



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INUNDAÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAMANDUATEÍ: Uma análise espacial e multifatorial.

Ítalo Rafael Costa de Mira

Análise Espacial de Dados Geográficos | SER 301

2024

ORGANIZAÇÃO

01

Motivação

03

Metodologia

05

Discussão

02

**Área de estudo e
Base de dados**

04

Resultados

06

Conclusão



01

Motivação

Urbanização → Eventos extremos → Climático-Meteorológicos

Inundações



2001 – 2018: 66.078 Mortes | 1.4 bi Pessoas afetadas | 309.4 bi USD

Eventos: Rápidos, dinâmicos e instáveis

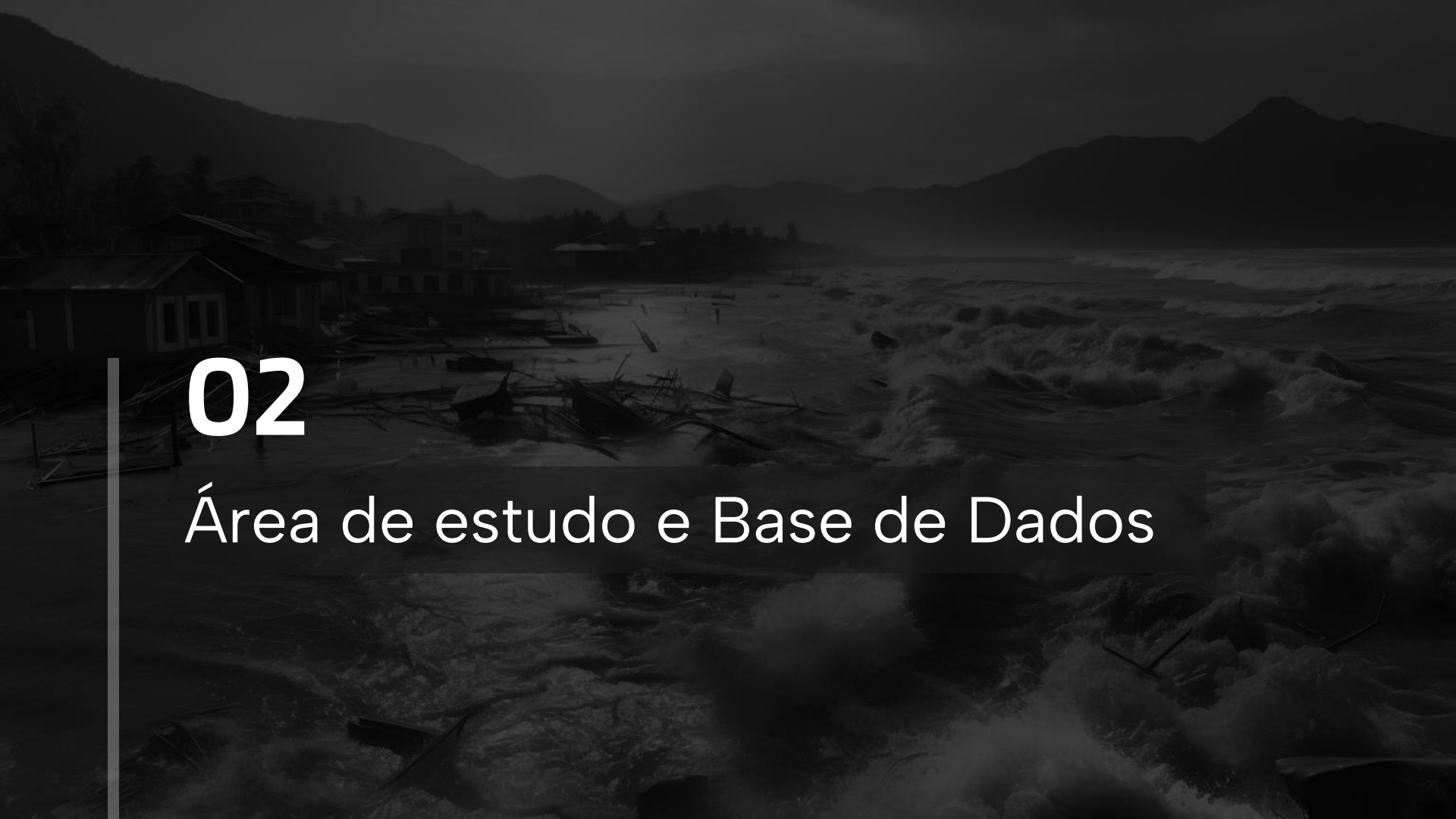
Parâmetros Geoambientais – Fatores Condicionantes

Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas → **Análise Espacial**



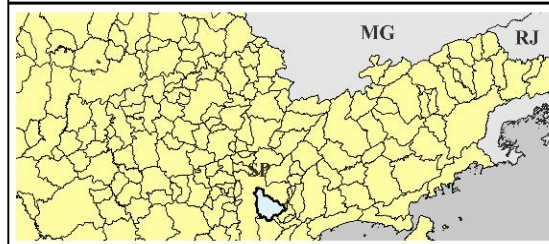
OBJETIVO

Avaliar como os fatores condicionantes influenciam a ocorrência de inundações na Bacia do Rio Tamanduateí - SP.



