MODELAGEM DA PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA NO ESTADO DO PARANÁ

Marcio Paulo de Oliveira[1], Marciane Lais Magnabosco[2], Gustavo Henrique Dalposso[3]

[1]*Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Toledo, Brasil (marciooliveira@utfpr.edu.br)*
[2,3]*Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Toledo, Brasil*

Resumo: As funções *splines* são usadas para construir curvas suaves por meio de polinômios definidos por partes. O objetivo deste trabalho foi modelar as séries temporais da média de previsão decendial do modelo ECMWF para os anos de 2021 a 2025 no Paraná. Os resultados mostram maiores volumes de chuva nos meses de janeiro a março e de outubro a dezembro. Os modelos apresentaram coeficientes *spline* negativos, indicando tendência de redução da precipitação média em determinados períodos.

Palavras-chave: Funções *splines*; Previsão de precipitação; Modelo ECMWF; Séries temporais.

INTRODUÇÃO

A precipitação pluviométrica é uma das variáveis meteorológicas com elevada variabilidade no espaço e no tempo, e investigações sobre seu comportamento são fundamentais para ampliar o conhecimento sobre sua sazonalidade e sobre eventos extremos que prejudicam safras, alojamentos e a segurança da sociedade.

Os dados de previsão de precipitação pluviométrica podem ser obtidos por meio de diversos modelos meteorológicos geridos por centros nacionais de meteorologia, que desenvolvem modelos para fornecer previsões de diferentes características meteorológicas.

O *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) constitui-se como uma das principais instituições internacionais dedicadas à previsão meteorológica e climática. Destaca-se por sua elevada capacidade de modelar e prever padrões atmosféricos em escala global, incluindo a identificação e o acompanhamento de sistemas como frentes atmosféricas, tempestades, ciclones tropicais e eventos extremos. Seus modelos numéricos são continuamente atualizados, incorporando avanços científicos e tecnológicos com vistas ao aprimoramento da acurácia e do desempenho das previsões (FRNDA, 2019).

Os modelos de previsão geram dados no espaço, indicando localizações geográficas, e ao longo do tempo, em séries temporais caracterizadas por estimativas sequenciais de uma variável. Essas séries são amplamente utilizadas na análise de fenômenos dinâmicos relacionados às ciências atmosféricas, permitindo identificar regiões onde possam ocorrer eventos extremos de precipitação, com acúmulo superior a 100 mm em um dia (Kirchner et al., 2008). Assim, o objetivo deste trabalho foi modelar as séries temporais da média de previsão decendial do modelo ECMWF para os anos de 2021 a 2025 no Paraná, a fim de identificar sazonalidades e eventos extremos de precipitação.

MATERIAL E MÉTODOS

As previsões decendiais de precipitação pluviométrica (alcance de 10 dias) podem ser obtidas por meio de modelos meteorológicos. O conhecimento dos padrões de precipitação é importante, pois permite sua aplicação em diversas atividades, como a produção de alimentos, o estudo de situações de risco, entre outras. Os dados utilizados neste trabalho são previsões de precipitação pluviométrica para os anos de 2021 a 2025, do modelo ECMWF, com alcance temporal de 240 horas, o que corresponde a um período de dez dias (decêndio).

Os dados foram estratificados espacialmente com as coordenadas geográficas que corresponde a um retângulo que contém o estado do Paraná (55ºW, 48ºW, 27ºS, 22ºS). Os pixels têm dimensão de 0,5º x 0,5º, totalizando 165 pixels, sendo que os valores em cada um deles são obtidos por interpolação realizada na base de dados. A Figura 1 apresenta a região de estudo selecionada neste trabalho e indica os pixels internos do estado do Paraná.

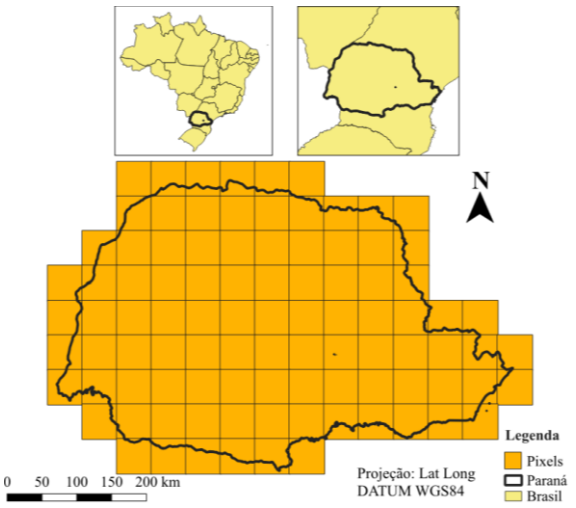


Figura 1. Localização dos pixels na área de estudo.

