

Relatório Final de Análise de Dados de Vazões e Precipitações na Área do Alto Curso do Rio das Velhas

Projeto: “De Olho no Velhas”

Parte I: Pluviometria




Maior cheia da história do Rio das Velhas. Vista de Raposos, a jusante de Bela Fama – 09/01/2022
Vazão Máx.: 788 m³/s

Foto: <https://manuelzao.ufmg.br/um-balanco-das-cheias-do-rio-das-velhas/>



Rio das Velhas registra baixa vazão e entra em estado de alerta - 09/08/2022 - Vazão residual a jusante de Bela Fama: 3,18 m³/s

Foto: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/08/09/rio-das-velhas-registra-baixa-vazao-e-entra-em-estado-de-alerta.ghtml>

0	PRIMEIRA EMISSÃO	30/03/2025	ECC	MGB	
Rev.	Descrição	Data	Elaborado	Verificado 1	Verificado 2
PROJETO/ÁREA	TEMA/SÍTIO	CLASSIFICAÇÃO		REV.	
DE OLHO NO VELHAS	ANÁLISE DE DADOS	FPSF-RA-02-2025-II		0	
GRUPO	SETOR	DENOMINAÇÃO		FOLHA	
EQUIPE TÉCNICA	ENGENHARIA	Relatório Final de Análise de Dados das Estações Plu e Fluviométricas do Alto Rio das Velhas		1/376	
	Fórum Permanente São Francisco – FPSF Belo Horizonte - MG				



O Fórum Permanente São Francisco (FPSF)

é uma entidade da sociedade civil, um grupo de cidadãos e cidadãs que foi formado três dias depois do rompimento da barragem do Córrego do Feijão, da empresa Vale, em Brumadinho - MG, em janeiro de 2019. Foi criado com o objetivo inicial de dedicar-se à segurança e à qualidade de vida da população que vive em áreas de mineração no Estado de Minas Gerais. Posteriormente expandiu sua área de atuação para englobar as questões mais abrangentes ligadas à sustentabilidade e ao meio ambiente. A partir de janeiro de 2023 o FPSF se tornou um Instituto.

Missão

Defesa, preservação e conservação do meio ambiente e do patrimônio histórico-cultural, bem como a promoção do desenvolvimento sustentável.

Desenvolvimento e divulgação de tecnologias alternativas voltadas para a sustentabilidade e para a regeneração. Realização de estudos e pesquisas, produção e divulgação de informações e de conhecimentos técnicos e científicos tendo como base o conceito de ecologia integral. Incentivo ao uso racional dos recursos naturais, com ênfase na segurança hídrica.

Valores

O Fórum Permanente São Francisco (FPSF), no desenvolvimento de suas atividades, tem como fundamento os princípios da legalidade, impessoalidade, moralidade, publicidade, economicidade e eficiência, sem qualquer discriminação de raça, cor, gênero, orientação sexual e religião e sem conotações político-partidárias.

Todos os direitos reservados. É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesse documento, desde que citada a fonte.



2019-2022

Sumário

1	OBJETIVO	9
2	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO ALTO CURSO DO RIO DAS VELHAS	10
3	METODOLOGIA.....	13
3.1	Introdução	13
3.2	Duração de Séries Temporais de Variáveis Hidrológicas.....	13
4	ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS.....	16
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
4.2	RAPOSOS – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 1943148	17
4.3	HONÓRIO BICALHO – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043128	17
4.4	RIO ACIMA – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043016.....	17
4.5	PCH RIO DE PEDRAS- RIO ITABIRITO – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043077	17
4.6	PCH RIO DE PEDRAS - BARRAMENTO – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043065.....	17
4.7	PCH RIO DE PEDRAS - MONTANTE – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043076.....	17
4.8	PCH RIO DE PEDRAS - RIO MARACUJÁ – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043078	17
4.9	LAGOA GRANDE (MMV) – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043002.....	18
4.9.1	Complementação dos Dados Faltantes – Método Dupla Massa.....	19
4.9.1.1	Aplicação do Método Dupla Massa	20
4.9.2	Análise Preliminar das Vazões Diárias	22
4.9.3	Análise Descritiva e Análise Inferencial (Tendências).....	28
4.9.3.1	Equalização de Dados para Análise – Metodologia	28
4.9.3.2	Períodos Decenais.....	29
4.9.3.3	Períodos Anuais – Médias.....	37
4.9.3.4	Médias Anuais – Precipitações Acumuladas Médias	37
4.9.3.4.1	Valores Anuais (Anos Cívicos) – Série Completa	37
4.9.3.4.2	Períodos Secos e Úmidos – Série Completa.....	44
4.9.3.4.3	Segmento da Série – 1983 a 2023 – Valores Anuais (Anos Cívicos).....	55
4.9.3.4.4	Segmento da Série – 1983 a 2023 – Períodos Secos e Úmidos	61
4.9.3.5	Quantidade de Dias de Chuva e Precipitação Acumulada	74
4.9.4	Distribuição Volumétrica da Precipitação Diária por Classes de Intensidade – Frequências.....	97

4.9.4.1	Dois Segmentos Iguais de 41,5 anos – Anos Cívicos.....	97
4.9.4.2	Dois Segmentos Iguais de 26,3 anos – Anos Cívicos – Para Comparação com Honório Bicalho	103
4.9.4.3	Dois Segmentos Iguais de 26,3 anos – Para Comparação com Honório Bicalho – Períodos Secos	108
4.9.4.4	Dois Segmentos Iguais de 26,3 anos – Para Comparação com Honório Bicalho – Períodos Úmidos	111
4.9.5	Análise Quantílica das Mudanças nos Padrões de Precipitação.....	117
4.9.5.1	Dois Segmentos Iguais de 41,5 anos – Anos Cívicos.....	117
4.9.5.2	Dois Segmentos Iguais de 26,3 anos – Para Comparação com Honório Bicalho – Anos Cívicos	119
4.9.5.3	Dois Segmentos Iguais de 26,3 anos – Para Comparação com Honório Bicalho – Períodos Secos	121
4.9.5.4	Dois Segmentos Iguais de 26,3 anos – Para Comparação com Honório Bicalho – Períodos Úmidos	122
4.9.5.5	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos – Para Comparação Itabirito Linígrafo e Faz. Água Limpa – Anos Cívicos.....	123
4.9.5.6	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos – Para Comparação com Honório Bicalho – Períodos Secos	125
4.9.5.7	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos – Para Comparação com Honório Bicalho – Períodos Úmidos	126
4.9.6	Gráficos Q-Q Plot.....	127
4.9.6.1	Dois Segmentos Iguais de 41,5 anos.....	127
4.9.6.2	Período 63,3 anos e Período dos 20 anos mais recentes.....	129
4.9.6.3	Dois Segmentos Iguais de 26,3 anos:.....	129
4.9.6.4	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos:.....	130
4.9.7	Precipitações Anuais Máximas, Médias e Mínimas.....	132
4.9.8	Índices de Anomalias.....	134
4.9.8.1	Índice de Anomalia de Chuva – IAC (Rainfall Anomaly Index - RAI).....	135
4.9.8.2	Índice de Anomalia de Precipitação Padronizado – IAPP (Standardized Rainfall Anomaly Index - SRAI).....	136
4.9.8.3	Índices de Anomalia Aplicados às Precipitações – Lagoa Grande (MMV) - Gráficos.....	137
4.9.8.4	Índices de Anomalia Aplicados às Precipitações – Lagoa Grande (MMV) - Valores.....	145
4.9.8.4.1	Série Completa.....	146
4.9.8.4.2	Comparação dos Períodos de 1941 a 2005 e 2006 a 2023.....	148
4.9.8.4.3	Comparação dos Períodos de 1984 a 2004 e 2005 a 2023.....	149
4.9.9	Observações.....	158
4.10	FAZENDA ÁGUA LIMPA – JUSANTE - CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043056.....	158

4.10.1	Análise Preliminar das Vazões Diárias.....	159
4.10.2	Análise Descritiva e Análise Inferencial (Tendências)	166
4.10.2.1	Períodos Decenais.....	166
4.10.2.2	Períodos Anuais – Médias.....	174
4.10.2.3	Médias Anuais – Precipitações Acumuladas Médias	174
4.10.2.4	Quantidade de Dias de Chuva e Precipitação Acumulada	181
4.10.3	Distribuição Volumétrica da Precipitação Diária por Classes de Intensidade – Frequências	190
4.10.3.1	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos.....	190
4.10.3.2	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos – Períodos Secos.....	198
4.10.3.3	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos – Períodos Úmidos.....	200
4.10.3.4	Conclusões da Comparação de Dois Períodos dos Últimos 40,4 anos – Frequências	204
4.10.4	Análise Quantílica das Mudanças nos Padrões de Precipitação	207
4.10.4.1	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos.....	207
4.10.4.2	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos – Períodos Secos.....	208
4.10.4.3	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos –	210
4.10.4.4	Períodos Úmidos	210
4.10.5	Gráficos Q-Q Plot.....	211
4.10.5.1	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos.....	211
4.10.6	Precipitações Anuais Máximas, Médias e Mínimas	212
4.10.7	Índices de Anomalias.....	214
4.10.7.1	Índices de Anomalia Aplicados às Precipitações – Estação Fazenda Água Limpa - Jusante 214	
4.10.7.2	Índices de Anomalia Aplicados às Precipitações – Fazenda Água Limpa - Valores	223
4.10.7.2.1	Série Completa – 1984 a 2023	223
4.10.7.2.2	Comparação dos Períodos de 1984 a 2004 e 2004 a 2023.....	225
4.10.8	Comparação Entre as Anomalias das Estações Fazenda Água Limpa e Lagoa Grande (MMV) 228	
4.10.8.1	Período Anual.....	228
4.10.8.2	Período Seco (maio–setembro).....	228
4.10.8.3	Período Úmido (outubro–abril).....	229
4.11	ITABIRITO – LINÍGRAFO – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043060.....	229
4.11.1	Aplicação do Método Dupla Massa.....	230
4.11.2	Análise Preliminar das Vazões Diárias.....	232
4.11.3	Análise Descritiva e Análise Inferencial (Tendências)	240
4.11.3.1	Períodos Decenais.....	240
4.11.3.2	Períodos Anuais – Médias.....	247

4.11.3.3	Médias Anuais – Precipitações Médias dos Dias de Chuva.....	247
4.11.3.3.1	Conclusões da Análise das Precipitações Médias dos Dias de Chuva – Gráficos de Regressão Linear.....	263
4.11.3.3.2	Tabela Comparativa das Três Estações - Análise por Regressão Linear das Médias Aritméticas e das Harmônicas das Precipitações dos Dias de Chuva	265
4.11.3.3.3	Conclusões dos Testes Estatísticos – Médias das Precipitações dos Dias de Chuva – Estação Itabirito Linígrafo	266
4.11.3.4	Quantidade de Dias de Chuva e Precipitação Acumulada	267
4.11.3.4.1	Quadros Comparativos das Três Estações – Gráficos de Regressão Linear – Precipitação Acumulada e Quantidade de Dias de Chuva.....	287
4.11.3.4.2	Conclusões da Análise por Regressão Linear das Precipitações Acumuladas e Quantidade de Dias de Chuva das Três Estações – (1984-2017) x (2017-2023).....	288
4.11.3.4.3	Tabela Comparativa das Três Estações - Análise por Regressão Linear das Precipitações Acumuladas e Quantidade de Dias de Chuva.....	290
4.11.3.4.4	Conclusões dos Testes Estatísticos dos Dados de Precipitação Acumulada da Série da Estação Itabirito Linígrafo	292
4.11.4	Distribuição Volumétrica da Precipitação Diária por Classes de Intensidade – Frequências	293
4.11.4.1	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos.....	293
4.11.4.2	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos – Períodos Secos.....	303
4.11.4.3	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos – Períodos Úmidos.....	310
4.11.4.4	Conclusões da Comparação de Dois Períodos dos Últimos 40,2 Anos – Distribuição Volumétrica por Classes de Intensidade e Frequências	315
4.11.5	Análise Quantílica das Mudanças nos Padrões de Precipitação	319
4.11.5.1	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos.....	319
4.11.5.2	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos – Períodos Secos.....	322
4.11.5.3	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos – Períodos Úmidos.....	325
4.11.5.4	Correlação entre Quantis de Precipitações Diárias, Horárias e Sub-Horárias (15 minutos)	327
4.11.6	Gráficos Q-Q Plot.....	329
4.11.6.1	Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos.....	330
4.11.7	Precipitações Anuais Máximas, Médias e Mínimas	331
4.11.8	Índices de Anomalias.....	332
4.11.8.1	Índices de Anomalia Aplicados às Precipitações – Estação Itabirito - Linígrafo.....	332
4.11.8.2	Índices de Anomalia Aplicados às Precipitações – Itabirito Linígrafo – Valores.....	346
4.11.8.2.1	Série Completa – 1984 a 2023	346
4.11.8.2.2	Comparação dos Períodos de 1984 a 2004 e 2004 a 2023	349
4.11.9	Comparação Entre as Anomalias das Estações Itabirito – Linígrafo, Fazenda Água Limpa e Lagoa Grande (MMV)	352

4.11.9.1	Período Anual.....	352
4.11.9.2	Período Seco (maio–setembro).....	353
4.11.9.3	Período Úmido (outubro–abril).....	353
4.11.9.4	Gráficos Comparativos	354
5	CONCLUSÕES - PLUVIOMETRIA	356
5.1	Observações Principais.....	356
5.2	Considerações sobre a Análise de Distribuição Volumétrica da Precipitação Diária por Classes de Intensidade e Frequências das Três Estações	356
5.3	Conclusões dos Estudos Estatísticos e Limitações dos Estudos Realizados	358
5.3.1	Escopo e limitações metodológicas.....	358
5.3.2	Principais achados (com base no recorte 5 meses secos / 7 úmidos).....	358
5.3.3	Implicações para a segurança hídrica, social e econômica	359
5.3.4	Agenda de estudos complementares (prioridades)	359
5.3.5	Recomendações de Gestão (ação imediata)	360
5.3.6	Ações "No-Regret" Relevantes	360
5.4	Recomendações	361
5.5	Resumo Executivo –Chuvas e Vazões na Bacia do Alto Rio das Velhas.....	362
	ANEXO 1 – Pluviometria	364
1	Conceitos Básicos	364
1.1	Estudos Pluviométricos	364
1.2	Componentes dos Estudos Pluviométricos	364
1.3	Intensidade de Chuva	365
1.4	Classificação das Chuvas.....	365
1.5	Tempo de Retorno da Chuva.....	365
1.5.1	Cálculo	365
1.5.2	Tempo de Retorno para Dimensionamento de Barragens de Mineração	366
1.6	PMP e CMP	367
1.6.1	PMP - Precipitação Máxima Provável.....	367
1.6.2	CMP - Cheia Máxima Provável.....	367
1.6.3	Relação entre PMP e CMP.....	368
1.7	Hidrogramas e Hietogramas.....	368

1.7.1	Hietograma	368
1.7.2	Hidrograma	369
1.7.3	Relação entre Hietograma e Hidrograma	369
1.8	Chuva de Projeto	370
1.9	Vazão de Projeto	370
1.9.1	O Método Racional	370
1.9.2	Outros Métodos de Cálculo de Vazões de Projeto	371
1.10	Escoamento Superficial	372
1.11	Chuva Efetiva	373
1.12	Exutório de uma Bacia Hidrográfica	374
1.13	Tempo de Concentração de uma Bacia Hidrográfica	374
ANEXO 2 – Parâmetros e Testes Estatísticos.....		375
2	Conceitos Básicos	375
2.1	Parâmetros e Estatísticas Utilizados na Análise Descritiva	375
2.1.1	Médias	375
2.1.1.1	Média Aritmética	375
2.1.1.2	Média Geométrica	375
2.1.1.3	Média Harmônica.....	376
2.1.1.4	Relação entre as Médias Harmônica e Geométrica	376
2.1.1.5	Média Móvel	376
2.1.2	Mediana	377
2.1.3	Variância e Desvio Padrão	377



RELATORIO FINAL DE ANÁLISE DE DADOS

Análise de Dados de Vazões e

Precipitações na Área do Alto Curso do Rio das Velhas

Parte I: Pluviometria

1 OBJETIVO

O objetivo deste Relatório é o de apresentar os resultados de análises dos dados de vazões e precipitações registrados até o dia 30/09/2024 pelas estações automáticas pluviométricas e fluviométricas, do sistema HidroTelemetria, da Agência Nacional de Águas (ANA) situadas na Bacia do Alto Rio das Velhas bem como das estações convencionais dessa região disponibilizadas pelo sistema HidroWeb da ANA.

O Portal HidroWeb constitui uma ferramenta essencial do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Seu objetivo é o de permitir o acesso a um banco de dados abrangente, contendo informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional. Nele são reunidos dados fundamentais, como níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos.

Essa análise faz parte do Projeto “De Olho no Velhas”, no âmbito da Plataforma Semente, do MPMG, que está sendo executado pelo Instituto Fórum Permanente São Francisco.

Durante a fase inicial do Projeto, foram selecionadas para inspeção e visitadas 9 (nove) estações hidrometeorológicas telemétricas existentes Rio das Velhas, no Rio Itabirito e no Rio Maracujá, desde o município de Ouro Preto – onde situa-se a nascente do rio – até a cidade de Raposos, para verificar a sua integridade, a susceptibilidade a danos, a acessibilidade e as condições de operação e de manutenção das estações, bem como as condições locais dos rios nos pontos em que são instaladas.

As estações selecionadas estão listadas na tabela abaixo.



Estação	Código INMET	Código CEMADEN	Código ANA	Munic.	Fonte	Long.	Lat.
PCH Rio de Pedras Barramento	D6703		41140080	Itabirito	HIDROWEB SNIRH	-43,7317	-20,2139
PCH Rio de Pedras Montante	D6791		4152000	Itabirito	HIDROWEB SNIRH	-43,6825	-20,2406
PCH Rio de Pedras Rio Itabirito	D6704		41180500	Itabirito	HIDROWEB SNIRH	-43,8039	-20,2242
PCH Rio de Pedras Rio Maracujá	D6792		41153050	Ouro Preto	HIDROWEB SNIRH	-43,6975	-20,2628
Rio Acima	D3597		41195050	Rio Acima	HIDROWEB SNIRH	-43,7919	-20,0919
Raposos	D1294	315390501A	41200430	Raposos	HIDROWEB SNIRH	-43,8067	-19,9631
Honório Bicalho	D1249	314480504A	41199998	Nova Lima	CEMADEN / HIDROWEB	-43,8250	-20,0210
Itabirito Linígrafo	D6702		41180000	Itabirito	HIDROWEB	-43,7981	-20,3011
Fazenda Água Limpa Jusante			41151001	Ouro Preto	HIDROWEB SNIRH	-43,6164	-20,3053

Lista de Estações Pluviométricas/Fluviométricas inicialmente selecionadas para esse Projeto

No decorrer dos estudos foram acrescentadas a essa lista, como se verá à frente, as estações Lagoa Grande (MMV) e, para efeitos de complementação de dados, Barragem das Codornas (MMV).

O estudo se fez por meio da aplicação de vários métodos estatísticos de análise para se buscar maior confiabilidade dos resultados obtidos e, ao mesmo tempo, maior visibilidade e entendimento das tendências e comportamentos das vazões e precipitações.

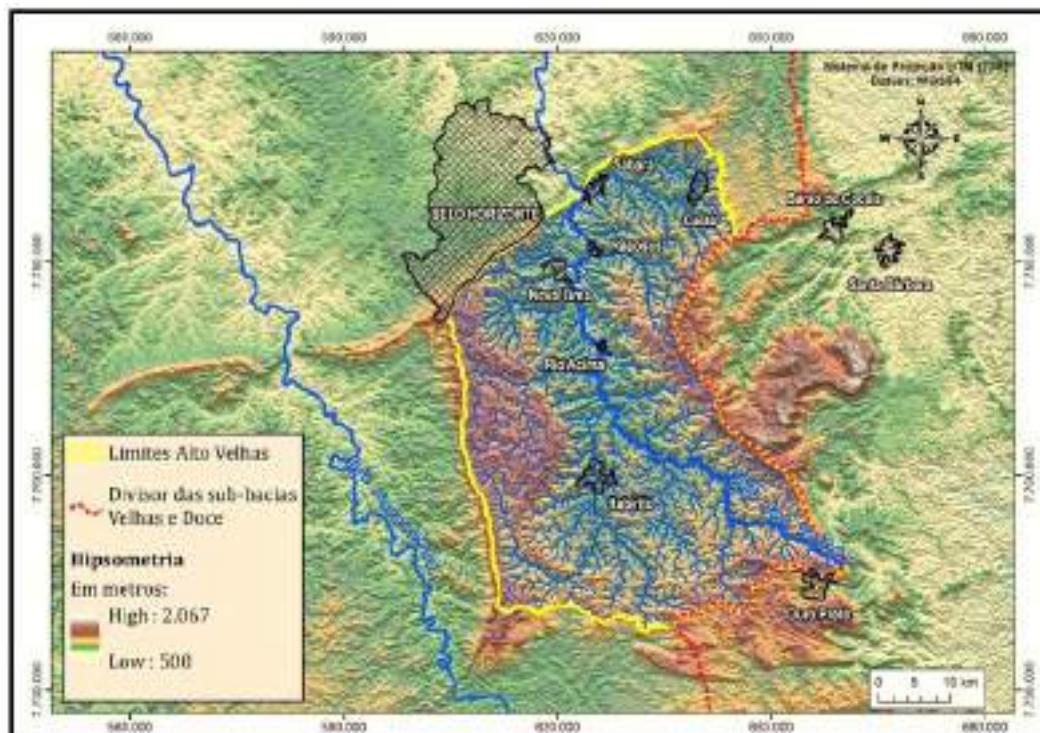
2 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO ALTO CURSO DO RIO DAS VELHAS

Os mapas a seguir mostram a localização, as características hipsométricas e hidrogeológicas da área de estudo. Essa área, a bacia do Alto Curso do Rio das Velhas, é de fundamental importância para o abastecimento público da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH, pois dela provém 70% da água que abastece a cidade de Belo Horizonte e 45% da água que abastece a RMBH. **Sem um rio como o das Velhas, não teria sido possível o crescimento das diversas cidades que dele dependem.**

A potencialidade desse rio para atender a demanda sempre crescente da região se devia tanto à pluviosidade da área quanto à existência de importantes aquíferos de altitude, capazes de assegurar vazões adequadas em épocas de recessão. No entanto, as atividades minerárias e a urbanização trouxeram importantes alterações nas características do solo, afetando a sua permeabilidade, e no volume dos aquíferos, cujos níveis freáticos têm sido intensa e crescentemente rebaixados para permitir o aprofundamento das cavas das minas. Soma-se a isso às mudanças do clima que, nos últimos 20 ou 30 anos, provocaram redução dos volumes precipitados e da intensidade geral das chuvas – o que se demonstra por meio desse trabalho – ao mesmo tempo que trouxeram alguns eventos extremos que causaram enchentes catastróficas.

