

ANÁLISE DE TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO PARA ESPACIALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO APODI-MOSSORÓ (BHRAM), NORDESTE DO BRASIL

Analysis of interpolation techniques for the spatialization of Rainfall in the Apodi–Mossoró River Basin (BHRAM), Northeast Brazil

Análisis de técnicas de interpolación para la espacialización de la precipitación pluvial en la Cuenca Hidrográfica del Río Apodi–Mossoró (BHRAM), Nordeste de Brasil



Vanessa Vitória Torres de Moraes 

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN)

E-mail: vanessavitoria.prof@gmail.com

Jacimária Fonseca de Medeiros 

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN)

E-mail: jacimariamedeiros@uern.br

Francisco Jablinski Castelhana 

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

E-mail: francisco.castelhana@ufrn.br

RESUMO

Histórico do artigo

Recebido: 17 março, 2026

Aceito: 27 julho, 2026

Publicado: 02 agosto 2026

A espacialização da precipitação pluviométrica constitui etapa fundamental para o entendimento da dinâmica climática e para o planejamento ambiental em regiões semiáridas, marcadas por elevada variabilidade espacial e temporal das chuvas. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo comparar o desempenho dos métodos de interpolação espacial Inverse Distance Weighting (IDW), Krigagem Ordinária e Spline na representação da precipitação média anual na Bacia Hidrográfica do Rio Apodi–Mossoró (BHRAM), localizada no Estado do Rio Grande do Norte. Foram utilizados dados pluviométricos de 52 estações, referentes ao período de 1973 a 2002, fornecidos pela EMPARN. A validação dos interpoladores foi realizada por meio de validação cruzada, com retirada aleatória de cinco estações, seguindo a metodologia proposta por Caruso e Quarta (1998). O desempenho dos métodos foi avaliado a partir de índices estatísticos de erro, precisão e concordância, incluindo RMSE, EQM, MAE, coeficientes de correlação e determinação, eficiência de Nash–Sutcliffe, índice de concordância de Willmott e índice de confiança. Os resultados indicaram desempenho superior da Krigagem, que apresentou os menores erros e os maiores índices de ajuste estatístico, seguida pelo IDW, com desempenho intermediário, enquanto o método Spline mostrou-se inadequado para a variável analisada. Conclui-se que a Krigagem é o método mais apropriado para a espacialização da precipitação na BHRAM, reforçando a importância da validação estatística na escolha de interpoladores em estudos climatológicos.

Palavras-chave: Climatologia; Espacialização pluviométrica; Semiárido brasileiro.

ABSTRACT

The spatialization of rainfall constitutes a fundamental step for understanding climate dynamics and for environmental planning in semi-arid regions, which are characterized by high spatial and temporal variability of precipitation. In this context, the present study aimed to compare the performance of the spatial interpolation methods Inverse Distance Weighting (IDW), Ordinary Kriging, and Spline in representing the mean annual precipitation in the Apodi–Mossoró River Basin (BHRAM), located in the state of Rio Grande do Norte, Brazil. Rainfall data from 52 meteorological stations, covering the period from 1973 to 2002, provided by EMPARN, were used. The validation of the interpolators was carried out through cross-validation, with the random removal of five stations, following the methodology proposed by Caruso and Quarta (1998). The performance of the methods was evaluated using statistical indices of error, accuracy, and agreement, including RMSE, MSE, MAE, correlation and determination coefficients, Nash–Sutcliffe efficiency, Willmott's index of agreement, and confidence index. The results indicated superior performance of Kriging, which presented the lowest errors and the highest statistical adjustment indices, followed by IDW with intermediate performance, while the Spline method proved inadequate for the analyzed variable. It is concluded that Kriging is the most appropriate method for rainfall spatialization in the BHRAM, reinforcing the importance of statistical validation in the selection of interpolators in climatological studies.

Keywords: Climatology; Rainfall spatialization; Brazilian semi-arid region.

RESUMEN

La espacialización de la precipitación constituye una etapa fundamental para la comprensión de la dinámica climática y para la planificación ambiental en regiones semiáridas, caracterizadas por una elevada variabilidad espacial y temporal de las lluvias. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo comparar el desempeño de los métodos de interpolación espacial Inverse Distance Weighting (IDW), Kriging Ordinario y Spline en la representación de la precipitación media anual en la Cuenca Hidrográfica del Río Apodi–Mossoró (BHRAM), ubicada en el estado de Rio Grande do Norte, Brasil. Se utilizaron datos pluviométricos de 52 estaciones, correspondientes al período de 1973 a 2002, proporcionados por EMPARN. La validación de los interpoladores se realizó mediante validación cruzada, con la retirada aleatoria de cinco estaciones, siguiendo la metodología propuesta por Caruso y Quarta (1998). El desempeño de los métodos fue evaluado a partir de índices estadísticos de error, precisión y concordancia, incluyendo RMSE, MSE, MAE, coeficientes de correlación y determinación, eficiencia de Nash–Sutcliffe, índice de concordancia de Willmott e índice de confianza. Los resultados indicaron un desempeño superior del Kriging, que presentó los menores errores y los mayores índices de ajuste estadístico, seguido por el IDW con desempeño intermedio, mientras que el método Spline se mostró inadecuado para la variable analizada. Se concluye que el Kriging es el método más apropiado para la espacialización de la precipitación en la BHRAM, reforzando la importancia de la validación estadística en la selección de interpoladores en estudios climatológicos.

Palabras clave: Climatología; Espacialización pluviométrica; Semiárido brasileño.



1 INTRODUÇÃO

A espacialização de dados pluviométricos com vistas ao aprimoramento do planejamento territorial e ao aprofundamento dos estudos climáticos configura-se como uma ferramenta de elevada relevância científica e aplicada, sobretudo quando se consideram os acumulados de precipitação e sua influência direta sobre a disponibilidade de recursos hídricos, o desempenho das atividades agropecuárias e a fundamentação de análises meteorológicas e hidrológicas (Marcuzzo et al., 2010).

