

AULA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Análise Espacial aplicada à Agricultura de Precisão

Geoestatística, semivariogramas e interpolação
por krigagem

Mestrado e Doutorado em Produção Vegetal

ESTRUTURA • ESCALA • INCERTEZA

Do dado georreferenciado à decisão

A análise espacial torna explícita a **variabilidade intratalhão**, transforma medidas pontuais em evidência espacial e apoia decisões que podem ser verificadas em campo.

- 01 Reconhecer estrutura espacial**
Distinguir variabilidade organizada, tendência e ruído em atributos de solo, planta e produtividade.
- 02 Modelar e validar previsões**
Interpretar semivariogramas, selecionar modelos e avaliar desempenho preditivo.
- 03 Comunicar incerteza**
Usar superfícies estimadas e mapas de incerteza para apoiar intervenções localizadas.

CADEIA DE RACIOCÍNIO ESPACIAL

Pergunta agrônômica

Qual decisão será apoiada?



Amostragem e qualidade

Onde, como e com qual suporte medir?



Modelo espacial

Que padrão de continuidade os dados revelam?



Decisão verificável

Qual ação, risco e retorno podem ser avaliados?

Variabilidade intratalhão tem escalas distintas

Um mesmo atributo pode apresentar gradientes de paisagem e variação de curta distância. **O espaçamento de amostragem precisa enxergar a escala relevante para a decisão.**

Macroescala

PROCESSOS AMPLOS



Relevo, material de origem, drenagem e posição na paisagem podem estruturar padrões persistentes.

Mesoescala

PADRÕES INTRATALHÃO



Histórico de manejo, gradientes de fertilidade, colheita e compactação podem formar zonas funcionais.

Microescala

VARIAÇÃO LOCAL



Agregação do solo, erro de medida e heterogeneidade próxima do ponto elevam o efeito pepita.

IMPLICAÇÃO METODOLÓGICA

Para detectar estrutura curta, o espaçamento precisa ser menor do que a escala de continuidade que se deseja caracterizar.

Para decidir em faixas maiores, a superfície final deve respeitar suporte, operação e retorno econômico — não apenas a resolução visual do mapa.

Dependência espacial muda a análise

Uma observação é mais do que um valor: ela é um valor **medido em um suporte** e na posição espacial $s = (x, y)$.

Suportes distintos

Pontos (amostras de solo, monitor de colheita), **linhas** (transectos), **polígonos** (talhões) e **grades** (imagens) não têm a mesma escala nem a mesma interpretação.

Autocorrelação espacial

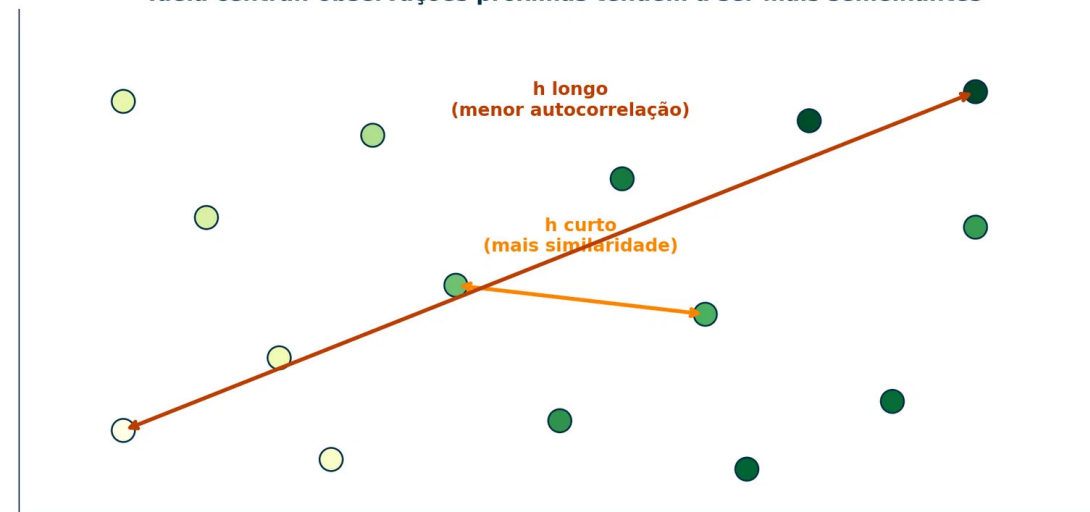
Valores próximos podem ser mais semelhantes que valores distantes. A relação decai com a distância — e, por vezes, muda com a direção.

Alerta de inferência

Tratar observações espacialmente dependentes como independentes pode subestimar incertezas e induzir **pseudorrepetição**.

Proximidade é uma hipótese mensurável

Ideia central: observações próximas tendem a ser mais semelhantes



Esquema didático: o valor observado em cada ponto é representado apenas para explicar a noção de continuidade espacial.

Esquema didático próprio: distâncias curtas tendem a conter mais informação mútua do que distâncias longas.

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s)$$

A variável espacial pode ser decomposta em tendência determinística $\mu(s)$ e componente residual $\varepsilon(s)$ espacialmente correlacionada. [5]

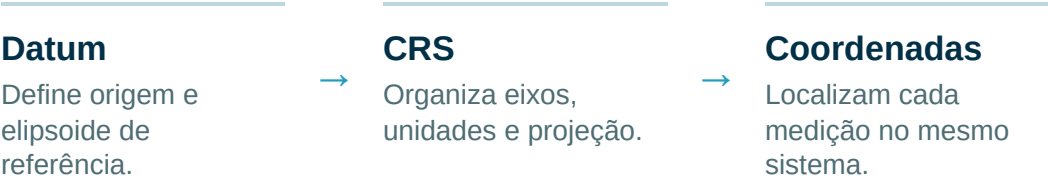
Ponto de partida: a primeira lei da geografia orienta a exploração; o semivariograma testa e quantifica a continuidade observada.