02

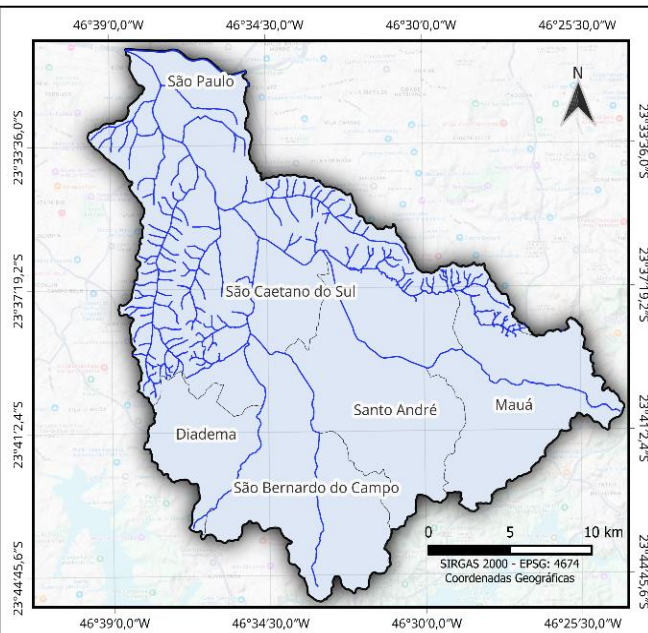
Área de estudo e Base de Dados



Convenções Cartográficas

-  Rede de Drenagem
-  Estado de São Paulo
-  Bacia do Rio Tamanduateí - SP
-  Unidades Federativas

Fonte: Base de dados do IBGE, GEOSAMPA e BING Maps (2024)
Org.: MIRA, I. R. C.; RENNO, C. D (2024)



Planície do Tamanduateí (1890). Google Imagens (2024).



Retificação do Tamanduateí (1970). Google Imagens (2024).

- Região Metrop. de SP – 323 km²

- Relevo variado

- Drenagem dendrítica

- Precipitação Anual (1250 – 1450 mm)

- Zona de Convergência do Atlântico Sul

- Meandros sinuosos e baixa declividade

Tabela 1 – Metadados utilizados.

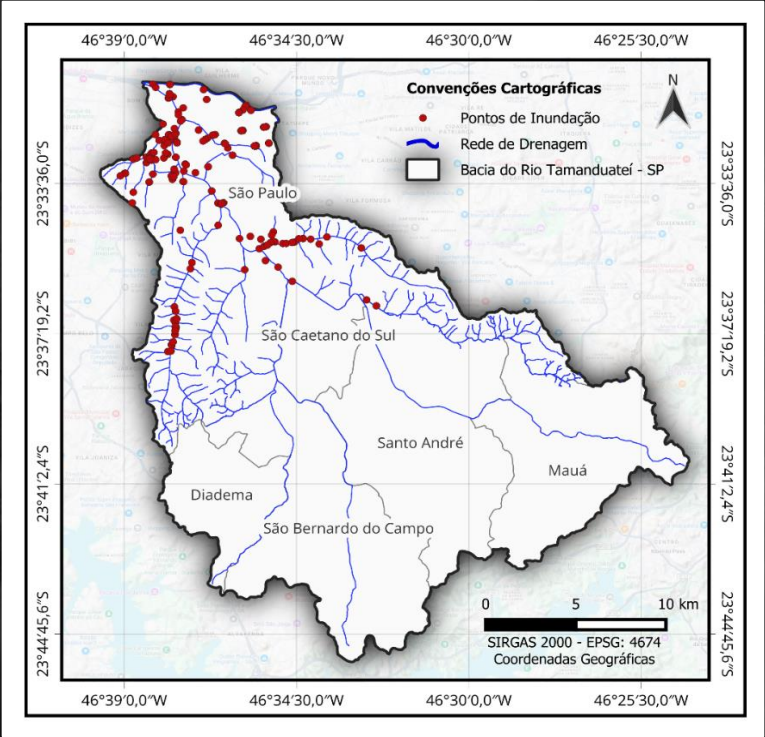
Dados	Tipo de dado	Ano do dado	Fonte
Ocorrência de inundações	Vetor e Arquivo CSV	2019	Centro de Gerenciamento de Emergências da cidade de São Paulo (CGE)
Contorno da Bacia do Rio Tamanduateí - SP	Vetor	2024	GEOSAMPA
Rede de Drenagem	Vetor	2024	GEOSAMPA
Divisões administrativas	Vetor	2022	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
Modelo Digital de Elevação (MDE)	Raster	2013	Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS)