Em regiões semiáridas, como o Nordeste brasileiro (NEB), a elevada variabilidade espacial e temporal das precipitações impõe desafios metodológicos expressivos. Isso ocorre em função da distribuição irregular das estações pluviométricas, da escassez de séries históricas contínuas e da recorrência de eventos extremos, tanto de seca prolongada quanto de chuvas concentradas em curto intervalo de tempo (Silva e Santos, 2018). Tais características reforçam a necessidade de abordagens metodológicas capazes de representar adequadamente a heterogeneidade pluviométrica regional, indo além da mera descrição matemática dos dados.

A esse respeito, Righi e Basso (2016) elucidam o uso de ferramentas de interpolação, por serem um processo matemático de achar valores intermediários entre os valores discretos de uma função, assim como, estimar valores de propriedades locais não amostrados, tomando como base valores de dados observados em locais conhecidos. Essas técnicas assumem papel estratégico no NEB, ao possibilitarem o preenchimento de lacunas de dados e a geração de superfícies contínuas de precipitação, fundamentais para análises climáticas em áreas com limitada densidade de monitoramento.

À luz dessa problemática, a Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró (BHRAM), situada no Estado do Rio Grande do Norte, destaca-se por sua expressiva relevância socioambiental e econômica, ao abranger 52 municípios que concentram áreas urbanas, sistemas agrícolas e ecossistemas sensíveis inseridos no domínio do Semiárido.

A compreensão dos padrões espaciais da precipitação nessa bacia é estratégica para subsidiar políticas públicas voltadas ao uso racional da água, à mitigação dos impactos da variabilidade climática e à adaptação frente aos efeitos das mudanças climáticas globais, amplamente discutidos nos relatórios recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

Dentre os métodos de interpolação espacial mais empregados em estudos climatológicos, conforme Silva et al. (2013) destaca-se o *Inverse Distance Weighting* (IDW),



Krigagem (KRG), e Spline, pois, são aplicados utilizando Sistema de Informação Geográfica.

O IDW é um método determinístico baseado no pressuposto de que os valores da variável tendem a ser mais similares entre locais próximos do que distantes, calculando o valor estimado a partir do inverso do peso da distância (Silva, 2007). Esse método foi adotado por Ribeiro e Reis (2009) e Silva et al. (2013) em estudos de Bacias Hidrográficas (BH), destacando-se como a melhor alternativa para mapear a distribuição espacial das chuvas.

Em contrapartida, os métodos estatísticos, representados neste trabalho pela Krigagem Ordinária, fundamentam-se na Teoria das Variáveis Regionalizadas e na existência de dependência espacial entre as observações. Diferentemente dos interpoladores puramente determinísticos, a Krigagem não se apoia apenas na distância geométrica, mas na estrutura de autocorrelação espacial capturada pelo semivariograma (Rocha 2021).

A modelagem do semivariograma vai além da interpolação baseada em distância, pois leva em conta o comportamento real e a distribuição probabilística dos dados no espaço. Para isso, a variância é explicada por três parâmetros estruturais: o efeito pepita, que engloba as variações em escala muito pequena ou erros de medida; o alcance, que define o limite máximo de influência entre as amostras; e o patamar, que marca o ponto onde essa dependência espacial deixa de existir (Landim, 2003).

A partir dessa leitura detalhada do comportamento espacial, a Krigagem ajusta os pesos de cada amostra para garantir o menor erro de estimativa possível. É essa base estatística que torna o método tão seguro para preencher falhas em séries observacionais e para mapear a dinâmica climática com fidelidade.

O método de Krigagem Ordinária apresentou resultados satisfatórios no estudo de Wanderley et al. (2012), mostrando-se eficaz tanto para mapear a distribuição espacial das chuvas quanto para preencher falhas de dados.

O método Spline, por sua vez, segundo Marcuzzo et al. (2010) estima valores usando uma função matemática que minimiza a curvatura da superfície resultando em uma superfície suave que passa exatamente pelos pontos de entrada. Sendo apropriado quando há a tendência de variações gradativas nos valores do fenômeno a ser interpolado (Amorim et al., 2008).

Em relação a aplicação deste teste, Castro Filho, et. al. (2012) ao compará-lo o considera como mais compatível com a realidade, considerando seus princípios



determinísticos e por sua vez, para realidade do trabalho, possibilitam criar uma superfície com valores mais próximos do real.

Diante desse cenário, o presente artigo tem como objetivo comparar o desempenho dos métodos de interpolação IDW, Krigagem e Spline na espacialização da precipitação pluviométrica na BHRAM. Deste modo, busca-se, avaliar como cada método representa os padrões espaciais dos acumulados, discutir suas potencialidades e limitações no contexto semiárido e contribuir para o aprimoramento metodológico de estudos climatológicos aplicados à gestão de BH.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo corresponde à BHRAM, localizada na porção Oeste do estado do Rio Grande do Norte, abarca porção da região imediata de Pau dos Ferros e Mossoró. A BH tem sua nascente no município de Luís Gomes, atravessa áreas da Chapada do Apodi e da cidade de Mossoró, e deságua no Oceano Atlântico, no município de Grossos (Silva e Camargo, 2022). Seus limites territoriais fazem fronteira com os estados do Ceará e da Paraíba, e a bacia é considerada a segunda maior do Estado do Rio Grande do Norte, sua representação espacial encontra-se na Figura 01.