As funções B-*splines* são constituídas por combinações lineares de funções base. A expressão genérica de uma função *spline* pode ser expressa por:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^{k} \hat{\beta}_i B_i(x) \qquad (1)$$

em que $B_i(x)$ são as funções base, denominadas de B-*splines*, $\hat{\beta}_0$ é o intercepto, $\hat{\beta}_i$ são os coeficientes estimados no modelo para $i = 1, \ldots k$, com k o número de funções base utilizadas na suavização, $\hat{y}$ é o valor estimado pelo modelo com a *spline* final.

Para avaliar o ajuste dos modelos, foram utilizados o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério de Informação Bayesiano (BIC). O AIC é definido pela Equação (2):

$$AIC = -2\log(L) + 2k \qquad (2)$$

em que L é a verossimilhança do modelo, k é o número de parâmetros estimados (Akaike, 1974). E o critério de informação Bayesiano (BIC).

$$BIC = -2\log(L) + 2\log(n) \qquad (3)$$

sendo L é a verossimilhança e n o tamanho da amostra. O logaritmo da função de verossimilhança utilizada pode ser expresso por:

$$l = \sum_{i=1}^{n} log[f\ (y_i|\theta^i)] \qquad (4)$$

em que, f denota a função densidade de probabilidade da variável resposta e θ^i os parâmetros de interesse.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na avaliação das séries temporais e espaciais de previsões decendiais de precipitação para os anos de 2021 a 2025, foram construídas as Figuras 2 a 6. A Figura 2 apresenta a média dos dados de previsões decendiais, considerando os dias 1, 11 e 20, que abrangem os meses de janeiro a dezembro de 2021. A escala indica a ausência de precipitação em azul e precipitações mais elevadas em tons de vermelho. Na série espaço-temporal, é possível identificar que, nos meses de janeiro e outubro, ocorreram as maiores precipitações, com maior distribuição no estado do Paraná. Já nos meses de abril, julho e agosto, é possível observar predominância de estiagem, com a maioria dos pixels indicando baixa ou nenhuma precipitação. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Salton et al. (2016) na avaliação da precipitação em três localidades no estado do Paraná.

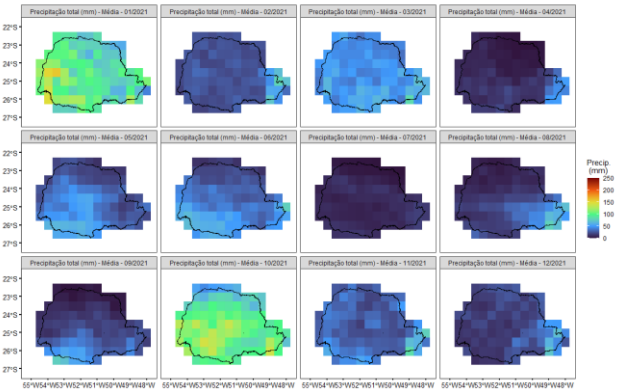


Figura 2. Média das previsões decendiais de precipitação pluviométrica para os dias 1, 11 e 20 de 2021.

A Figura 3 apresenta a média das previsões decendiais, considerando os dias 1, 11 e 20 de janeiro a dezembro de 2022. A distribuição espacial indica um número maior de pixels com precipitações mais elevadas ocorreram nos meses de setembro a outubro, valores entre 50 mm a 100 mm, em média. Na região do litoral, também é possível identificar que, de março a dezembro, houve eventos de precipitação mais intensos, com alguns pixels apresentando valores médios entre 100 mm e 150 mm. Esses resultados concordam com os obtidos por Amorim et al. (2020), ao estudarem eventos de precipitação no litoral paranaense.