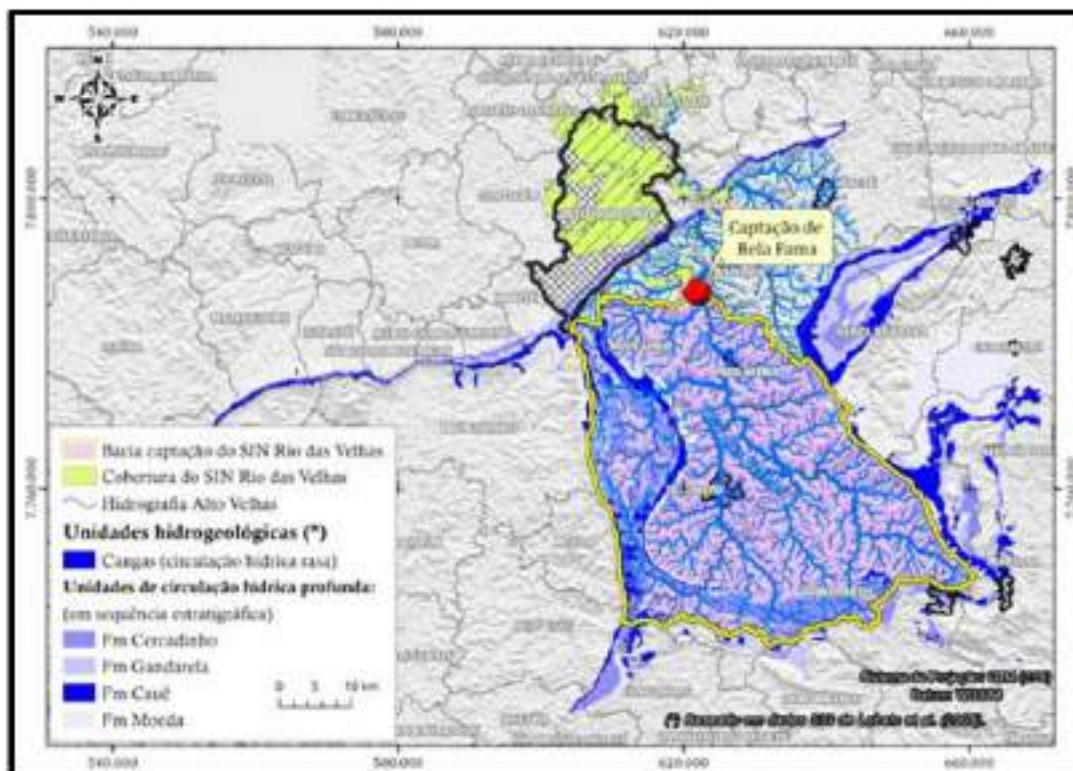
De acordo com FIGUEIREDO, 2019, as bacias hidrográficas são alimentadas por uma rede de canais fluviais convergentes para um canal principal. Os canais secundários são alimentados por zonas de cabeceiras, de nascentes (ou pontos de exfiltração), **situadas nas partes mais elevadas do relevo regional, onde os aquíferos afloram.** Os aquíferos do QF ocupam, portanto, papel

central no abastecimento hídrico atual e futuro da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), terceira maior região metropolitana do Brasil.



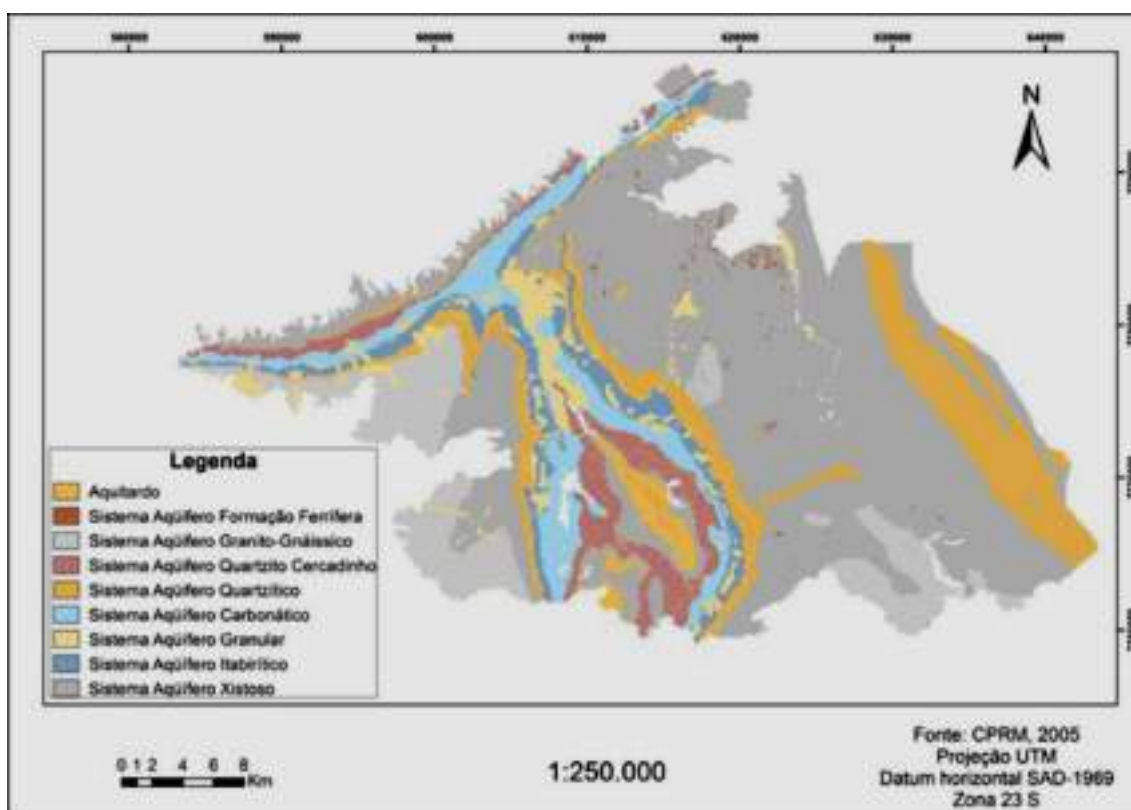
Hipsometria e delimitação da alta bacia do Rio das Velhas, no QF, zona onde está situada a principal captação de água da RMBH, Bela Fama.

Fonte: Rodrigues, 2010.



Localização da captação de Bela Fama (captação única do Sistema Integrado Rio das Velhas), sua bacia de captação e as regiões da RMBH atendidas.

Fonte: Papatella et al., 2018.



A região do Quadrilátero Aquífero-Ferífero (QAF) tem como principal aquífero a unidade geológica hospedeira dos corpos de minério de ferro característicos, denominada de Formação Cauê originada pela precipitação química predominante de ferro e sílica, originando as formações ferríferas bandadas (BIF – Banded Iron Formations). Estas rochas foram submetidas a processos geológicos que promoveram a supressão da porosidade primária, proporcionando a formação de porosidade fissural, evidenciada pela presença de falhas, fraturas e clivagens no corpo mineral das BIF.

Nessas rochas, fluidos percolantes originários da infiltração de águas pluviais e outros processos promoveram a dissolução da sílica e do carbonato secundário, gerando corpos hematíticos compactos, com porosidade fissural e alta condutividade hidráulica, e corpos hematíticos friáveis, com porosidade intersticial e alta capacidade de armazenamento.

A Formação Cauê ocorre continuamente no Sinclinal (Serra da) Moeda e no Homoclinal Serra do Curral, fazendo-se presente em todo o relevo de cimeira da região. De forma ampla, as ocorrências de BIF estão associadas a importantes zonas de exfiltração de água subterrânea em diversos pontos do QAF.

As BIF apresentam-se destacadamente como um recurso mineral e econômico de alto valor e qualidade, e também com o maior destaque, como aquífero de grande potencial abastecedor das bacias hidrográficas do QAF, sendo, portanto, de fundamental importância para a manutenção das condições ambientais e hidrológicas destas bacias e para o abastecimento urbano (residencial, comercial, industrial e agrícola) da RMBH e demais cidades adjacentes ao QAF.

Os conflitos de uso surgiram na medida em que as operações minerárias iniciaram procedimentos de rebaixamento de nível d'água, necessários ao avanço da lavra, para cotas



altimétricas inferiores à superfície piezométrica (nível freático), exigindo o bombeamento constante de volume de água superior à recarga do aquífero afetado.

Além dos elevados riscos à segurança hídrica da RMBH impostos pelas perdas dos volumes dos aquíferos provocadas pelas atividades minerárias, é necessário evidenciar outros riscos associados a essas atividades. De fato, as operações minerárias do QAF, em constante e acelerada expansão ao longo dos últimos 50 anos, são complexos de larga escala e têm como subproduto, rejeitos de mineração, também em larga escala, depositados em barragens – e mais recentemente, em pilhas – de rejeitos, construídas por todo o QAF, cuja estabilidade, em sua maioria, vem sendo questionada com maior ênfase devido aos eventos traumáticos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019).

A montante do principal sistema de captação, no Rio das Velhas, o mais importante para o abastecimento da capital Belo Horizonte, existem várias barragens e pilhas de rejeitos de mineração com estabilidade questionada, bem como novos projetos minerários de larga escala em fase implantação e de planejamento.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

O presente trabalho apresenta, nessa Parte 1, uma análise detalhada do comportamento das chuvas e, na Parte 2, o das vazões do Rio das Velhas e de seu afluente, o Rio Itabirito

As alterações nos volumes precipitados e na distribuição das chuvas ao longo do tempo constituem fatores fundamentais para estudos e decisões que envolvam a segurança hídrica da RMBH e necessariamente devem ser tomadas em consideração em conjunto com a análise dos riscos derivados das atividades minerárias, acima mencionados, da impermeabilização de áreas devido à urbanização, da mudança do uso da terra, da perfuração de poços artesianos para abastecimento urbano e uso industrial e do desmatamento.

Na **Parte 2**, apresenta-se uma análise detalhada do comportamento, nos últimos 50 anos aprox., das vazões do Rio das Velhas no exutório da sua bacia a montante da Estação de Tratamento de Água de Bela Fama, da COPASA, em Nova Lima (aqui denominada “Bacia do Alto Rio das Velhas”), considerando como ponto de medição dessas vazões a Estação Fluviométrica de Honório Bicalho, situada a cerca de três quilômetros águas acima da ETA Bela Fama, bem como uma análise detalhada do comportamento das chuvas na área nessa bacia ao longo das últimas décadas. A série dessa estação tem início em 27/04/1971 e termina em 30/11/2023. A descontinuação das medições fluviométricas da série, decisão tomada pela ANA e pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, pode ser questionada devido à importância da Estação no contexto da Bacia do Alto Velhas e dos estudos concernentes ao abastecimento da RMBH.

3.2 Duração de Séries Temporais de Variáveis Hidrológicas

Como o objetivo de identificar tendências e fatores que possam impactar negativamente a segurança hídrica da RMBH um dos principais focos dos estudos realizados foi o tema das baixas vazões dos períodos de estiagem. Para tanto, a metodologia utilizada foi baseada em recomendações para estes tipos de estudos, tendo sido aplicadas aqui, principalmente, as do



"Manual on Low-flow Estimation and Prediction" (WMO-No. 1029) da Organização Mundial Meteorológica¹ (WMO, 2008).

Alguns dos principais pontos a serem considerados para a análise das séries são os seguintes:

“Com relação aos requisitos para dados de vazão em estudos de baixas vazões, dado que a taxa de variação das vazões tende a ser relativamente pequena de um dia para o outro durante períodos de baixas vazões, dados com resolução diária (vazão média diária) são normalmente preferidos, embora dados semanais (vazão média de 7 dias), de 10 dias e mensais (vazão média mensal) também sejam regularmente utilizados.

As séries temporais devem ser tão longas quanto possível. Dados com duração de 30 anos ou mais são frequentemente recomendados como registro mínimo (por exemplo, Tallaksen e outros, 2004). Na prática, hidrólogos muitas vezes têm que lidar com dados de duração bem menor: um registro mínimo de 5 anos é comumente especificado; no entanto, dados de menos anos de duração às vezes podem ser úteis, especialmente se eventos importantes forem capturados em uma região com poucos dados e se os dados puderem ser correlacionados com uma série temporal mais longa de estações próximas.

Idealmente, cada série temporal deve ser uma sequência contínua e ininterrupta de observações de vazão igualmente espaçadas e incluir dados em toda a faixa de valores possíveis, das maiores às menores vazões.

As séries temporais devem conter o mínimo possível de valores ausentes ou truncados. Embora métodos de preenchimento possam melhorar a utilidade dos dados de séries temporais (ver 3.3.4), nem sempre é possível determinar vazões realistas para sequências longas de valores ausentes.

Limites podem ser estabelecidos arbitrariamente para especificar um nível aceitável de completude para um registro, ou seja, o número máximo, ou proporção, de valores ausentes permitidos. Um limite pode ser usado para ajudar a decidir se deve-se rejeitar o registro completo ou apenas dados de anos específicos. Para séries temporais de dados diários de vazão média, não é incomum que um registro completo seja rejeitado se, por exemplo, mais de 20% dos valores estiverem ausentes. Para os dados diários de um único ano, limites de 5% (mais de 18 dias de dados ausentes) ou 10% são frequentemente usados.

O limite escolhido deve sempre ser determinado de acordo com os objetivos e circunstâncias do estudo individual. Deve-se notar, no entanto, que essa abordagem nem sempre é apropriada, pois muitos dos valores ausentes ou truncados podem ter ocorrido durante períodos de altas vazões, o que não invalidaria necessariamente o registro para uma análise de baixas vazões.

Antes de rejeitar um registro, ou qualquer parte dele, com base na completude, o momento dos valores ausentes deve ser cuidadosamente considerado: um registro aparentemente inaceitável devido à incompletude ainda pode ser valioso, se eventos significativos de baixas vazões tiverem sido capturados”.

(Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Item: 3.3 Preparation of good-quality data for low-flow analysis. Subitem: 3.3.1 Establishing data requirements, pags. 27 e 28).

Além do foco nas baixas vazões, as análises realizadas incluíram também os eventos de cheias e os eventos de chuvas intensas e extremas.

¹ Manual on Low-flow Estimation and Prediction. World Meteorological Organization - WMO, 2008 (WMO, No. 1029). Os diversos manuais dessa Organização estão disponíveis no seguinte site: <https://old.wmo.int/extranet/pages/prog/hwrrp/manuals.php>



Para a análise de características e de tendências de séries de dados hidrológicos (vazões e precipitações) preferencialmente foram utilizadas séries das estações que possuem pelo menos 30 anos de monitoramento, conforme recomendado pela WMO.

Entre as estações pluviométricas existentes na região, destacam-se as denominadas Lagoa Grande (MMV), situada às margens da Lagoa dos Ingleses, cuja série de medições diárias iniciou-se em janeiro de 1941; Itabirito – Linígrafo (jan./1984) e Fazenda Água Limpa (jan./1984), Rio do Peixe (MMV) e Barragem das Codornas (MMV) (set./1976), sendo as três primeiras as consideradas no presente trabalho como representativas das diferentes áreas da bacia. As estações mais antigas foram implantadas pela empresa Mineração Morro Velho (MMV).

Para efeitos da análise de dados realizada no presente documento considerou-se representativas as séries com um limite de 10% de dados faltantes com relação ao total do período considerado (quantidade de dados diários, horários ou a cada 15 minutos, dependendo das características de cada série, que deveriam existir caso o período estivesse completo, ou seja, sem dados faltantes).

Adota-se aqui a denominação “período” para designar cada uma das subdivisões do conjunto de todos os dados da série utilizadas para evidenciar a evolução dos valores ao longo do tempo. Para as séries de maior duração adotou-se aqui tanto um período aproximadamente decenal, baseado na equipartição dos volumes escoados pelo rio, quanto períodos anuais da parte mais recente das séries, para permitir a comparação das séries longas com as séries das estações telemétricas, as quais têm duração de oito a quinze anos apenas.

Todavia, apenas para efeitos da análise preliminar realizada na primeira fase do presente estudo, foram incluídas nos gráficos de evolução de valores as medidas referentes a toda a série, mesmo aquelas com mais de 10% de dados faltantes.

Para as séries das Estações de Honório Bicalho, Itabirito Linígrafo e Fazenda Água Limpa, que têm duração de 52, 68 e 30 anos respectivamente, optou-se por adotar períodos de duração aproximada de 10 anos, como já referido. A maior parte dos dados dessas estações foi coleta por observadores, por serem estações convencionais, e há poucos anos foram instalados equipamentos telemétricos nas seções de réguas linimétricas das estações antigas. No caso de Honório Bicalho, a coleta telemétrica de dados operou por pouco tempo e gerou dados não confiáveis, tendo sido interrompida, o que não ocorreu com leitura diária pelo observador. Isso permitiu manter a série de dados até que a estação foi desativada, proporcionando uma série ininterrupta até 30/11/2023.

O critério para estabelecer a data do início e a data do fim de cada um dos períodos maiores foi o de se ter, em cada um deles, o escoamento de 20% do volume total da água que escoou pelo Rio das Velhas, no ponto da Estação Honório Bicalho, durante todo o tempo abrangido pela série dessa Estação. O volume escoado pode ser estimado multiplicando-se a vazão média diária, em m^3/s , pelo número de segundos de um dia (24×3600). Esse critério físico pareceu aos responsáveis pela análise aqui apresentada mais adequado em termos hidrológicos que o de se adotar decênios, por exemplo, que é um critério matemático. Resulta dessa escolha que a quantidade, maior ou menor, de dias de cada um dos cinco períodos, é, por si só, representativa da disponibilidade de água no rio em cada período. Essa escolha também constitui uma proposta de abordagem metodológica introduzida pelo presente trabalho.

No caso da série da Estação Itabirito Linígrafo, que tem duração de pouco mais de 68 anos de dados diários (desde o dia 27/06/1956 até o dia 30/09/2024), para permitir a comparação do comportamento de suas vazões com o das vazões da série de Honório Bicalho, adotou-se 5 períodos com datas de início e de fim iguais às de Honório Bicalho, além de dois outros períodos de menor duração anteriores ao início da série dessa última Estação. Cada um desses dois períodos abrange metade dos dias decorrente entre o início da série de Itabirito Linígrafo e o início da série de Honório Bicalho.



Nos casos em que as tabelas de dados do Portal Hidroweb, para um mesmo mês, apresentavam linhas de dados brutos e linha de dados consistidos, foram utilizados apenas os valores consistidos. Assim, os valores brutos somente foram considerados nos meses que ainda não dispunham de valores consistidos (geralmente os meses mais recentes da série).

Para melhor entendimento dos itens e da metodologia utilizada nas análises referentes às precipitações são apresentados no **Anexo 1** do presente documento alguns dos principais conceitos e critérios utilizados em estudos de pluviometria.

No presente trabalho, devido às características pluviométricas da região, os períodos úmidos foram considerados com início em 1º de outubro de um ano e com final no dia 30 de abril do ano seguinte. **Por concisão, para referência a um período úmido em textos, tabelas e gráficos, considerou-se somente o ano de término do período úmido. Assim, optou-se por escrever, por exemplo, “período úmido de 2019” ao invés de “período úmido de 2018/2019”.**

4 ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Das nove estações telemétricas selecionadas para o presente estudo, somente três possuem série de dados pluviométricos, sendo essas séries referentes a estações convencionais que foram instaladas na década de 1930 (Rio Acima) e na década de 1984 (Itabirito Linígrafo e Fazenda Água Limpa). Essas estações convencionais foram dotadas de pluviômetros automáticos na década de 2010 e, desde então, os registros das séries antigas têm sido complementados com os dados desses pluviômetros automáticos. Pelo menos para a Estação Itabirito Linígrafo, de acordo com informação obtida in loco durante visita a ela realizada em setembro de 2024 pelos autores do presente trabalho, a coleta convencional de dados continuou também até meados de 2023.

A estação pluviométrica Rio Acima esteve operativa somente de maio de 1937 a outubro de 1957. Sendo assim, não foi possível utilizar os dados dessa estação para análise de tendências.

A Estação Fazenda Água Limpa é a que se situa mais a montante do Rio das Velhas, não muito distante da nascente do rio, e sua série, longa e quase completa, representa bem a pluviometria da região em que está situada. A série da Estação Itabirito Linígrafo, a montante da cidade de Itabirito, também bastante longa e quase completa, pode ser considerada bastante representativa da pluviosidade da bacia desse rio, um dos mais importantes afluentes do Rio das Velhas na região.

Para complementar a falta de dados das demais estações, podem ser utilizadas séries de pelo menos três outras, situadas não muito distantes uma da outra e na bacia do Rio do Peixe, nas imediações do Alphaville (Nova Lima). São elas:

Código da Estação	Nome da Estação	Oper.	Início da Série	Final da Série	Localização	
					Lat.	Longit.
2043002	Lagoa Grande (MMV) [Lagoa dos Ingleses]	CPRM	01/01/1941	31/05/2024	-20,18	-43,94
2043004	Rio do Peixe (MMV)	CPRM	01/01/1940	30/11/2023	-20,14	-43,89
2043042	Barragem das Codornas (MMV)	CPRM	13/09/1976	31/05/2024	-20,1647	-43,8919

Por se tratar de série de longa duração e apresentar dados até maio de 2024, optou-se por utilizar aqui os dados da Estação Lagoa Grande, que originalmente foi instalada, como as demais,



pela Mineração Morro Velho (MMV) e atualmente é propriedade da AngloGold Ashanti, sua operadora.

4.2 RAPOSOS – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 1943148

No portal HidroWeb não há arquivo de dados dessa estação.

4.3 HONÓRIO BICALHO – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043128

No portal HidroWeb não há arquivo de dados dessa estação.