Coordenadas e suporte condicionam a comparação

Dois valores só são espacialmente comparáveis se sua localização, unidade e suporte forem conhecidos. **Erros de referência espacial podem simular padrões inexistentes.**

Referência espacial

O sistema de coordenadas e a projeção devem ser documentados e coerentes com a extensão da área e com as unidades de distância usadas no variograma.



Suporte de observação

Um ponto de laboratório, uma faixa de colheita e um pixel não representam a mesma unidade de suporte; profundidade e época também alteram o significado do valor.

Solo	Volume, profundidade, método de coleta e preparo da amostra.
Sensor	Área instantânea de visada, resolução, calibração e momento da aquisição.
Colheita	Largura da plataforma, atraso, limpeza de dados e agregação espacial.

Moran e LISA revelam padrões complementares

Autocorrelação global

O índice de Moran resume se valores semelhantes tendem a se agrupar em toda a área, considerando uma matriz de pesos espaciais W .

$$I = n / S_0 \cdot \sum_i \sum_j w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z}) / \sum_i (z_i - \bar{z})^2$$

I positivo sugere agrupamento de valores semelhantes; I negativo sugere dispersão. A interpretação depende da definição de vizinhança e de teste por permutação.

Autocorrelação local: onde está o padrão?

H–H

Alto–Alto

Valor alto cercado por valores altos: possível núcleo de maior fertilidade, produtividade ou risco.

L–L

Baixo–Baixo

Valor baixo cercado por baixos: possível área problemática ou gradiente persistente.

H–L

Alto–Baixo

Outlier espacial: investigar erro, transição abrupta ou processo local singular.

L–H

Baixo–Alto

Outlier espacial: exige checagem de suporte, campo e vizinhança adotada.

USO ADEQUADO

Moran e LISA descrevem organização espacial, não substituem o variograma. Use-os para explorar agrupamentos e hipóteses; use a geoestatística para modelar continuidade e prever valores em locais não observados.

Métodos de interpolação não são equivalentes

Interpolar é estimar valores em locais não amostrados. A escolha deve refletir **o processo espacial, o desenho amostral e a validação** — não a preferência por um botão do software.

MÉTODO	PREMISSA DOMINANTE	COMPORTAMENTO DA SUPERFÍCIE	INCERTEZA EXPLÍCITA?	USO CAUTELOSO EM AP
Vizinho natural DETERMINÍSTICO	Geometria local dos pontos próximos.	Local; suaviza entre vizinhos e respeita a tesselação dos dados.	Não, como produto nativo.	Exploração rápida com amostragem relativamente densa e bem distribuída.
IDW DETERMINÍSTICO	Proximidade define pesos; potência controla o decaimento.	Tende a reproduzir os pontos e pode gerar “olhos de boi”.	Não; depende de p, raio e número de vizinhos.	Comparador simples; não substitui teste de desempenho.
Spline DETERMINÍSTICO	Superfície contínua com penalização de curvatura.	Muito suave; pode introduzir oscilação ou sobre-elevação.	Não, em sua forma usual.	Gradientes suaves, sempre com inspeção de artefatos.
Krigagem GEOESTATÍSTICO	Autocorrelação modelada por variograma ou covariância.	Pesos dependem de distância, direção e estrutura espacial.	Sim: variância ou desvio-padrão de krigagem.	Atributos regionalizados com variograma e validação adequados.

$$\hat{Z}(s_0) = \sum w_i \cdot Z(s_i) \quad | \quad w_i \propto d_i^{-p}$$

No IDW, os pesos são função da distância. Na krigagem, eles também dependem da estrutura de dependência espacial.

Regra de decisão: compare candidatos sob o mesmo conjunto de validação. Prefira o método com desempenho preditivo compatível com o processo, superfície plausível e limitações comunicadas com transparência.

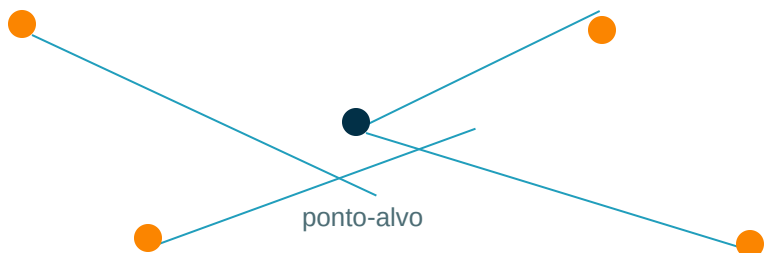
Fonte conceitual: Esri, *What are the different kriging models?*. IDW, spline e vizinho natural são métodos determinísticos; a krigagem incorpora um modelo probabilístico de dependência espacial.

IDW responde à potência e à vizinhança

No inverso da distância, pesos maiores são atribuídos a observações próximas. A superfície resultante é **altamente sensível aos parâmetros escolhidos**.

$$w_i = d_i^{-p} / \sum_j d_j^{-p}$$

e $\hat{Z}(s_0) = \sum_i w_i Z(s_i)$. Os pesos somam 1, mas não usam uma estrutura explícita de covariância.



Três alavancas alteram o mapa

Potência p

p maior: maior dominância dos vizinhos imediatos e maior risco de padrões concêntricos ao redor das amostras.

Raio de busca

Raio curto: reforça a localidade, mas pode deixar vazios; **raio longo:** suaviza e incorpora observações distantes.

Nº de vizinhos

Controla estabilidade local e custo computacional. Poucos vizinhos podem amplificar ruído; muitos reduzem contraste local.

Barreiras

Vizinhança euclidiana pode ser inadequada quando existem limites físicos ou processos direcionais relevantes.

Boa prática: testar p , raio e vizinhança sob validação cruzada, preservando a mesma base de comparação para outros interpoladores.