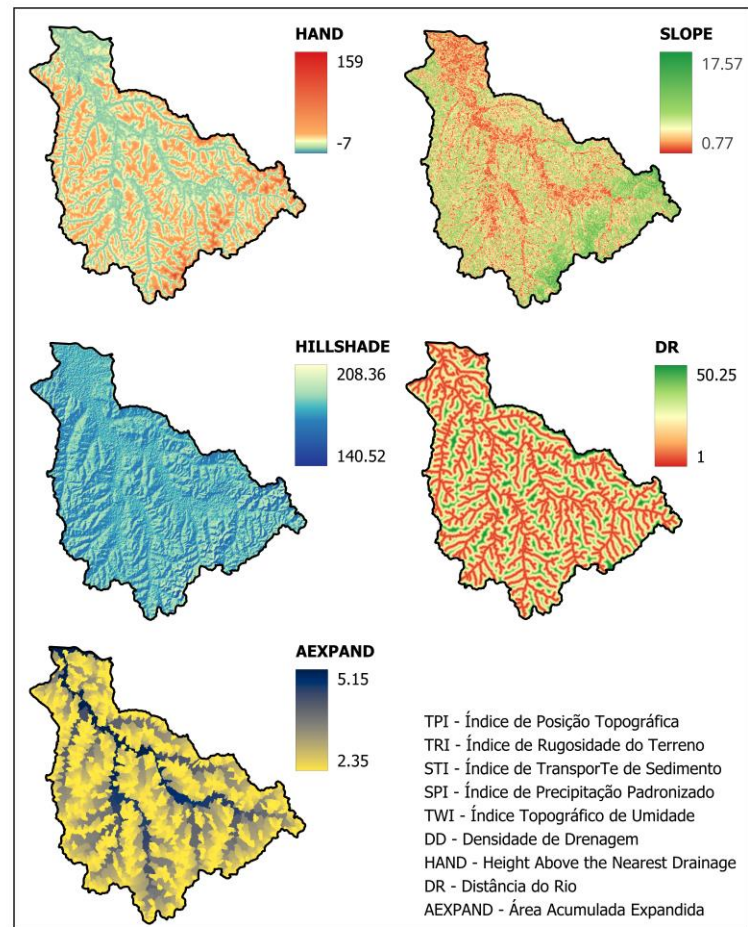
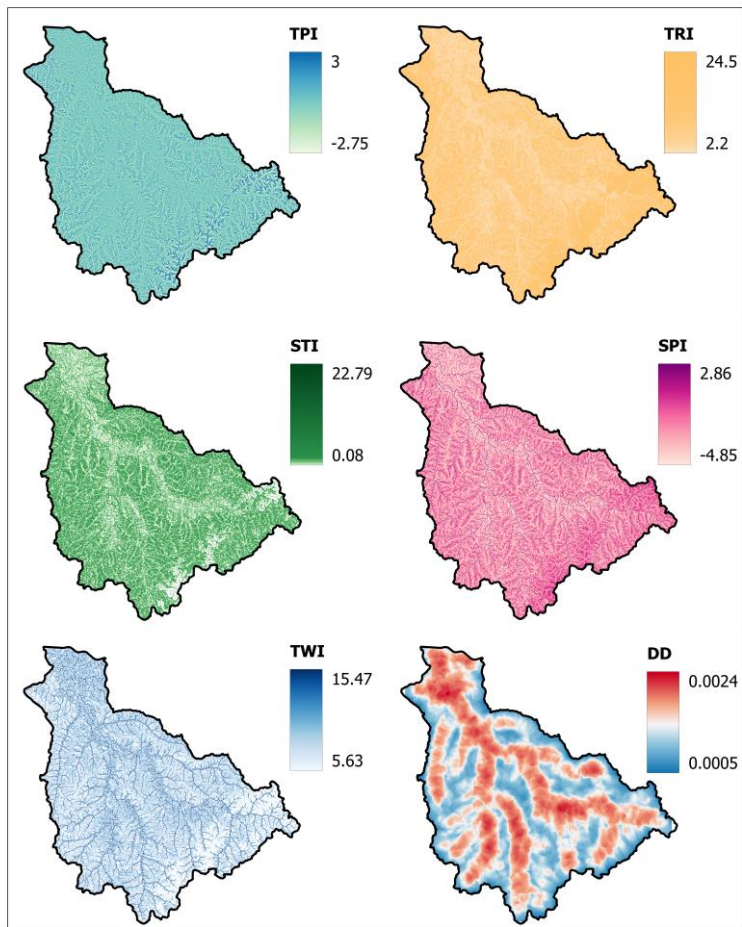
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Tabela 2 - Fatores condicionantes.

