

ANÁLISE DA PREVISÃO DE PRECIPITAÇÕES MENSAIS NA REGIÃO ADMINISTRATIVA DO RIACHO FUNDO DO DISTRITO FEDERAL POR MEIO DE MODELOS ESTOCÁSTICOS

Marília Candida Pinto Borges ¹ José Augusto Fiorucci ² Carlos Henrique Ribeiro Lima ³

RESUMO: A intensificação do processo de urbanização provoca alterações significativas no escoamento superficial como, por exemplo, o aumento da vazão de pico e a aceleração do escoamento. Tais alterações podem resultar em consequências adversas para a população frente a eventos hidrológicos extremos como inundações, enchentes e alagamentos. Assim, é necessário que os tomadores de decisão tenham acesso a informações que subsidiem um planejamento urbano eficiente e a previsão de comportamentos futuros de precipitações. O presente trabalho realizou uma análise da previsão de precipitações mensais da Região Administrativa do Riacho Fundo/DF, por meio de modelos estocásticos tradicionais, identificando aquele que melhor se ajusta à série analisada, bem como sua previsão pontual e intervalar para os horizontes de 5 e 10 anos. O modelo de melhor ajuste foi o ETS (A, N, A). No entanto, observou-se que o ajuste não foi completamente satisfatório, sendo necessário buscar novos modelos estocásticos para a realização do ajuste.

ABSTRACT: The intensification of the urbanization process causes displacement changes in surface runoff, such as, for example, an increase in the peak flow and an acceleration of runoff. These changes can result in adverse consequences for a population in the face of extreme hydrological events such as floods, floods and flooding. Thus, it is necessary that decision makers have access to information that supports an efficient urban planning and the forecast of future rainfall. The present work carried out an analysis of the monthly rainfall forecast in the Administrative Region of Riacho Fundo / DF, through traditional stochastic models, identifying the one that best fits the analyzed series, as well as its punctual and interval forecast for the horizons of 5 and 10 years. The best fit model for ETS (A, N, A). However, it was observed that the adjustment was not completely satisfactory, being necessary to search for new stochastic models to perform the adjustment.

Palavras-Chave – Análise de séries temporais; Precipitações; Modelos estocásticos.

INTRODUÇÃO

A busca por melhores condições de vida favoreceu a intensificação dos processos de urbanização de forma desordenada e sem planejamento (Tucci, 2008). As modificações do uso e ocupação do solo causam o aumento da impermeabilização das superfícies, o aumento das áreas expostas e das fontes de poluição difusa, que por sua vez resultam em erosão, assoreamento de corpos hídricos, aumento da velocidade do escoamento superficial e da vazão de pico, e em mudanças significativas na qualidade da água dos corpos hídricos (Tucci; Mendes, 2013). Como consequência

1) Mestranda pelo Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da UnB. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Campus Universitário Darcy Ribeiro, SG -12, borges.marilia@aluno.unb.br.

2) Professor adjunto da Pós-Graduação em Estatística na Universidade de Brasília, Departamento de Estatística, Asa Norte, jafiorucci@unb.br.

3) Professor associado do pelo Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. PTARH, Prédio SG-12, Térreo Asa Norte 70910900 - Brasília, DF – Brasil, chrlima@unb.br.

das alterações no escoamento superficial, destacam-se eventos como inundações urbanas, enchentes e alagamentos.

Desde o ano 2000, o Brasil sofreu eventos de inundações que causaram 2.642 mortes e afetaram mais de 7,5 milhões de habitantes, totalizando perdas econômicas de mais de US\$ 5,8 bilhões (EM-DAT, 2021). De acordo com a última coleta de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, módulo Águas Pluviais (SNIS-AP), o Brasil registrou cerca de 30 mil eventos hidrológicos extremos entre os anos de 2014 a 2018, que resultaram em 554 óbitos, o que corresponde a 23% dos registros dos anos 2000. É provável que as mudanças climáticas aumentem a gravidade e a frequência desses tipos de desastres (Rasch, 2015). No Brasil, aumentos em eventos de alta precipitação e secas são esperados em cenários climáticos futuros.

O Distrito Federal é uma região do país que está em constante crescimento e, dentre suas regiões administrativas, destaca-se o Riacho Fundo, que possui um histórico recente de acelerado crescimento populacional que, aliado ao estabelecimento de loteamentos e assentamentos de forma não planejada, sofre com os problemas de escoamento de águas pluviais, cujas consequências negativas afetam a qualidade de vida da população e a infraestrutura existente.

A previsão do comportamento futuro das precipitações é uma importante ferramenta que pode auxiliar os gestores urbanos no planejamento de medidas de prevenção e mitigação dos efeitos nocivos de eventos hidrológicos extremos. Uma forma de realizar tal previsão é por meio de modelos estocásticos, que podem ser utilizados na compreensão das componentes envolvidas nas séries temporais, bem como podem ser aplicados na previsão de valores futuros dessas séries.