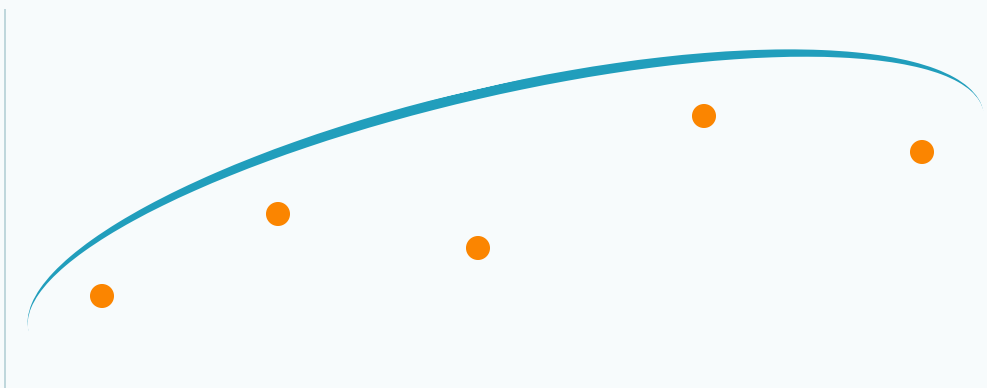
Limite conceitual: um bom desempenho empírico não transforma IDW em modelo de incerteza; a saída nativa não é uma variância de previsão.

Superfícies suaves também podem enganar

Splines estimam uma superfície contínua sob uma penalização de curvatura. Essa suavidade pode ser desejável — mas **não é evidência de que o processo seja suave**.

Princípio: ajustar e penalizar curvatura

O modelo equilibra aderência aos dados e regularidade da superfície. A escolha entre interpolação exata e aproximada muda quanto cada ponto é reproduzido.



Onde a interpretação exige cautela

- 1 Oscilação local**
Curvas suaves podem exceder valores observados ou criar máximos/mínimos artificiais entre pontos escassos.
- 2 Extrapolação de bordas**
Em áreas sem suporte amostral, a forma da superfície é mais uma consequência do algoritmo do que uma informação observada.
- 3 Escala errada**
Uma superfície agradável pode mascarar transições reais de curta distância, especialmente com malha muito esparsa.
- 4 Sem incerteza nativa**
Na forma usual, não entrega uma variância de previsão comparável à da krigagem.

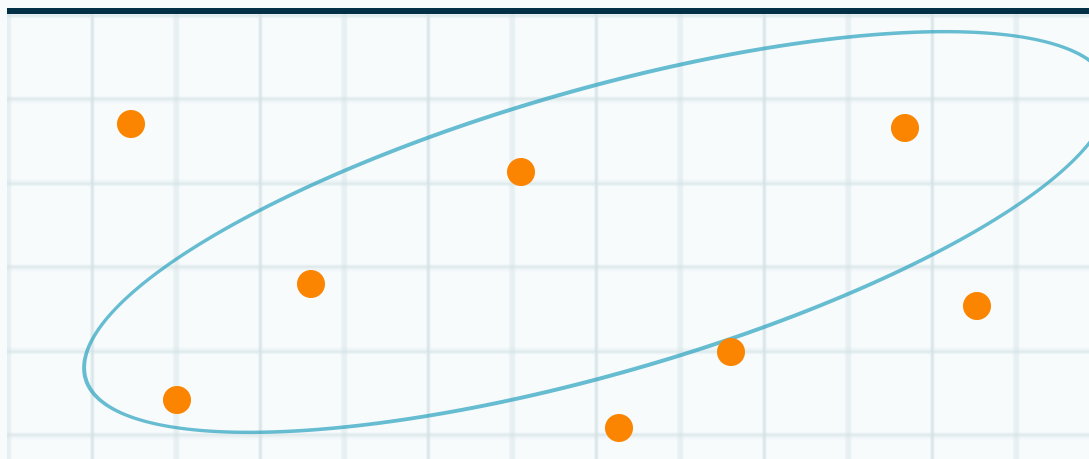
USO CRITERIOSO

Comparar, não assumir: use spline como candidato quando há fundamento para continuidade suave; valide contra alternativas e investigue visualmente excedências, bordas e coerência agrônômica.

A amostragem define o limite do mapa

A resolução de saída pode ser de 1 m, mas a **resolução de informação** é limitada pelo suporte, pelo espaçamento e pela qualidade das observações coletadas.

ESCALA ESPACIAL COMEÇA NA PERGUNTA



Espaçamento, direção e suporte devem ser coerentes com a escala em que o atributo varia e com a escala da decisão de manejo.

Pergunta operacional: a grade proposta consegue capturar a estrutura espacial antes que a continuidade se perca?

EVIDÊNCIA APLICADA

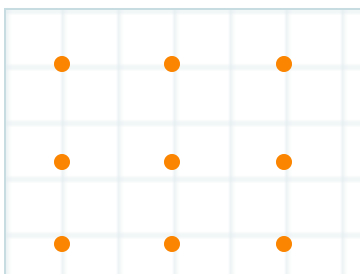
Em cana-de-açúcar, grades mais esparsas e menor número de pontos aumentaram o erro de estimativa por krigagem; a conclusão prática é que **densidade amostral deve ser compatível com o atributo e o talhão**, não uma regra fixa. [3]

ROTEIRO MÍNIMO DE PRÉ-ANÁLISE

- 1 Auditar localização e suporte**
Verificar CRS, coordenadas, duplicatas, unidades, profundidade, método de coleta e coerência temporal.
- 2 Examinar distribuição e outliers**
Inspeccionar histograma, assimetria, amplitude plausível e valores extremos com justificativa agrônômica — não apenas estatística.
- 3 Investigar tendência e direção**
Mapear a variável, observar gradientes e comparar direções antes de assumir estacionaridade ou isotropia.
- 4 Planejar a validação**
Definir modelos candidatos e métricas de desempenho antes de escolher o interpolador final.