Fatores Condicionantes	Sigla	Equação
Índice de Posição Topográfica	TPI	$Z_0 - \sum_{i=1}^n \frac{Z_n}{n}$
Índice de Rugosidade do Terreno	TRI	$\sqrt{\sum (x_{ij} - x_{00})^2}$
Índice de Transporte de Sedimentos	STI	$\left(\frac{\alpha}{22.13}\right)^{0.6} \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^{1.3}$
Índice de Potência de Fluxo	SPI	$\alpha + \tan \beta$
Índice Topográfico de Umidade	TWI	$\ln\left(\frac{\alpha}{\tan \beta}\right)$
Densidade de Drenagem	DD	$\frac{L}{A}$
Height Above the Nearest Drainage	HAND	***
Inclinação	SLOPE	$\arctan\left(\frac{\Delta z}{d}\right)$
Hillshade	HILLSHADE	$255 * [(\cos(Z) \cos(S) + \sin(Z) \sin(S) \cos(Az - As))]$
Distância do Rio	DR	$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$
Área Acumulada Expandida	AEXPAND	***

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).





TPI - Índice de Posição Topográfica
 TRI - Índice de Rugosidade do Terreno
 STI - Índice de TransporTe de Sedimento
 SPI - Índice de Precipitação Padronizado
 TWI - Índice Topográfico de Umidade
 DD - Densidade de Drenagem
 HAND - Height Above the Nearest Drainage
 DR - Distância do Rio
 AEXPAND - Área Acumulada Expandida



03

Metodologia

(3.1) Densidade de pontos de inundação

Densidade de Kernel

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

QGIS v.3.34.9

(3.2) Autocorrelação e dependência espacial dos pontos de inundação

Índice de Moran Global

$$I = \left(\frac{n}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right) \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \right)$$

Tabela 3 – Índice de Moran (I).

Índice de Moran (I)	Autocorrelação Espacial	Significado
≈ 1	Positiva	Há padrão de agrupamento
≈ 0	Ausente	Não há padrão
≈ -1	Negativa	Há padrão de dispersão

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Índice de Moran Local (LISA Cluster)

PySAL v.24.7

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_j - \bar{X})}{\left(\frac{n}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right)}$$

Tabela 4 – LISA cluster.

Cluster	Significado	Corr. Espacial
Alto-Alto (HH)	Alto KDE e alta similaridade na vizinhança	Positiva
Alto-Baixo (LH)	Alto KDE e baixa similaridade na vizinhança	Negativa
Baixo-Baixo (LL)	Baixo KDE e alta similaridade na vizinhança	Positiva
Baixo-Alto (HL)	Baixo KDE e baixa similaridade na vizinhança	Negativa
N. Significativo (ns)	Não há padrões	Ausente

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

(3.3) Detecção de fatores

Fatores de risco

[0,1] Quanto > q > controle da Var. independente sobre a Var. dependente.

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^n N_h \sigma_h^2$$

Pacote Geodetector v.1.0-5 (Rstudio)

Interação

Tabela 5 – Interação de fatores do Geodetector.

Interação	Descrição	Equação
Enfraquecimento não linear	$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	O efeito da interação dos fatores X_1 e X_2 na variável dependente Y é menor que os efeitos independentes.
Enfraquecimento unitário	$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	Interação enfraquece o efeito de um dos fatores.
Realce binário	$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	Interação entre os fatores X_1 e X_2 tem impacto maior em Y do que um único valor.
Independente	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	Interação independente. Os fatores X_1 e X_2 não interferem um no outro.
Realce não linear	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	Efeito de interação tem impacto maior em Y do que a soma dos efeitos independente de X_1 e X_2 .

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

(3.4) Análise de Regressão Espacial

Modelo de Regressão Geograficamente Ponderada (GWR)

$$Y_i = \beta_0(u_i v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i v_i) X_{ik} + \varepsilon_i$$

Modelo de Regressão Geograficamente Ponderada Multiescala (MGWR) Python (Oshan et al. 2019)

$$Y_i = \beta_0(u_i v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i v_i, s_k) X_{ik} + \varepsilon_i$$

Avaliação dos resultados

Coeficiente de Determinação (R^2)

Critério de Informação de Akaike Corrigido (AICc)

Quanto $> R^2$ e $< AICc$, melhor o ajuste do modelo em relação aos dados.