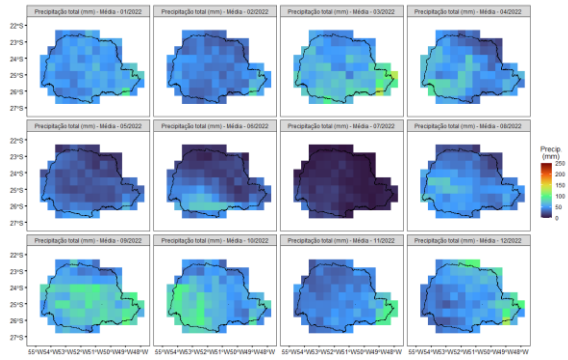


Figura 3. Média das previsões decendiais de precipitação pluviométrica para os dias 1, 11 e 20 de 2022.

Na Figura 4 a média das previsões decendiais, nos dias 1, 11 e 20 ao longo de 2023, apresentou pixels com eventos de precipitação, considerados elevados, na mesorregião Sudoeste nos meses de setembro a novembro com valores de precipitação média previstos entre 100 a 250 mm, o que indica ocorrência de eventos extremos de precipitação no período, com possibilidade de valores diários acima de 55 mm (Souza, et al., 2012), evidenciando uma região que pode sofrer com efeitos associados.

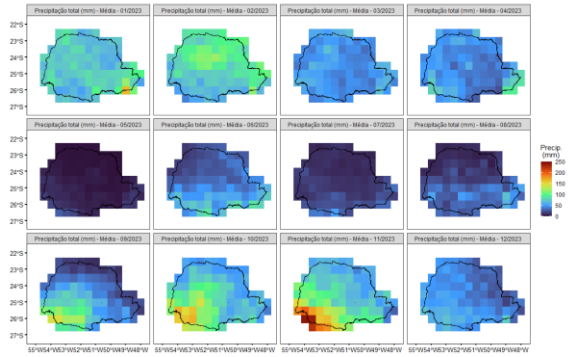


Figura 4. Média das previsões decendiais de precipitação pluviométrica para os dias 1, 11 e 20 de 2023.

A média das previsões decendiais, nos dias 1, 11 e 20 ao longo de 2024, são apresentadas na Figura 5. Em comparação com 2023, não foi possível identificar eventos com médias decendiais próximas a 250 mm. A precipitação prevista mais elevada ocorreu em janeiro, em uma localização no litoral paranaense, e a maior concentração de pixels com precipitação prevista entre 50 mm e 150 mm foi observada em dezembro.

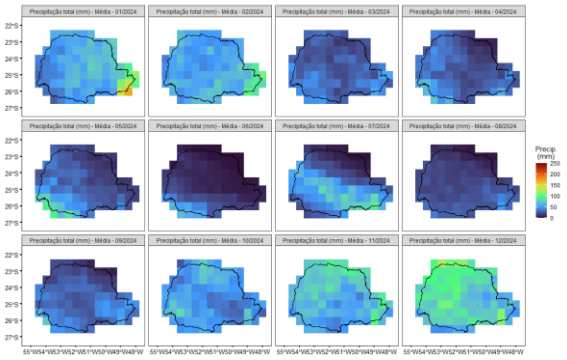


Figura 5. Média das previsões decendiais de precipitação pluviométrica para os dias 1, 11 e 20 de 2024.

Na Figura 6, com a média das previsões decendiais, nos dias 1, 11 e 20 ao longo de 2025 os pixels com maiores precipitações previstas ocorreram em janeiro, fevereiro e junho com valores entre 100 mm e 150 mm, sendo nos demais meses uma predominância de valores entre 50 mm e 100 mm, sendo alguns meses com valores próximos entre 0 mm e 50 mm, indicando períodos de estiagem (Salton et al., 2021).

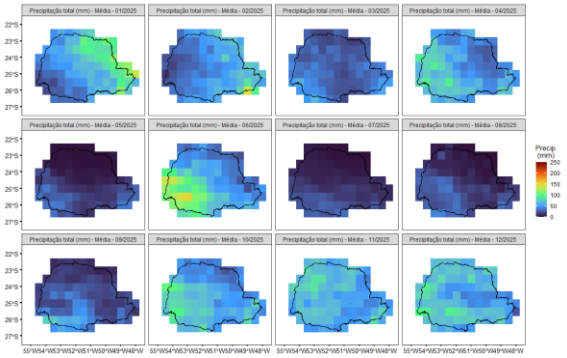


Figura 6. Média das previsões decendiais de precipitação pluviométrica para os dias 1, 11 e 20 de 2025.