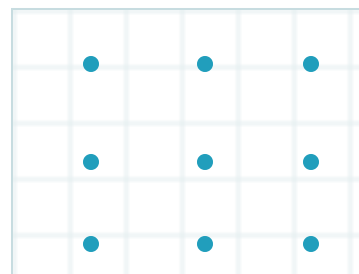
O desenho amostral depende do processo

Não existe uma grade universalmente ótima. O desenho deve equilibrar **representatividade, custo, acessibilidade e a escala de continuidade esperada.**



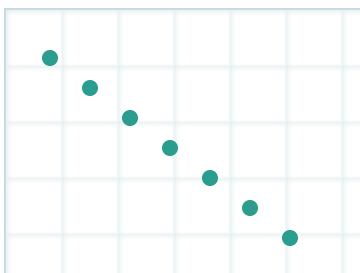
Malha regular

Força: cobertura uniforme e comparação direta entre locais. **Limite:** pode desperdiçar pontos em áreas homogêneas e perder transições quando a grade é larga.



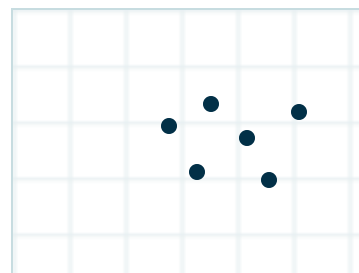
Estratificada

Força: aloca esforço por zona definida por relevo, solo, CEA ou histórico. **Limite:** depende da qualidade da estratificação prévia.



Transectos

Força: eficientes para gradientes suspeitos, toposequências e estudos exploratórios. **Limite:** podem não representar variação perpendicular ao traçado.



Adaptativa

Força: adiciona pontos onde há maior incerteza ou mudança. **Limite:** exige desenho em fases e pode complicar inferência se não for documentada.

PRINCÍPIO DE ESCOLHA

Amostre para a pergunta, não para o software. O variograma preliminar, a heterogeneidade observada e o custo marginal de novas amostras ajudam a definir onde a densidade deve aumentar.

O semivariograma traduz continuidade espacial

$$\hat{\gamma}(h) = [1 \div 2N(h)] \times \sum \{ Z(s_i) - Z(s_i + h) \}^2$$

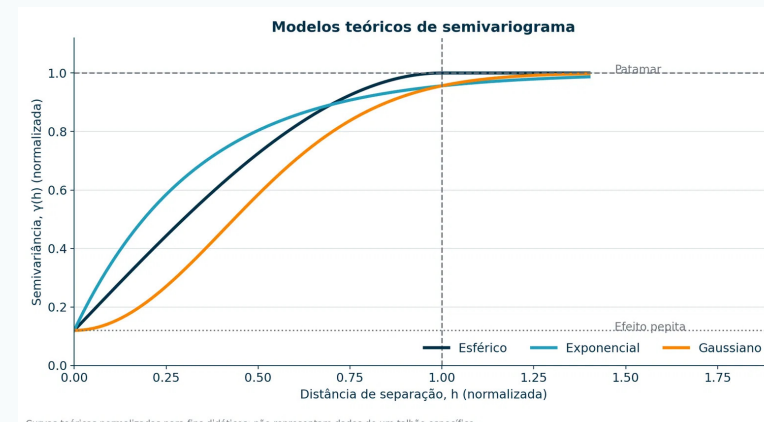
h é o vetor de separação; $N(h)$ é o número de pares no lag; $Z(s)$ é o valor observado na posição espacial s .

O semivariograma resume como a diferença média entre observações cresce à medida que a separação espacial aumenta.

LEITURA OPERACIONAL

Defina **lags**, tolerância de distância e número mínimo de pares. O semivariograma experimental orienta a escolha do modelo, mas precisa ser confrontado com diagnóstico de dados e validação preditiva.

Modelos teóricos e parâmetros estruturais



Curvas normalizadas para comparação didática. A escolha depende da forma experimental, do processo agrônomo e do desempenho de previsão.

Efeito pepita, C_0

Variação muito próxima de $h = 0$: erro de medição, microvariabilidade ou ambos.

Contribuição, C

Parcela de variância associada à estrutura espacial modelada.

Patamar, $C_0 + C$

Semivariância aproximada quando a continuidade se perde.

Alcance, a

Escala de influência espacial; orienta o espaçamento amostral.

Tendência e distribuição devem ser tratadas

A estacionaridade é uma hipótese sobre a componente espacial modelada. Quando há tendência, o variograma bruto pode refletir gradiente e não continuidade residual.

1. Tendência

Gradientes sistemáticos podem resultar de relevo, drenagem, material de origem, operações ou bordas de manejo.

Pergunta diagnóstica

O mapa e os gráficos contra coordenadas revelam mudança sistemática da média? **Se sim**, modelar a tendência ou analisar resíduos.

2. Distribuição

Assimetria, caudas longas e limites físicos influenciam estimativas e interpretação de erros.

Resposta possível

Avaliar transformação (por exemplo, log ou Box–Cox), mantendo interpretação agronômica e retrotransformação apropriada.

3. Valores extremos

Um outlier pode indicar erro, condição rara ou microambiente real; removê-lo automaticamente perde informação.

Resposta responsável

Auditar coordenada, unidade, protocolo e contexto de campo. **Documentar** qualquer exclusão ou winsorização.

$$Z(s) = m(s) + \varepsilon(s)$$

Modelar $m(s)$ quando necessário; avaliar o semivariograma de $\varepsilon(s)$.