4.4 RIO ACIMA – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043016

A série de dados diários dessa estação telemétrica foi obtida pelo Portal HidroWeb e abrange o período de 01/05/1937 a 13/10/1957. Somente dados brutos estão disponíveis para o período de mai./1937 a mai./1941. De jun./1941 até o final da série, existem linhas de dados brutos e de dados consistidos para cada mês.

Trata-se de uma série com 20 anos de duração (menor que a duração de 30 anos recomendada pela WMO No. 1029) e anterior à data de início da série de vazões mais antiga dentre as analisadas no presente documento, a da Estação Itabirito Linígrafo. Portanto, os dados da série não serão objeto de análise no presente documento. Poderão ser usados, entretanto, como referência, para comparação em casos específicos, caso isso se mostre necessário.

4.5 PCH RIO DE PEDRAS- RIO ITABIRITO – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043077

No portal HidroWeb não há arquivo de dados dessa estação.

4.6 PCH RIO DE PEDRAS - BARRAMENTO – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043065

No portal HidroWeb não há arquivo de dados dessa estação.

4.7 PCH RIO DE PEDRAS - MONTANTE – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043076

No portal HidroWeb não há arquivo de dados dessa estação.

4.8 PCH RIO DE PEDRAS - RIO MARACUJÁ – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043078

No portal HidroWeb não há arquivo de dados dessa estação.



	Bacia Completa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Data de início do período	01/01/1941	01/01/1941	01/02/1948	23/06/1968	26/11/1965	27/04/1971	04/01/1982	03/04/1995	30/10/2001	02/12/2011	-
Data de final do período	31/01/2024	31/01/1949	26/06/2008	25/11/2003	23/04/1971	20/10/1982	02/04/2002	06/10/2005	01/12/2011	31/05/2024	-
Quantidade de dias de chuva	36407	2952	2763	2799	2700	2908	2370	2043	2708	4905	-
Área de drenagem	92,41	8,80	7,40	7,41	7,41	18,69	8,24	30,52	18,14	13,58	-
Totais de dados	28412	2422	2743	2782	2706	2403	2270	2643	2702	4542	-
Porcentagem de dias chuvosos	89,02%	98,89%	119,89%	180,80%	180,00%	100,00%	122,80%	120,80%	99,80%	98,62%	-
Quant. de dias de chuva por período	8138	742	689	792	791	1318	978	1099	1843	1287	-
Méts. de dias de chuva por área	97	92	94	95	101	89	106	97	183	93	-
Precipitação acumulada no período	320494,4	22427,8	16478,6	17775,7	11283,8	19837,4	13943,2	13993,8	17801,7	29302,2	mm
Precipitação anual média (Média Aritmética)	1884	2527	2417	1494	1511	1948	1723	1532	1771	1944	mm/ano
Variação da precipitação anual média	3,68%	-2,02%	6,42%	-7,80%	-3,36%	6,96%	10,21%	-3,34%	11,35%	-1,20%	%
Precipitação média por dia de chuva (Média Aritmética)	16,09	18,88	25,36	25,30	16,92	18,28	19,33	25,02	17,23	18,53	mm/dia
Precipitação média por dia de chuva (Média Harmônica)	5,79	8,31	5,86	5,91	6,89	7,31	8,58	4,93	5,79	5,90	mm/dia
Índice pluviométrico	26,42	17,23	26,32	27,52	19,66	14,19	26,62	27,34	18,49	17,78	mm/ano
Precipitação diária máxima do período	202,89	180,10	245,66	118,48	128,40	189,30	89,30	108,18	114,78	202,90	mm/dia
Quant. de dias de chuva - Período todo	836	94	68	68	72	128	144	137	134	129	-
Quant. de dias de chuva - Período médio	7279	792	627	622	606	606	668	667	1018	1545	-
Méts. de dias de chuva por área - Período todo	10,90	8,89	7,84	10,76	9,76	11,68	15,88	12,09	11,34	16,58	-
Méts. de dias de chuva por área - Período médio	90,96	69,89	86,31	84,09	91,72	83,27	96,30	81,09	109,28	91,47	-

Para o cálculo das médias foram considerados apenas os dias em que ocorreu chuva com valor precipitado maior que 1,2 mm (ver à frente explicação sobre esse critério). Assim, a média aritmética anual das precipitações de cada período, por exemplo, foi calculada somando-se todos os valores das precipitações (precipitação acumulada) ocorridas durante o período (ex. de 01/01/1941 a 31/01/1949) e dividindo-se o resultado pela quantidade de dias de chuva desse período que tiveram valores acima de 1,2 mm.

4.9.1 Complementação dos Dados Faltantes – Método Dupla Massa

Com o intuito de verificar a consistência de dados entre as estações pluviométricas e seu uso como ferramenta de preenchimento de lacunas, foi utilizado o Método da Dupla Massa, desenvolvido pelo Geological Survey (USA) e de Regressão Linear, Tucci (2001, 2012), Barbosa et al. (2005) e Oliveira et al. (2010).

Esse método se baseia na suposição de que a relação entre os dados de uma estação pluviométrica e um conjunto de estações vizinhas deve ser linear e consistente ao longo do tempo. Se houver mudanças nessa relação, o método permite identificar e corrigir essas inconsistências.

A análise de dupla massa é essencial para verificar a consistência dos dados. Pontos próximos a uma linha reta indicam correspondência satisfatória entre as séries de dados, enquanto dispersão significativa sugere problemas de medição ou alterações no sistema. Essa análise não fornece explicações diretas, mas aponta inconsistências que requerem investigação adicional. É importante investigar possíveis fontes de erro, como erros de medição ou mudanças ambientais. Assim, a análise de dupla massa melhora a qualidade e a precisão das análises hidrológicas e hidrogeológicas, ao identificar inconsistências nos dados e proporcionar ações para sua correção. (WATER SERVICES, 2024)

Descrição do Método:

- **Seleção das Estações Pluviométricas:** Escolher a estação com dados faltantes (chamada **estação alvo**), nesse caso, a Estação Lagoa Grande (MMV) ; Selecionar a(s) estação(ões) pluviométrica(s) vizinha(s), com séries temporais consistentes e bem documentadas.
- **Acumulação dos dados:** Para as duas ou mais estações, calcular os valores acumulados de precipitação ao longo do tempo:

$$P_{\text{acum}}(t) = \sum_{i=1}^t P(i)$$

Onde P(i) é o valor da precipitação no dia “i”.



- **Gráfico dupla massa:** Construir um gráfico com a precipitação acumulada da estação alvo no eixo y e a média da precipitação acumulada das estações vizinhas no eixo x calculada pela fórmula:

$$\text{Média Acumulada} = \frac{P_{\text{acum},1} + P_{\text{acum},2} + \dots + P_{\text{acum},n}}{n}$$

onde n é o número de estações vizinhas. Para o caso em questão, n = 1.

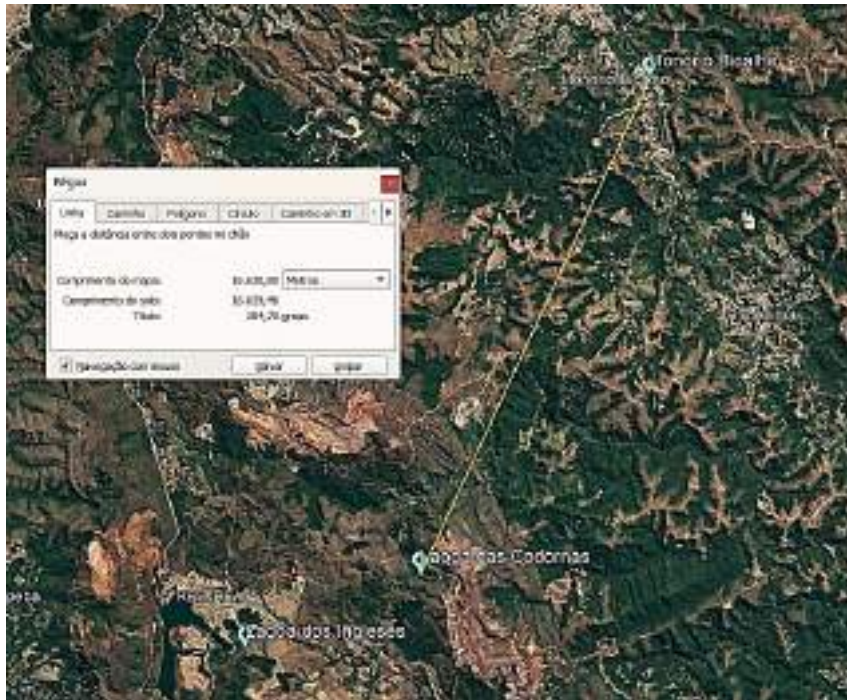
- **Identificação de Inconsistências:** No gráfico, uma relação linear indica consistência nos dados. Desvios dessa linearidade sugerem mudanças nas condições ou inconsistências nos dados da estação alvo.
- **Preenchimento dos Dados Faltantes:** Usando a relação ajustada (linear) entre os dados da estação alvo e as estações vizinhas, estimar os valores faltantes com base na média ponderada ou regressão linear dos dados das estações vizinhas. Assim, para obter os dados de um período sem dados na estação alvo, usar os dados acumulados das estações vizinhas para prever os valores acumulados da estação alvo e subtrair os valores acumulados consecutivos para determinar a precipitação mensal ou diária estimada.

4.9.1.1 Aplicação do Método Dupla Massa

Para a construção do gráfico de dupla massa com objetivo de completar os dados faltantes na série da Lagoa Grande (MMV) – (Lagoa dos Ingleses) foi utilizada a série da Barragem das Codornas da acima referida. Como essa série tem dados somente a partir de 1º/09/1976, os dados faltantes na série da Lagoa Grande (Lagoa dos Ingleses) anteriores a essa data (ou seja, somente os dados dos 31 dias do mês de dezembro de 1943, permaneceram como lacunas. Para a elaboração do gráfico de dupla massa foram selecionados apenas as datas com dados completos nas duas séries.

Essas duas estações distam entre si de apenas 5700 metros. A Estação Lagoa Grande está na altitude 1370 m.a.n.m, na parte central do Sinclinal Moeda, e a Estação Barragem das Codornas está a 1220 m.a.n.m., próxima ao flanco leste do mesmo Sinclinal e dista 16.300 m da Estação Fluviométrica de Honório Bicalho, conforme mostrado nas figuras a seguir. As duas estações estão na Bacia do Rio de Peixe, afluente do Velhas e podem ser consideradas bastante representativas de todo o Sinclinal, que constitui o lado oeste da Bacia do Alto Rio das Velhas desde a Serra do Curral até as proximidades de Congonhas, Miguel Burnier e Rodrigo Silva.

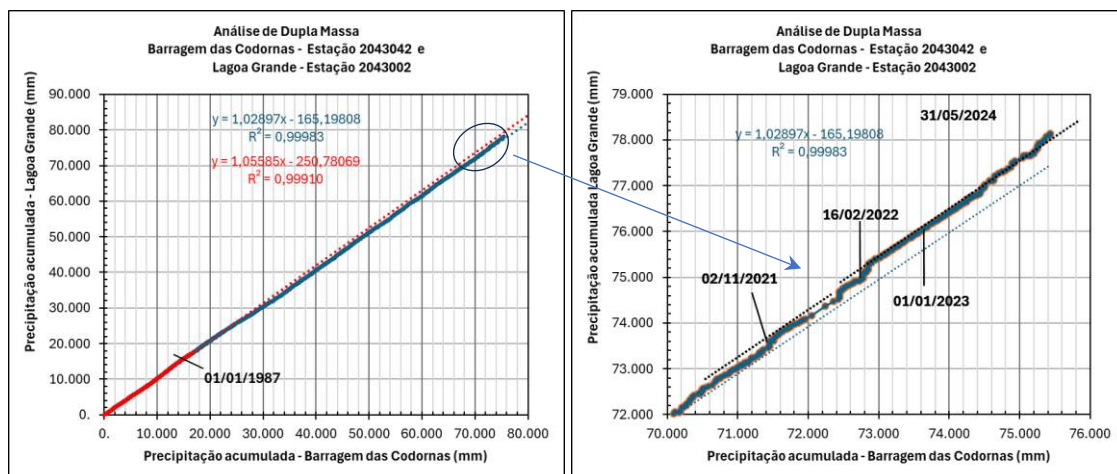




Como pode ser observado na curva de dupla massa apresentada a seguir, as duas estações apresentam estreita semelhança entre si, sem pontos discordantes significativos. Essa similaridade é ratificada, para ambas as estações, pelo elevado coeficiente de correlação, R^2 , na ordem de 0,99983 – o que representa uma correlação muito alta - bem acima do mínimo de 0,7 acima citado – entre os dados medidos em ambas as estações. Assim, comprova-se que a estação Barragem das Codornas pode ser utilizada como ferramenta de preenchimento de dados da Lagoa Grande (MMV)

Como exemplo de verificação de alterações de tendências entre as séries com o uso do método de Dupla Massa, inclui-se no gráfico da esquerda, abaixo, que abrange todo o período da série (linha azul), o segmento de massas acumuladas correspondente aos primeiros 10 anos da série, desde 13/09/1976 até 31/12/1986 (linha vermelha). A reta de regressão desse período inicial tem inclinação ligeiramente maior que a reta de regressão que cobre toda a série, indicando que a pluviosidade no ponto da Estação Lagoa Grande reduziu-se discretamente ao longo do tempo quando comparada com a do ponto da Estação Codornas.

No entanto, quando se amplia a parte final da curva (gráfico da direita), nota-se que a pluviosidade relativa na Lagoa Grande (MMV) volta a aumentar no final de 2021 (degrau da curva em 02/21/2022) e a relação entre as massas retorna à inclinação anterior durante até o final do período seco desse ano. Um outro degrau ocorre no período chuvoso seguinte (2021-2022), com novo retorno à inclinação original. Essas diferenças, bem pequenas, podem não ser muito significativas, mas, de qualquer forma, parecem indicar que discretas alterações de distribuição de chuvas ocorrem, com o tempo, mesmo entre pontos bastante próximos, pois esses dois períodos chuvosos da Lagoa Grande foram um pouco mais intensos que de costume com relação à Codornas.



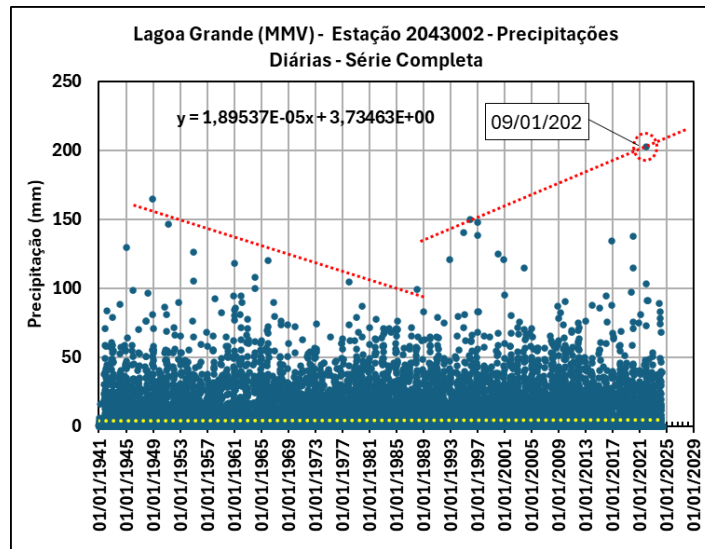
Análise de Dupla Massa entre a Estação Barragem das Codornas - 2043042 e a Estação Lagoa Grande (MMV) - 2043002

4.9.2 Análise Preliminar das Vazões Diárias

A série da Estação Lagoa Grande (MMV) disponibilizada pela ANA no portal HidroWeb na data de 30/09/2024 (data final de coleta de dados para o presente relatório) abrange um período de 30.467 dias. A primeira abordagem dos dados, apresentada a seguir, tratou de explorar os aspectos mais evidentes das precipitações diárias, procurando identificar os intervalos anuais que poderiam ser considerados os períodos úmidos e seco, bem como as tendências mais gerais.

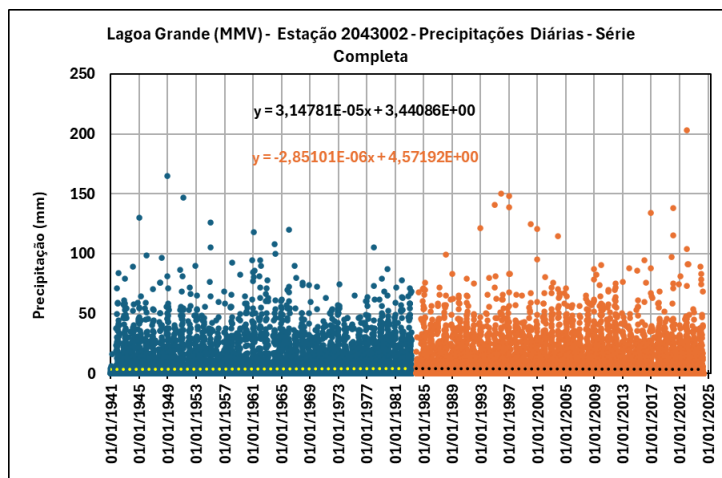
Nesse sentido, o gráfico a seguir mostra a distribuição temporal das vazões diárias da Estação pluviométrica na Lagoa Grande (MMV) entre 01/01/1941 e 31/05/2024. As envoltórias constituídas pelas retas tracejadas vermelhas procuram destacar duas prováveis tendências (a serem confirmadas ou não por estudos posteriores) de redução das precipitações máximas no decorrer dos primeiros 50 anos da série e de aumento dessas precipitações máximas ao longo dos 30 anos mais recentes, aumento esse possivelmente associado às mudanças climáticas. No gráfico, destaca-se o valor de 202,9 mm referente ao dia 09/01/2022.

A equação da reta de regressão linear (linha pontilhada amarela) do conjunto total dos dados, com coeficiente da variável positivo, aponta para uma tendência de longo prazo de aumento das precipitações, tendência essa oposta à tendência geral das vazões registradas na Estação Honório Bicalho. Essas tendências gerais opostas poderiam ser consideradas, uma contradição a ser investigada, uma vez que seria de se esperar um aumento nas vazões do Rio das Velhas como consequência do aumento das precipitações em sua bacia. Entretanto, como se explica a seguir, ao se considerar segmentos da série da Lagoa Grande (MMV), a contradição não se mantém.



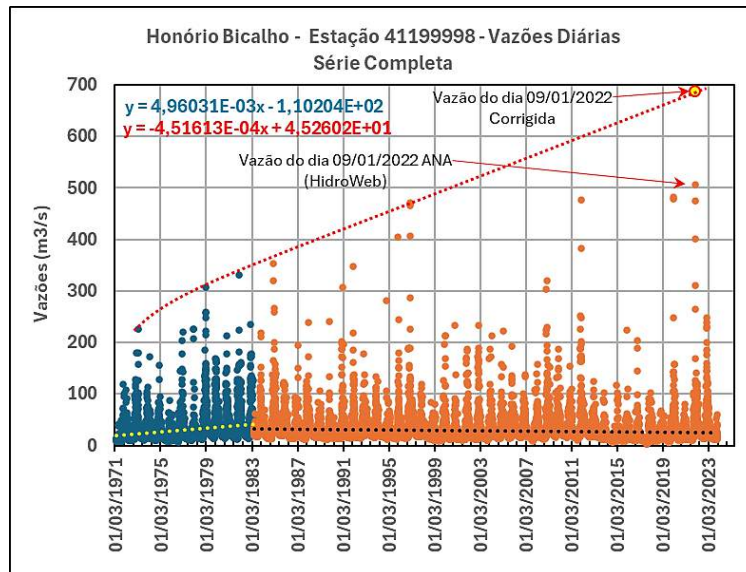
Distribuição das precipitações ao longo do período total da série

Como feito para Honório Bicalho, mostra-se a seguir a distribuição de vazões do gráfico anterior dividida em dois períodos, sendo que o primeiro abrange as vazões desde o início dos registros, em 1941, até o dia 30/04/1983, fim do período úmido 1982-1983. Essa data de partição da série foi selecionada, por tentativa e erro, de modo a maximizar os coeficientes de inclinação das retas de regressão dos dados dos dois períodos. Observa-se, no primeiro período, tendência geral de aumento dos valores de precipitação e, no segundo, tendência de redução que faz com que, para a série completa, a tendência seja de redução (gráfico acima).



Distribuição das precipitações ao longo do período total da série

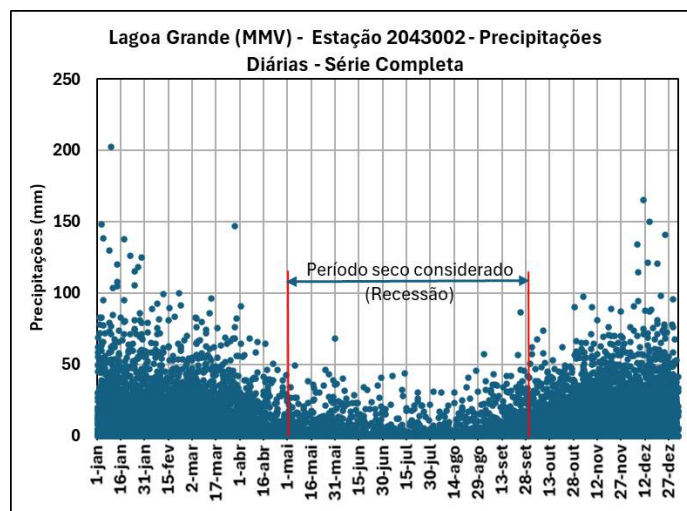
Para facilitar a comparação e demonstrar a coerência entre vazões e precipitações, rerepresenta-se a seguir o gráfico das vazões em Honório Bicalho no qual também divide a série dessa estação em dois segmentos com tendências opostas:



Distribuição temporal das vazões diárias registradas na Estação

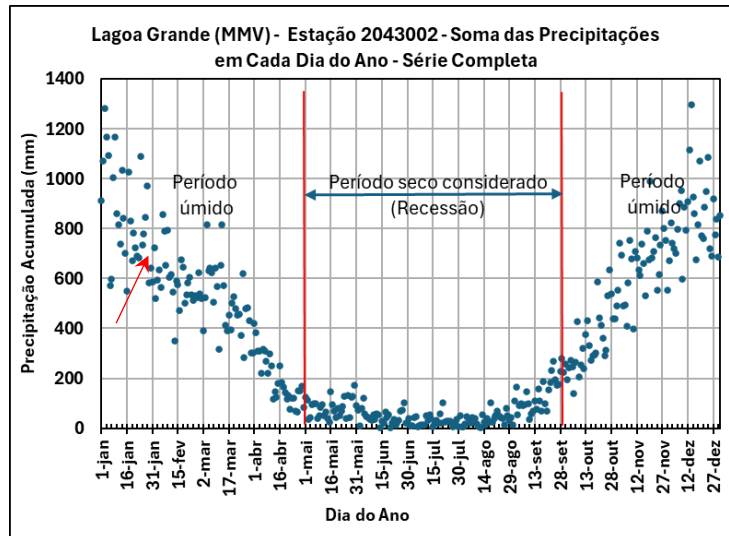
Essas tendências serão mais bem exploradas à frente, no presente documento, bem como em documentos futuros a serem apresentados no âmbito do Projeto “De Olho no Velhas”.