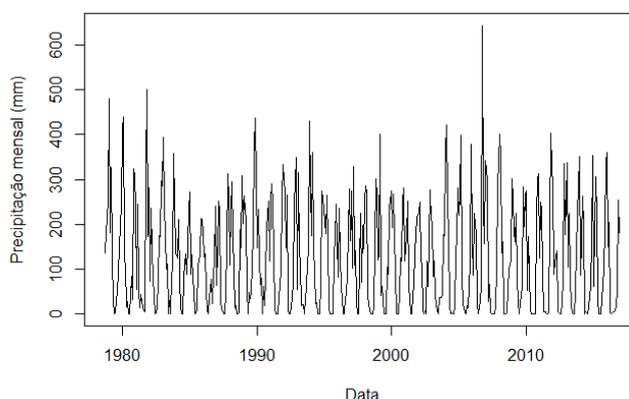
Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise da previsão de precipitações mensais da Região Administrativa do Riacho Fundo/DF, por meio de modelos estocásticos tradicionais, identificando aquele que melhor se ajusta à série analisada, bem como sua previsão pontual e intervalar para os horizontes de 5 e 10 anos.

METODOLOGIA

Base de dados

O presente trabalho analisou a série de precipitações mensais registradas pela estação pluviométrica convencional de código 1548010, localizada na Estação de Tratamento de Esgotos do Riacho Fundo, com registro de dados entre os anos de 1978 a 2021 (Figura 1). Para o acesso à série analisada, utilizou-se a base de dados disponibilizada pela ANA no Portal *HidroWeb*.

Figura 1 - Série de precipitação mensal entre os anos de 1978 a 2021.



Para esse estudo, foi necessário dividir a série de precipitações em duas partes, a saber: série de precipitação **P_mensal**, utilizada para a aplicação da metodologia de decomposição, seleção de modelos, análise de resíduos e previsões pontuais e intervalares, indo de 1978 a 2016 na primeira janela de previsão e de 1978 a 2010 na segunda janela de previsão; e, série de precipitação **P_m.acu**, utilizada para a verificação da acurácia dos modelos, indo de 2017 a 2021 na primeira janela de previsão e de 2011 a 2021 na segunda janela de previsão.

Análise da série temporal de precipitações mensais da RA Riacho Fundo

A análise da série de precipitações mensais da RA Riacho Fundo foi realizada por meio da aplicação de modelos preditivos tradicionais. A metodologia aplicada no processo consistiu na decomposição da série, cujo objetivo era conhecer o comportamento das componentes de tendência, sazonalidade e erro associados à série analisada. Foi realizado, também, um processo de análise de diferentes modelos com o objetivo de identificar aquele que melhor se ajustasse à série de precipitações.

Assim, considerou-se os modelos ARIMA, que visam descrever as autocorrelações presentes nos dados. Tais modelos são aplicados em séries estacionárias, sendo necessário transformar a série de estudo em estacionária por meio da aplicação da técnica de diferenciação de séries temporais (Hyndman e Athanasopoulos, 2018).

Utilizou-se, também, diferentes modelos de alisamento exponencial (Hyndman *et al.*, 2008), que consistem em um conjunto de modelos voltados para a previsão de séries temporais. Para tanto foi necessário escrevê-los como Modelos de Espaço de Estado (MEE), tornando possível o uso de uma mesma estrutura para diferentes modelos, o que facilita as previsões. Dentre os modelos de alisamento exponencial, destacam-se o SES (Alisamento Exponencial Simples), que não considera tendência e nem sazonalidade; o Holt, que inclui um termo de tendência linear ao modelo SES; o Holt+Damped, que se trata de um método com tendência damped, que considera um termo de tendência amortizada; e, o Holt-Winters, que adiciona um termo de sazonalidade, de forma aditiva ou multiplicativa, e é baseado em três equações de alisamento, a saber: uma para o *level*, utilizado no contexto de modelos de alisamento exponencial para descrever a previsão pontual em séries sem tendência e sem sazonalidade, ou com tendência e sazonalidade ajustadas; uma para o crescimento; e, uma para a sazonalidade.

Aplicou-se, ainda, o modelo ETS (*Error, Trend and Seasonal*), que generaliza todos os modelos de alisamento exponencial, apresentando uma estrutura que permite os descrever em função dos tipos de suas componentes de erro, tendência e sazonalidade. A classificação como modelo ETS é realizada de acordo com a presença das componentes de erro, tendência e sazonalidade, respectivamente. A letra N indica que o modelo não apresenta a componente, a letra A indica a componente aditiva, a letra Ad indica a componente aditiva com damped e a letra M indica a componente multiplicativa.

Após realizados os ajustes dos modelos, analisou-se os resíduos, de forma visual por meio dos gráficos das funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial (PACF), e com testes estatísticos, que verificam as hipóteses de estacionariedade (*KPSS Test*), independência (*Box-Ljung test*) e normalidade (*Shapiro-Wilk*). Foram realizadas, também, simulações pontuais e intervalares para um horizonte de 5 e 10 anos. Os resultados dessas previsões foram comparados com a série **P_m.acu** com o objetivo de verificar o erro absoluto médio da previsão (MAE) e assim identificar o modelo que melhor se ajusta à série estudada.