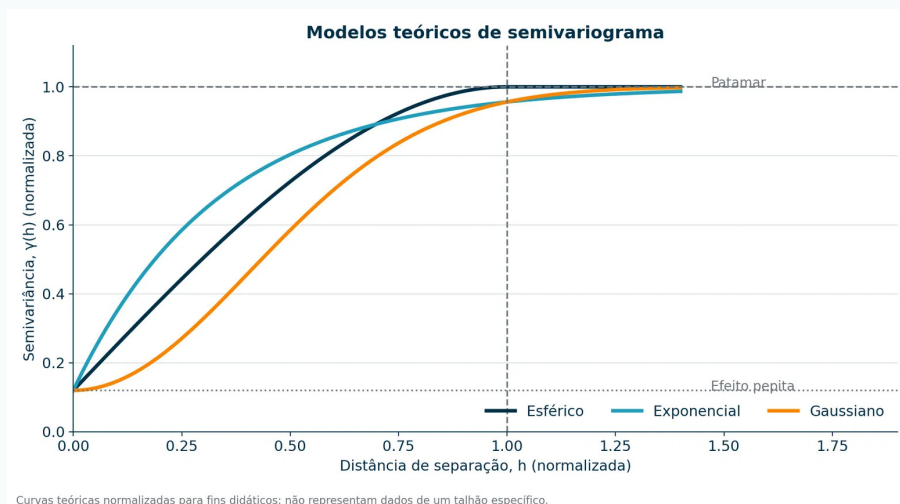
Regra prática: transforme ou retire tendência para atender uma premissa não é o mesmo que apagar o processo. A escolha deve aumentar validade preditiva e permanecer explicável agronomicamente.

Modelo e direção precisam fazer sentido

O modelo teórico deve descrever a continuidade observada; a análise direcional verifica se essa continuidade é a mesma em todas as direções. **Não selecione um variograma apenas pela aparência do ajuste.**

A forma do modelo altera a previsão

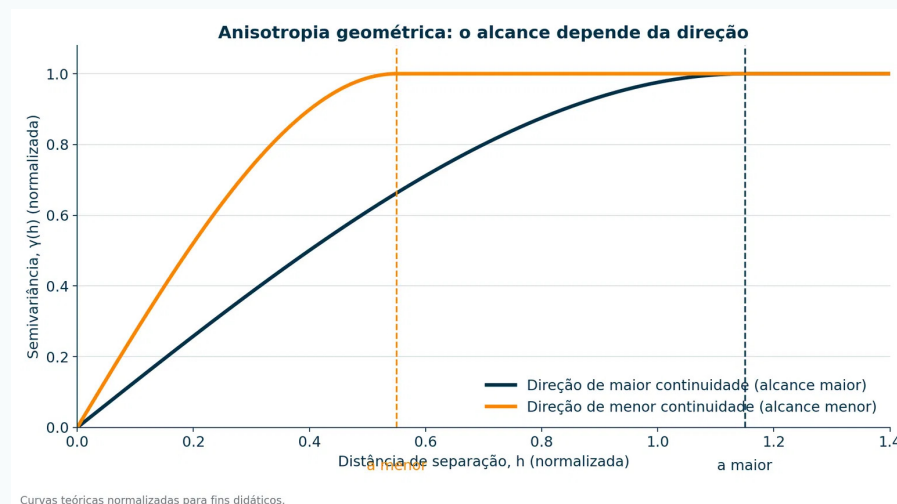
Modelos esférico, exponencial e gaussiano diferem sobretudo no comportamento em curtas distâncias e na aproximação ao patamar.



Curvas teóricas normalizadas para fins didáticos. O efeito pepita, o patamar e o alcance estruturam os pesos da krigagem. [1]

A direção pode revelar escalas distintas

Semivariogramas direcionais permitem detectar direções de maior e menor continuidade espacial.



Exemplo teórico de anisotropia geométrica: o patamar é semelhante, mas o alcance varia segundo a direção de análise. [2]

COMO INTERPRETAR ANISOTROPIA

Geométrica

Patamar semelhante; **alcances diferentes** entre direções.

Zonal

Alcance semelhante; **patamares diferentes** entre direções.

Combinada

Alcance e patamar diferem; demanda avaliação direcional mais cuidadosa.

O variograma nasce dos pares de dados

$$\hat{\gamma}(h) = 1/[2N(h)] \cdot \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(s_i) - Z(s_i+h)]^2$$

cada ponto resume diferenças entre pares separados por h.

01

Formar pares

Calcular a separação entre observações e agrupar pares com distância e direção compatíveis.

N(h) precisa ser suficiente para dar estabilidade à média de diferenças; lags distantes tendem a ter menos pares.

02

Definir lags

Escolher largura de classe e tolerância que preservem resolução sem gerar classes vazias ou muito ruidosas.

Lag muito amplo: suaviza detalhes. **Lag muito estreito:** aumenta variabilidade e instabilidade.

03

Examinar direção

Repetir o cálculo em setores angulares para testar se o padrão varia com a direção.

Azimute e tolerância angular devem refletir hipótese de processo, não apenas padrão de software.

04

Ler a nuvem

Inspecionar crescimento, patamar, efeito pepita e comportamento de longas distâncias antes de ajustar uma curva.

Diagnóstico: tendência, outliers e suporte inconsistente podem distorcer a estrutura observada.

PERGUNTA CENTRAL

Que distâncias guardam informação mútua? O semivariograma experimental não é um gráfico decorativo: ele traduz uma hipótese quantitativa sobre continuidade espacial e condiciona a krigagem.

Krigagem ordinária: pesos guiados pela estrutura

A previsão no ponto-alvo é uma combinação linear das observações. Na krigagem, os pesos dependem da **estrutura espacial modelada**, e não apenas da proximidade.

ESTIMADOR

$$\hat{Z}(s_0) = \sum \lambda_i \cdot Z(s_i)$$

$$\sum \lambda_i = 1$$

A soma unitária impõe não viés quando a média local é desconhecida, mas considerada constante dentro da vizinhança.

O QUE DETERMINA λ_i ?

Distâncias

Entre amostras e entre cada amostra e o ponto-alvo.

Geometria

Distribuição, agrupamento e orientação dos pontos disponíveis.

Semivariograma

Pepita, patamar, alcance e possível anisotropia.

Não é IDW

Proximidade importa, mas não é a única regra de ponderação.