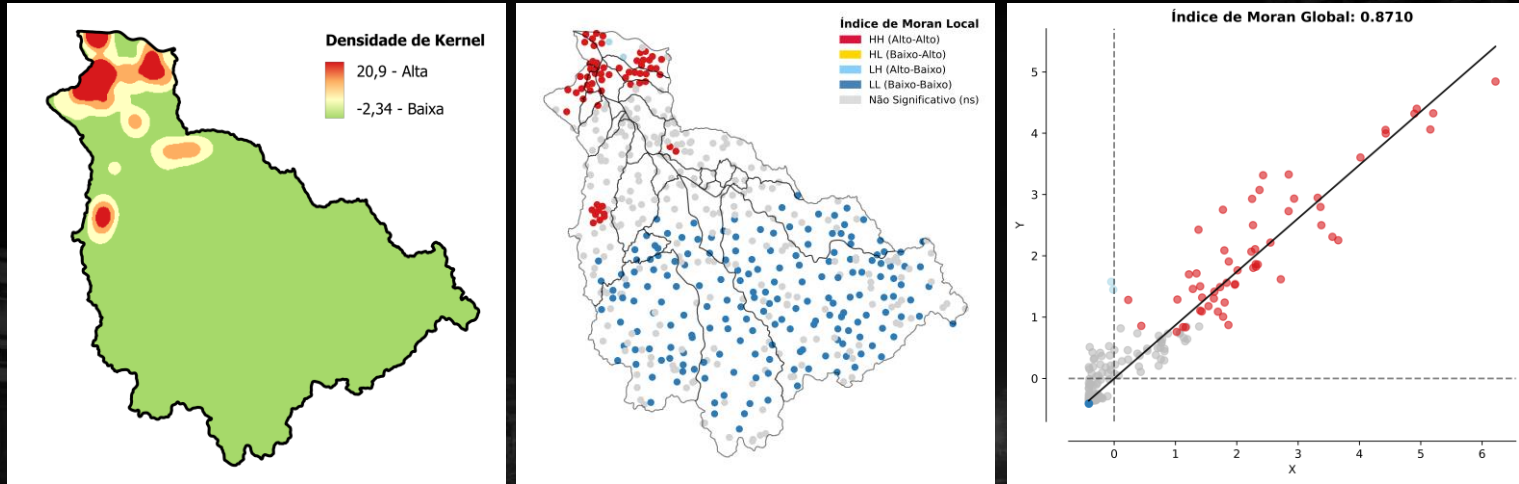
Espacialização dos Resultados



04

Resultados

(4.1) Autocorrelação espacial das ocorrências de inundação



Densidade de Kernel:

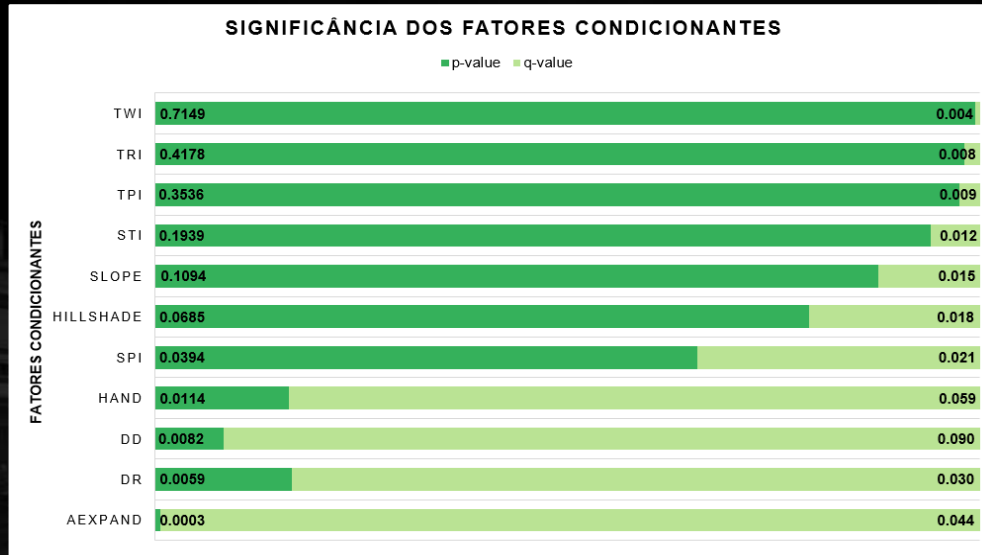
Agregação espacial nas ocorrências → Correlação espacial positiva;

Autocorrelação e Dependência Espacial:

Alto-Alto (HH): Alta densidade de inundações rodeado de áreas com densidade similar;

Baixo-Baixo (LL): Baixa densidade de inundações com alta similaridade espacial.

(4.2) Fatores dominantes na ocorrência de inundações



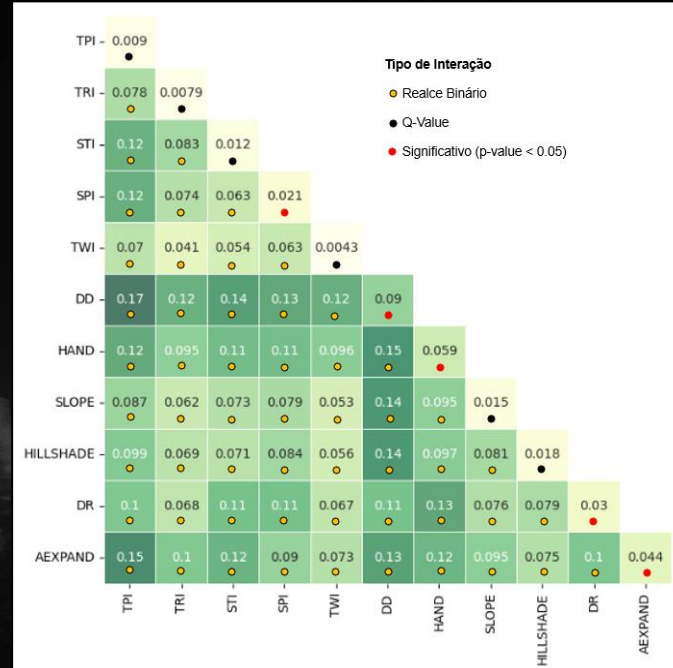
AEXPAND: Concentração de fluxo hídrico;