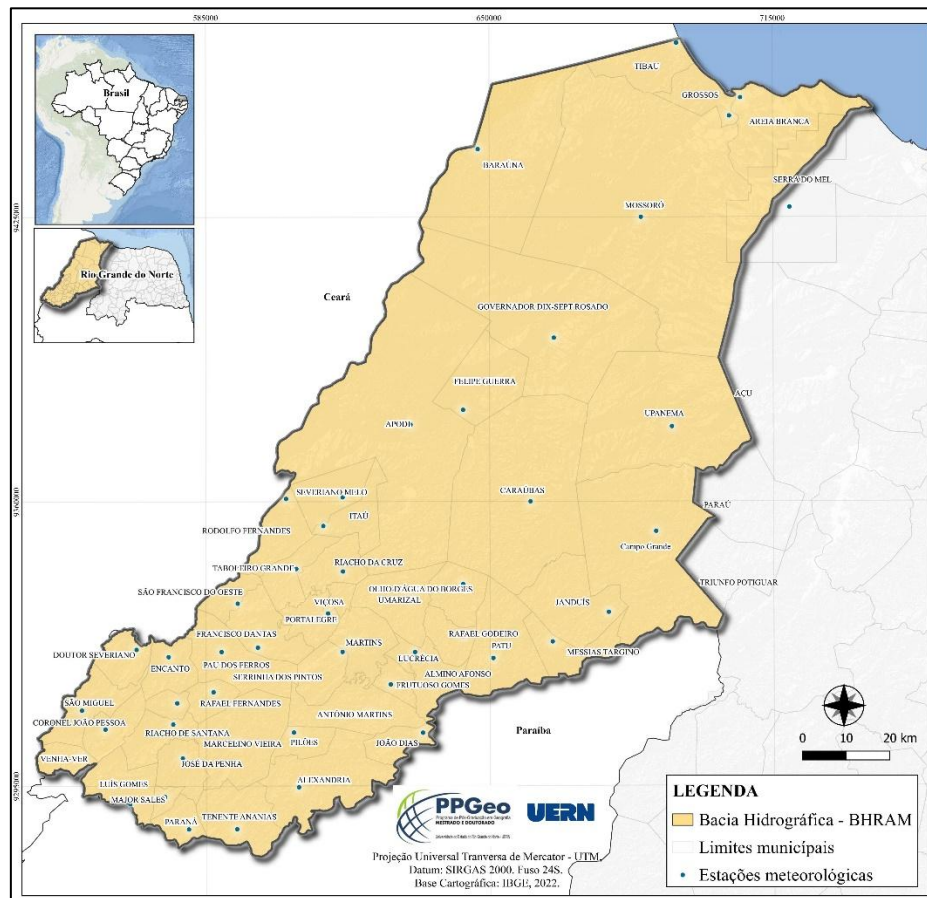
A porção oeste do Rio Grande do Norte, onde a BHRAM insere-se, encontra-se predominantemente no domínio do clima Tropical de Zona Equatorial, caracterizado por elevadas temperaturas ao longo de todo o ano e por um regime pluviométrico marcado pela irregularidade espacial e temporal. Nessa região, predominam condições semiáridas, com longos períodos de estiagem e estação chuvosa concentrada, geralmente entre os meses de fevereiro e maio.

A principal responsável pelas chuvas é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), cuja migração sazonal favorece a ocorrência de precipitações no primeiro semestre. Em função dessa dinâmica, observa-se a presença de áreas com sete a dez meses secos, configurando um quadro de forte vulnerabilidade climática (Diniz e Pereira, 2015).

Além da atuação da ZCIT, o clima do oeste potiguar é influenciado por fatores geográficos, especialmente o relevo e a posição em relação aos planaltos e serras regionais. A presença de áreas a sotavento da Borborema e de outros maciços contribui para a redução dos totais pluviométricos, intensificando as condições de aridez em municípios do Seridó e do sertão ocidental.



Figura 01 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Apodi – Mossoró



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Em contrapartida, áreas mais elevadas, como as serras de Martins e Luiz Gomes, apresentam médias pluviométricas superiores, resultantes do efeito orográfico, que favorece a formação de chuvas. Dessa forma, o oeste do Rio Grande do Norte apresenta forte heterogeneidade climática, marcada pela combinação entre sistemas atmosféricos, relevo e continentalidade, o que condiciona os padrões ambientais e socioeconômicos da região (Diniz e Pereira, 2015).

A análise da precipitação se deu a partir de dados pluviométricos em uma série temporal de 30 anos, período compreendido entre os anos de 1973 a 2002, cedidos pela Empresa de Pesquisas Agropecuárias do Rio Grande do Norte (EMPARN). Sendo 52 pontos de estações pluviométricas dentro do limite da BH.

A manipulação dos dados para ambos os métodos, procederam da mesma maneira, a priori, a elaboração da base de dados em planilha do *Excel* contendo as coordenadas dos municípios que compõem a área de estudo e as respectivas médias pluviométricas. Esses dados foram exportados em formato csv (separação de valores por

virgula) para o *software* Qgis v. 3.40. A camada em tabela necessariamente necessita ser convertida para *shapefile*, para posteriormente ser aplicado os métodos de interpolação.

Para o método IDW, foram testados diferentes parâmetros de ponderação da distância, de modo a avaliar a sensibilidade da interpolação à influência espacial das estações pluviométricas. Esse método, por sua vez, realiza a estimativa da variável ao longo do espaço, ponderando pesos a cada um dos postos mais próximos, o que é função do inverso de uma potência da distância, ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior o peso atribuído ao ponto amostrado (JIMENEZ; DOMEQ, 2008).

Para o método IDW foi adotado expoente igual a 2, valor amplamente empregado em estudos climatológicos por representar um equilíbrio entre a influência dos pontos próximos e a suavização espacial das estimativas (Marcuzzo, Cardoso e Mello, 2010). A escolha desse parâmetro buscou garantir comparabilidade com estudos prévios voltados à espacialização da precipitação.

Gardiman Júnior et al. (2012) enfatizam que o método de IDW é recomendado para regiões com alta densidade de amostras, sendo comumente utilizado com o expoente dois, com bons resultados, razão pela qual foi utilizado neste trabalho.

O interpolador Krigagem é baseado numa função contínua, que explica o comportamento de uma variável nas distintas direções de um espaço geográfico. Permite associar a variabilidade da estimação com base na distância que existe entre um par de pontos, pelo uso de um semivariograma, o qual permite verificar o nível de similitude que existe entre estes, à medida que se afastam (Gallardo, 2006).

