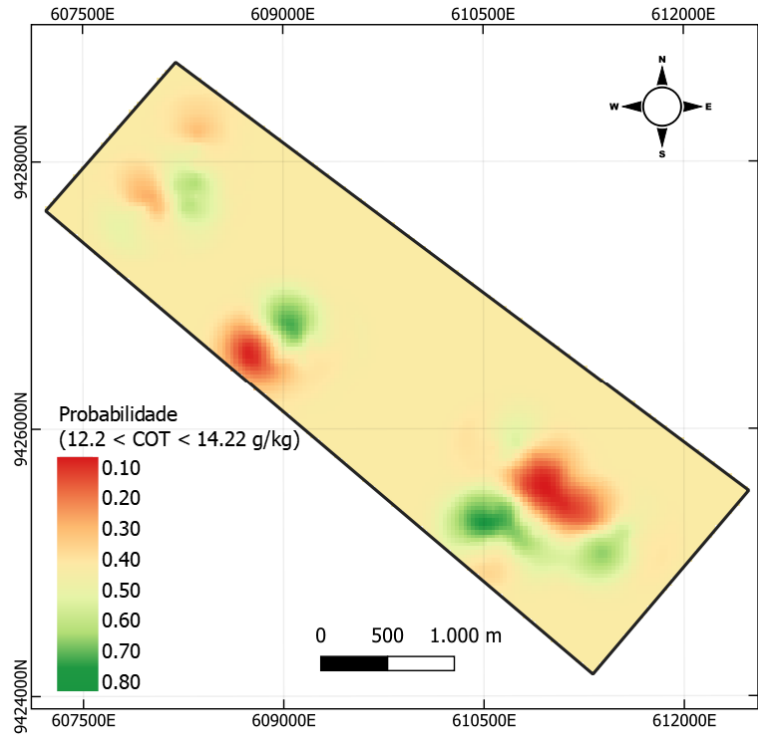
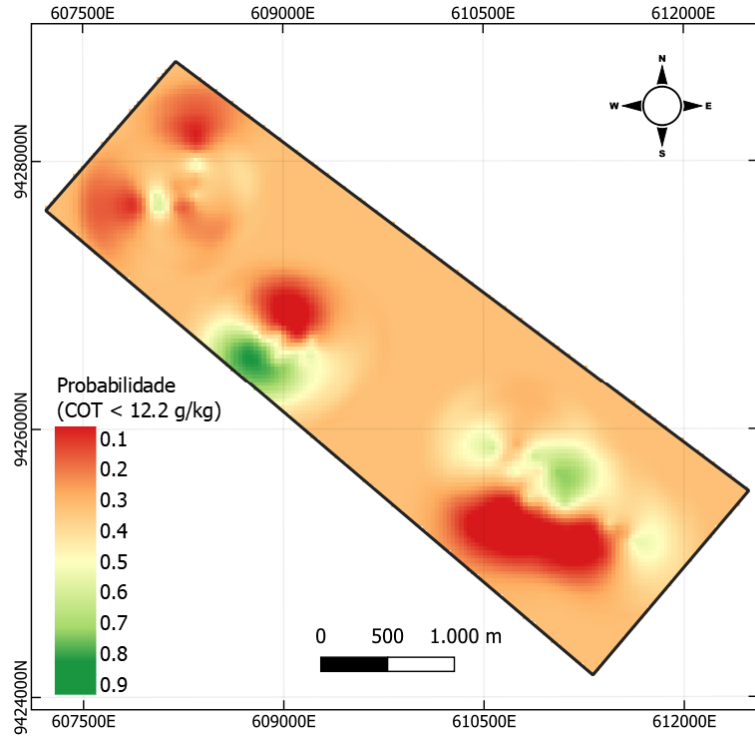
Semivariograma para COT > 14.22 g/kg



- Modelo: Esférico
- Efeito pepita ( $C_0$ ) = 0,1561
- Patamar ( $C_0 + C$ ) = 0,2062
  - Alcance = 473,9 m

# 4.4 Krigagem Indicativa

➤ A2



**COT < 12.2 g/kg      Esférico**

RMSE (g/kg)      1.83  
 MSE (g/kg)      3.34  
 MAE (g/kg)      0.032

**12.2 < COT < 14.22 g/kg      Esférico**

RMSE (g/kg)      1.84  
 MSE (g/kg)      3.37  
 MAE (g/kg)      0.070

**COT > 14.22 g/kg      Esférico**

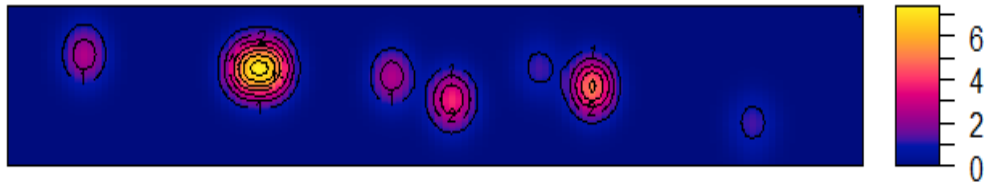
RMSE (g/kg)      1.89  
 MSE (g/kg)      3.56  
 MAE (g/kg)      0.025