DR: Proximidade aos canais de drenagem;

DD: Volume de concentração de água;

HAND: Proximidade ao nível da água;

SPI: Menor capacidade de dissipar a energia hidráulica.



Interação de fatores possui maior impacto sobre as inundações do que suas influências individuais.

(4.3) Comparação de Modelos

Tabela 6 – Indicadores de modelo GWR e MGWR.

Modelo	Log-Likelihood	AICc	R ²	RSS
GWR	-195.405	811.395	0.872	63.966
MGWR	40.535	348.208	0.950	24.893

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

MGWR apresentou maior capacidade de capturar e explicar, com maior precisão, a variabilidade e a correlação espacial entre os fatores condicionantes analisados.

(4.4) Análise da variação espacial dos coeficientes

Tabela 7 – Descrição estatística do MGWR.

Variáveis	Largura de Banda	Média	Desvio Padrão (Resíduos)	Mínimo	Mediana	Máximo
Intercepto	12	0.057	1.003	-0.426	-0.408	4.720
SPI	489	0.012	0.008	0.003	0.009	0.025
DD	498	0.002	0.003	-0.004	0.003	0.006
HAND	74	0.055	0.137	-0.081	0.011	0.611
DR	498	-0.008	0.002	-0.012	-0.008	-0.005
AEXPAND	76	0.039	0.079	-0.040	0.000	0.291

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Largura de banda:

HAND e AEXPAND: Influência predominantemente local;

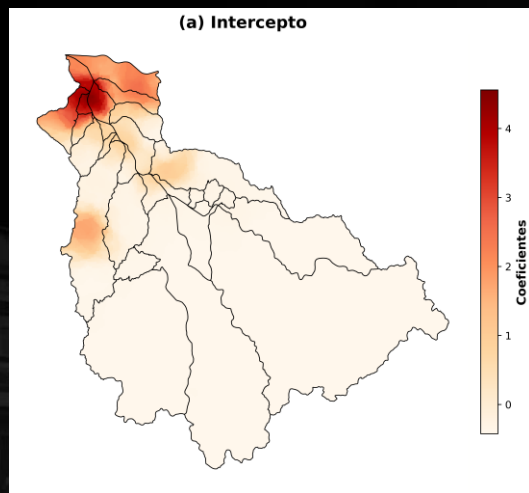
SPI, DD e DR: Impactos distribuídos e generalizados por toda a bacia.

Média:

HAND e AEXPAND: Maior influência global.

Desvio padrão:

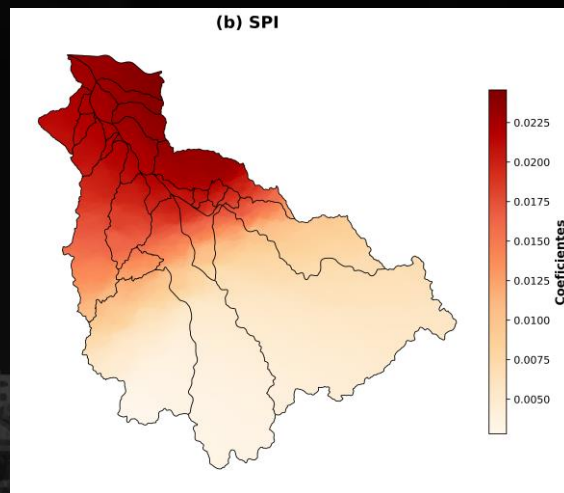
HAND: Forte variabilidade e influência espacial.



-0.426 – 4.750: Ampla variação da densidade de inundações.

Coef. Positivo: Áreas baixas;

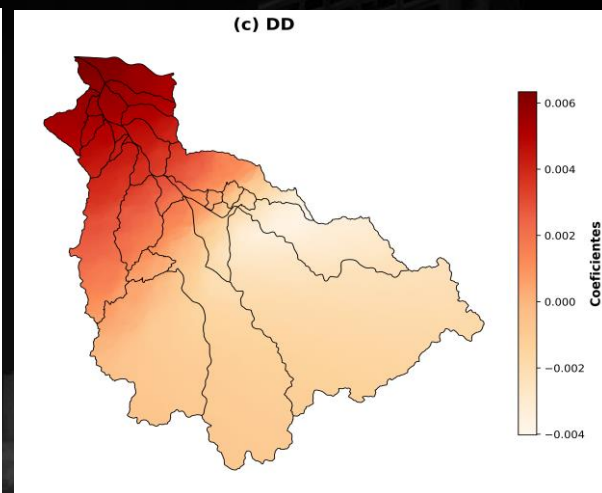
Coef. Negativo: Áreas altas.