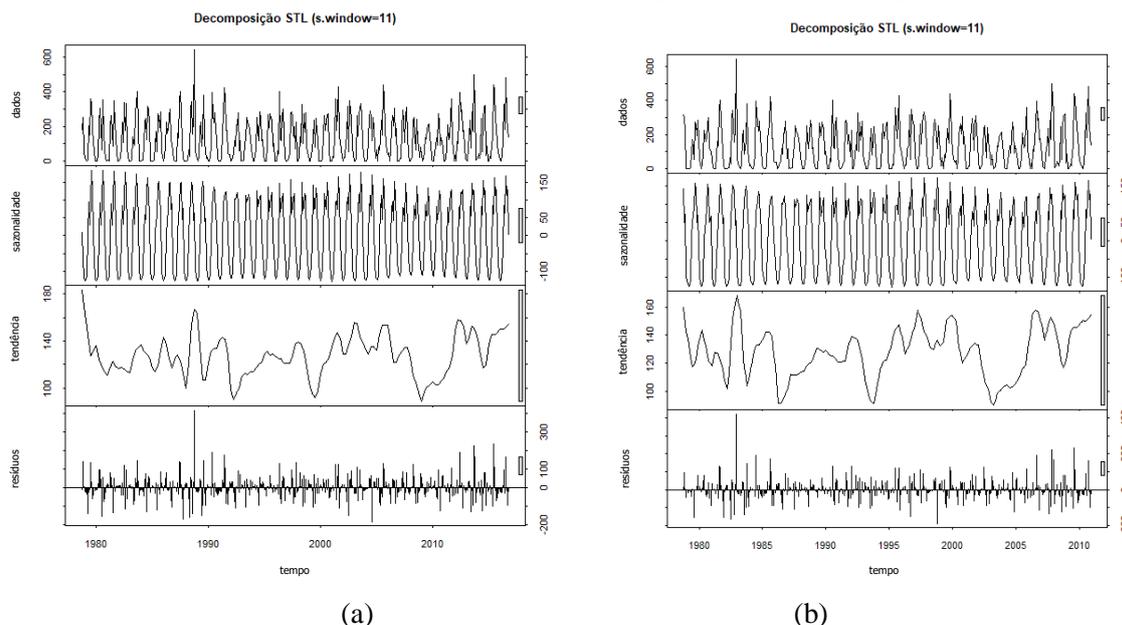
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Decomposição da série temporal

Para analisar o comportamento dessa série foi realizada a decomposição pelo método STL (*Seasonal and Trending using Loess*), com parâmetro $s.window = 11$, cujo resultado é apresentado na Figura 2.

Observa-se que a série apresenta um termo de sazonalidade, comportamento típico do DF, que é caracterizado pela presença de duas estações anuais bem definidas: uma seca e uma chuvosa. Observou-se, também, que a sazonalidade se aproxima de um comportamento constante e o termo de resíduo se torna aleatório e próximo de um ruído branco com média 0.

Figura 2 - Decomposição STL ($s.window = 11$) (a) previsão 5 anos; (b) previsão 10 anos.



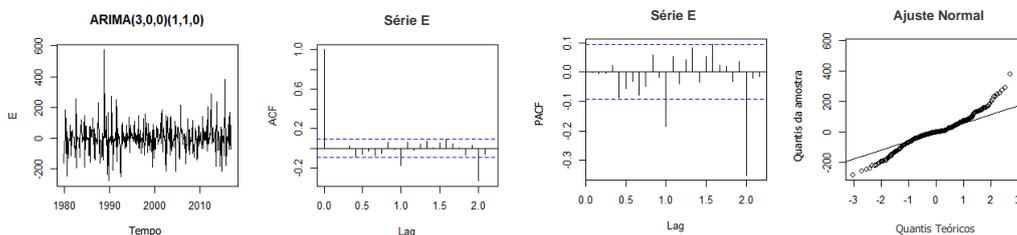
Ajuste de modelos e análise de resíduos

Para o presente estudo foram testados, de forma automática no R por meio do pacote *Forecast*, modelos preditivos tradicionais, como os modelos ARIMA, modelos de alisamento exponencial e modelos ETS. A série de precipitação foi analisada de acordo com duas janelas de previsões, considerando um nível de confiança de 95%.

Para o ajuste ao modelo ARIMA foi necessário tornar a série em estacionária por meio da técnica de diferenciação de séries temporais, na qual se identificou a necessidade de apenas uma diferença sazonal e nenhuma diferença simples. O ajuste ao modelo ARIMA foi realizado considerando diferentes ordens, bem como o ajuste automático por meio do pacote *Forecast*. Para a comparação dos modelos de melhores ajustes, analisou-se o valor do critério de informação de Akaike (AIC) e o valor do MAE, após previsão pontual e intervalar.