De maneira similar ao que foi feito para a Estação Honório Bicalho, apresenta-se a seguir a distribuição das precipitações diárias de toda a série ao longo dos dias do ano. As maiores precipitações concentram-se em janeiro. O recorde da série é o valor de 202,9 mm referente ao dia 08/01/2022. Das 30 maiores precipitações de toda a série, 16 ocorreram em janeiro, 9 em dezembro, duas em fevereiro, duas em março e uma em novembro. O gráfico inclui as linhas que demarcam o período seco selecionado de acordo com os critérios definidos no item referente à Estação Honório Bicalho.



Distribuição das precipitações da série ao longo dos dias do ano

Também de forma similar ao que está apresentado para Honório Bicalho, para facilitar a visualização do comportamento das precipitações ao longo do ano, adotou-se como variável a soma das precipitações do mesmo dia do ano de cada ano da série. Ou seja, para cada dia do ano (eixo das abscissas), os gráficos apresentam a soma (eixo das ordenadas) a soma das precipitações naquele dia em toda a série. Ex.: o ponto referente ao dia 31 de janeiro (586,3 mm) é a soma dos valores de precipitação de todos os dias 31 de janeiro da série, ou seja, a soma de 83 valores (seta vermelha).



Volume total escoado por dia do ano

O dia que acumula o maior volume de chuvas é 14 de dezembro e poderia ser considerado o dia que tem a maior probabilidade de se ter uma precipitação alta. Esse dia é seguido pelos dias 03/01, 04/01 e 09/01. Dos 30 maiores valores acumulados de toda a série, 14 ocorrem em dezembro, 13 em janeiro, dois em novembro e um em fevereiro. Dezembro e janeiro são, portanto, os meses em que, historicamente ocorrem as maiores precipitações na região do entorno da Lagoa Grande (MMV).

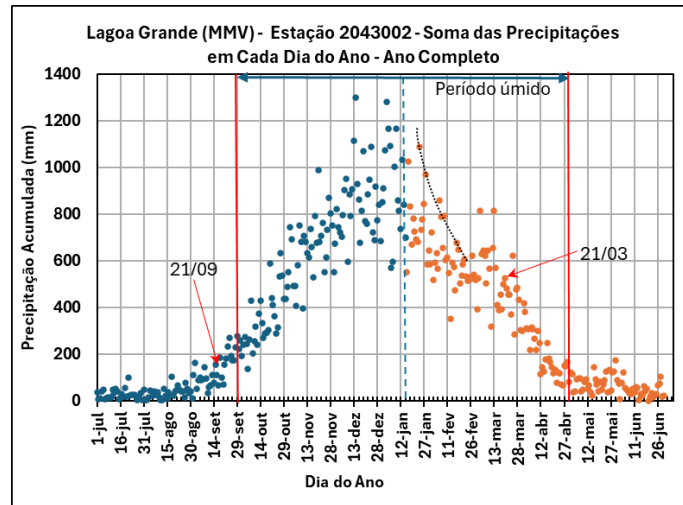
Conforme definido com base nas observações sobre a Estação Honório Bicalho, considerada nos presentes estudos como a mais importante da bacia, adota-se também aqui o dia 15 janeiro como sendo o centro do ciclo hidrológico da bacia do Alto Rio das Velhas.

A soma das precipitações ao longo dos 83,41 anos da série foi 130.994,5 mm. Dividindo-se esse valor por dois e comparando-o com a soma dos valores de cada dia do ano ao longo de toda a série, antes e depois do dia central elegido, verifica-se que metade do volume se deve a chuvas ocorridas do dia 16/jan. ao dia 19/out. (277 dias) e a outra metade, do dia 20/out. ao dia 15/jan. (88 dias). Portanto, em geral, o primeiro período (que abrange 75,9% do ano) apresenta precipitações bem menores que o segundo. Assim, em termos da soma dos valores diários referida, metade das chuvas de um ano típico ocorrem em 24,1% do tempo total do ano. O volume de precipitações dos períodos úmidos (1º/out. a 30/abr.) é de 120.193,8 mm, ou seja, 92,40% do total de toda a série. Dessa forma, historicamente, 41,9% do tempo de um ano recebe apenas 7,6% das chuvas e 58,1% do tempo recebe os restantes 91,75% das chuvas.

O gráfico a seguir, elaborado segundo o princípio de partição definido para Honório Bicalho (para permitir a comparação entre os gráficos de vazão de Honório Bicalho e de precipitação da Lagoa dos Ingleses, estações próximas), mostra à esquerda a curva ascendente (linha pontilhada vermelha) das somas dos volumes precipitados, culminando com o ponto do dia 3 de janeiro. À direita, mostra-se a curva descendente dos volumes (linha pontilhada preta).

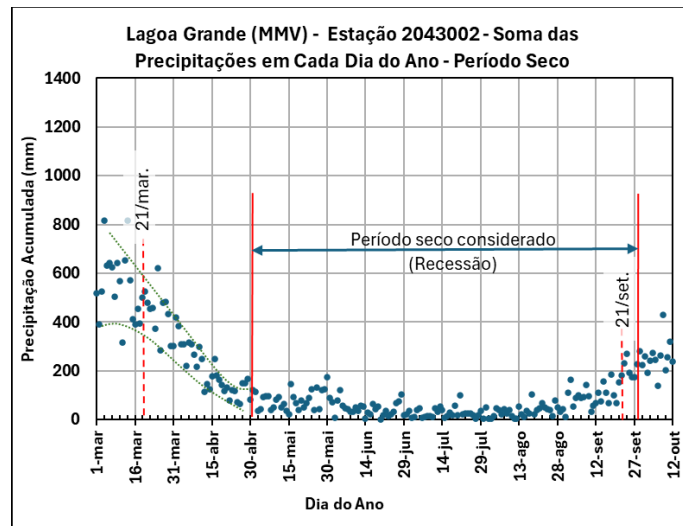
O dia 15 de janeiro, visualmente, está mais próximo da curva descendente. Assinala-se, no gráfico, as datas adotadas como início e fim do período úmido (linhas verticais vermelhas, pelos dias 1º de outubro e 30 de abril). As setas apontam para os dias dos equinócios da primavera e do outono (21 a 23/09 e 20 a 23/03). Considerando-se as somas das precipitações da série, constatou-se que 58,43% das precipitações dos períodos úmidos ocorreram do dia 1º/out. até o

dia 15/jan. (pontos azuis no gráfico a seguir) e 41,6% ocorreram do dia 16/jan. até o dia 30/abr. (pontos cor laranja).



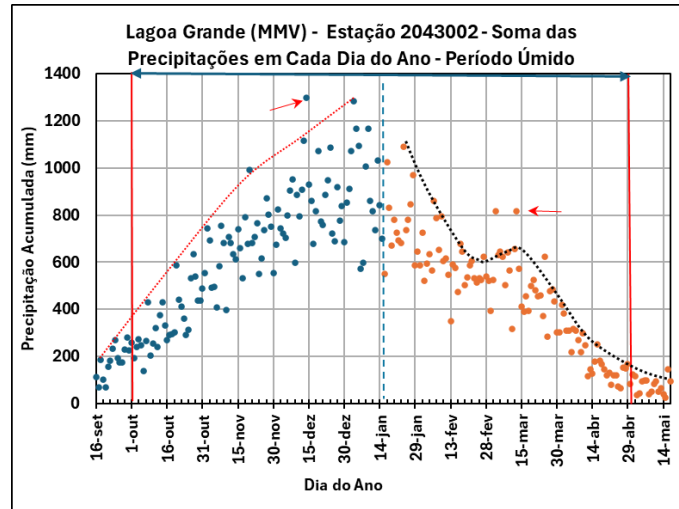
Volume total escoado por dia do ano – Centro do ciclo hidrológico

Um “zoom” do gráfico acima, abrangendo o período de 1º de março a 12 de outubro, permite ver a variabilidade dos valores acumulados dos volumes de precipitação desde o início de março até o final de abril, valores esses que se situam entre as duas curvas envoltórias (linhas pontilhadas azuis) que convergem até se encontrarem por volta de 30 de abril. A partir dessa data, até 21 de setembro, os valores acumulados se mantêm em um patamar bem baixo, com poucas variações, denotando o comportamento típico de um período de recessão, baixo volume de chuvas.



Volume total escoado por dia do ano – Período seco

Uma ampliação do gráfico anual de volumes de precipitação do período úmido permite a visualização de algumas características bastante peculiares, um comportamento, em alguns aspectos, bem similar ao verificado para as vazões em Honório Bicalho (ver abaixo), o que é de se esperar, uma vez que as vazões maiores são consequência do escoamento superficial provocado pelas chuvas de maior intensidade e as duas estações são próximas uma da outra. As curvas ascendente e descendente dos valores de volumes acumulados de precipitação não são simétricas com relação à data central de 15 de janeiro entre as datas de 30/nov. e 25/fev., fato que ocorre com relação a Honório Bicalho.

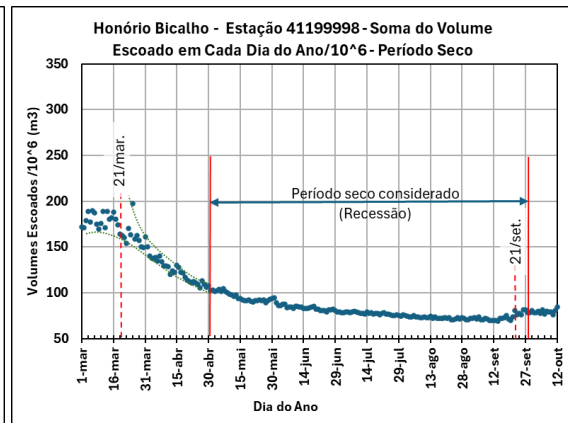
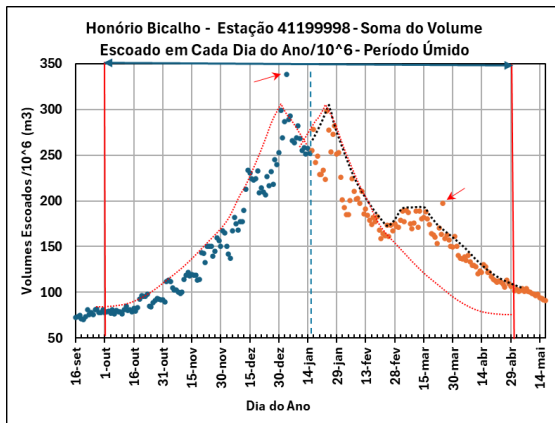


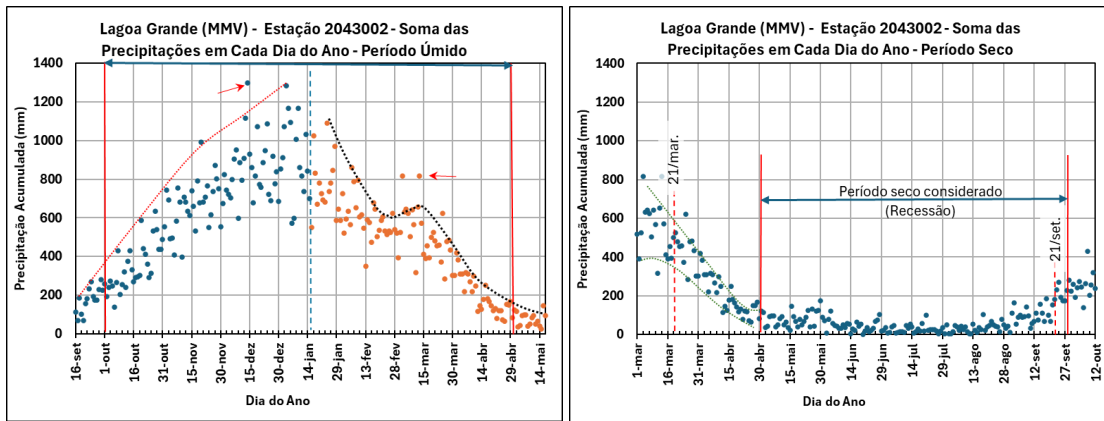
Volume total escoado por dia do ano – Centro do ciclo hidrológico

Entre 26/fev. e 18/mar. os volumes acumulados crescem novamente, assim como ocorre com as vazões em Honório Bicalho, reduzindo-se depois, de maneira mais uniforme a partir do dia 19 de março, nas vésperas do equinócio do outono (que ocorre de 20 a 23 de março, dependendo do ano), o que denota que é comum que se tenha menos chuvas em fevereiro e recrudescimento delas desde o final de fevereiro até pouco depois da metade de março.

Três pontos se destacam fora das curvas, indicando um comportamento histórico particular: os dos 14/dez., 04/mar. e 13/mar. (indicados por setas).

Os gráficos acima podem ser comparados aos do volume escoado pelo Rio das Velhas de acordo com os registros da Estação Honório Bicalho para demonstrar a similaridade entre o ciclo pluviométrico e o fluviométrico, comportamento esse que é o esperado:



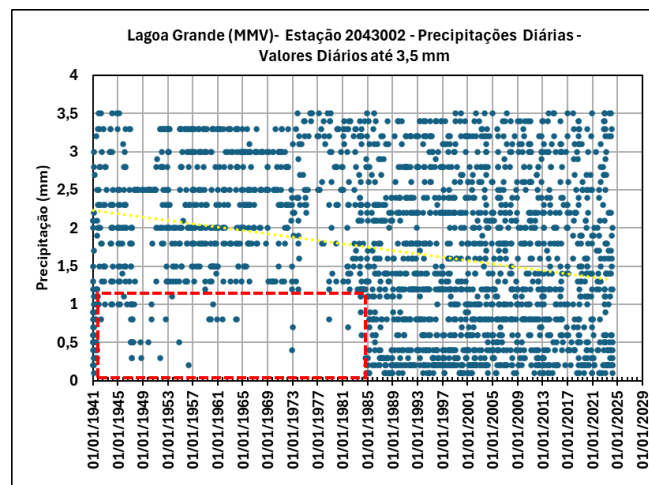


4.9.3 Análise Descritiva e Análise Inferencial (Tendências)

4.9.3.1 Equalização de Dados para Análise – Metodologia

Uma análise preliminar dos dados de precipitação da Lagoa Grande (MMV) mostrou que até o final de 1983 foram registrados poucos valores inferiores a 1,3 mm de chuva diários e a partir do princípio de 1984 iniciaram-se registros detalhados, com valores que variam de 0,1 a 0,1 mm nessa faixa, o que permite supor que o tipo de pluviômetro utilizado até 1983 não permitia leituras de valores pequenos de precipitação ou que tais leituras não eram tomadas devido a questões metodológicas. Essa última hipótese é mais plausível, visto que o ano de 1941, primeiro da série, contém vários registros, de 0,1 em 0,1 mm, na faixa de 0 a 1,3 mm. O gráfico a seguir, referente apenas a valores não superiores a 3,5 mm diários, apresenta a lacuna de dados referida.

Para uniformizar a análise e evitar efeitos que pudessem mascarar tendências, devido à diferença na quantidade de dados referentes à primeira e à segunda metades da série, foram considerados, para todo o período da série, nas análises estatísticas dos valores anuais apresentadas a seguir, apenas os valores de precipitação superiores a 1,2 mm diários. Pode-se considerar que valores diários muito pequenos de precipitação não apresentam influência significativa nem nas vazões dos cursos d'água (resultantes do escoamento superficial das chuvas) nem na recarga das águas subterrâneas e que boa parte desses pequenos volumes de chuva são logo perdidos por evaporação e evapotranspiração.

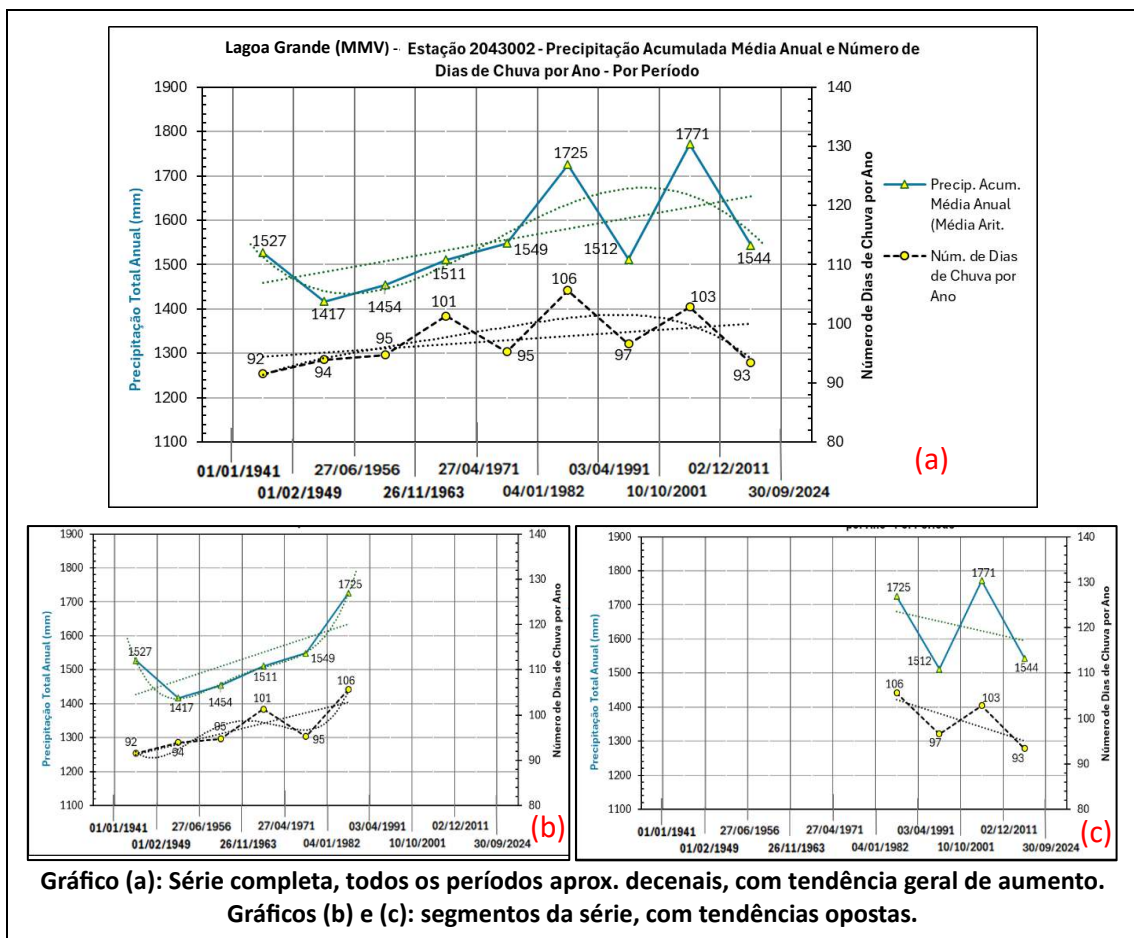


4.9.3.2 Períodos Decenais

A análise da série temporal de valores de precipitação da Estação Lagoa Grande (MMV) permitiu verificar (gráficos a seguir) que tem havido – se a série for analisada como um todo – aumento do volume anual de precipitações a começar da década de 1950, com picos nas décadas de 1980 e 2000, seguidos de redução (oscilações) no volume nas décadas seguintes a essas duas, mas com tendência geral de crescimento. Esse aumento e suas variações são acompanhados pelo aumento e correspondentes variações do número total de dias chuvos por ano, comportamento que também se verifica se esse número é dividido em dois conjuntos: o de dias chuvos no período úmido e de dias chuvos no período seco.

Por outro lado, quando se faz uma subdivisão dos dados em dois segmentos – um até a década de 1980 e outro a partir dessa década – constata-se tendência de aumento no primeiro segmento e de redução no segundo, tanto no que diz respeito ao volume de chuvas quanto ao que se refere ao número de dias de chuva.

Como já observado no item anterior, a série de Honório Bicalho inicia-se em 1971 e pode-se considerar que a sua tendência geral de redução está associada à tendência de redução das precipitações na Lagoa Grande (MMV) verificada na segunda metade do período total dessa série, aspecto mais bem explorado mais à frente, no presente documento.