CONDIÇÕES DO SISTEMA

$$\Gamma \cdot \lambda + \mu \cdot 1 = y_0$$

$$1^T \cdot \lambda = 1$$

Γ representa relações espaciais entre amostras; y_0 representa relações das amostras com o alvo; μ é o multiplicador de Lagrange. A solução fornece os pesos λ .

Premissas a verificar

Resíduos aproximadamente estacionários, tendência tratada, semivariograma válido e suporte amostral coerente com a variável.

Formulação baseada em referências de geoestatística e documentação conceitual de krigagem.

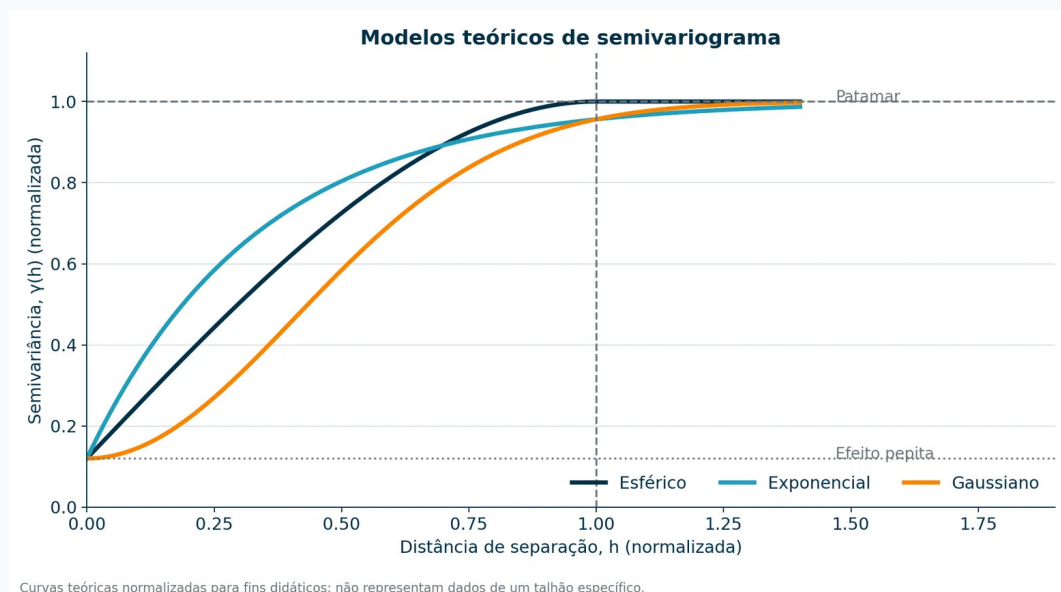
Saída responsável

Estimativa + variância de krigagem. A superfície prevista deve ser interpretada junto à incerteza do modelo, não isoladamente.

Ajustar não é perseguir cada ponto

Um modelo útil captura a estrutura dominante com parâmetros interpretáveis e produz previsões estáveis. **A aderência visual é necessária, mas não suficiente.**

Modelos candidatos diferem em curtas distâncias



Modelos normalizados para ilustração. O ajuste real deve considerar a nuvem experimental, direções e contexto do atributo.

Critérios para escolha defensável

1 Forma experimental

O modelo reproduz crescimento inicial, aproximação ao patamar e comportamento em distâncias relevantes?

2 Parâmetros plausíveis

Pepita, patamar e alcance são coerentes com erro de medição, microvariabilidade, escala agrônômica e desenho amostral?

3 Direção e estabilidade

O ajuste permanece consistente quando se examinam setores angulares, diferentes lags e pequenas mudanças de especificação?

4 Desempenho de previsão

O candidato reduz viés e erro na validação, sem padrões residuais espacialmente estruturados?

HIERARQUIA DE DECISÃO

Processo → dados → variograma → validação. Um modelo fisicamente implausível não deve ser escolhido só porque reduz marginalmente uma métrica; um modelo bonito que prevê mal também não é suficiente.

A variante depende do processo e da pergunta

Antes de escolher: a média é conhecida? Há tendência espacial? Existe uma covariável informativa? A decisão exige valor esperado ou probabilidade de exceder um limiar?

VARIANTE	HIPÓTESE SOBRE A MÉDIA	QUANDO CONSIDERAR	SAÍDA PRINCIPAL	EXEMPLO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO
Simples SK	Média conhecida em toda a área.	Processo bem caracterizado, média de referência justificável e resíduos estacionários.	Estimativa e variância de krigagem.	Monitoramento repetido de uma variável quando a média de longo prazo é defensável.
Ordinária OK	Média local desconhecida, porém aproximadamente constante .	Ponto de partida frequente após explorar tendência, anisotropia e variograma.	Estimativa e variância; pesos somam 1.	Mapas de pH, P, K, produtividade ou resistência à penetração em talhão.
Universal UK	Média varia no espaço como função de coordenadas ou bases de tendência.	Há tendência espacial explícita que não deve ser ignorada.	Tendência modelada + resíduo espacial.	Gradiente sistemático associado a relevo, posição na paisagem ou drenagem.
Regressão-krigagem RK	Média explicada por covariáveis; resíduos são espacialmente correlacionados.	Covariável tem relação agrônômica e cobertura espacial compatível.	Predição por regressão + krigagem dos resíduos.	Mapear atributo do solo com MDE, CEa, imagem espectral ou relevo como preditores.
Cokrigagem CK	Mais de uma variável, com correlação espacial cruzada modelável.	Variável auxiliar é informativa; semivariograma cruzado é tecnicamente defensável.	Estimativa multivariada e incerteza.	Integrar amostras de solo e variável auxiliar mais densa, com cautela de suporte.
Indicadora IK	Variável transformada em indicador abaixo/acima de limiar z_c .	A pergunta é sobre risco de excedência , não apenas média.	Probabilidade condicional de atender ou violar um limiar.	Probabilidade de pH abaixo de meta, P insuficiente ou compactação acima de limite.