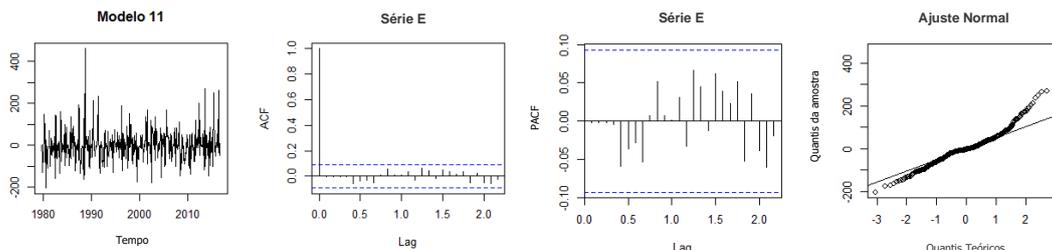
A aplicação do ajuste automático na primeira janela de previsão, resultou em um modelo ARIMA (3,0,0) (1,1,0). No entanto, ao analisar os resíduos desse modelo, observou-se que o ajuste não foi satisfatório, uma vez que a análise visual (Figura 3) mostrou a presença de autocorrelação entre os dados e os testes estatísticos rejeitaram as hipóteses de independência e normalidade. Os valores de AIC (5274,46) e MAE (209,0,85) também foram considerados altos em relação aos demais modelos testados.

Figura 3 - Análise de resíduos do modelo ARIMA.



Analisando, então, o ajuste manual de diversos modelos ARIMA, com diferentes ordens, observou-se que os modelos com menores AIC foram o modelo 3 (1,0,0) (0,1,1) com AIC = 5125,24 e o modelo 11 (3,0,1) (1,1,1) com AIC = 5125,92. Embora o modelo 3 tenha um menor valor de AIC, o MAE obtido no modelo 11 foi menor (MAE3 = 189,094 e MAE11 = 188,439), sendo esse modelo considerado o de melhor ajuste para a série de estudo. A análise gráfica dos resíduos (Figura 4) e dos testes estatísticos também foram satisfatórios, sendo apenas o teste de normalidade rejeitado.

Figura 4 - Análise de resíduos do modelo ARIMA (3,0,1) (1,1,1).



Foi realizado, também, ajuste de diversos modelos ARIMA na segunda janela de previsão para a série estudada. O modelo ajustado automaticamente foi o ARIMA (2,0,0) (1,1,0), cujo valor do AIC foi de 4449,40 e do MAE foi de 196,29. Assim, como na primeira janela de previsão, o ajuste automático não foi satisfatório, em comparação com os demais modelos ajustados. Tanto a análise gráfica quanto os testes estatísticos mostraram a presença de autocorrelação e as hipóteses de independência e normalidade foram rejeitadas.

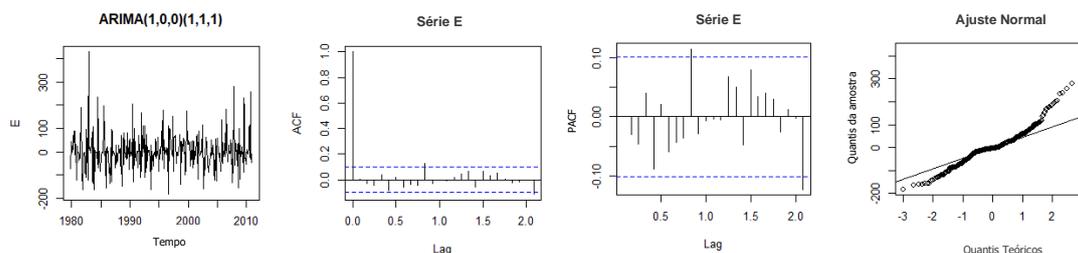
Analisando os demais modelos testados, observou-se que aqueles com menores valores de AIC e de MAE foram os modelos 4, 5 e 8, conforme mostra a Tabela 1. Considerando os dois critérios de escolha, optou-se pelo modelo 5 (1,0,0) (1,1,1) como aquele de melhor ajuste à série estudada na segunda janela de previsão. Em comparação com o modelo escolhido para a primeira janela, esse possui uma menor ordem, com um menor número de parâmetros.

Tabela 1 - Modelos ARIMA com melhores ajustes na segunda janela de previsão.

MODELO	ORDEM	AIC	KPSS Test (estacionariedade)	Box-Ljung test (independência)	Shapiro-Wilk (normalidade)	MAE
4	(1,0,0) x (0,1,1)	4332,92	0,1	0,36	6,34E-12	169,7883
5	(1,0,0) x (1,1,1)	4334,59	0,1	0,39	7,57E-12	169,6902
8	(1,0,1) x (0,1,1)	4335,40	0,1	0,36	5,34E-12	169,7819

A análise gráfica do modelo 5, apresentada na Figura 5, mostrou a presença de uma pequena autocorrelação e o teste de normalidade foi rejeitado.

Figura 5 - Análise de resíduos do modelo ARIMA (1,0,0) (1,1,1).



A série temporal analisada nesse estudo apresenta uma componente de tendência e uma de sazonalidade. Com isso, considerando o modelo de alisamento exponencial, os métodos SES, Holt e Holt+Damped não são adequados para tal série, uma vez que o SES não considera tendência e sazonalidade, o método Holt considera apenas uma tendência linear e o Holt+Damped considera uma tendência amortizada. Já os métodos Holt-Winters consideram a sazonalidade de forma aditiva ou multiplicativa, no entanto, o ajuste ao modelo Holt-Winters Multiplicativo só pode ser realizado a uma série estritamente estacionária. Como a série analisada apresenta valores de precipitação iguais a 0, não foi possível testar esse modelo.