As tendências acima identificadas são verificadas também, como se verá com mais detalhes à frente, quando se analisa os valores anuais. Para comparação com os gráficos acima, abaixo são apresentados os gráficos dos valores anuais correspondentes:

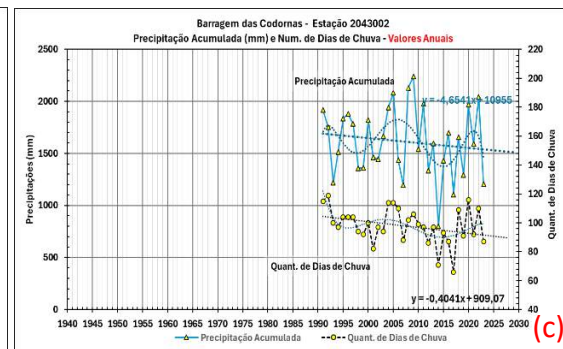
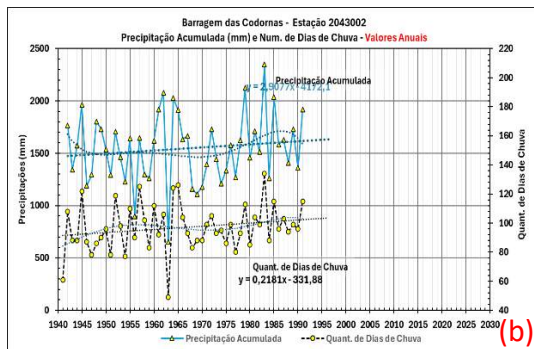
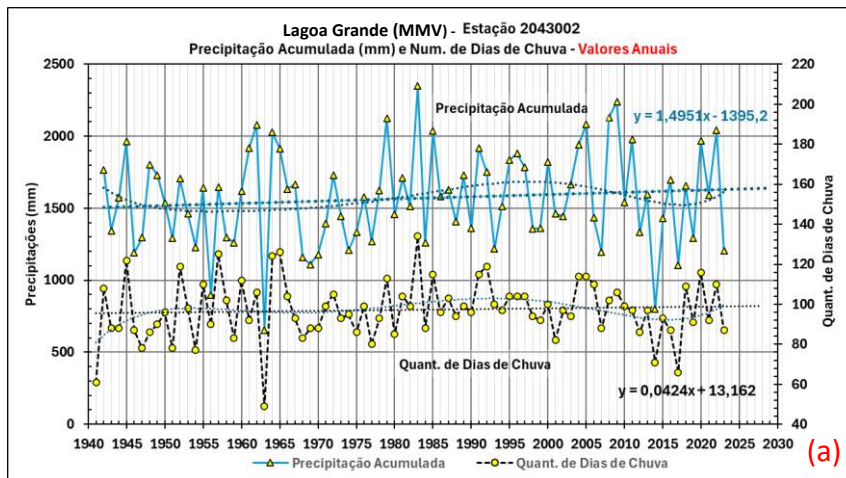
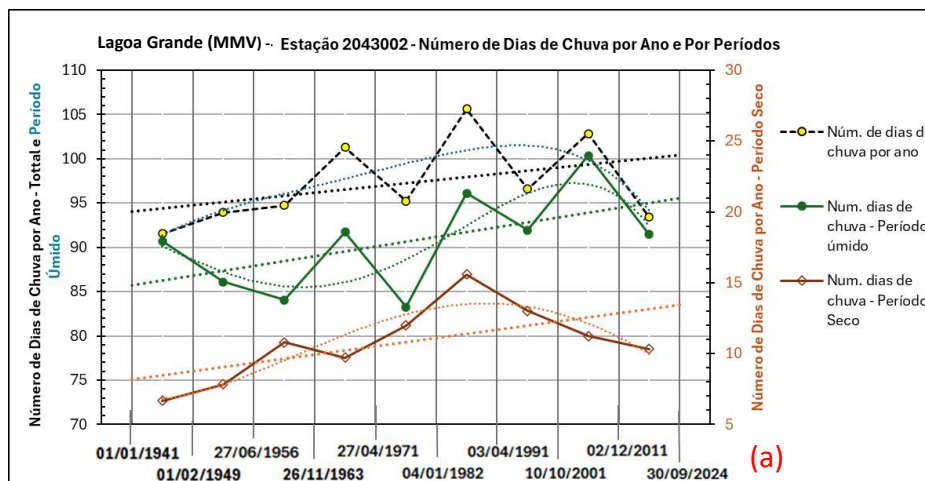


Gráfico (a): Série completa, valores anuais, com tendência geral de aumento. Gráficos (b) e (c): segmentos da série, com tendências opostas.



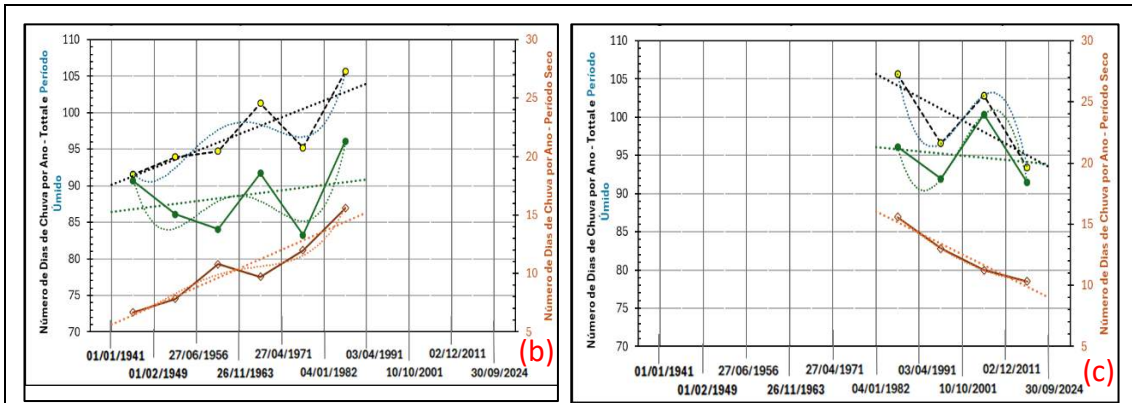


Gráfico (a): Série completa, todos os períodos aprox. decenais, períodos secos e úmidos, com tendência geral de aumento. Gráficos (b) e (c): segmentos da série, com tendências opostas.

As tendências acima apontadas devem ser consideradas no contexto das tendências de outras variáveis. De fato, como se vê no gráfico a seguir, se tomamos a série como um todo, o **valor médio** do volume de precipitação dos dias chuvosos tem crescido (com algumas oscilações e um mínimo na década de 1990) desde a década de 1950. Ou seja, identifica-se, quando se analisa a série completa, uma tendência à ocorrência de valores médios maiores de precipitação acumulada em um dia e de aumento da quantidade desses dias com valores médios maiores de precipitação acumulada, resultado do um aumento do volume total (precipitação acumulada).

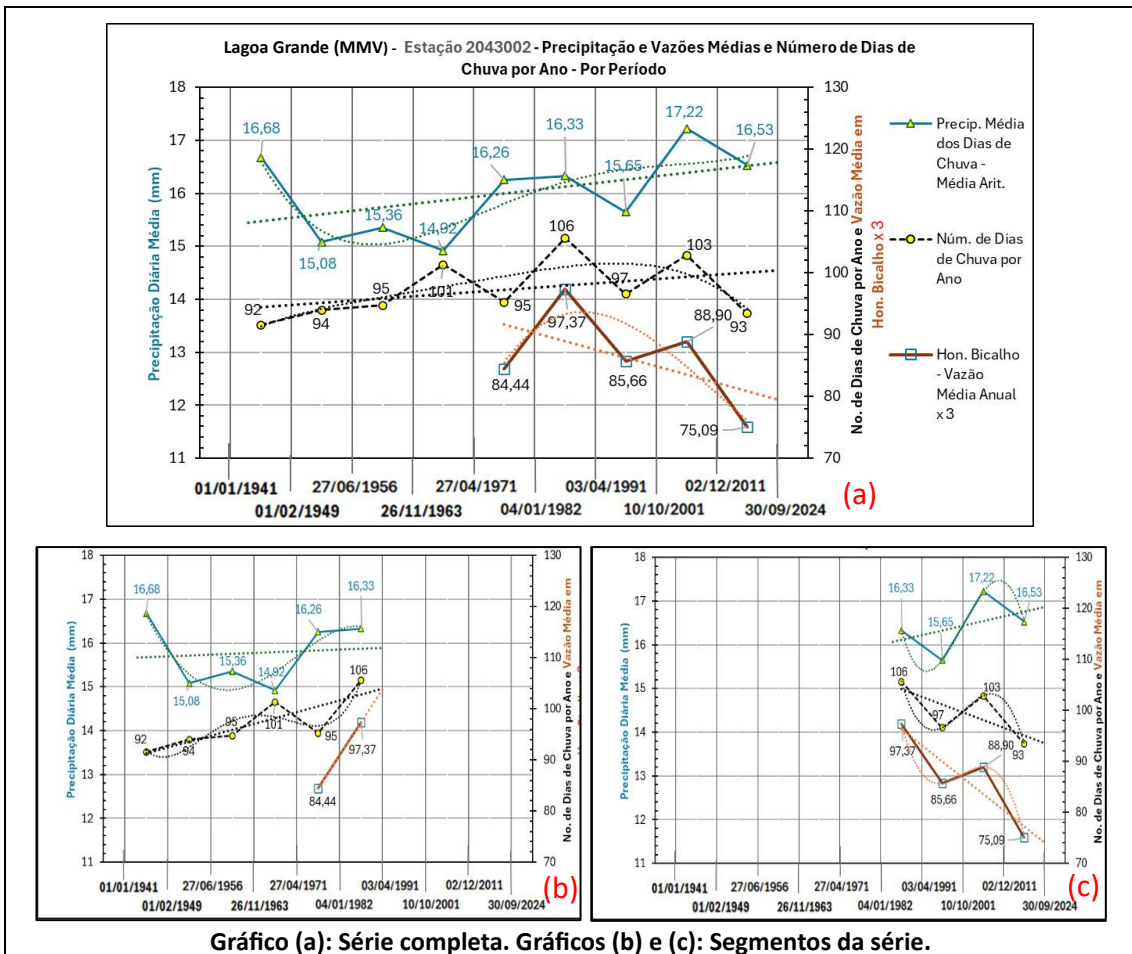


Gráfico (a): Série completa. Gráficos (b) e (c): Segmentos da série.

Como no caso anterior, a segmentação da série em dois períodos revela tendências diferentes, ou seja, no primeiro segmento (até a década de 1980) tendência nítida de aumento dos dias de

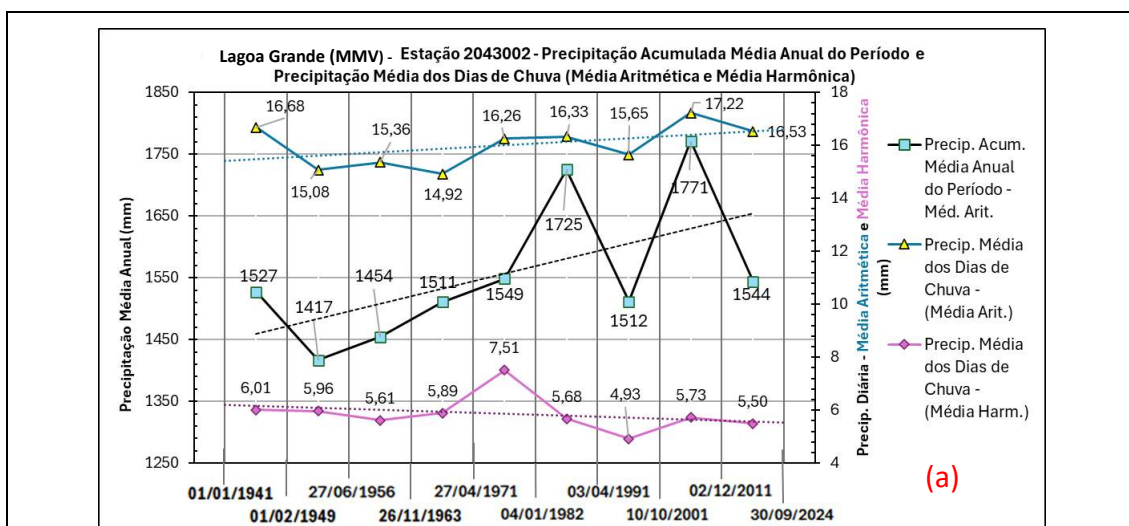
chuva e da média das chuvas desses dias, tendência essa acompanhada pelo aumento das vazões do Rio das Velhas (ver item sobre a Estação Honório Bicalho).

No segundo segmento, porém, a média dos dias de chuva continua aumentando, mas a quantidade de dias de chuva e as vazões do Rio das Velhas apresentam tendência de redução, resultado da redução do volume anual de precipitações.

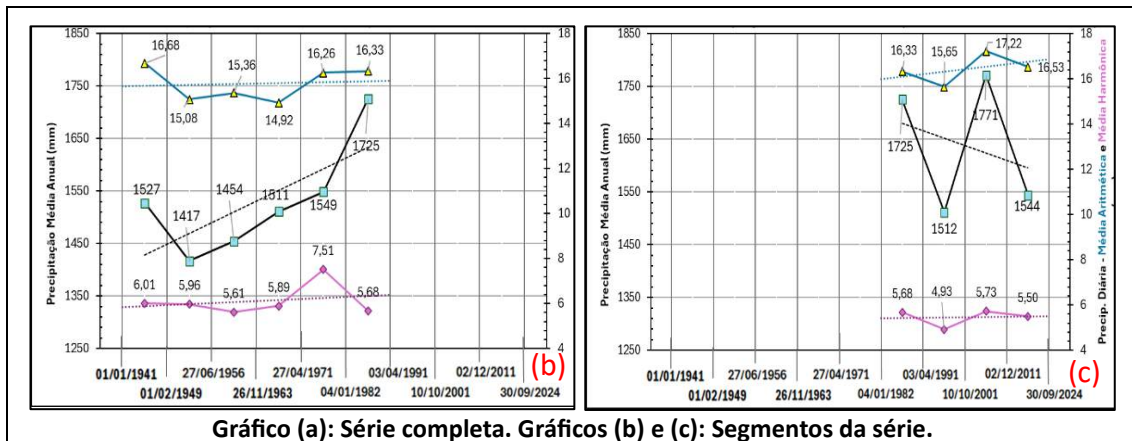
A redução das vazões médias dos períodos aproximadamente decenais em Honório Bicalho, acrescentadas ao gráfico, se mostra coerente com a redução da quantidade de dias de chuva, embora haja, ao mesmo tempo, um aumento discreto da média desses dias. Dessa forma, constata-se um aumento da intensidade das chuvas – agravando o risco de enchentes e desastres – sem que isso se reflita no aumento das vazões, pois o volume anual de chuvas tem decrescido (é importante notar que, para ajustar as escalas em um só gráfico, as vazões médias estão multiplicadas por três e sua leitura se faz no eixo da direita do gráfico).

Como exercício de análise, tomando-se os pontos extremos das curvas do segundo segmento da série, houve uma redução de 12,3% na quantidade de dias de chuva (1-93/106), ao passo que houve uma redução de 22,9% ($1 - (75,09/3)/(97,37/3)$) nas vazões médias anuais do Rio das Velhas do período analisado. Como a redução das vazões, se vista desse prisma, foi quase duas vezes superior à redução dos dias de chuva, pode-se cogitar a existência de fatores extras – que não os dias de chuva – influenciando as vazões ou, ainda, uma forte influência da quantidade dos dias de chuva nas vazões observadas em Honório Bicalho.

Considerando-se (gráfico abaixo) a série da Lagoa Grande (MMV) como um todo, o volume da precipitação acumulada média anual nos períodos aprox. decenais² apresentou tendência geral de aumento, como já visto, e a precipitação média aritmética dos dias de chuva também aumentou. Por outro lado, a média harmônica dos dias de chuva diminuiu, o que indica uma maior quantidade de dias com chuvas fracas. Esse comportamento sugere o agravamento dos extremos, ou seja, tendência a se ter dias com precipitações cada vez mais intensas e dias com precipitações cada vez mais fracas.



² Esse valor é calculado somando-se todos os valores diários de precipitação do período considerado (ex. de 01/01/1941 até 31/01/1949) e dividindo-se a soma pela quantidade de anos (8,08) desse período.

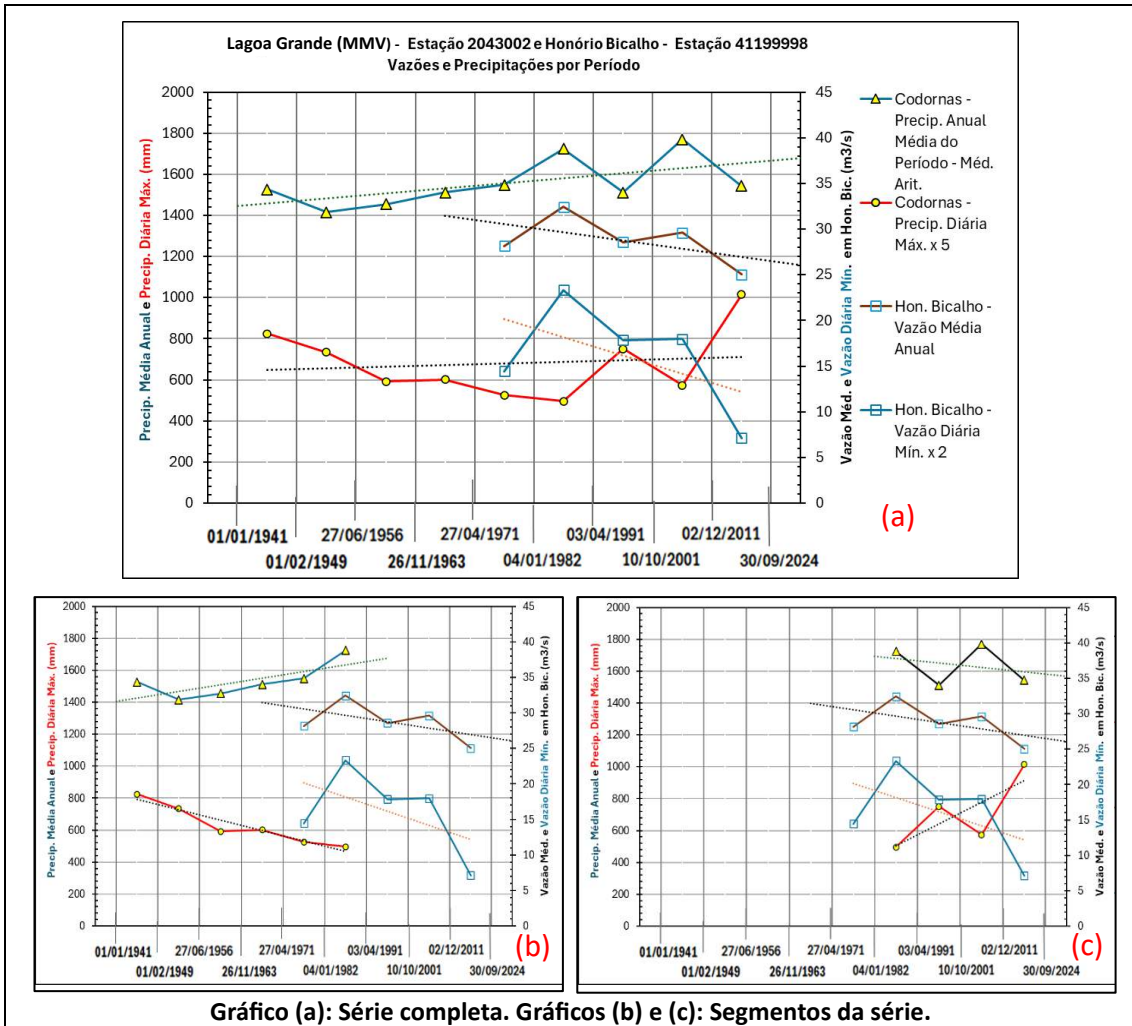


Quando se analisa em separado os dois segmentos da série, observa-se no primeiro deles (até 1991) uma certa estabilidade das médias aritméticas e ligeiro aumento das harmônicas, mas um crescimento acentuado da precipitação acumulada média anual. Isso permite inferir que o aumento precipitação acumulada se deu devido ao aumento da quantidade de dias de chuva, o que foi mostrado nos gráficos anteriores.

No segundo segmento (1991 até o 2023) verifica-se o aumento das médias aritméticas das precipitações dos dias de chuva e redução das harmônicas desses dias, indicando o agravamento dos extremos no período mais recente. A precipitação acumulada média anual apresentou dois valores altos e dois baixos, podendo ser considerada estável ou com tendência de redução, como mostrado pela reta de regressão dos quatro valores, porém essa oscilação forte não permite afirmar, com algum grau de certeza, qual foi a real tendência. Essa variação de valores acompanha a da quantidade de dias de chuva (gráficos anteriores), confirmando a vinculação direta dessas duas variáveis. Como a quantidade de dias de chuva teve tendência nítida de redução no segundo segmento, pode-se estender essa tendência para as precipitações acumuladas, como indica a reta de regressão dos quatro pontos dessa variável.

Assim, o aumento dos valores de precipitação acumulada média anual parece mesmo estar associado mais à quantidade de dias de chuva, como mostrado no primeiro gráfico desse item, e menos aos valores médios de precipitação.

O gráfico maior abaixo, da série completa da Lagoa Grande (MMV), apresenta novamente o volume da precipitação acumulada média anual nos períodos aprox. decenais, com sua tendência geral de aumento, e o compara com os valores – também com tendência geral de aumento – da precipitação diária máxima de cada período aprox. decenal (multiplicada por 5, para ajuste da escala do eixo vertical esquerdo), bem como com a vazão média e a vazão mínima (multiplicada por 2) em Honório Bicalho (eixo vertical da direita), ambas com tendência de redução. Embora com tendências similares, não se pode afirmar que o aumento das precipitações máximas de um dia seja a causa do aumento dos volumes de precipitação, pois os valores máximos são esporádicos e teriam alguma influência sobre os volumes somente se, associados a esses valores máximos, ocorresse um aumento igualmente acentuado de valores a eles inferiores; adicionalmente, o gráfico mostra que onde há um pico na curva dos valores de precipitação acumulada há um vale na dos valores máximos e vice-versa.

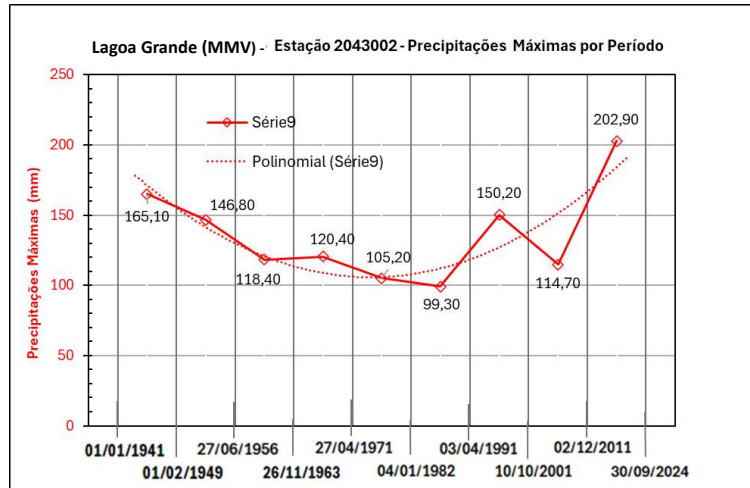


A segmentação da série revela aspectos novos e relações mais prováveis, as quais podem ser melhor investigadas com uso de outros procedimentos. Assim, no gráfico (b) acima vê-se o aumento dos valores de precipitação acumulada média anual e a redução simultânea dos valores máximos diários e, no gráfico (c), o inverso desse comportamento. Assim, parece que quando há aumento dos volumes médios de precipitação anual há redução de eventos de chuva diária de maior intensidade, bem como o contrário, o que poderia significar que períodos com menor volume de chuvas (mais secos) tendem a ter mais eventos extremos de chuva e vice-versa.