0.003 – 0.025: Baixa variação da densidade de inundações.

Coef. Positivo: Áreas planas.

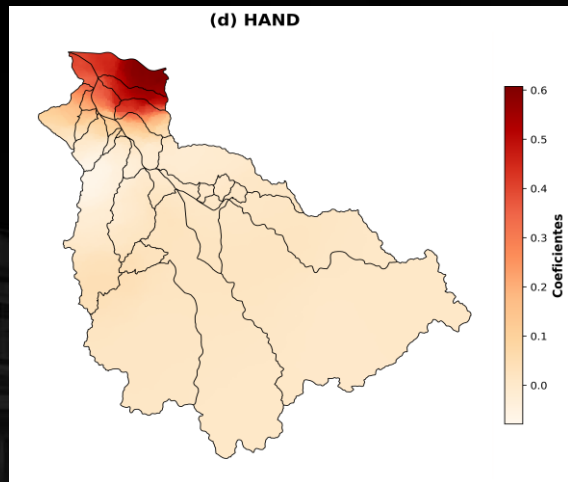
Coef. Negativo: Áreas íngremes.



-0.004 – 0.006: Ampla variação da densidade de inundações.

Coef. Positivo: Densidade maior.

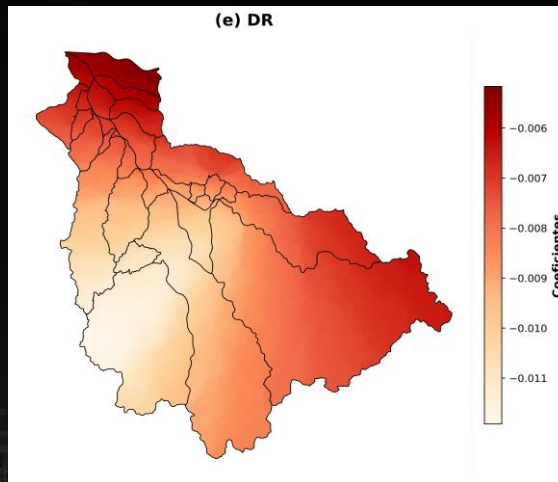
Coef. Negativo: Densidade menor.



-0.081 – 0.611: Ampla variação da densidade de inundações.

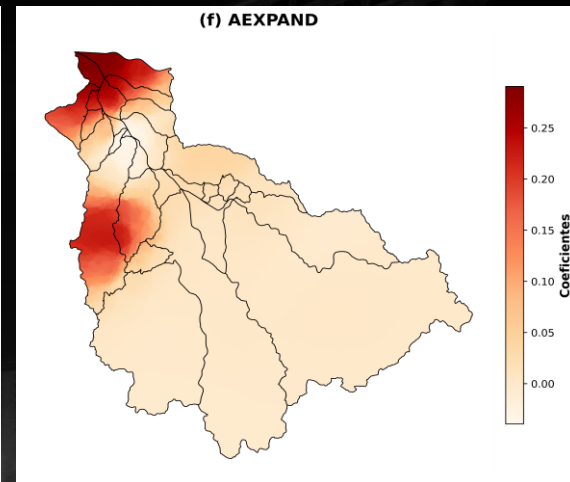
Coef. Positivo: Prox. dos canais.

Coef. Negativo: Dist. dos canais.



-0.012 – -0.005: Baixa variação da densidade de inundações e coeficientes negativos.

> Dist. Dos canais < Prob. de inundar.



-0.040 – 0.291: Ampla variação da densidade de inundações.

Coef. Positivo: Acum. de água.

Coef. Negativo: Sem acumulo.



05

Discussão

(5.1) Relações espaciais não estacionária dos fatores condicionantes:

- Interação de fatores → Distribuição espacial e densidade de inundações.
- Efeito sinérgico que amplifica a suscetibilidade em áreas planas.
- Áreas planas: Alteração na drenagem e aumento das áreas impermeáveis → Áreas urbanizadas.

(5.2) Recomendações

- Geodetector evidenciou o impacto dos fatores individuais e suas interações.
- Dinâmica amplificada e não uniforme dos fatores → Medidas de mitigação e planejamento.
- Medidas: Modernização dos sistemas de drenagem, soluções baseadas na natureza.