A Tabela 1 apresenta medidas descritivas da precipitação pluviométrica média prevista para o passo de 240 h, correspondente a um período de dez dias para os pixels que cobrem o estado do Paraná. No período em estudo, ausência total de chuva nos decêndios em um mês, ocorreu em 06/2024, sendo nos demais meses o valor mínimo indica a ocorrência de alguma precipitação, mesmo que baixa como em 07/2022 com 0,19 mm ou em 05/2025 com 0,11 mm. Assim, as previsões de precipitação indicam uma região com certa regularidade na ocorrência de precipitação. Com relação aos valores mais elevados, da média, foi possível observar as precipitações previstas nos meses 01/2021 (159,55 mm), 01/2023 (165,46 mm) e 01/2024 (172,27), e nos meses

10/2023 (168,94 mm), 11/2023 (241,95) e 06/2025 (153,43 mm). Nestes meses, as médias de precipitação previstas atingiram valores superiores a 150 mm, com possibilidade de eventos extremos de precipitação diária que provocam efeitos associados, como alagamentos, deslizamentos e outros (Souza et al., 2012).

Tabela 1. Estatísticas descritivas da média das previsões decendiais nos dias 1, 11 e 20 nos pixels no interior do estado do Paraná.

Mês/Ano	Min	Q1	Q2	Med	Q3	Max	SD
01/2021	41,58	78,08	91,30	93,95	104,42	159,55	21,31
02/2021	17,64	22,46	25,28	28,25	27,63	81,23	11,83
03/2021	35,22	43,36	47,84	49,54	54,12	84,08	8,75
04/2021	0,53	5,13	10,20	12,25	14,18	51,85	11,23
05/2021	12,34	22,71	33,05	35,64	47,99	65,17	14,46
06/2021	12,02	27,26	36,33	38,15	48,93	78,71	15,07
07/2021	0,59	6,48	8,73	8,68	11,18	17,61	4,09
08/2021	3,42	9,37	16,20	21,07	25,95	79,32	16,54
09/2021	0,79	11,06	18,46	21,97	28,54	77,42	16,11
10/2021	44,63	86,68	99,24	98,26	112,13	143,11	21,22
11/2021	16,80	26,62	30,65	34,22	37,43	86,23	12,49
12/2021	10,47	15,14	18,69	22,77	25,26	72,99	12,17
01/2022	36,83	46,52	52,41	53,05	58,18	94,20	9,26
02/2022	26,99	34,71	40,19	41,52	45,86	85,62	9,57
03/2022	40,35	53,03	62,75	64,92	72,25	131,95	17,16
04/2022	18,89	40,97	48,15	51,30	64,33	89,38	15,89
05/2022	11,65	22,72	29,56	30,42	36,49	65,19	10,79
06/2022	5,39	17,39	26,95	31,89	42,90	76,55	18,00
07/2022	0,19	4,38	7,46	9,24	12,18	39,34	6,82
08/2022	14,06	36,00	44,12	43,83	51,57	75,01	13,17
09/2022	30,18	57,04	69,47	68,23	81,33	104,69	16,34
10/2022	31,51	49,83	62,32	63,44	76,72	101,52	17,65
11/2022	25,74	36,88	41,67	45,82	48,08	97,43	15,67
12/2022	27,29	42,01	52,11	54,89	62,69	124,72	18,24
01/2023	53,22	67,26	73,75	75,70	80,48	165,46	14,99
02/2023	41,28	70,62	85,37	83,87	95,48	120,50	17,00
03/2023	34,36	42,89	47,09	49,25	55,05	70,02	8,33
04/2023	23,82	39,53	46,34	48,65	53,37	94,61	14,11
05/2023	0,11	1,07	3,79	5,47	7,91	28,69	5,65
06/2023	14,82	27,11	38,86	42,06	54,15	89,02	18,67
07/2023	6,95	10,66	14,06	16,68	21,54	52,84	8,26
08/2023	4,73	12,42	24,10	24,55	32,69	69,20	13,78
09/2023	10,54	25,83	42,69	53,08	74,16	145,16	32,91
10/2023	39,57	56,25	75,79	83,10	101,62	168,94	31,56
11/2023	29,72	63,77	76,87	93,47	107,79	241,95	44,91
12/2023	18,72	35,61	45,74	45,07	53,04	75,70	11,94
01/2024	28,90	50,30	59,77	62,18	69,26	172,27	22,82
02/2024	40,16	51,07	57,55	59,87	65,42	106,62	13,03
03/2024	14,33	24,96	30,91	32,04	37,65	56,51	9,19
04/2024	6,68	23,47	29,82	31,18	38,35	71,98	13,17
05/2024	10,96	20,77	28,77	33,33	38,64	97,55	18,70
06/2024	0,00	4,55	9,10	15,09	19,92	66,66	15,85
07/2024	0,47	21,45	40,15	39,26	55,66	93,13	23,71
08/2024	2,36	16,81	20,63	21,14	25,85	50,78	8,78
09/2024	5,23	24,71	32,40	32,41	39,35	72,53	11,68
10/2024	25,84	44,14	49,62	50,98	57,47	85,55	11,60
11/2024	40,30	57,27	66,78	67,32	76,72	101,12	14,11
12/2024	44,99	70,38	81,46	81,33	93,86	126,38	17,51
01/2025	21,00	43,95	60,41	63,53	82,70	136,79	25,89
02/2025	15,18	36,43	50,45	50,04	58,68	144,47	18,64
03/2025	17,10	25,50	31,98	33,13	38,25	63,46	9,73
04/2025	26,43	42,83	56,89	56,58	67,68	96,36	16,90
05/2025	0,11	2,34	12,62	13,86	22,53	38,74	12,07
06/2025	22,69	42,00	55,48	66,97	88,68	153,43	30,98
07/2025	0,40	4,97	10,45	12,63	17,83	33,68	9,34
08/2025	0,05	6,14	15,66	16,49	26,62	42,09	11,68
09/2025	7,87	17,53	22,51	27,46	35,98	77,93	14,67
10/2025	26,16	46,37	58,30	59,76	71,46	104,20	17,06
11/2025	39,29	52,99	62,36	61,64	68,62	89,69	11,47
12/2025	25,54	54,25	65,94	64,25	71,16	98,87	14,00