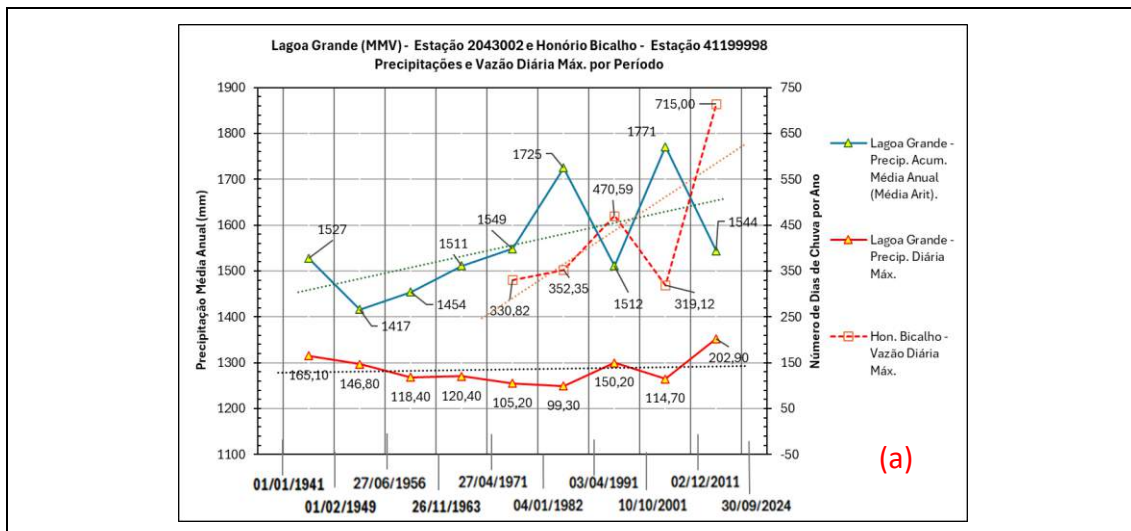
No gráfico (c) pode-se ver que a redução dos valores médios e mínimos de vazões em Honório Bicalho coincide com uma redução dos volumes médios anuais de chuva na região. Tomando-se os valores iniciais e finais de cada curva do gráfico (c), tem-se que, nas últimas quatro décadas houve uma redução de 10,4% do volume médio anual de precipitações, 22,9% das vazões médias anuais em Honório Bicalho e 69,5% das vazões mínimas diárias.

Portanto, embora a série completa da Lagoa Grande (MMV), de 1941 a 2023, mostre uma tendência geral de aumento das precipitações, os últimos 40 anos são marcados por uma tendência de redução, o que pode ser a causa da redução das vazões médias anuais ao longo dessas quatro décadas em Honório Bicalho. Adicionalmente, nas quatro últimas décadas ocorreu uma redução das vazões mínimas (agravamento dos períodos secos) em Honório Bicalho e aumento das precipitações máximas (agravamento das chuvas mais intensas).

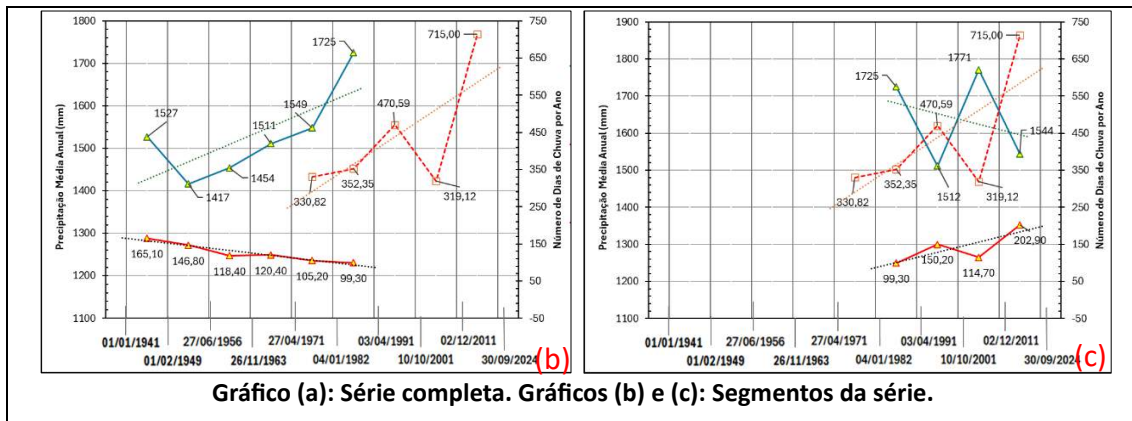
O gráfico a seguir destaca um aspecto importante já apresentado acima em conjunto com outros: os valores das **máximas precipitações de um dia** (precipitações dos dias de chuva de maior intensidade de cada um dos nove períodos em que a série foi subdividida) **reduziram-se progressivamente desde a década de 1940 até a de 1980, mas apresentaram notável aumento na década de 1990 e a partir de 2016**, culminando com o evento extremo de chuva do dia 8 de janeiro de 2022 (leitura realizada na manhã do dia 9/01/2022: 202,9 mm, recorde da série). Naturalmente, esse comportamento das precipitações máximas encontra-se refletido no comportamento das vazões diárias máximas dos períodos registradas em Honório Bicalho.



Esse aumento das precipitações máximas de um dia a começar da década de 1990, que pode estar associado às mudanças climáticas, é plotado a seguir em conjunto com os valores de precipitação média acumulada anual e as vazões máximas diárias dos períodos aprox. decenais. Em que pese as tendências gerais de aumento das três variáveis, se consideradas as séries completas, ao se segmentar a série da Lagoa Grande (MMV), para comparar com a duração menor da série de Honório Bicalho, constata-se, como era de se esperar, uma correspondência direta das vazões máximas diárias em Honório Bicalho com as precipitações máximas na Lagoa Grande (MMV), em um cenário – já apontado – de redução dos volumes médios anuais de precipitação.



(a)



Conclusões da Análise por Períodos Decenais

Tendência de Aumento das Precipitações – Série Completa

- A **análise da série completa** da Estação Lagoa Grande (MMV) indica um aumento no volume anual de precipitações desde a década de 1950, com picos nas décadas de 1980 e 2000, seguido de oscilações.
- O número total de dias chuvosos por ano também aumentou, tanto no período úmido quanto no seco.

Tendências Opostas em Segmentos da Série

- Ao dividir a série em dois segmentos (antes e depois da década de 1980), observa-se aumento das precipitações e do número de dias de chuva no primeiro período, bem como aumento das vazões do Rio das Velhas (Estação Honório Bicalho)
- Após a década de 1980 (segundo segmento) constata-se redução do volume anual de chuvas e do número de dias chuvosos, bem como queda nas vazões médias do Rio das Velhas, apesar do aumento da intensidade média das chuvas (maior risco de enchentes).
- Portanto, a redução de precipitações pode ser a causa ou uma das causas da redução das vazões registradas na Estação Honório Bicalho a partir do início da década de 1980.

Mudança na Intensidade das Chuvas

- O volume médio de precipitação diária em dias chuvosos aumentou ao longo do tempo, sugerindo maior intensidade das chuvas. No segundo segmento da série (a partir do início da década de 1980), apesar da redução da quantidade de dias de chuva, as precipitações nesses dias ficaram mais intensas, aumentando o risco de eventos extremos como enchentes.

Redução das Vazões do Rio das Velhas

- A quantidade de dias chuvosos diminuiu em 12,3%, mas a vazão do Rio das Velhas caiu 22,9%, indicando influência de outros fatores além da precipitação (como uso do solo, rebaixamento dos níveis de água subterrânea ou evaporação).
- Nos últimos 40 anos a precipitação média dos dias de chuva continua aumentando, mas a quantidade de dias de chuva e as vazões do Rio das Velhas apresentam tendência de redução, resultado da redução do volume anual de precipitações (valor acumulado em um ano). Como a redução das vazões, se vista desse prisma, foi quase duas vezes superior à redução dos dias de chuva, pode-se cogitar a existência de fatores extras



influenciando as vazões ou, ainda, uma forte influência da quantidade dos dias de chuva nas vazões observadas em Honório Bicalho.

Agravamento dos Extremos

- A média harmônica das precipitações diminuiu, indicando mais dias com chuvas fracas sugerindo extremização do clima: mais dias com precipitações muito intensas (risco de enchentes) e mais dias com precipitações muito fracas (secas mais frequentes (períodos de chuvas intensas intercalados por períodos mais secos)).
- Aumento das precipitações máximas em um dia desde a década de 1990, com destaque para o recorde de 202,9 mm em janeiro de 2022. Esses eventos extremos podem estar associados a mudanças climáticas e refletem-se em picos de vazão no Rio das Velhas (enchentes graves e desastres).

Correlação entre Volumes Anuais e Chuvas Extremas

- Períodos com maiores volumes anuais médios de precipitação tendem a ter menos os eventos extremos de chuva diária e vice-versa. Esse padrão indica que períodos secos podem estar mais associados a eventos de chuva intensa nas estações chuvosas.

Queda Sustentada das Vazões nas Últimas Décadas

- Nos últimos 40 anos, houve reduções de 10,4% no volume médio anual de precipitação (valor acumulado em um ano), 22,9% nas vazões médias do Rio das Velhas e 69,5% nas vazões mínimas. Esse declínio reforça a ideia de que a redução das precipitações afeta significativamente a disponibilidade hídrica.

Resumo Final:

- Longo prazo (1941–2023): Aumento geral das chuvas, mas com mudanças significativas após os anos 1980.
- Tendência recente (últimas 4 décadas):
 - Redução do volume anual de chuvas e dos dias chuvosos.
 - Aumento da intensidade das chuvas (mais extremos: secas e enchentes).
 - Queda acentuada das vazões do Rio das Velhas, especialmente nas mínimas.
- Risco climático: Maior frequência de eventos extremos (seca e chuvas intensas), com impactos diretos nos recursos hídricos.

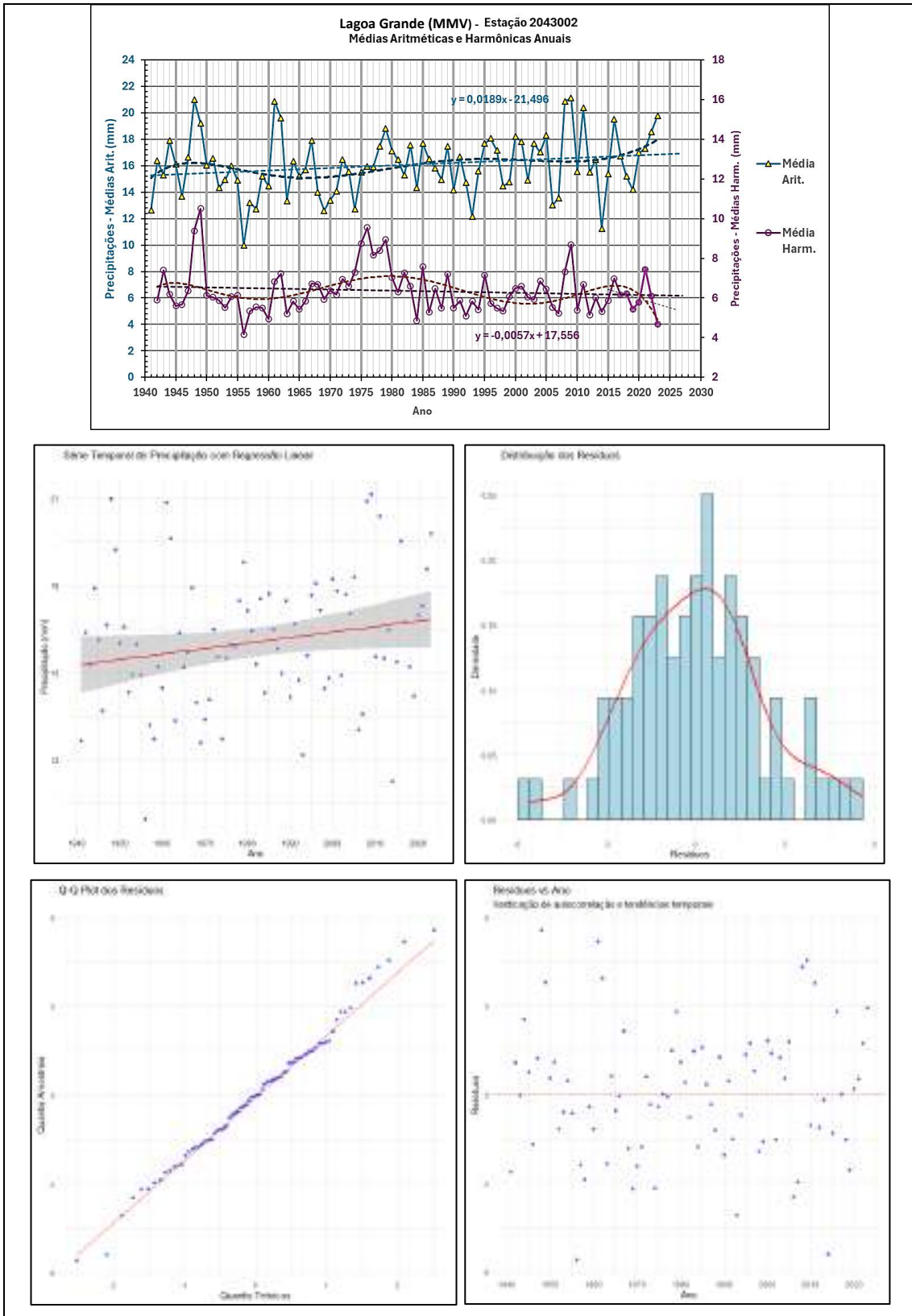
Essas conclusões sugerem a necessidade de gestão adaptativa para lidar com a maior variabilidade climática e seus efeitos sobre a disponibilidade de água e o risco de desastres.

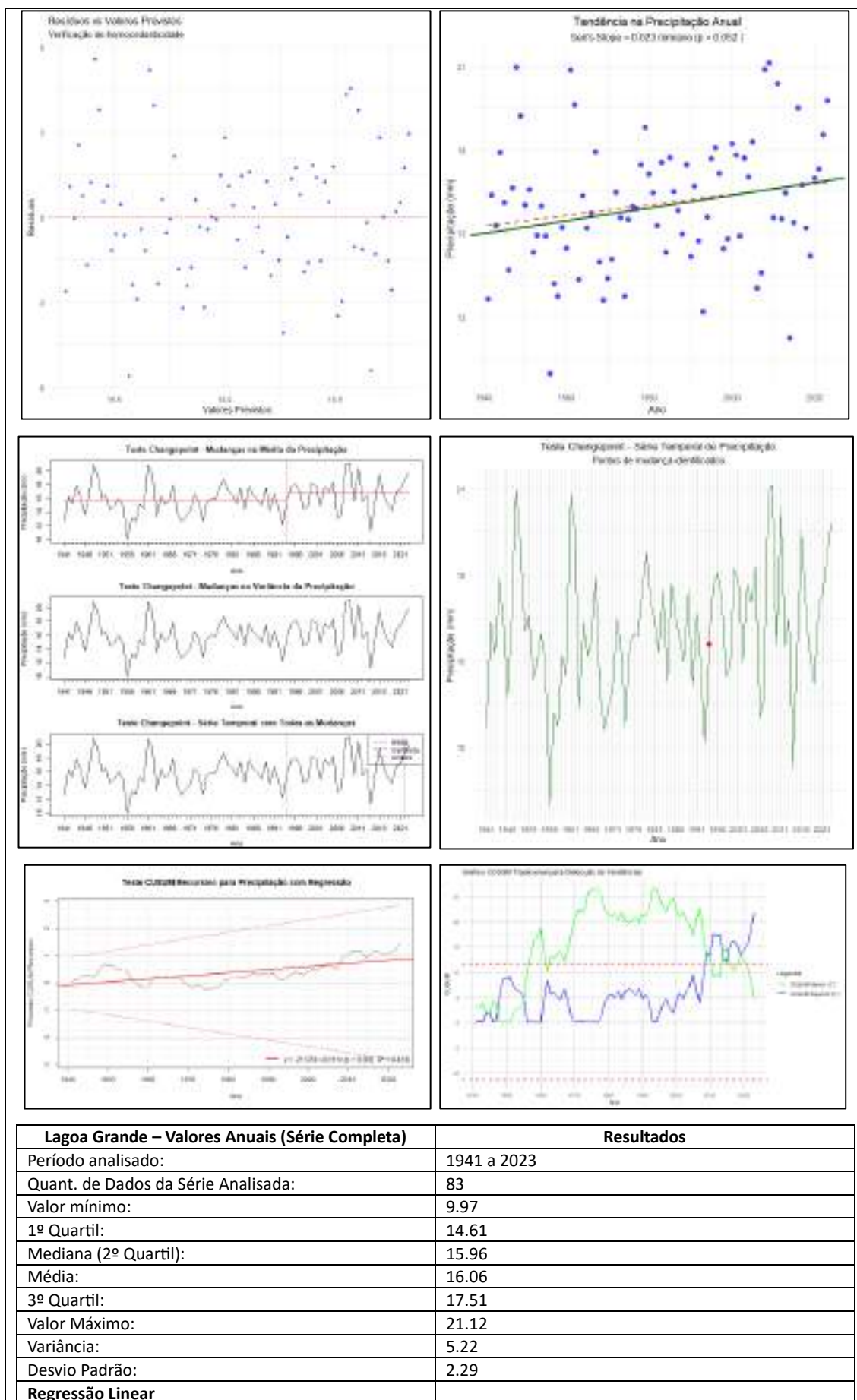
4.9.3.3 Períodos Anuais – Médias

4.9.3.4 Médias Anuais – Precipitações Acumuladas Médias

4.9.3.4.1 Valores Anuais (Anos Civos) – Série Completa

No item anterior foi feito um estudo preliminar de tendências dos períodos aprox. decenais, ou seja, sob uma visão mais ampla. A seguir adota-se como que uma lupa para examinar o comportamento das precipitações não apenas durante um ano completo, mas também durante os períodos seco e úmido de cada ano. Nessa análise são consideradas, para cada ano, a média das precipitações dos dias de chuva em mm/dia.





<p>Equação da reta: Coeficiente angular (variação por ano): p-valor do coeficiente angular: Intervalo de Confiança: IC95% para a inclinação: R² do modelo: Interpretação:</p>	<p>Precipitação = 1.89e-02 * tempo - 21.5 0.0189 7.01e-02 (-0.001589, 0.03948) 0.03994 Há evidências de aumento na precipitação ao longo do tempo, com 0.011 mm a mais na precipitação média dos dias de chuva por ano da série (0,913 mm em 83 anos, 5,7% da média total da série (16,06 mm/dia de chuva).</p>
Testes de Pressupostos da Regressão:	
<p>Teste Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos Interpretação:</p>	<p>W = 0.9905 p-valor = 8.06e-01 Resíduos seguem distribuição normal</p>
<p>Teste Anderson-Darling para normalidade dos resíduos Interpretação:</p>	<p>A = 0.2414 p-valor = 7.65e-01 Resíduos seguem distribuição normal</p>
<p>Kolmogorov-Smirnov para normalidade dos resíduos: Interpretação:</p>	<p>D = 0.06232 p-valor = 0.8837 (p > 0,05) Não há evidências para rejeitar a normalidade dos resíduos</p>
<p>Teste de Breusch-Pagan para heterocedasticidade: Interpretação:</p>	<p>LM = 0.0199 p-valor = 8.88e-01 Variância constante (homocedasticidade)</p>
<p>Teste de White para heterocedasticidade: Interpretação:</p>	<p>Chisq = 0.0212 p-valor = 8.84e-01 Variância constante (homocedasticidade)</p>
<p>Teste de Durbin-Watson para autocorrelação: Interpretação:</p>	<p>DW = 1.5342 p-valor = 1.15e-02 Resíduos autocorrelacionados</p>
Testes de tendências e mudanças	
<p>Mann-Kendall: Interpretação:</p>	<p>tau = 0.1455 p-valor = 0.05205 (p > 0.05) Não há evidência de tendência significativa</p>
<p>Sen's Slope: Coeficiente angular (Sen's Slope): Intervalo de Confiança 95%: Valor-p: Interpretação:</p>	<p>0.02291 IC95% = (-0.0002984 , 0.04181) Não há evidências de tendência estatisticamente significativa (p ≥ 0.05, IC95% inclui zero) Há evidências de aumento na precipitação ao longo do tempo, com 0.02291 mm a mais na precipitação média dos dias de chuva por ano da série (1,902 mm em 83 anos, 11,84% da média total da série (16,06 mm/dia de chuva).</p>
<p>Teste de Pettitt para mudança de ponto: Interpretação:</p>	<p>U = 512 p-valor = 0.132 Nenhum ponto de mudança significativo detectado</p>
<p>Teste de Spearman: Interpretação:</p>	<p>rho = 0.2087 p-valor = 0.05835 (p > 0.05) Não há correlação significativa com o tempo</p>
<p>BFAST:</p>	<p>Nenhuma mudança estrutural detectada</p>
<p>CUSUM Recursivo: Equação da reta: Coeficiente angular: R² da regressão: Limiar de Decisão (H): Tendência de AUMENTO Tendência de DIMINUIÇÃO Interpretação:</p>	<p>– $y = -21.979 + 0.011x$ (p = 0.000, R² = 0.433) (ver reta vermelha no gráfico) – +0.011 (positivo: Indica um aumento sistemático nos valores de precipitação ao longo do tempo). – 0.433 (valor de R2 baixo, ajuste pequeno, embora se verifique tendência de aumento ao longo de toda a série) – 11.43 – detectada (C⁺ > H) – detectada (C⁻ > H)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Curva predominantemente acima de zero a partir de 1980: • Flutuações não ultrapassam as bandas de confiança: são estatisticamente insignificantes. • Período inicial (40 anos) valores oscilam próximos ao de referência (linha zero). A transição para

CUSUM Tradicional	valores negativos marca o início da mudança estrutural (1980 aprox.) As curvas C- e C+ (verde e azul) marcam a transição a partir de 1980: C- sobe e C+ desce e cruzam o limiar de decisão.
Changepoint: Análise de Mudança na Média:	– Mudanças detectadas nos anos: 1994 – Período 1941-1994: Média = 15.652 mm – Período 1994-2023: Média = 16.771 mm
Análise de Mudança na Variância:	Uma mudança significativa na variância detectada.
Análise de Mudança na Média e na Variância:	– Mudança mais significativa detectada em: 2022 – Nova média: 19.779 mm – Nova variância: NA mm

Considerando-se o período completo da série, o gráfico acima, com os valores das médias de cada ano, mostra aumento dos valores das médias aritméticas e redução das médias harmônicas das precipitações (coeficiente positivo e coeficiente negativo, respectivamente, das variáveis das retas de regressão). O fato de haver redução das médias harmônicas ao longo do período completo da série (o que indica a representatividade crescente dos valores mínimos de precipitações) ao passo em que há crescimento das médias aritméticas se deve à acentuação de comportamentos extremos, com aumento dos valores máximos e redução dos mínimos, indicando maior variação da pluviosidade ao longo do tempo.