A aplicação da Krigagem Ordinária foi realizada por meio do complemento Smart-Map, no *software* QGIS, sendo avaliados diferentes modelos teóricos de semivariograma, entre eles o esférico, o exponencial e o gaussiano. Após os testes realizados, o modelo gaussiano foi selecionado por apresentar o melhor ajuste à estrutura de dependência espacial dos dados pluviométricos da área de estudo, proporcionando uma representação mais contínua da variabilidade espacial da precipitação.

A escolha desse modelo encontra respaldo na literatura geoestatística, que destaca sua adequação para variáveis ambientais cujas transições espaciais ocorrem de forma gradual e contínua, característica frequentemente observada na distribuição da precipitação pluviométrica. (Lundgren et al., 2017; Mello e Sampaio (2019); Costa et al., 2021). Diferentemente de modelos que representam mudanças mais abruptas na continuidade espacial, o modelo gaussiano apresenta uma ascensão suave da semivariância nas menores distâncias, permitindo representar com maior fidelidade



fenômenos naturais controlados por processos atmosféricos e fisiográficos de comportamento contínuo.

No presente estudo, a interpolação spline foi realizada no ambiente R por meio do ajuste de um modelo de regressão aditiva generalizada com funções Thin Plate Regression Spline, utilizando o pacote mgcv. Inicialmente, os dados pluviométricos foram organizados em formato tabular, contendo as coordenadas projetadas dos postos e os respectivos valores de precipitação anual. Em seguida, foi ajustado um modelo espacial bidimensional, no qual a variável dependente correspondeu à precipitação e as variáveis independentes às coordenadas geográficas.

A superfície interpolada foi obtida por meio da predição dos valores em uma grade regular, posteriormente convertida em raster e recortada pelos limites da bacia hidrográfica, possibilitando a geração do mapa final de precipitação interpolada.

A verificação do desempenho dos interpoladores foi realizada por meio do procedimento de validação cruzada, conforme metodologia proposta por Caruso e Quarta (1998). O método consiste na remoção temporária de um subconjunto de estações pluviométricas do banco de dados original, seguida da execução de cada interpolador com o conjunto reduzido de postos. Os valores estimados para as estações removidas são então comparados aos valores reais observados, possibilitando a quantificação dos erros e a avaliação da capacidade preditiva de cada método, como em estudo de Alves (2011); Silva, Pedrollo e Castro (2013), Malfatti, Oliveira e Hamburger, (2018).

Neste estudo, foram selecionados aleatoriamente cinco postos pluviométricos (aproximadamente 10% da rede observacional), distribuídos espacialmente na área da BHRAM. A definição do subconjunto de validação deve ser, portanto, orientada por dois critérios concomitantes: a representatividade espacial e fisiográfica das estações retiradas, e a preservação da densidade amostral mínima necessária para o ajuste confiável do semivariograma e para a execução dos interpoladores, principalmente, a Krigagem Ordinária, que é sensível à redução do número de postos (Isaaks e Srivastava, 1989; Landim, 2003).

Nesse sentido, as cinco estações foram selecionadas de forma a contemplar as distintas unidades fisiográficas e climáticas da BHRAM, incluindo postos localizados nas áreas de maior altitude (Domínio montanhoso, chapadas úmidas e inselbergs), onde o efeito orográfico condiciona maiores totais pluviométricos, e nas áreas rebaixadas (depressão sertaneja e tabuleiros costeiros), caracterizadas por menores acumulados e maior irregularidade interanual.



Essa distribuição espacial intencional garante que o subconjunto de validação seja climaticamente representativo da heterogeneidade pluviométrica interna da bacia, e não um mero artefato da aleatoriedade da amostra (Gardiman Júnior et al., 2012). As 47 estações remanescentes mantiveram densidade amostral suficiente para o ajuste do semivariograma gaussiano e para a execução dos três interpoladores com parâmetros estáveis.

Para validação e verificação, foram utilizados parâmetros embasados em Gardiman Júnior et al. (2012), no qual, foram cálculos dos seguintes coeficientes de determinação: (r^2), o qual indica o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total, em que, quanto mais próximo da unidade, mais perfeita é a relação entre os dados.

Foi comparado, também, o coeficiente de correlação (r) e o erro quadrático médio – EQM, de acordo com este índice, o melhor interpolador, para cada variável, é aquele que apresentar o menor valor do EQM. Calculou-se, dessa forma, o índice de concordância (d), e o índice de confiança (c). O índice de confiança ou desempenho (c), que é produto da multiplicação entre o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d), em que seus valores variam de “zero” (não existe concordância) a “um” (concordância perfeita). Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 01.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A precipitação registrada pelos pluviômetros na área de estudo indica variação significativa entre os postos amostrados, evidenciando elevada heterogeneidade espacial no regime pluviométrico da BHRAM. Os valores observados variam de aproximadamente 633 mm a 1.221 mm anuais, com média em torno de 804 mm e mediana próxima de 789 mm, refletindo a influência conjunta dos condicionantes fisiográficos e da dinâmica atmosférica regional.

Essa variabilidade resulta da interação entre a compartimentação morfoclimática da bacia e a atuação dos principais sistemas atmosféricos que influenciam o Nordeste Setentrional, especialmente a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), responsável pela maior parte da precipitação anual, além dos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) e, em menor frequência, dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), que modulam a distribuição temporal e espacial das chuvas (Molion; Bernardo, 2002; Ferreira; Mello, 2005).