ESCOLHA RESPONSÁVEL Não há “melhor krigagem” universal. Comece pela estrutura do processo e pelo objetivo decisório; em seguida, compare modelos com validação cruzada, resíduos e plausibilidade agrônômica. Cokrigagem e regressão-krigagem não dispensam qualidade de dados nem coerência de suporte.

Fonte conceitual: Esri, *What are the different kriging models?* [5]; Oliver (2010) [4].

Mapa estimado exige mapa de incerteza

Uma superfície visualmente convincente não é evidência suficiente. A escolha do modelo deve combinar **capacidade preditiva, coerência espacial e incerteza explicitamente comunicada**.

Validação cruzada: lógica leave-one-out

Retira-se cada observação, estima-se seu valor com as demais e compara-se previsão e medida.

1

Retirar

Omitir um ponto observado.

2

→ Estimar

Usar somente as demais amostras.

3

→ Comparar

Calcular o erro entre $\hat{Z}(s_0)$ e o valor medido.

Repita para todos os pontos e resuma os erros com ME, MAE, RMSE e métricas de erro padronizado. Se possível, complemente com validação espacial independente.

PRODUTO RESPONSÁVEL

Mapa de estimativa

Mostra o valor previsto $\hat{Z}(s_0)$. É útil para reconhecer gradientes e comparar locais, mas não revela sozinho a confiabilidade da estimativa.

Métricas respondem a perguntas diferentes

ME

Erro médio. Indica viés; idealmente próximo de zero.

RMSE

Raiz do erro quadrático médio. Penaliza desvios grandes.

MAE

Erro absoluto médio. Resume erro típico e é menos sensível a extremos.

Erro padronizado

Calibração da incerteza. Verifica a coerência da variância prevista.

Inspecione resíduos no espaço: padrão remanescente, assimetria ou dependência residual sugerem tendência não tratada, variograma inadequado ou suporte mal especificado.

Mapa de variância de krigagem

Mostra a incerteza do **modelo**, que tende a aumentar em vazios amostrais. Não é automaticamente o erro observado em campo.

Incerteza da krigagem também é espacial

A variância de krigagem indica quão precisa é a estimativa **sob o modelo adotado**. Ela muda conforme a cobertura de dados, a geometria e a continuidade modelada.

$$\sigma^2_K(s_0) = \lambda^T \gamma_0 + \mu$$

Uma forma usual sob convenção de semivariograma. Os termos derivam do sistema de pesos e das relações espaciais com o ponto-alvo.

Distância e vazios

Áreas longe de observações tendem a ter maior incerteza, especialmente perto de bordas ou em regiões pouco amostradas.

Configuração dos pontos

Agrupamento, alinhamento e ausência de vizinhos em certas direções alteram a precisão, mesmo com distância média semelhante.

Modelo espacial

Pepita alto, alcance curto e anisotropia modificam a informação compartilhada entre observações e alvo.

O mapa de incerteza orienta amostragem e prudência

superfície contínua e delineamento conceitual de zonas de manejo

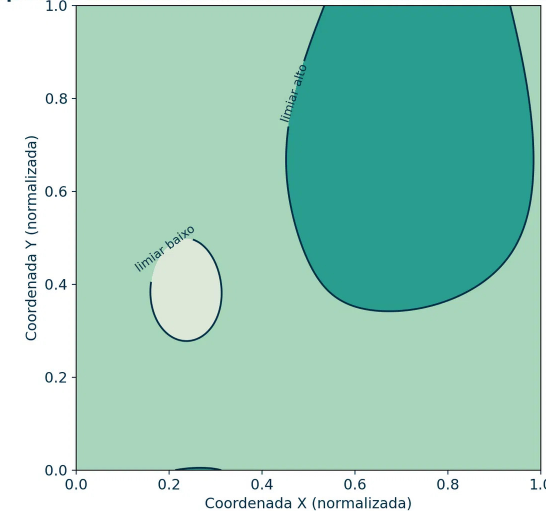


Ilustração baseada em função analítica para demonstrar a passagem de uma superfície estimada para zonas de manejo.

Ilustração conceitual. Em análise aplicada, a superfície estimada deve ser acompanhada por superfície de variância ou desvio-padrão de krigagem.

INTERPRETAÇÃO CORRETA

Variância de krigagem não é o erro observado automaticamente. Ela é condicional aos dados e ao modelo. Para avaliar erro preditivo, combine-a com validação cruzada, checagem de resíduos e, quando possível, dados independentes.

Da superfície estimada à ação agronômica

A krigagem converte pontos em uma superfície contínua; a decisão exige mais: **incerteza, coerência agronômica, estabilidade temporal e resposta econômica.**

Superfície estimada não é prescrição automática

Uma superfície contínua pode orientar limiares, estratificação e zonas; os limites precisam ser testados no contexto da operação agrícola.

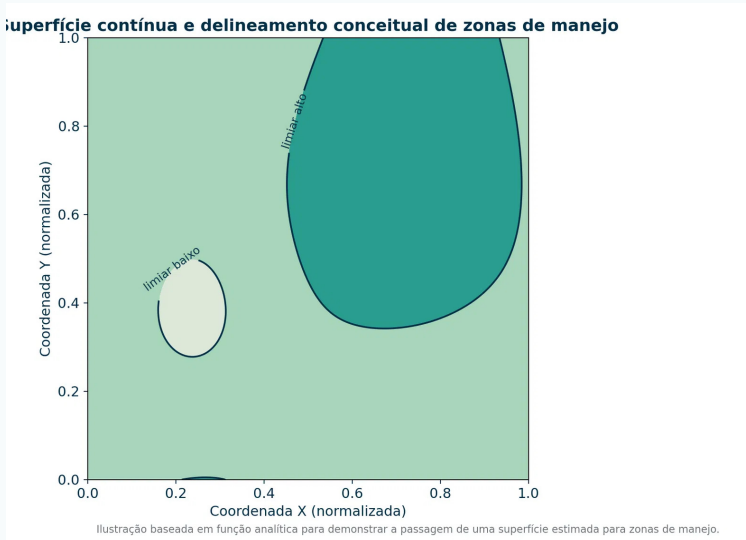


Ilustração própria baseada em função analítica: a passagem de gradiente contínuo para zonas é uma decisão de manejo, não uma consequência automática do interpolador.