As curvas de regressão polinomial mostram os principais ciclos de aumento e redução de ambas as médias, podendo-se ver que os valores das médias harmônicas apresentaram maiores oscilações que os das aritméticas. Destaca-se o comportamento oposto das médias a partir da década de 1980, indicado oscilações em sentidos opostos das curvas polinomiais, ou seja, a tendência citada de aumento simultâneo de valores máximos e de valores mínimos de precipitação, em cada ano, resultado de um cenário de menor pluviosidade pontuado com alguns eventos de chuvas cada vez intensas.

Características Gerais da Série

A série de precipitações **médias anuais** da Lagoa Grande (1941–2023), com 83 anos de dados, apresenta valores entre 9,97 mm e 21,12 mm, com média de 16,06 mm, muito próxima da mediana (15,96 mm), sugerindo distribuição aproximadamente simétrica.

A dispersão é moderada, evidenciada pelo desvio padrão de 2,29 mm e variância de 5,22 mm², o que indica variabilidade relevante, mas dentro de limites estáveis para séries pluviométricas longas.

A análise de quartis (Q1 = 14,61 mm; Q3 = 17,51 mm) mostra que a maior parte dos valores se concentra em torno da média, embora extremos pluviométricos estejam presentes.

Regressão Linear:

O modelo de regressão linear aponta um coeficiente angular positivo (0,0189 mm/ano), indicando leve tendência de aumento da precipitação média anual ao longo da série, equivalente a 0,011 mm/ano, ou cerca de 0,9 mm em 40 anos (5,7% da média da série).

Embora o p-valor (0,0701) não seja estatisticamente significativo ao nível de 5%, encontra-se próximo do limiar, sugerindo indícios de tendência ascendente.

O intervalo de confiança da inclinação (–0,001589 a 0,03948) inclui zero, reforçando a ausência de robustez estatística.

O R^2 baixo (0,0399) mostra que o tempo explica pouca variação nos dados.

Testes de Pressupostos da Regressão:

- Distribuição normal (Shapiro-Wilk, Anderson-Darling e KS não rejeitam normalidade);
- A série é homocedástica (Breusch-Pagan e White não rejeitam variância constante);
- Há autocorrelação significativa dos resíduos (DW = 1,53; $p = 0,0115$), violando um pressuposto essencial e reduzindo a confiabilidade do modelo linear.

Testes Não-Paramétricos:

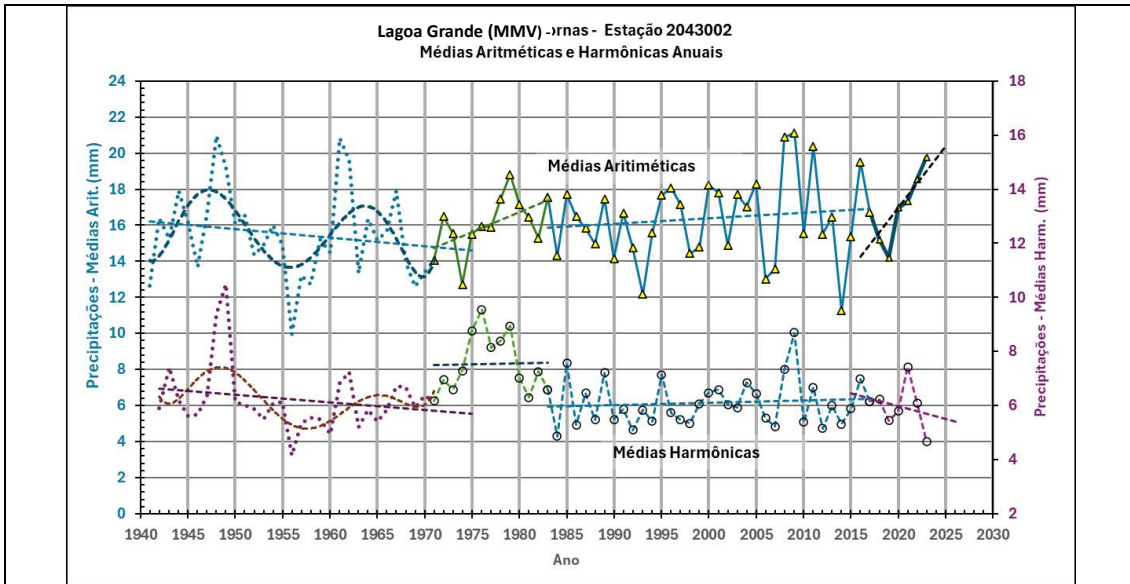
- Os testes não paramétricos (Mann-Kendall, Spearman e Sen's Slope) não identificaram tendência estatisticamente significativa, embora os sinais de inclinação positiva coincidam com o resultado da regressão linear.
- Sen's Slope: Inclinação de -0.02291 mm/ano não significativa (IC95% inclui zero)
- O teste de Pettitt não encontrou ponto de mudança significativo;
- O BFAST também não indicou rupturas estruturais, sugerindo continuidade no regime geral da série.
- O CUSUM mostrou tendência sistemática de aumento a partir de 1980, com coeficiente de inclinação positivo (+0,011) e $R^2 = 0,433$, indicando um ajuste melhor que o da regressão linear, ainda que moderado. Esse resultado sugere uma mudança estrutural em torno da década de 1980, possivelmente associada a alterações climáticas regionais ou fatores antrópicos.
- A análise de Changepoint confirmou mudanças estatisticamente significativas na média em 1994 (aumento de 15,65 mm para 16,77 mm) e em 2022 (nova média de 19,77 mm), além de alteração significativa na variância, sugerindo que os últimos anos marcaram um período mais úmido e instável.

Conclusões Principais

A análise da série de precipitações **médias anuais** da Lagoa Grande (1941–2023) mostrou que há discrepância entre métodos de avaliação de tendências: CUSUM mostra tendência de aumento da pluviosidade e demais testes (Mann-Kendall, Spearman, Sen) não detectam tendência significativa. Possível explicação: CUSUM é mais sensível a mudanças graduais persistentes.

A autocorrelação positiva detectada pode inflacionar falsamente a significância em alguns testes.

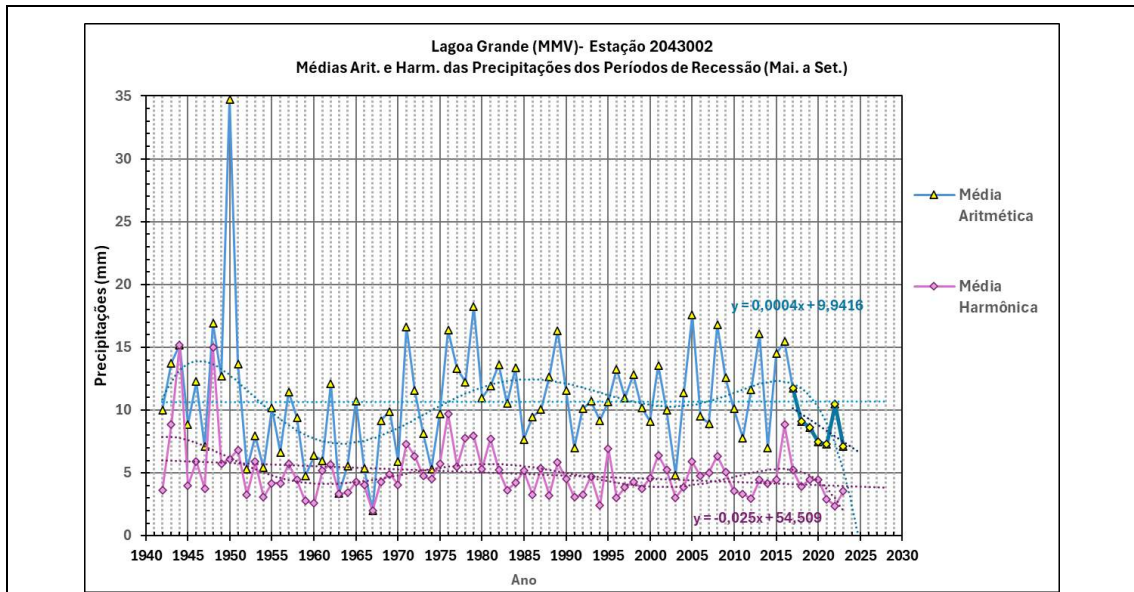
Pettitt e BFAST não identificaram nenhuma mudança e Changepoint identificou mudanças em 1994. Possível explicação: Changepoint é mais sensível a mudanças temporárias. O ano de 2022 foi atípico: aumento acentuado na média, que foi de 19,78 mm, possivelmente associado ao evento extremo de 08/01/2022.



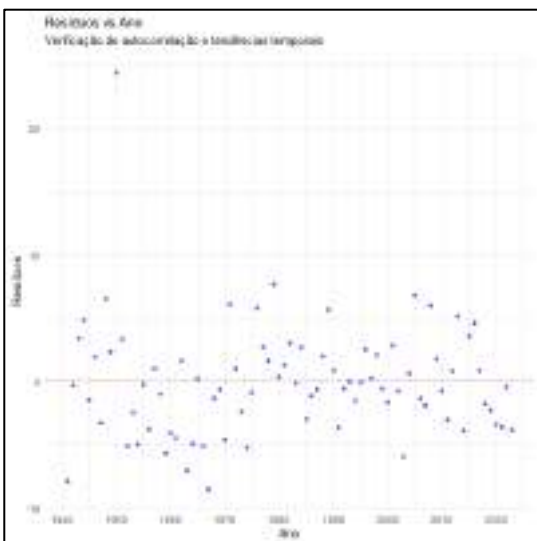
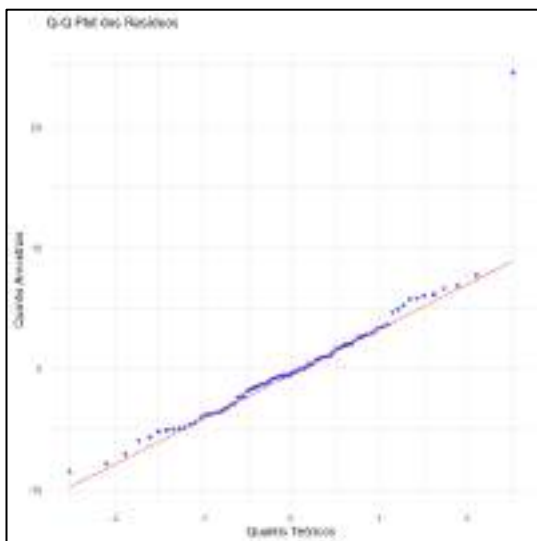
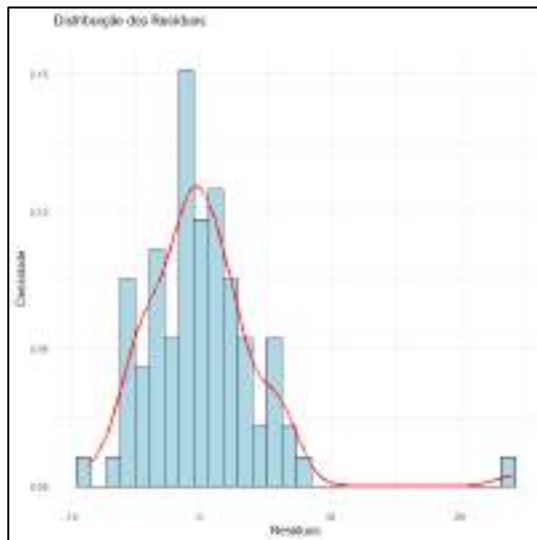
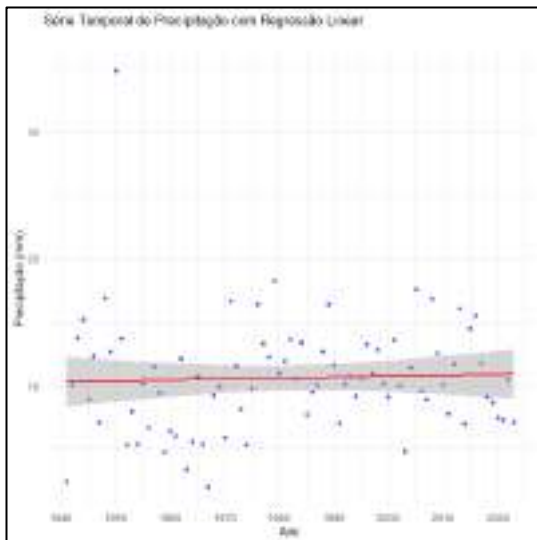
Para permitir uma análise mais detalhada, as tendências de alguns segmentos da série completa são mostrados nesse gráfico. Foram selecionados, visualmente, quadro segmentos:

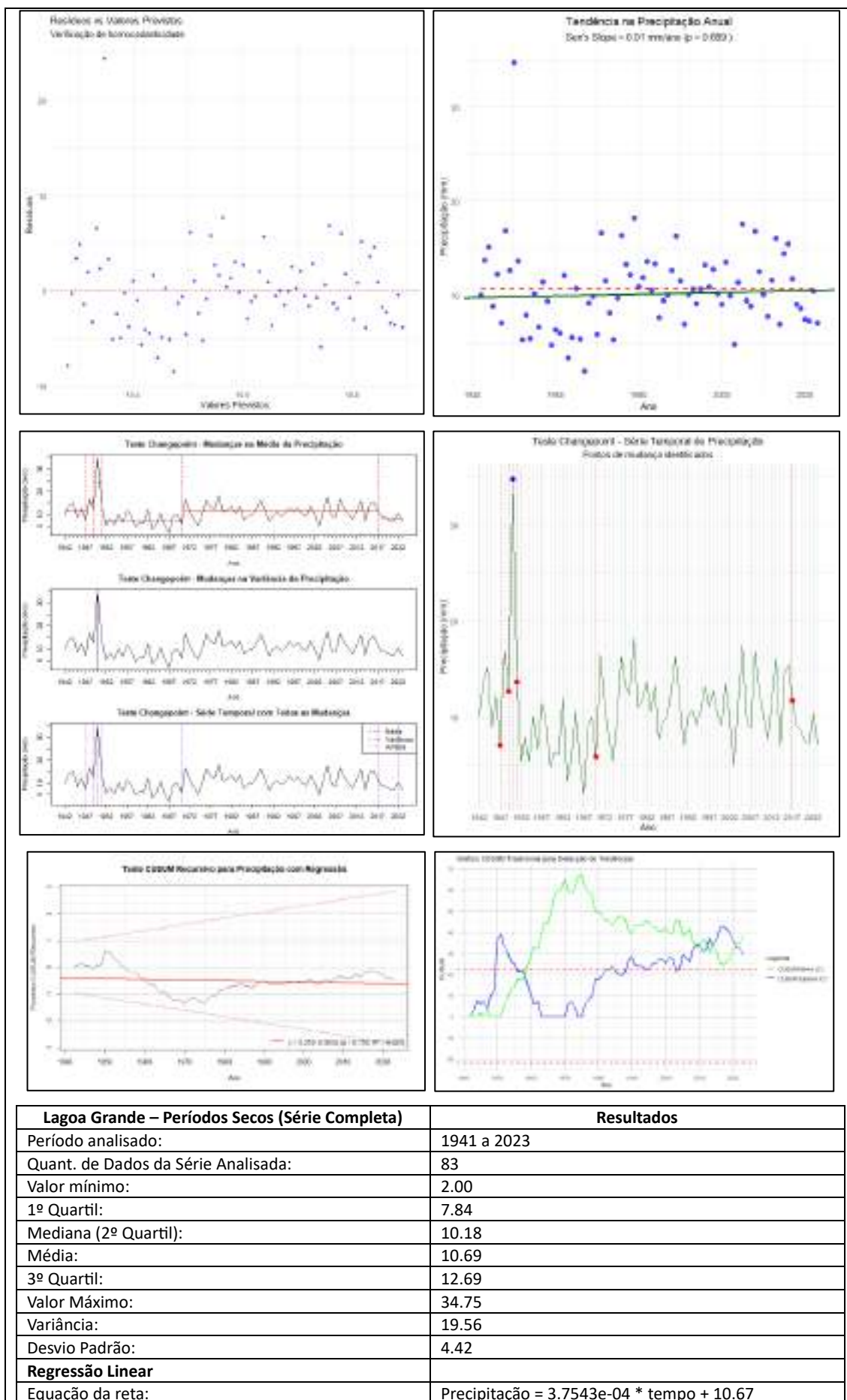
- 1941 a 1970: comportamento similar das médias aritmética e harmônica, com redução de ambas as médias e oscilações similares, indicando uma uniformidade de distribuição da pluviosidade.
- 1971 a 1982: aumento mais acentuado da média aritmética e estabilidade da harmônica, porém em um cenário com valores mais altos de média harmônica de 1974 a 1980, o que indica ser esse um período com menor quantidade de valores mínimos de pluviosidade.
- 1983 a 2016: comportamento similar ao do período anterior, mas sem variações acentuadas nas médias, exceto no período de 2008 a 2012.
- 2017 a 2023: aumento bastante acentuado das médias aritméticas e redução das harmônicas, indicando um cenário com aumento tanto de eventos de chuvas mais intensas quanto de eventos de chuvas mais fracas, ou seja, de grande variação da pluviosidade durante o ano.

4.9.3.4.2 Períodos Secos e Úmidos – Série Completa



Períodos Secos





Lagoa Grande – Períodos Secos (Série Completa)	Resultados
Período analisado:	1941 a 2023
Quant. de Dados da Série Analisada:	83
Valor mínimo:	2.00
1º Quartil:	7.84
Mediana (2º Quartil):	10.18
Média:	10.69
3º Quartil:	12.69
Valor Máximo:	34.75
Variância:	19.56
Desvio Padrão:	4.42
Regressão Linear	
Equação da reta:	Precipitação = 3.7543e-04 * tempo + 10.67

<p>Coeficiente angular (variação por ano): p-valor do coeficiente angular: Intervalo de Confiança: IC95% para a inclinação: R² do modelo: Interpretação:</p>	<p>3.75e-04 9.856e-01 (-0.04094, 0.04169) 4.087e-06 Há evidências de aumento na precipitação ao longo do tempo, com 0.000375 mm a mais na precipitação média dos dias de chuva por ano da série (0,031 mm em 83 anos, 0,29% da média total da série (10,69 mm/dia de chuva).</p>
Testes de Pressupostos da Regressão:	
<p>Teste Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos Interpretação:</p>	<p>W = 0.8718 p-valor = 7.33e-07 Resíduos não seguem distribuição normal</p>
<p>Teste Anderson-Darling para normalidade dos resíduos Interpretação:</p>	<p>A = 0.2414 p-valor = 7.65e-01 Resíduos não seguem distribuição normal</p>
<p>Kolmogorov-Smirnov para normalidade dos resíduos: Interpretação:</p>	<p>D = 1.1329 p-valor = 5.46e-03 (p < 0,05) Há evidências para rejeitar a normalidade dos resíduos</p>
<p>Teste de Breusch-Pagan para heterocedasticidade: Interpretação:</p>	<p>LM = 2.8101 p-valor = 9.37e-02 Variância constante (homocedasticidade)</p>
<p>Teste de White para heterocedasticidade: Interpretação:</p>	<p>Chisq = 15.4849 p-valor = 8.32e-05 Variância não constante (heterocedasticidade)</p>
<p>Teste de Durbin-Watson para autocorrelação: Interpretação:</p>	<p>DW = 1.6169 p-valor = 3.06e-02 Resíduos autocorrelacionados</p>
Testes de tendências e mudanças	
<p>Mann-Kendall: Interpretação:</p>	<p>tau = 0.03041 p-valor = 0.6888 (p > 0.05) Não há evidência de tendência significativa</p>
<p>Sen's Slope: Coeficiente angular (Sen's Slope): Intervalo de Confiança 95%: Valor-p: Interpretação:</p>	<p>0.010 IC95% = (-0.02807 , 0.04424) 0.6888284 Não há evidências de tendência estatisticamente significativa (p ≥ 0.05)</p>
<p>Teste de Pettitt para mudança de ponto: Interpretação:</p>	<p>U = 506 p-valor = 0.1275 Nenhum ponto de mudança significativo detectado</p>
<p>Teste de Spearman: Interpretação:</p>	<p>rho = 0.06573 p-valor = 0.5574 (p > 0.05) Não há correlação significativa com o tempo</p>
<p>BFAST:</p>	<p>Nenhuma mudança estrutural detectada</p>
<p>CUSUM Recursivo: Equação da reta: Coeficiente angular: R² da regressão: Limiar de Decisão (H): Tendência de AUMENTO Tendência de DIMINUIÇÃO Interpretação:</p>	<p>– $y = 5.250 - 0.003x$ (p = 0.156, R² = 0.025) (ver reta vermelha no gráfico) – -0,003 (negativo: Indica uma pequena redução sistemática nos valores de precipitação ao longo do tempo). – 0.025 (valor de R2 baixo, ajuste muito pequeno) – 22.11 – detectada (C⁺ > H) – detectada (C⁻ > H)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Curva predominantemente abaixo de zero a partir de 1955: • Valor atípico, muito alto, em 1950; possível outlier? • Flutuações não ultrapassam as bandas de confiança: são estatisticamente insignificantes. • Valores mínimos entre 1965 e 1975 e alguma tendência de aumento a partir de 1975 até o final da série.
<p>CUSUM Tradicional</p>	<p>As curvas C- e C+ (verde e azul) atingem os limites máx. e mín. entre 1965 e 1975 e a partir daí invertem</p>

	as tendências cruzando-se em 2010 acima da banda superior
Changepoint: Análise de Mudança na Média:	<ul style="list-style-type: none"> – Mudanças detectadas nos anos: 1947, 1949, 1951, 1970, 2017 – Período 1942-1947: Média = 11.202 mm – Período 1947-1949: Média = 12.229 mm – Período 1949-1951: Média = 20.383 mm – Período 1951-1970: Média = 7.572 mm – Período 1970-2017: Média = 11.439 mm – Período 2017-2023: Média = 8.832 mm
Análise de Mudança na Variância:	Mudanças na variância detectadas nos anos: 1950 Período 1942-1950: Variância = 66.441 mm Período 1950-2023: Variância = 20.426 mm
Análise de Mudança na Média e na Variância:	<ul style="list-style-type: none"> – Mudança mais significativa detectada em: 2022 – Nova média: 7.102 mm – Nova variância: NA mm

Considerando-se o período completo da série, o gráfico acima mostra estabilidade dos valores das médias aritméticas e redução pequena das médias harmônicas das precipitações dos períodos secos de cada ano. Pode-se destacar a maior redução das médias aritméticas de 2019 a 2023 e o comportamento inverso com relação à média harmônica nesses anos, o que indica períodos secos cada vez mais secos.