Nota: Min: valor mínimo, Q1: primeiro quartil, Q2: segundo quartil, Med: média, Q3: terceiro quartil, Max: valor máximo, SD: desvio padrão.

As séries temporais com a média das previsões de alcance de 240 h foram modeladas por meio da função B-*spline* (Figura 7), conforme a equação (1). A figura evidencia a variabilidade mensal da precipitação pluviométrica média entre 2021 e 2025, indicando um comportamento sazonal marcado por maiores volumes de precipitação de janeiro a março e de outubro a dezembro, com redução de abril a setembro ao longo dos anos. Esse padrão é coerente com estudos sobre a Região Sul do Brasil, que

apontam que a precipitação apresenta forte variabilidade sazonal e interanual. A precipitação no Sul do Brasil se destaca por uma distribuição de chuvas não homogênea, com diferenças importantes entre estados, entre as estações do ano e entre os períodos úmidos e secos (Nery e Carfan, 2014).

Em 2021, houve queda acentuada da precipitação no primeiro semestre, com mínimos próximos aos meses de maio e junho. Essa oscilação pode estar relacionada às condições atmosféricas associadas à La Niña, fenômeno que altera a distribuição das chuvas no Sul do Brasil. Nos anos de 2023 e 2024, destaca-se o aumento da precipitação nos meses finais (outubro a dezembro), com os maiores valores em 2024. Esse comportamento é um indicativo de eventos extremos de precipitação, conforme discutido por Cardoso et al. (2020).

Assim, nas séries analisadas, foi possível identificar que no estado do Paraná, a sazonalidade pluviométrica caracteriza-se por valores acumulados mais elevados no período de outubro a dezembro e de janeiro a março (Salton et al., 2016; Amorim et al., 2020).