Fertilidade e acidez

Atributos: pH, P, K, Ca, Mg, V%. **Decisão:** estratificar amostragem e avaliar taxa variável com base em critérios agronômicos.

Produtividade

Atributos: massa, umidade, fluxo e rendimento. **Decisão:** identificar padrões persistentes e investigar fatores limitantes.

Fluxo reprodutível para uso agronômico

1	Definir a decisão e a escala Ex.: calagem, adubação, irrigação, descompactação ou diagnóstico de baixa produtividade.	PERGUNTA
2	Medir com suporte coerente Padronizar profundidade, sensor, época, coordenadas e protocolo de campo.	DADOS AUDITÁVEIS
3	Modelar, comparar e validar Ajustar variogramas candidatos, verificar direção e avaliar o desempenho preditivo.	SUPERFÍCIE + INCERTEZA
4	Estratificar com regra explícita Combinar valor estimado, risco, faixa operacional, resposta esperada e custo de intervenção.	ZONAS CANDIDATAS
5	Executar e aprender no campo Registrar prescrição, operação e resposta para recalibrar o modelo no ciclo seguinte.	DECISÃO VERIFICÁVEL

Compactação

Atributos: resistência à penetração, densidade, CEa. **Decisão:** priorizar diagnóstico e intervenção localizada quando tecnicamente justificável.

Água e estresse

Atributos: umidade, temperatura, índices espectrais. **Decisão:** apoiar monitoramento, inspeção dirigida e manejo de irrigação.

Covariáveis ajudam quando acrescentam informação

Dados auxiliares densos — relevo, CEa, imagens, proximidade de drenagem — podem melhorar a previsão apenas quando sua relação com o alvo é **real, consistente e adequadamente modelada**.

Regressão-krigagem

Explica parte da variável-alvo com covariáveis e usa krigagem para modelar a estrutura espacial que permanece nos resíduos.

Covariáveis

MDE, CEa, índices espectrais, posição de paisagem



Regressão

$m(s)$ estimada por relação funcional



Krigar $\varepsilon(s)$

resíduo espacialmente correlacionado

$$\hat{Z}(s) = \hat{m}(s) + \hat{\varepsilon}_K(s)$$

Cokrigagem

Usa duas ou mais variáveis em um sistema espacial conjunto, dependendo de correlação cruzada e modelos válidos de covariância.

Alvo escasso

atributo de solo medido em poucos pontos



Auxiliar densa

variável correlacionada e bem referenciada



Modelo cruzado

previsão multivariada com restrições

$\gamma_{uv}(h)$ descreve a dependência cruzada

CHECKLIST

Relevância: a covariável possui mecanismo ou associação agrônômica plausível com o alvo?

Compatibilidade: suporte, data, CRS e resolução são coerentes? A relação se sustenta em validação fora da amostra?

Síntese e referências essenciais

CINCO MENSAGENS PARA LEVAR AO CAMPO

01 Variabilidade não é sinônimo de ruído.

Ela pode conter estrutura espacial útil para diagnóstico, amostragem e manejo.

02 Amostragem é parte do modelo.

Espaçamento, suporte, direção e qualidade dos dados definem o limite de inferência.

03 O semivariograma conecta dados e previsão.

Ele quantifica continuidade, alcance, variabilidade não resolvida e possível anisotropia.

04 Krigagem não é apenas interpolação sofisticada.

É previsão sob um modelo de dependência espacial, com hipóteses explícitas e pesos derivados da estrutura.

05 Todo mapa deve explicitar incerteza.

Uma recomendação espacial só é robusta quando a superfície estimada, a validação e a decisão agrônômica são coerentes.

QUESTÕES PARA DISCUSSÃO

Para um talhão real: qual atributo sustenta a decisão? Em qual escala ele varia? Há tendência ou anisotropia? Como a incerteza modifica a taxa, a zona ou a necessidade de uma nova amostragem?

REFERÊNCIAS SELECIONADAS

[1] Esri. *Understanding a semivariogram: range, sill, and nugget*. ArcGIS Pro Documentation.

[2] Carvalho, M. P. et al. *Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32(6), 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000600001.

[3] Miranda, M. A. et al. *Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo*. Ciência Rural, 44(2), 2014. DOI: 10.1590/S0103-84782014000200011.

[4] Oliver, M. A. (Ed.). *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-90-481-9133-8.

[5] Esri. *What are the different kriging models?* ArcMap Documentation.

O mapa precisa voltar ao campo

A análise espacial reduz incerteza quando se torna parte de um ciclo de decisão: **prever, verificar, intervir e aprender.**

1. Identificar

Reconhecer padrão, contraste, zona ou risco revelado pelo dado espacial.



2. Checar

Visitar locais estratégicos, auditar a medida e registrar condição de solo, planta e operação.



3. Decidir

Converter evidência em intervenção com regra agronômica, logística e econômica explícita.



4. Monitorar

Registrar prescrição, execução e resposta no ciclo produtivo para medir efeito e incerteza.



5. Atualizar

Reamostrar onde importa, revisar modelos e verificar estabilidade temporal das zonas.

Estabilidade temporal

O padrão observado se repete entre safras, anos ou condições climáticas? Se não, uma zona fixa pode ser uma simplificação excessiva.

Resposta econômica

O ganho esperado cobre custo de amostragem, operação e insumo? O valor do mapa está na decisão que ele melhora, não no número de classes.