O modelo ETS, que generaliza todos os métodos de alisamentos exponencial, também foi ajustado à série estudada, bem como foi realizado o seu ajuste com o método *bootstrap* não paramétrico, que realiza a reamostragem dos resíduos. Os resultados obtidos nos ajustes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Ajuste de modelos de alisamento exponencial e ETS.

Previsão para 5 anos					
MÉTODO	AICc	TESTES ESTATÍSTICOS (valor-p)			MAE
		KPSS Test	Box-Ljung test	Shapiro-Wilk	
HOLT-WINTERS ADITIVO	6751,759	0,1	0,4843	7,27E-11	188,5431
ETS	6735,287	0,1	0,4458	6,12E-15	187,2062
ETS <i>bootstrap</i>	6735,287	0,1	0,4458	6,12E-15	187,2062
Previsão para 11 anos					
MÉTODO	AICc	TESTES ESTATÍSTICOS			MAE
		KPSS Test	Box-Ljung test	Shapiro-Wilk	
HOLT-WINTERS ADITIVO	5659,805	0,1	0,2843	1,32E-13	168,2209
ETS	5650,329	0,1	0,2781	6,72E-14	168,7407
ETS <i>bootstrap</i>	5650,329	0,1	0,2781	6,72E-14	151,2642

Os resultados do ajuste mostram que o modelo ETS que melhor se ajusta à série estudada é identificado como A, N, A, ou seja, possui uma componente de *level* e de sazonalidade aditivas e não possui uma componente de tendência, tanto para a primeira quanto para a segunda janela de previsão. Ao analisar os valores de AICc, os modelos ETS são melhores em comparação com o Holt-Winters aditivo (HWa). Em relação ao valor do MAE, o modelo ETS também possui valores menores que o HWa, não havendo diferença entre o ETS e o ETS com *bootstrap* na primeira janela, mas com uma diferença significativa entre eles na segunda janela.

A análise visual dos resíduos de cada modelo, apresentada nas Figuras 3 e 4, mostrou que o termo de erro oscila em torno de 0. Os gráficos ACF e PACF do método Holt-Winters aditivo e do modelo ETS não apresentam autocorrelação entre os dados na janela de previsão para 5 anos, no

entanto, para a janela de previsão para 10 anos, identifica-se uma autocorrelação. Os testes estatísticos não conseguiram rejeitar a hipótese nula de estacionariedade e de independência, no entanto, a hipótese de normalidade foi rejeitada em todos os modelos.

Figura 6 - Análise de resíduos - Previsão para 5 anos.

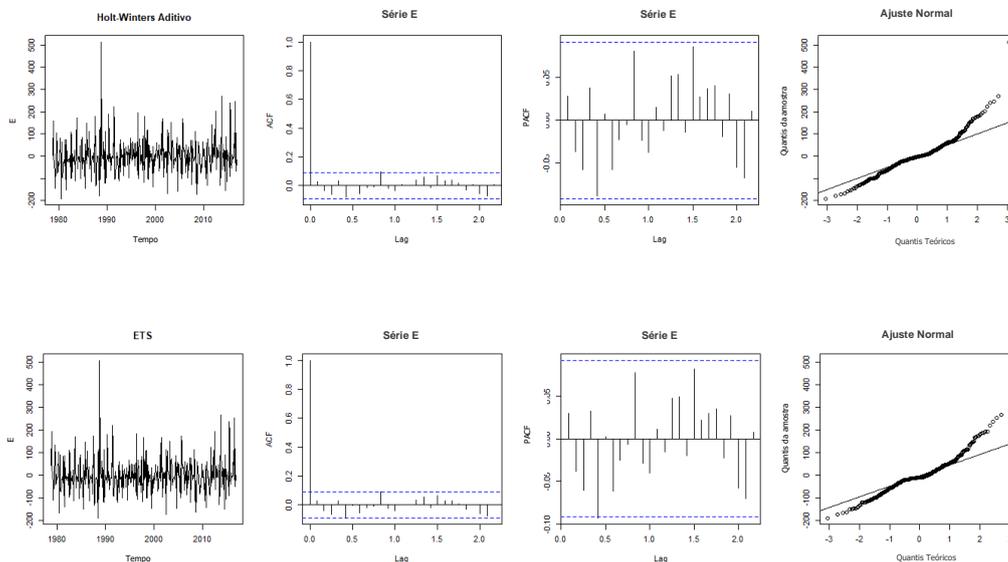
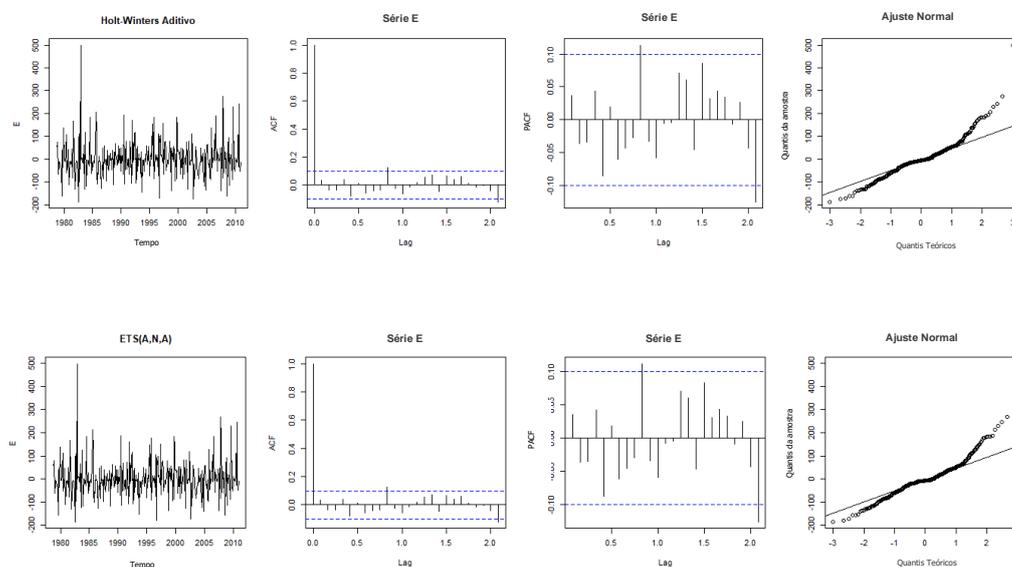