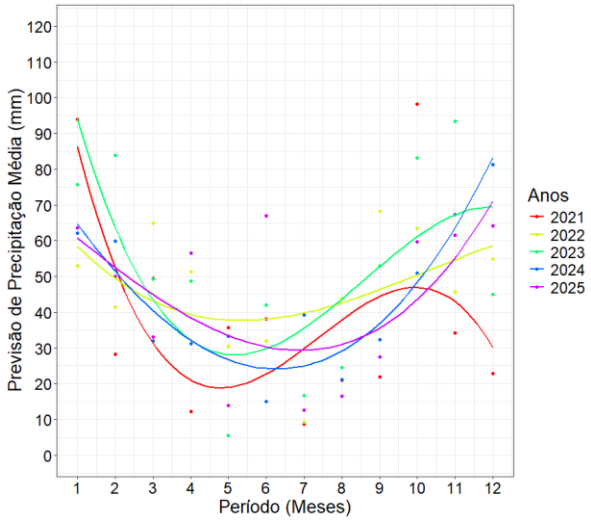


Figura 7. Modelagem com B-*spline* da média das previsões decendiais de precipitação pluviométrica para os anos de 2021 a 2025.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros estimados e os critérios AIC e BIC dos modelos de previsão decendial média para os pixels que cobrem o estado do Paraná, referentes aos anos de 2021 a 2025. O modelo de 2021 apresentou intercepto $\hat{\beta}_0 = 86{,}39$, indicando uma média inicial elevada de precipitação. O coeficiente $\hat{\beta}_1 = -152{,}20$ indica uma forte tendência de redução em determinado trecho da curva ajustada, enquanto $\hat{\beta}_2 = 10{,}03$ representa uma pequena compensação positiva na estrutura temporal. O coeficiente $\hat{\beta}_3 = -56{,}26$ evidencia a redução em outro trecho da curva.

No ano de 2022, observa-se menor magnitude dos coeficientes negativos em comparação a 2021. O intercepto $\hat{\beta}_0 = 58{,}48$ sugere menor precipitação média inicial. O parâmetro $\hat{\beta}_1 = -39{,}04$ indica uma redução menos intensa na curva temporal em comparação com o ano de 2021, enquanto $\hat{\beta}_2 = -13{,}67$ aponta para a continuidade da tendência decrescente. O coeficiente $\hat{\beta}_3 = 0{,}16$ próximo a zero indica um efeito de estabilização na curva. O ano de 2023 apresentou o intercepto $\hat{\beta}_0 = 94{,}09$, indicando a precipitação média inicial mais elevada. O coeficiente $\hat{\beta}_1 = -133{,}01$ revela forte declínio em parte da série, enquanto $\hat{\beta}_2 = -3{,}68$ e $\beta 3 = -24{,}68$ evidenciam um comportamento crescente na série, sugerindo uma redução na precipitação média acumulada.

Para o modelo de 2024, o intercepto $\hat{\beta}_0 = 64{,}70$ representa nível médio intermediário de precipitação. Os coeficientes $\hat{\beta}_1 = -53{,}18$ e $\hat{\beta}_2 = -60{,}96$ indicam reduções importantes na precipitação ao longo da série, porém o coeficiente positivo $\hat{\beta}_3 = 18{,}67$ sugere um aumento da precipitação em um dos trechos finais da curva. Esse comportamento evidencia maior variabilidade temporal e possível retomada de eventos chuvosos em determinados decêndios.

No ano de 2025, o intercepto $\hat{\beta}_0 = 60{,}74$ permaneceu próximo ao observado em 2024. Os coeficientes negativos $\hat{\beta}_1 = -31{,}05$ e $\hat{\beta}_2 = -55{,}64$ indicam redução da precipitação em um trecho mais longo da série. Já o coeficiente positivo $\hat{\beta}_3 = 10{,}36$ evidencia uma tendência de aumento das médias de precipitação nos trechos finais da curva ajustada.

Os modelos ajustados foram avaliados por meio dos coeficientes AIC e BIC. Para o ano de 2021 com $AIC = 117{,}72$ e $BIC = 120{,}15$ indicam ajuste moderado em comparação aos demais anos. Já no ano 2022 o $AIC = 108{,}02$ e $BIC = 110{,}44$ mostram melhora do ajuste em relação ao ano anterior de 2021. Um ajuste intermediário em comparação com 2021 e 2022 foi obtido no modelo de 2023, com $AIC = 114{,}37$ e $BIC = 116{,}79$. O modelo de 2024 apresentou os menores valores de $AIC = 90{,}78$ e $BIC = 93{,}20$, indicando o melhor ajuste entre todos os anos analisados. No ano de 2025, os valores de $AIC = 110{,}77$ e $BIC = 113{,}19$ indicam ajuste inferior ao de 2024, mas ainda adequado para representar a dinâmica temporal.