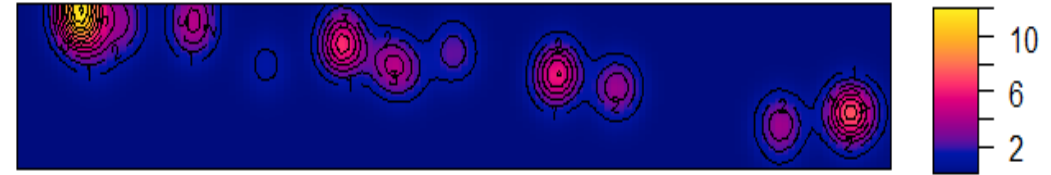
## 4.5 Análise espacial dos pontos amostrados

➤ A1

Distribuição de pontos com COT < 6.3 g/kg

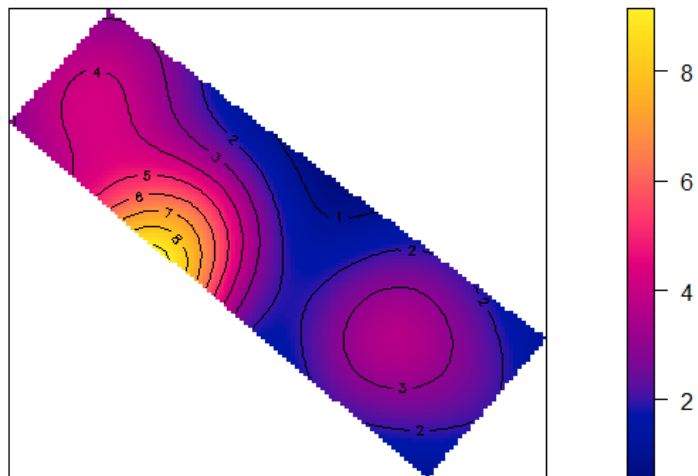


Distribuição de pontos com COT entre 6.3 e 12.3 g/kg

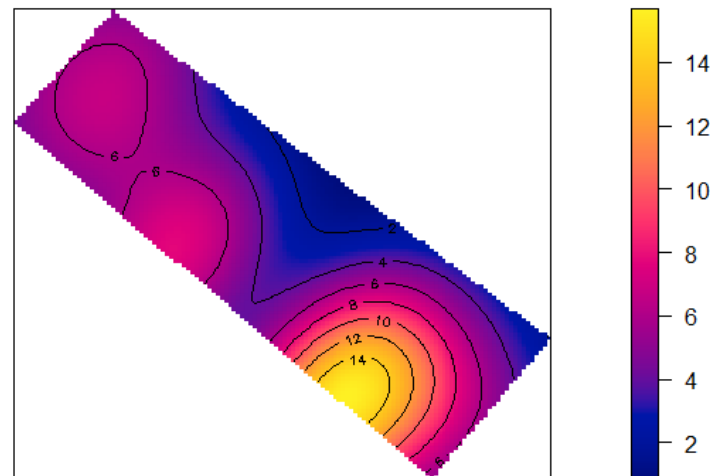


➤ A2

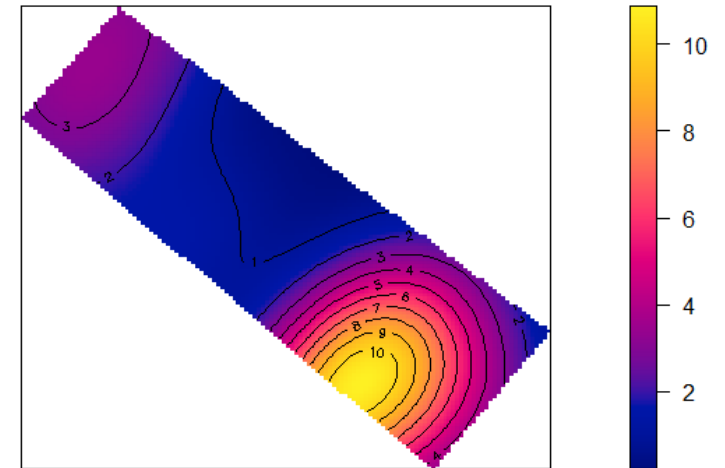
Distribuição de pontos com COT < 12.2 g/kg



Distribuição de pontos com COT entre 12.2 e 14.22 g/kg



Distribuição de pontos com COT > 14.22 g/kg



# 5. Conclusões

---

1. A **Krigagem Ordinária** se mostrou eficiente na estimativa de COT para as duas regiões com solos e variações diferentes dos elementos.
2. A **Krigagem Indicativa** apresentou resultados consistentes à ocorrência dos teores de COT observados em campo, refletindo sua capacidade de aplicação como técnica complementar à geoestatística linear.
3. Tanto a **Krigagem Ordinária** quanto a **Krigagem Indicativa** apresentaram melhores resultados na distribuição de COT em Cambissolos (A2) mais homogêneos para o elemento.
4. A **intensidade da amostragem** pode influenciar na resposta da Krigagem Indicativa, portanto, se faz necessário utilizar pontos de coleta com distribuição mais regular do que agrupada.