Figura 7 - Análise de resíduos - Previsão para 11 anos.



Previsões pontuais e intervalares

As previsões pontuais e intervalares foram realizadas para um horizonte de aproximadamente 5 anos na primeira janela de previsão e aproximadamente 11 anos na segunda janela de previsão, considerando um nível de confiança de 95%. Os resultados são apresentados nas Figuras 8 e 9, para cada janela, respectivamente. Observou-se que o modelo ARIMA, o método Holt-Winters aditivo e o modelo ETS conseguiram acompanhar o comportamento da série de precipitações mensais.

Figura 8 - Previsões pontuais e intervalares para 5 anos.

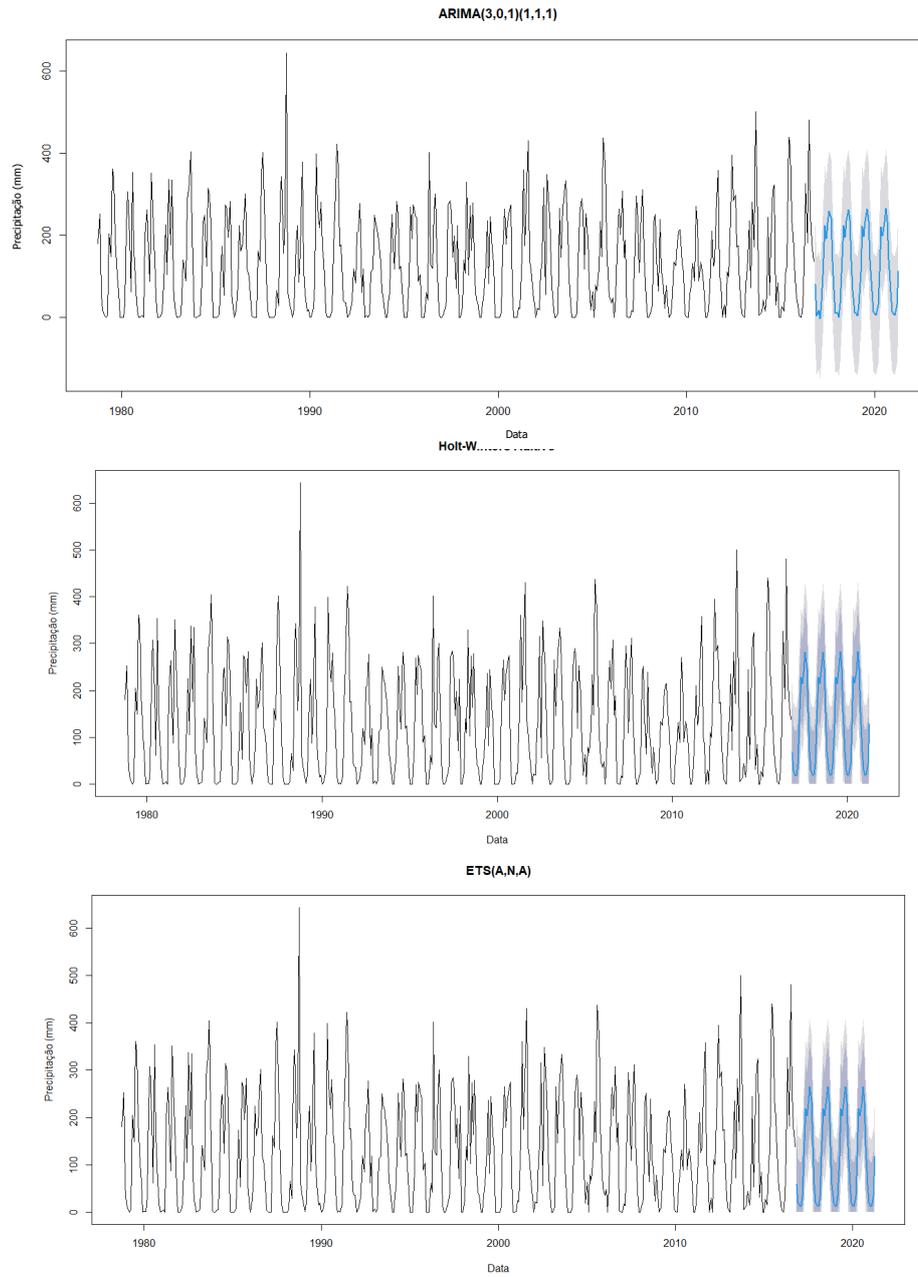
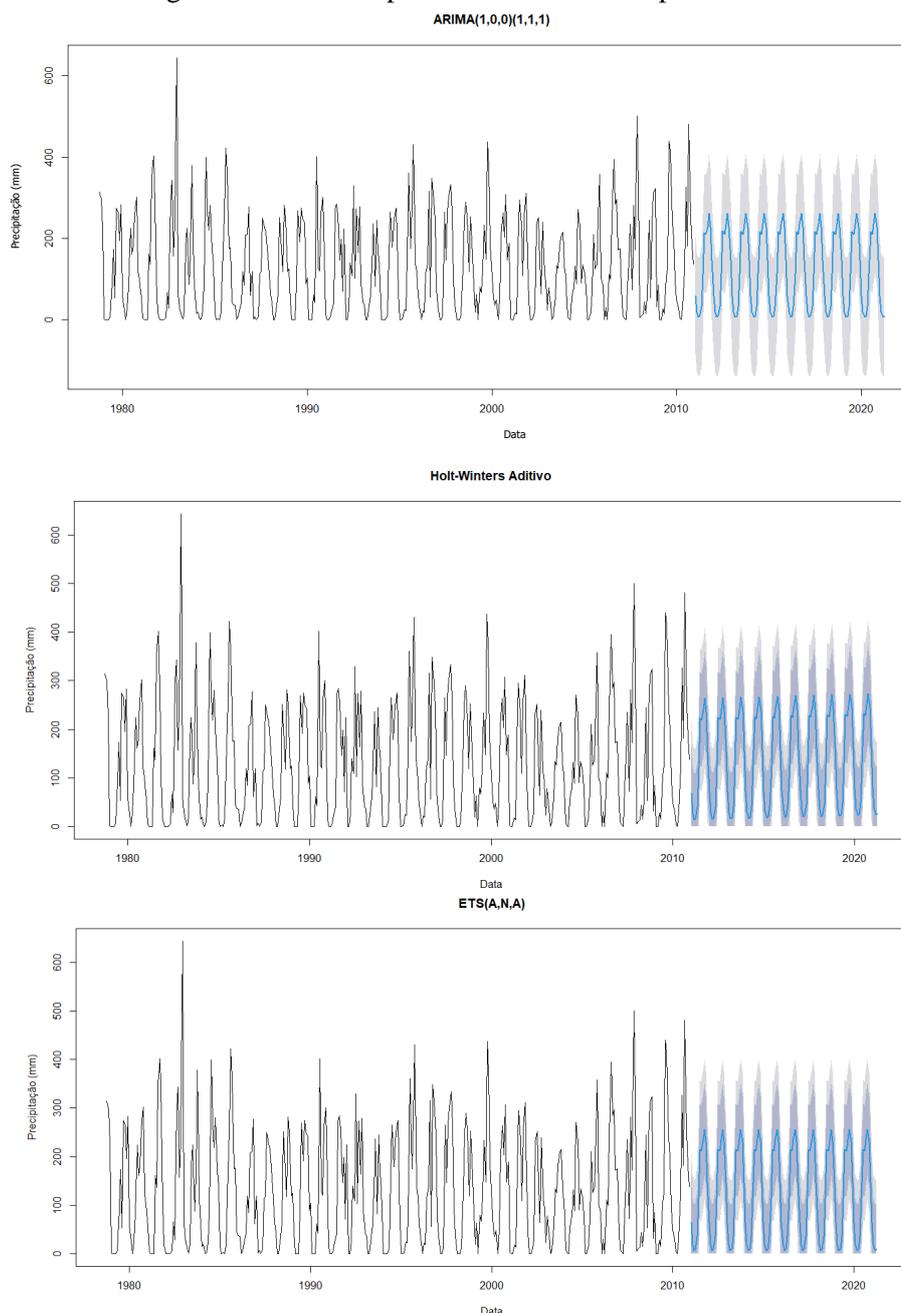


Figura 9 - Previsões pontuais e intervalares para 11 anos.



Os modelos ARIMA, Holt-Winters aditivo e ETS conseguem acompanhar a sazonalidade da série, apresentando uma oscilação típica da mudança de estações seca e chuvosa no DF, no entanto, a oscilação no crescimento da série parece constante, apresentando valores de pico similares a cada ciclo sazonal.