Esses sistemas operam sobre uma superfície fisiográfica heterogênea: os compartimentos de maior altitude, como os Domínios Montanhosos, as Chapadas e Platôs e os Inselbergs, favorecem o levantamento orográfico das massas de ar úmidas, intensificando a condensação e a precipitação, enquanto as áreas correspondentes à

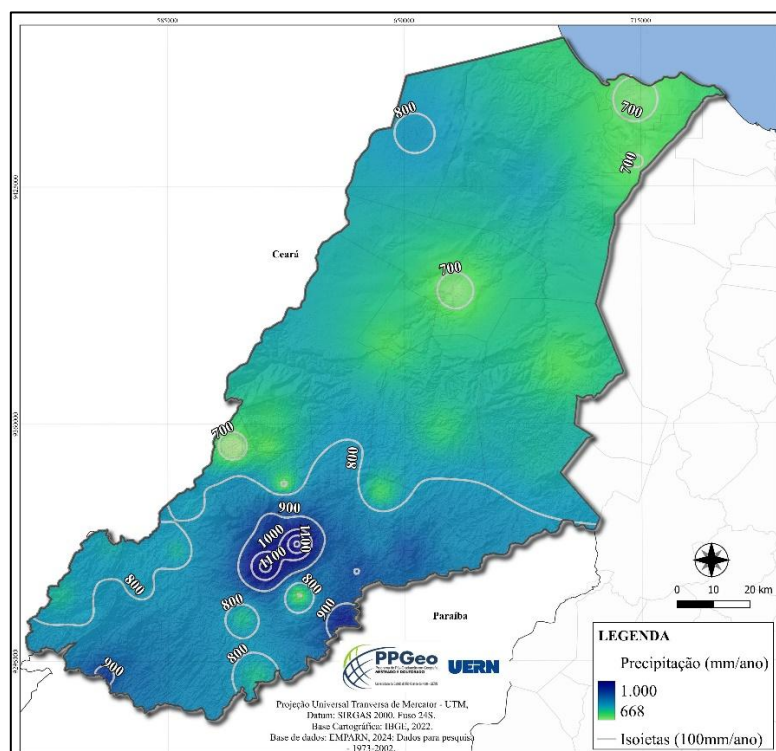


Depressão Sertaneja, aos Baixos Platôs e aos Tabuleiros Costeiros apresentam menores totais pluviométricos em razão das menores altitudes, do efeito de sotavento em determinados setores e da maior influência da continentalidade (Diniz e Pereira, 2015; Silva e Camargo, 2022; Morais, 2025).

A interpolação espacial constitui, portanto, ferramenta indispensável para representar esses gradientes pluviométricos com continuidade cartográfica, convertendo medições pontuais em superfícies que expressam os padrões espaciais condicionados pela organização morfoclimática da bacia e subsidiam análises ambientais e decisões de gestão hídrica.

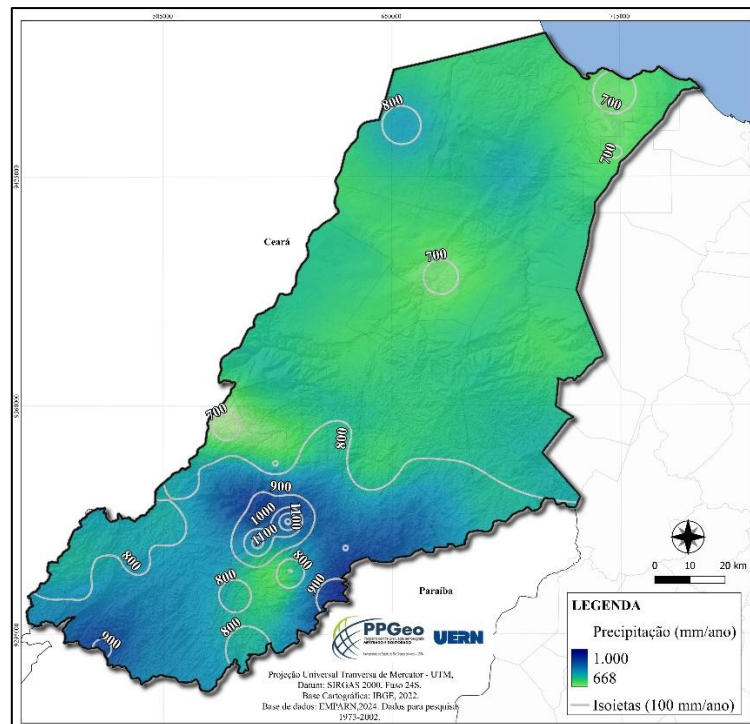
A análise comparativa entre os produtos cartográficos gerados pelos métodos IDW, Krigagem Ordinária e Spline (Figuras 2, 3 e 4) evidencia diferenças substanciais na representação espacial do comportamento pluviométrico da BHRAM, diretamente relacionadas aos pressupostos teóricos e operacionais que fundamentam cada técnica.

Figura 02 - Distribuição da precipitação para o período de 1973-2002 para Bacia Hidrográfica do Rio Apodi – Mossoró por método do IDW



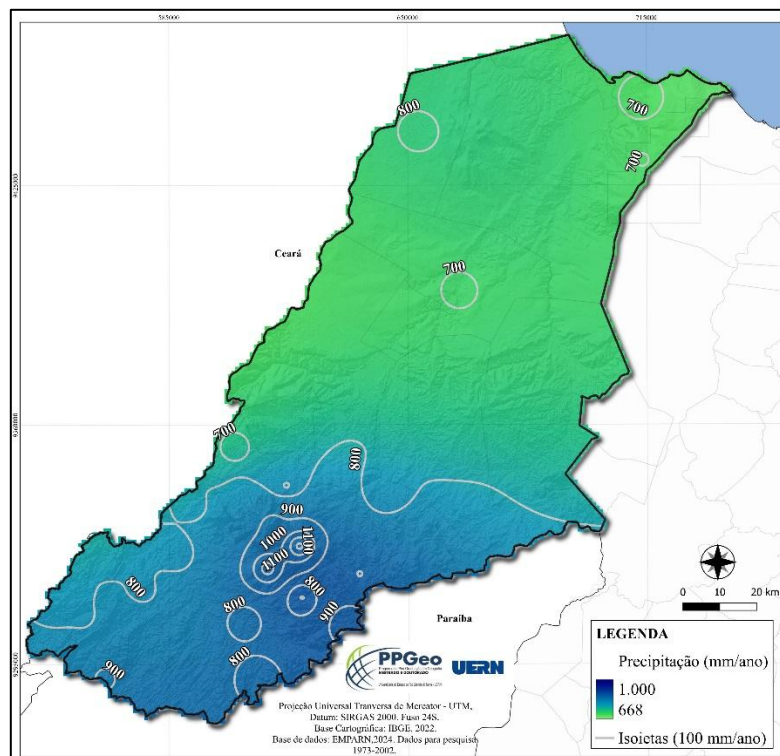
Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Figura 03 - Distribuição da precipitação para o período de 1973-2002 para Bacia Hidrográfica do Rio Apodi – Mossoró por método de Krigagem