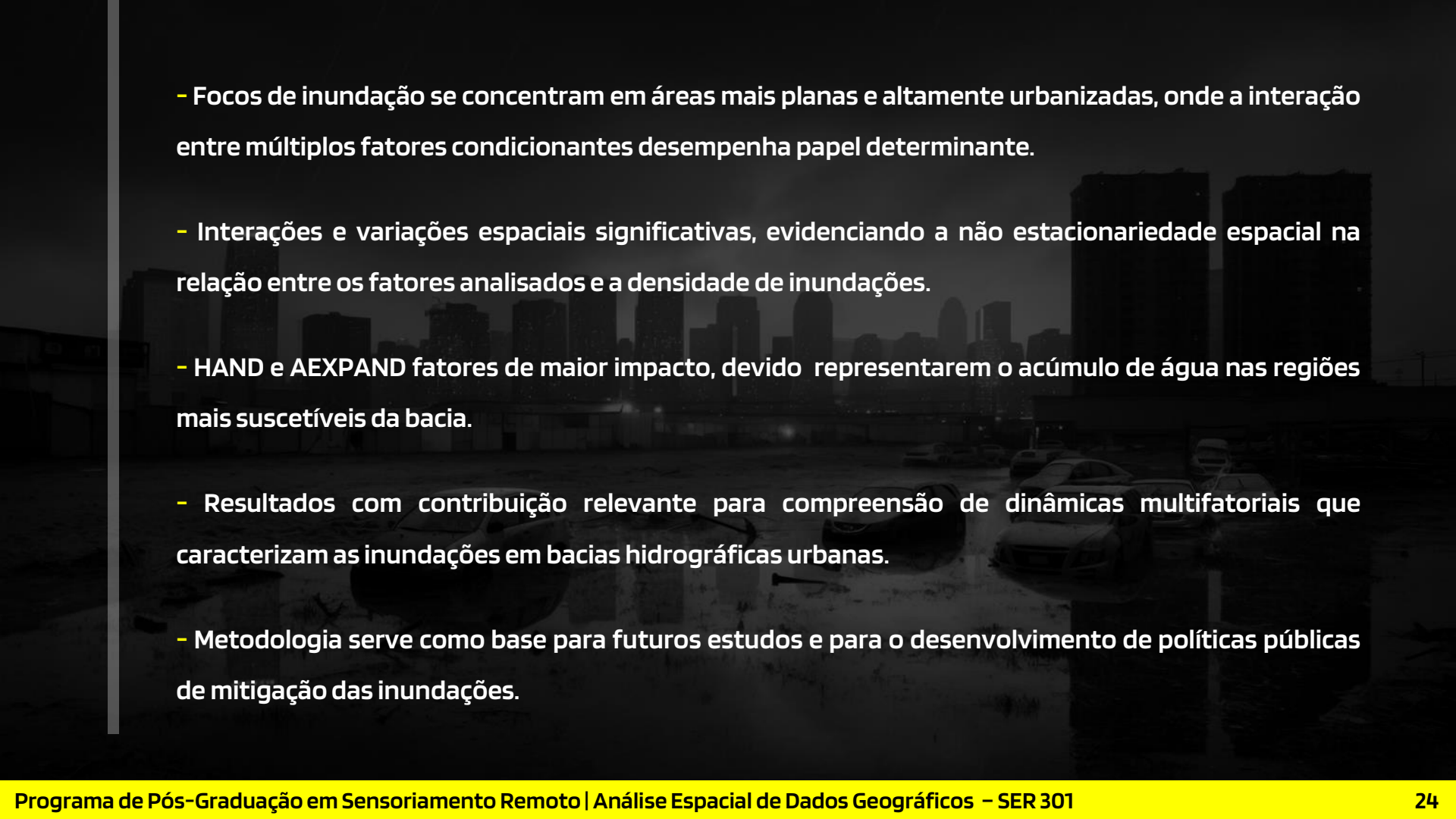
(5.3) Limitações e trabalhos futuros

- Ocorrências pontuais e densidade estimada, número limitado de fatores condicionantes, interação apenas entre 2 fatores → Utilizar manchas de inundações reais, analisar mais fatores condicionantes e utilizar algoritmos de aprendizagem de máquina para analisar mais que 2 fatores.



06

Conclusão

- 
- Focos de inundação se concentram em áreas mais planas e altamente urbanizadas, onde a interação entre múltiplos fatores condicionantes desempenha papel determinante.
 - Interações e variações espaciais significativas, evidenciando a não estacionariedade espacial na relação entre os fatores analisados e a densidade de inundações.
 - HAND e AEXPAND fatores de maior impacto, devido representarem o acúmulo de água nas regiões mais suscetíveis da bacia.
 - Resultados com contribuição relevante para compreensão de dinâmicas multifatoriais que caracterizam as inundações em bacias hidrográficas urbanas.
 - Metodologia serve como base para futuros estudos e para o desenvolvimento de políticas públicas de mitigação das inundações.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Muito Obrigado!!

*"A tarefa é não tanto ver o que ninguém viu ainda, mas pensar o
que ninguém ainda pensou sobre o que todo mundo vê"*

Arthur Schopenhauer, 1851

Ítalo Rafael Costa de Mira

Téc. Em Agrimensura | Eng. Ambiental

italo.mira14@gmail.com | italo.rafael@inpe.br

(35) 9 9969-0262