De modo geral, todos os modelos analisados apresentaram resultados similares, tanto em termos de erros quanto no que diz respeito ao comportamento da série. Isso se deve ao fato de que os modelos que foram empregados utilizam unicamente o histórico das séries como *input*, tendo apenas isso como informação disponível. Ressalta-se que o mais relevante para se fazer previsões neste tipo de modelagem é o conhecimento da sazonalidade e da tendência, no entanto, as séries estudadas não possuem tendência relevante, ou seja, a informação mais importante que o modelo pode obter é a sazonalidade. Desta forma, ainda que os modelos ARIMA e ETS modelem a sazonalidade por meio

de estruturas diferentes, ambos utilizam exatamente a mesma informação histórica, o que leva previsões semelhantes.

Erro Absoluto Médio e a escolha do modelo de melhor ajuste

Por fim, para a escolha do modelo com melhor ajuste à série de precipitações mensais do Riacho Fundo, foram analisados os valores do Erro Absoluto Médio (MAE) dos modelos ARIMA, Holt-Winters aditivo e ETS.

Tabela 3 - Critérios de seleção do modelo.

Previsão para 5 anos		Previsão para 11 anos	
METODO	MAE	METODO	MAE
ARIMA (3,0,1) (1,1,1)	188,4390	ARIMA (1,0,0) (1,1,1)	169,6902
HOLT-WINTERS ADITIVO	188,5431	HOLT-WINTERS ADITIVO	168,2209
ETS (A,N,A)	187,2062	ETS (A,N,A)	168,7407
ETS (A,N,A) bootstrap	187,2062	ETS (A,N,A) bootstrap	151,2642

De acordo com os valores do MAE, o modelo com melhor ajuste à série estudada, para a janela de previsão de 5 anos, é o ETS (A,N,A) sem ou com o *bootstrap*, seguido pelo modelo ARIMA (3,0,1) (1,1,0) e pelo método Holt-Winters aditivo. Para a janela de previsão de 11 anos, o modelo com melhor ajuste, de acordo com o valor do MAE, é o ETS (A,N,A) com *bootstrap*, seguido pelo ETS (A,N,A), pelo Holt-Winters aditivo e pelo ARIMA (1,0,0) (1,1,1). Assim, pode-se afirmar que o modelo que melhor se ajusta à série de precipitações mensais da RA Riacho Fundo/DF é o modelo ETS (A, N, A) para a previsão de 5 anos à frente e o ETS (A,N,A) *bootstrap* para a previsão de 11 anos à frente.

CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a previsão de precipitações mensais da Região Administrativa do Riacho Fundo/DF, por meio de modelos estocásticos tradicionais, identificando aquele que melhor se ajusta à série analisada, bem como sua previsão pontual e intervalar para o horizonte de 5 e 11 anos.

O ajuste de modelos estocásticos tradicionais como modelos ARIMA, modelos de alisamento exponencial e modelos ETS foi realizado considerando que a série estudada apresentava uma componente de tendência e uma de sazonalidade, conforme identificado na decomposição STL. Esse comportamento fez com que apenas o modelo ARIMA, o método Holt-Winters aditivo e o modelo ETS apresentassem um melhor ajuste à essa série. Dentre esses, o que melhor se ajusta às precipitações mensais do Riacho Fundo, em ambos horizontes de previsão, foi o modelo ETS (A,N,A), sendo o que apresentou o menor Erro Absoluto Médio (MAE) em relação aos dados observados no horizonte de previsão.

O que se pode notar nesse estudo é que, mesmo identificando um modelo de melhor ajuste à série estudada, nenhum dos modelos estudados apresentou um ajuste fiel ao comportamento da série, sendo recomendado um estudo mais aprofundado com a aplicação de outras janelas de previsão, bem como de outros modelos preditivos, que sejam capazes de fornecer um melhor ajuste às séries de precipitações mensais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. *Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios*. Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 176 p. 2007.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 4º Diagnóstico de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas – 2019*. Brasília: SNS/MDR. 185 p.: il., 2020.
- COCHRAN, W. G. *Sampling Techniques*. 3º edition. Wiley. 1977.
- HYNDMAN, R.J., et al. *Forecasting with exponential smoothing: the state space approach*. Springer Science & Business Media, 2008.
- HYNDMAN, R.J., & ATHANASOPOULOS, G. *Forecasting: principles and practice*, 2nd edition, OTexts: Melbourne, Australia, 2018.
- RASCH, R. J. *Assessing urban vulnerability to flood hazard in Brazilian municipalities*. v. 28, n. 1, p. 145–168, 2015.
- TUCCI, C. E. M. *Águas Urbanas*. Estudos Avançados, v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.
- TUCCI, C. E. M. *Inundações e drenagem urbana*. Inundações Urbanas na América do Sul. ABRH, p. 45–150, 2003.
- TUCCI, CARLOS E. M.; MENDES, C. A. *Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica*. [s.l: s.n.]. v. 53, 2013.