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Figura 04 – Distribuição da precipitação para o período de 1973-2002 para Bacia Hidrográfica do Rio Apodi – Mossoró por método Spline



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

O mapa gerado pelo IDW (Figura 2) reproduz o gradiente geral de precipitação na direção oeste-leste com maiores totais no setor serrano e menores na porção central e leste da bacia, mas revela um padrão típico dos interpoladores determinísticos baseados em distância: a formação de zonas de influência circulares em torno das estações com valores extremos, em especial nas áreas de maior altitude. Esse fenômeno, denominado efeito de alvo ou bull's-eye, resulta da dependência exclusiva da distância euclidiana para o cálculo dos pesos, sem considerar a estrutura de autocorrelação espacial dos dados (Marcuzzo, Cardoso e Mello, 2010).

A consequência prática é uma representação espacial que superestima a influência local de cada posto e suaviza de forma inadequada as transições entre as unidades morfoclimáticas, limitando a fidelidade cartográfica nos setores de baixa densidade amostral, como o extremo leste da bacia.

O mapa gerado pela Krigagem Ordinária (Figura 03) apresenta uma superfície espacialmente mais contínua e fisicamente coerente, com transições graduais entre os núcleos de maior precipitação e as áreas de menor acumulado. A estrutura de dependência espacial capturada pelo semivariograma gaussiano ajustado permite que o método atribua pesos diferenciados às estações vizinhas em função não apenas da distância, mas da autocorrelação inerente ao campo pluviométrico.

Isso resulta em uma representação que respeita os gradientes orográficos com o setor montanhoso do oeste bem individualizado como núcleo de maior precipitação, e dilui de forma mais realista os efeitos de borda, produzindo um produto cartográfico mais aderente à dinâmica climática da região. A maior continuidade espacial do mapa da Krigagem é consistente com o comportamento esperado da precipitação média anual em regiões onde a ZCIT atua como sistema gerador de larga escala, produzindo campos de chuva de ampla extensão e variação gradual.

O mapa gerado pelo método Spline, evidenciado na Figura 04, demonstra o principal problema operacional desse interpolador para variáveis com alta variabilidade local: a tendência à suavização excessiva da superfície, que atenua os extremos pluviométricos e compromete a representação dos gradientes abruptos associados ao relevo.

Os núcleos de alta precipitação dos setores serranos aparecem diluídos, e as transições entre as unidades morfoclimáticas perdem a nitidez observada nos demais métodos. Essa característica, embora matematicamente coerente com a lógica do ajuste de superfícies suaves por mínimos quadrados, é inadequada para variáveis com

comportamento espacial descontínuo, como a precipitação pluviométrica em regiões de topografia acidentada e elevada variabilidade interanual (Marcuzzo et al., 2011).

A Tabela 01 apresenta os índices estatísticos obtidos pela validação cruzada aplicada aos três métodos, confirmando e quantificando as diferenças qualitativas observadas nos produtos cartográficos.

Tabela 01 – Comparação entre os métodos de interpolação

Modelos	RMSE	EQM	r	MAE	R ²	EF	d	c
IDW	35,48	1258,50	0,825	31,27	0,681	0,489	0,832	0,577
Krigagem	4,29	18,39	0,999	3,66	0,998	0,993	0,998	0,995
Spline	82,26	6766,87	0,63	48,66	0,39	0,37	0,68	0,43

Fonte: Organizado pelas autoras (2025).

Os resultados evidenciam desempenhos contrastantes, confirmando a Krigagem Ordinária como o interpolador de melhor desempenho para dados de precipitação pluviométrica na BHRAM, em consonância com estudos realizados em outras bacias hidrográficas brasileiras (Marcuzzo, Cardoso e Mello, 2010; Wanderley et al., 2012; Cunha et al., 2013).

A Krigagem Ordinária registrou os menores valores de erro absoluto e quadrático (RMSE = 4,29 mm; EQM = 18,39 mm²; MAE = 3,66 mm) e os maiores índices de ajuste ($r = 0,999$; $R^2 = 0,998$; EF = 0,993; $d = 0,998$; $c = 0,995$), configurando desempenho classificado como ótimo segundo os critérios de Camargo e Sentelhas (1997).

A eficiência de Nash-Sutcliffe de 0,993 supera em larga margem o limiar mínimo recomendado de 0,75 para modelos hidrológicos e climatológicos e o índice de confiança de Willmott próximo da unidade indica concordância quase total entre os valores observados e estimados. Esse desempenho superior é diretamente atribuível à capacidade da Krigagem de incorporar a estrutura de autocorrelação espacial da precipitação por meio do semivariograma, tornando as estimativas ótimas no sentido estatístico, ou seja, não tendenciosas e de variância mínima.

O IDW apresentou desempenho intermediário. Embora o coeficiente de correlação ($r = 0,825$) indique associação razoável entre valores estimados e observados, os erros absolutos (RMSE= 35,48mm; MAE= 31,27mm) são consideravelmente mais elevados do que os da Krigagem, e a eficiência de Nash-Sutcliffe (EF= 0,489) muito abaixo do limiar de 0,75, revela que o método não consegue reproduzir adequadamente a variabilidade



espacial da precipitação. O índice de confiança ($c = 0,577$), classificado como "regular" conforme Camargo e Sentelhas (1997), reforça essa limitação.