Os modelos apresentaram coeficientes negativos, sugerindo uma tendência de redução da precipitação média em determinados períodos decendiais. Para os

modelos de 2024 e 2025, os coeficientes positivos observados indicam que os modelos com *splines* detectaram oscilações e incrementos locais da precipitação, evidenciando a natureza não linear e sazonal da série temporal pluviométrica.

Tabela 2. Parâmetros estimados e os critérios AIC e BIC dos modelos das previsões decendiais médias dos dias 1, 11 e 20 para os pixels que cobre o estado do Paraná para os anos de 2021 a 2025.

Ano	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	*AIC*	BIC
2021	86,39	-152,20	10,03	-56,26	117,72	120,15
2022	58,48	-39,04	-13,67	0,16	108,02	110,44
2023	94,09	-133,01	-23,68	-24,68	114,37	116,79
2024	64,70	-53,18	-60,96	18,67	90,78	93,20
2025	60,74	-31,05	-55,64	10,36	110,77	113,19

Nota: $\hat{\beta}$: parâmetros estimados do modelo; AIC: critério de informação de Akaike; BIC: critério de informação bayesiano.

CONCLUSÃO

Os resultados sugerem que a precipitação média mensal entre 2021 e 2025 apresenta um padrão sazonal, porém com diferenças interanuais relevantes. Essas variações são importantes para estudos agrícolas, hidrológicos e ambientais, pois a irregularidade das chuvas pode afetar o planejamento da produção, a disponibilidade hídrica e a ocorrência de eventos extremos.

A análise das séries, considerando aspectos espaciais e temporais, permitiu identificar localizações na região em estudo onde ocorrem maiores concentrações de precipitação, com valores que indicam a ocorrência de eventos de elevada precipitação pluviométrica, com potencial para desenvolver efeitos associados, como alagamentos, deslizamentos e outros.

Os modelos apresentaram coeficientes *spline* negativos, indicando tendência de redução da precipitação média em determinados períodos decendiais.

A precipitação pluviométrica apresenta elevada variabilidade nos pixels em estudo, o que sugere que uma análise mais detalhada utilize as séries temporais formadas a partir dos valores de cada pixel.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 716–723, 1974.

AMORIM, A. C. B., SCUDELARI, A. C., CUNHA, C., & GONÇALVES, J. E. Eventos Extremos de Precipitação no Litoral do Paraná (Baía de Paranaguá). **Revista Brasileira De Meteorologia**, v. 35, n. 4, p. 563–575, 2020.

CARDOSO, C. DE S.; QUADRO, M. F. L. DE .; BONETTI, C.. Persistência e Abrangência dos Eventos Extremos de Precipitação no Sul do Brasil: Variabilidade Espacial e Padrões Atmosféricos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 219–231, abr. 2020.

FRNDA, J.; DURICA, M.; NEDOMA, J.; ZABKA, S.; MARTINEK, R.; KOSTELANSKY, M. A. Weather Forecast Model Accuracy Analysis and ECMWF Enhancement Proposal by Neural Network. **Sensors,** v. 19, n. *23*, p. 5144, 2019.

KIRCHNER, R. M.; SOUZA, R. C.; ZIEGELMANN, F. A. Identificação de estruturas não-lineares de séries temporais através de regressão linear local e modelos aditivos. **Pesquisa Operacional**, v. 28, n. 1, p. 45–57, 2008.

NERY, T. J.; CARFAN. C. Re-analysis of pluvial precipitation in southern Brazil. **Atmósfera**, v. *27, n.* 2, p. 103–115, 2014.

SALTON, F. G., MORAIS, H., CARAMORI, P. H.; BORROZZINO, E. Climatologia dos Episódios de Precipitação em Três Localidades no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 626–638, 2016.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V.; ARAÚJO, L. E. Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados às Chuvas na Cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 2, p. 250–268, 2012.