Esse comportamento é esperado do ponto de vista teórico, uma vez que o IDW desconsidera a estrutura espacial dos dados e produz distorções geométricas nos setores de maior contraste altimétrico, onde a precipitação muda rapidamente em distâncias relativamente curtas.

Cabe ressaltar, contudo, que a limitação do IDW está vinculada ao contexto específico da BHRAM. Em regiões com distribuição amostral densa, topografia mais homogênea ou variáveis com menor variabilidade local, o método pode apresentar desempenho satisfatório e operacionalmente adequado, como demonstrado por Ribeiro e Reis (2009) e Silva et al. (2013) em outras bacias hidrográficas brasileiras. Conforme Li e Heap (2011), o desempenho dos interpoladores é sempre condicionado às características da variável, à estrutura de dependência espacial, à densidade amostral e à escala de investigação, não sendo recomendável a adoção de um método de forma generalizada.

O Spline registrou o pior desempenho entre os três métodos avaliados. Os elevados erros absolutos ($RMSE = 82,26$ mm; $EQM = 6.766,87$ mm²; $MAE = 48,66$ mm) e os baixos índices de correlação ($r = 0,63$) e determinação ($R^2 = 0,39$) revelam baixa capacidade preditiva para a variável analisada. A eficiência de Nash-Sutcliffe de 0,37 e o índice de confiança de 0,43, ambos em patamar insatisfatório, confirmam que o método é inadequado para a espacialização da precipitação na BHRAM. Essa inadequação decorre da tendência estrutural do Spline em minimizar a curvatura da superfície ajustada, produzindo representações excessivamente suavizadas que não reproduzem os gradientes abruptos associados ao efeito orográfico nos setores serranos.

O método torna-se especialmente problemático quando a base de dados contém pontos com valores extremos relativamente isolados, como os postos de maior altitude na porção oeste da bacia, situação em que a superfície ajustada tende a distorcer o campo pluviométrico nas regiões intermediárias entre esses extremos e os demais postos.

Em síntese, os resultados demonstram que a superioridade estatística da Krigagem na BHRAM não é circunstancial, ela expressa uma compatibilidade fundamental entre o método geoestatístico e a natureza do fenômeno estudado. A existência de dependência espacial moderada no campo de precipitação evidenciada pelo comportamento do semivariograma gaussiano ajustado é a condição necessária e suficiente para que a Krigagem ofereça vantagem sobre os demais interpoladores. Os resultados reforçam,



portanto, a importância de avaliar a estrutura espacial dos dados antes da definição do método de interpolação, e não apenas após a comparação de índices de validação.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou que a escolha do método de interpolação espacial exerce influência direta sobre a qualidade cartográfica e a precisão das estimativas de precipitação na BHRAM, reforçando que a seleção do interpolador deve ser precedida da análise da estrutura de dependência espacial da variável e validada por múltiplos índices estatísticos.

A Krigagem Ordinária mostrou-se o método mais adequado para a espacialização da precipitação média anual na área de estudo, com desempenho classificado como ótimo em todos os indicadores avaliados, superando amplamente o IDW e o Spline. Esse resultado decorre da compatibilidade entre a base geoestatística do método e a estrutura de autocorrelação espacial presente no campo pluviométrico da bacia, condicionada pela interação entre os sistemas atmosféricos atuantes, especialmente a ZCIT e a compartimentação morfoclimática do território.

Do ponto de vista aplicado, os produtos cartográficos gerados pela Krigagem Ordinária oferecem representações espacialmente coerentes com os controles físicos e climáticos da BHRAM, constituindo subsídios qualificados para a gestão integrada dos recursos hídricos, o planejamento territorial e a formulação de políticas públicas de adaptação à variabilidade e às mudanças climáticas no Semiárido brasileiro.

A capacidade do método de identificar com fidelidade os núcleos de maior precipitação nos setores de maior altitude e os gradientes de aridez nas áreas rebaixadas é especialmente relevante em uma região onde pequenas variações espaciais na disponibilidade hídrica têm impactos expressivos sobre a agropecuária, o abastecimento urbano e os ecossistemas sensíveis.

Para investigações futuras, recomenda-se a ampliação das estratégias de validação cruzada, com a adoção da abordagem leave-one-out, proposta por Baratto et al., (2022) ou da reamostragem repetida com maior número de postos de validação, de modo a conferir maior validação estatística.

A incorporação de variáveis fisiográficas auxiliares, como altitude, declividade e orientação das vertentes, por meio da Krigagem com Deriva Externa, representa um avanço metodológico promissor, especialmente considerando que o efeito orográfico configura o principal controle da heterogeneidade pluviométrica na porção serrana da BHRAM. A



avaliação da variabilidade espacial da precipitação e o teste de modelos de semivariograma alternativos em diferentes escalas temporais (sazonais e mensais) também ampliariam a compreensão dos processos que governam a distribuição das chuvas na região.

REFERÊNCIAS

ALVES, F. C. Avaliação de interpoladores para a espacialização de variáveis de precipitação na bacia hidrográfica do rio Ivaí. **SIMPOSIÓ BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, v. 15, p. 4070-4077, 2011.

AMORIM, R. C.F.; RIBEIRO, A.; LEITE, C. C. LEAL, B.G; SILVA, J. B.G. Avaliação do desempenho de dois métodos de espacialização da precipitação pluvial para o Estado de Alagoas. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 3Sa0, n. 1, p. 87-91, 2008.

BARATTO, P. F. B.; CECÍLIO, R.A.; TEIXEIRA, D.B. de S.; ZANETTI, S. S.; XAVIER, A. C.. Espacialização da precipitação diária em bacias hidrográficas do Sul do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, p. 385-404, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863730034>

CASTRO FILHO, H. C. de; STEINKE, E. T.; STEINKE, V. A. Análise espacial da precipitação pluviométrica na bacia do lago Paranoá: comparação de métodos de interpolação. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 8, p. 336–345-336–345, 2012.

COSTA, I. dos S.; MEDEIROS, E. S. de, SILVA, A. Q. da; MEDEIROS, C. C. B.; OLIVEIRA, L. A. de. (2021). Mapeamento da precipitação em uma Região do Nordeste Brasileiro por meio de técnicas geoestatística. **Revista Ibero-Americana De Ciências Ambientais**, 12(5), 761–769. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.005.0059>.

CUNHA, A. de M.; LANI, J. L.; SANTOS, G. R. dos. FERNANDES FILHO, E. I.; TRINDADE, F. S; SOUZA, E. de. Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 1179-1191, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000900001>.

DINIZ, M.T. M, e PEREIRA, V.H.C., Climatologia do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil: Sistemas Atmosféricos Atuantes e Mapeamento de Tipos de Clima. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 35, n. 3, p. 488–, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5216/bgg.v35i3.38839>.

FERREIRA, A. G., MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**. ABC, ano 1, dez. 2005. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>.

GALLARDO, Antonio. Geostadística. **Ecosistemas**, v. 15, n. 3, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/26496605_Geostadistica.

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; COUTO, D. R.; SOUZA, F. B. C; SANTOS JUNIOR, G. N. dos.; SANTOS, A. R. dos. Perda de solo por erosão hídrica em áreas de preservação permanente na microbacia hidrográfica Córrego do Horizonte, Alegre, Espírito Santo.



Engenharia Ambiental. Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 2, p. 21–34, jun. 2012.

Disponível em:

https://www.mundogeomatica.com.br/Publicacoes/Revistas_2012/3_Perdas_Solo_Erosao_Hidrica_BHRA.pdf.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R. M. **Uma Introdução à Geoestatística Aplicada.** Oxford University Press, Nova Iorque, 561 p. 1989.

JIMENEZ, K. Q.; DOMEQ, F. M. **Estimação de chuva usando métodos de interpolação.** Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.16, 2008.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos.** 2a. edição revista e ampliada. 2. ed. São Paulo/SP: Fundação Editora da UNESP/FEU, 253p. 2003.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. **Ecological Informatics**, v. 6, n. 3-4, p. 228-241, 2011. DOI: [10.1016/j.ecoinf.2010.12.003](https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003).

LUNDGREN, W. J. C.; SOUZA, I. F. de; LUNDGREN, G. A. . Krigagem na construção de mapa pluviométrico do Estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 13-22, 2017.

MALFATTI, M. G. L.; OLIVEIRA C. de, A.; HAMBURGER, D. S. Identificação de regiões pluviométricas moderadas na bacia hidrográfica do Rio Paraná. **Geociências** **Geociências**, v. 2, p. 409-421, 2018. Disponível em: https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/37/volume37_2_files/37-2-artigo-13.pdf.

MARCUZZO, F. F. N.; Cardoso, M.R.D.; Mello, L. T. A. de. Uso dos Métodos de Krigagem e Spline de Tensão no Mapeamento de Chuvas na Região Metropolitana de Goiânia e Seu Entorno. In: II Simpósio Internacional Caminhos Atuais da Cartografia na Geografia, 2010, São Paulo. **Anais do Simpósio Internacional Caminhos Atuais da Cartografia na Geografia**, 2. São Paulo: EDUSP, 2010. v. 1. p. 128-128.

MELLO, Y. R. de; SAMPAIO, T. V. M. Análise geoestatística da precipitação média para o estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.64468>.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p 1-10, 2002.

MORAIS, V.V.T. de M. **Compartimentação Morfoclimática da Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró – BHRAM.** 2025. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Mossoró, 2025.

PINTO, Y. G.; ROCHA, M. M d; RAMOS, G. Z. **Comparação entre krigagem ordinária e krigagem lognormal, aplicadas a uma base de dados de cobre da Mina Sequeirinho.** Monografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.



RIBEIRO, G. A.; REIS, J. A. T. Avaliação de métodos discretos e de modelos distribuídos de interpolação para a apropriação da precipitação média na bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória – ES. **Revista Capixaba de Ciência e Tecnologia**, Vitória, n. 5, p.1-8, 2009.

RIGHI, E.; BASSO, L. A. Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas. **Ambiência. Guarapuava (PR). Vol. 12, n. 1 (jan./abr. 2016), p. 101-117**, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/224300>.

SILVA, G. H. G da S.; CAMARGO, A. F. M.; (organizadores). **A Bacia do Rio Apodi-Mossoró aspectos ambientais, sociais e econômicos de uma bacia hidrográfica no Semiárido do Rio Grande do Norte**. 1. ed. Mossoró: EDUDERSA, 2022. 409 p. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8595>.

SILVA, J. N.; SILVA C. E. da; CAIADO, M. A. C. Escolha de Parâmetro para Interpolação de Precipitação Diária Utilizando o Interpolador Inverse Distance Weight (IDW). **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves**, 2013. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/1c037e71706800dcf54a10bf04028fa6_2f83cb4af409f1fb93152f01c71ba061.pdf.

SILVA, K. R da.; PAIVA, Y. G.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. E. M. Avaliação de interpoladores para a espacialização de temperaturas climáticas na bacia do rio Itapemirim-ES. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 3141-3146, 2007.

SILVA, V. P. da; SANTOS F. dos G. L. . Percepções de mudanças do clima, impactos e adaptação para sertanejos do semiárido. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55958>.

SILVA, V. S. V.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. R. ; LUCCHESI, L. V. . Estudo de regionalização por transferência de parâmetros do modelo IPH II na bacia do rio Ijuí/RS. REGA. **Revista de Gestão de Águas da América Latina**, v. 10, p. 65-75, 2013.

WANDERLEY, H. S.; AMORIM, R. F. C. de; CARVALHO, F. O. de. Variabilidade espacial e preenchimento de falhas de dados pluviométricos para o estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 347-354, 2. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000300009>.