As curvas de regressão polinomial mostram os principais ciclos de aumento e redução de ambas as médias, podendo-se ver que, de 1975 a 2015, os valores das médias harmônicas mantiveram-se em um patamar (curva praticamente sem oscilações).

Características Gerais da Série

A série histórica dos **médias anuais de precipitação dos períodos secos da Lagoa Grande (1942–2023)**, com 82 anos de dados, apresenta grande amplitude, com valores entre 2,00 mm e 34,75 mm, refletindo a ocorrência de anos excepcionalmente secos e outros com acumulados bem acima do padrão.

A média (10,69 mm) e a mediana (10,18 mm) são próximas, indicando uma distribuição quase simétrica, embora marcada por possível outlier (34,75 mm em 1950).

A variabilidade é relativamente alta, evidenciada pelo desvio padrão de 4,42 mm e variância de 19,56 mm², o que sugere oscilações significativas ao longo da série.

A análise de quartis (Q1 = 7,84 mm; Q3 = 12,69 mm) mostra que 50% dos valores estão em um intervalo relativamente concentrado, ainda que os extremos demonstrem forte irregularidade nos períodos secos.

Regressão Linear:

A regressão linear ajustada apresentou coeficiente angular muito baixo (0,000375 mm/ano), equivalente a um aumento irrelevante de apenas 0,031 mm em 82 anos (0,28% da média da série).

O p-valor (0,986) e o IC95% da inclinação (–0,0409 a 0,0417), que inclui zero, confirmam a ausência de significância estatística.

O modelo explica virtualmente nada da variação ($R^2 = 0,000004$).

Testes de Pressupostos da Regressão:

- Além disso, os pressupostos da regressão linear não foram plenamente atendidos:
- Os resíduos não seguem distribuição normal (Shapiro-Wilk, Anderson-Darling e KS rejeitam normalidade);
- A série apresenta heterocedasticidade segundo o teste de White ($p < 0,001$);
- Há autocorrelação significativa nos resíduos (DW = 1,62; $p = 0,0306$).

Esses resultados comprometem seriamente a confiabilidade da regressão linear, tornando inadequada a interpretação de tendência com base nesse modelo.

Testes Não-Paramétricos:

Os testes não paramétricos confirmam a ausência de tendências robustas.

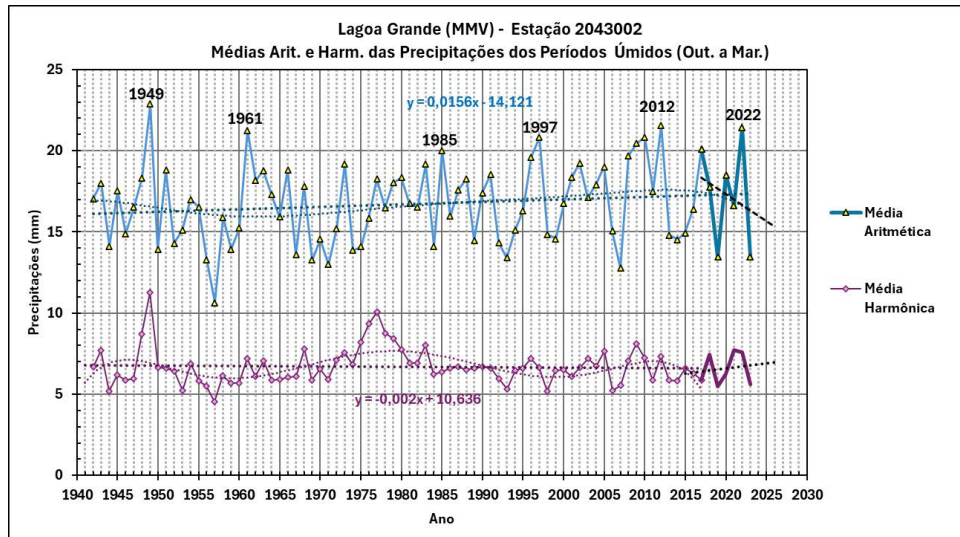
- O Mann-Kendall ($p = 0,689$) e o Spearman ($p = 0,557$) rejeitam a hipótese de tendência significativa.
- O Sen's Slope estima uma inclinação de 0,0096 mm/ano, mas com intervalo de confiança que inclui zero ($-0,028$ a $0,044$) e $p \geq 0,05$, reforçando que não há evidência estatística de aumento ou redução consistente ao longo do tempo.
- O Pettitt não identificou pontos de ruptura significativos ($p = 0,128$).
- O BFAST não apontou mudanças estruturais.
- O CUSUM sugere uma leve tendência negativa ($-0,003$ mm/ano, $p = 0,156$, $R^2 = 0,025$), com maior instabilidade entre 1965–1975 e alguma recuperação posterior, mas sem robustez estatística.
- A análise de Changepoint revelou múltiplas mudanças na média: destaque para o período extremamente úmido entre 1949–1951 (média = 20,38 mm), seguido por um longo intervalo mais seco entre 1951–1970 (média = 7,57 mm). Em tempos mais recentes, nota-se média de 11,44 mm (1970–2017) e redução para 8,83 mm (2017–2023), com nova queda significativa em 2022 (média = 7,10 mm). Também foi detectada mudança na variância após 1950, indicando uma diminuição da instabilidade inicial da série.

Conclusões Principais

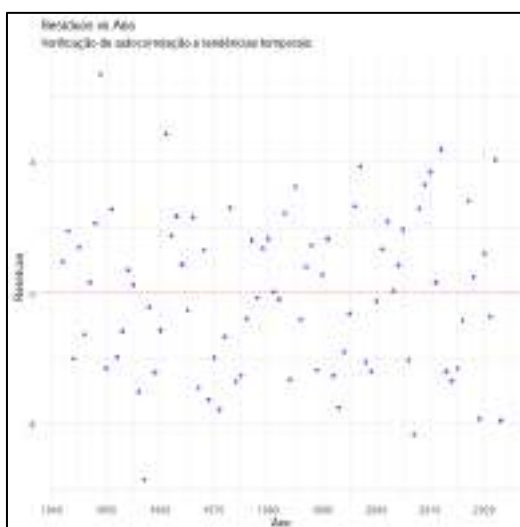
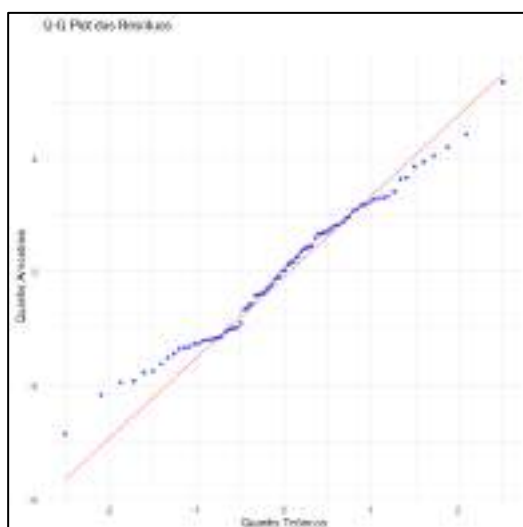
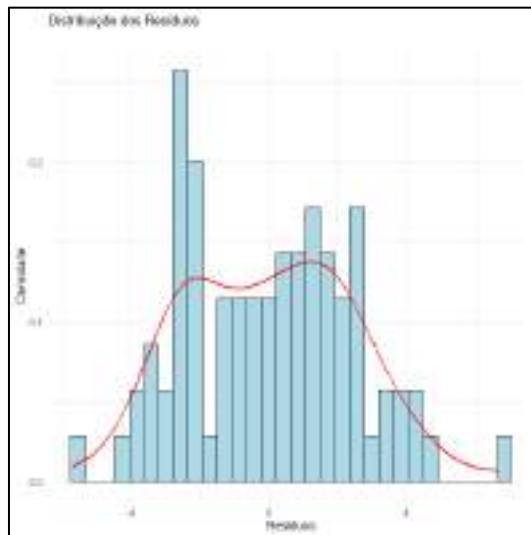
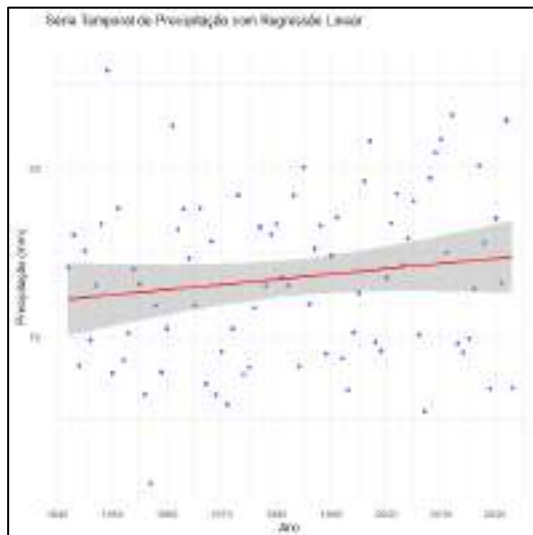
A série de **médias anuais** de precipitação dos **períodos secos** da Lagoa Grande (1942–2023) é marcada por alta variabilidade interanual e por episódios extremos, como o valor atípico de 1950

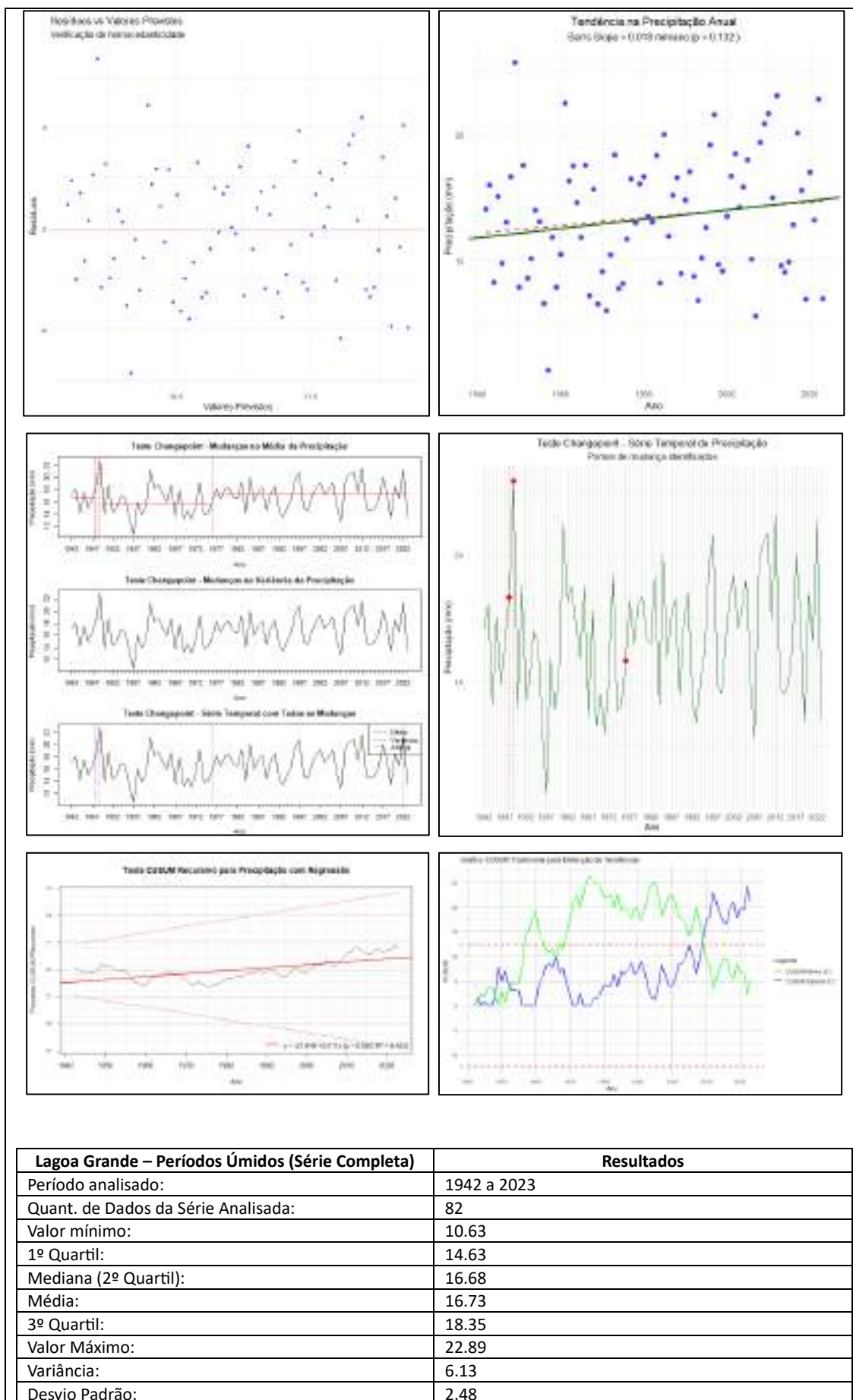
As análises estatísticas (regressão linear, Mann-Kendall, Spearman e Sen's Slope) não indicam tendência significativa de aumento ou redução ao longo do tempo, embora o CUSUM e as mudanças na média apontem oscilações estruturais em alguns períodos, especialmente entre 1949–1951 (excepcionalmente úmido), 1951–1970 (seco) e após 2017 (novo período de redução).

A ausência de tendência clara ao longo dos 82 anos analisados reforça que o regime de chuvas em períodos secos se mantém altamente variável e sem direção consistente, exigindo cautela na modelagem climática e estratégias de gestão que considerem a possibilidade de extremos recorrentes.



Períodos Úmidos





Lagoa Grande – Períodos Úmidos (Série Completa)	Resultados
Período analisado:	1942 a 2023
Quant. de Dados da Série Analisada:	82
Valor mínimo:	10.63
1º Quartil:	14.63
Mediana (2º Quartil):	16.68
Média:	16.73
3º Quartil:	18.35
Valor Máximo:	22.89
Variância:	6.13
Desvio Padrão:	2.48

Regressão Linear	
Equação da reta: Coeficiente angular (variação por ano): p-valor do coeficiente angular: Intervalo de Confiança: IC95% para a inclinação: R ² do modelo: Interpretação:	Precipitação = 1.5561e-02 * tempo + 16.1 1.56e-02 1.79e-01 (-0.007304, 0.03843) 0.02241562 Há evidências de aumento na precipitação ao longo do tempo, com 0.0156 mm a mais na precipitação média dos dias de chuva por ano da série (1,28 mm em 82 anos, 7,65% da média total da série (16.73 mm/dia de chuva).
Testes de Pressupostos da Regressão:	
Teste Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos Interpretação:	W = 0.9865 p-valor = 5.51e-01 Resíduos seguem distribuição normal
Teste Anderson-Darling para normalidade dos resíduos Interpretação:	A = 0.4653 p-valor = 2.47e-01 Resíduos seguem distribuição normal
Kolmogorov-Smirnov para normalidade dos resíduos: Interpretação:	D = 0.09277 p-valor = 0.4535 (p > 0,05) Não há evidências para rejeitar a normalidade dos resíduos
Teste de Breusch-Pagan para heterocedasticidade: Interpretação:	LM = 0.0541 p-valor = 8.16e-01 Variância constante (homocedasticidade)
Teste de White para heterocedasticidade: Interpretação:	Chisq = 0.0415 p-valor = 8.39e-01 Variância constante (homocedasticidade)
Teste de Durbin-Watson para autocorrelação: Interpretação:	DW = 1.922 p-valor = 3.19e-01 Resíduos independentes (não autocorrelacionados)
Testes de tendências e mudanças	
Mann-Kendall: Interpretação:	tau = 0.1135 p-valor = 0.1322 Não há evidência de tendência significativa
Sen's Slope: Coeficiente angular (Sen's Slope): Intervalo de Confiança 95%: Valor-p: Interpretação:	0.01842433 IC95% = (-0.005616 , 0.04281) 0.1321506 Conclusão: Não há evidências de tendência estatisticamente significativa (p ≥ 0.05)
Teste de Pettitt para mudança de ponto: Interpretação:	U = 419 p-valor = 0.3029 Nenhum ponto de mudança significativo detectado
Teste de Spearman: Interpretação:	rho = 0.1483 p-valor = 0.1835 (p > 0.05) Não há correlação significativa com o tempo
BFAST:	Nenhuma mudança estrutural detectada
CUSUM Recursivo: Equação da reta: Coeficiente angular: R ² da regressão: Limiar de Decisão (H): Tendência de AUMENTO Tendência de DIMINUIÇÃO Interpretação:	– $y = -21.649 + 0.011x$ (p = 0.000, R ² = 0.425) (ver reta vermelha no gráfico) – +0.011 (positivo: Indica um aumento sistemático nos valores de precipitação ao longo do tempo). – 0.425 (valor de R2 baixo, ajuste muito pequeno) – 12,38 – detectada (C ⁺ > H) – detectada (C ⁻ > H) • Curva predominantemente abaixo de zero entre 1941 e 2000 e com tendência sistemática crescente a partir de 1975: • Flutuações não ultrapassam as bandas de confiança: são estatisticamente insignificantes.
CUSUM Tradicional	As curvas C- e C+ (verde e azul) atingem os limites máx. e mín. em 1975 e a partir daí invertem as tendências cruzando-se em 2009 acima da banda superior
Changepoint: Análise de Mudança na Média:	– Mudanças detectadas nos anos: 1948, 1949, 1976

Análise de Mudança na Variância:	<ul style="list-style-type: none"> – Período 1942-1948: Média = 16.634 mm – Período 1948-1949: Média = 20.607 mm – Período 1949-1976: Média = 16.007 mm – Período 1976-2023: Média = 17.146 mm <p>Nenhuma mudança significativa na variância detectada.</p>
Análise de Mudança na Média e na Variância:	<ul style="list-style-type: none"> – Mudança mais significativa detectada em: 2022 – Nova média: 13.463 mm – Nova variância: NA mm

Considerando-se o período completo da série, o gráfico acima mostra aumento geral dos valores das médias aritméticas das precipitações dos períodos úmidos de cada ano (coeficiente positivo da reta de regressão) e estabilidade, ou redução pouco expressiva, das médias harmônicas, o que indica um aumento geral da pluviosidade dos períodos úmidos. Destaca-se a redução das médias aritméticas de 2017 a 2023, apesar das oscilações nesse período, com períodos úmidos de pouca pluviosidade em 2019 e 2023, e uma ligeira tendência de aumento das médias harmônicas nesse período, o que significa um aumento do número de eventos de chuva com baixos valores diários de precipitação no período úmido.

As curvas de regressão polinomial mostram ciclos discretos de aumento e redução de ambas as médias, podendo-se ver que, de 1975 a 2015, os valores de ambas as médias se mantiveram em um patamar (curva praticamente sem oscilações).

Características Gerais da Série

A série de **médias anuais** de precipitação dos **períodos úmidos** da Lagoa Grande (1942–2023), com 82 anos de dados, apresenta valores entre 10,63 mm e 22,89 mm, com média de 16,73 mm e mediana próxima (16,68 mm), o que indica distribuição relativamente simétrica e estável ao longo do tempo.

O intervalo interquartil (Q1 = 14,63 mm; Q3 = 18,35 mm) sugere uma concentração da maior parte dos valores em torno da média, com variabilidade moderada (desvio padrão = 2,48 mm; variância = 6,13 mm²).

Diferentemente dos períodos secos, a série dos períodos úmidos mostra maior homogeneidade e menor influência de extremos, refletindo condições pluviométricas mais estáveis, embora ainda sujeitas a oscilações de médio prazo.

Regressão Linear:

O ajuste da regressão linear indicou uma inclinação positiva de 0,0156 mm/ano, correspondendo a um aumento acumulado de 1,28 mm ao longo de 82 anos (cerca de 7,65% da média histórica).

Apesar da magnitude relativamente maior que a observada nos períodos secos, o resultado não é estatisticamente significativo ($p = 0,179$; IC95% da inclinação = $-0,0073$ a $0,0384$, incluindo zero).

O poder explicativo do modelo é baixo ($R^2 = 0,022$), indicando fraca relação linear entre precipitação e tempo.

Testes de Pressupostos da Regressão:

- Os pressupostos da regressão linear foram plenamente atendidos:

- Os resíduos seguem distribuição normal (Shapiro-Wilk, AD e KS não rejeitam);
- Não há evidência de heterocedasticidade (Breusch-Pagan e White, $p > 0,05$);
- Os resíduos são independentes (Durbin-Watson = 1,92, $p = 0,319$).

Assim, embora a tendência linear não seja estatisticamente robusta, o modelo ajustado é consistente em termos de pressupostos estatísticos.

Testes Não-Paramétricos:

Os testes não paramétricos não são unânimes em comprovar a ausência de tendência:

Mann-Kendall ($\tau = 0,113$; $p = 0,132$) e Spearman ($\rho = 0,148$; $p = 0,183$) não rejeitam a hipótese de ausência de tendência.

O Sen's Slope estimou um aumento de 0,0184 mm/ano, mas com intervalo de confiança que inclui zero ($-0,0056$ a $0,0428$) e $p \geq 0,05$, confirmando que não há tendência estatisticamente significativa.

O Pettitt ($p = 0,303$) e o BFAST não detectaram pontos de mudança significativos.

Em contraste, o CUSUM recursivo sugeriu uma tendência positiva consistente ($+0,011$ mm/ano, $p < 0,001$, $R^2 = 0,425$), com inversão de padrão a partir de 1975 e cruzamento das curvas C- e C+ em 2009, sugerindo fortalecimento do sinal de aumento na precipitação após a segunda metade da série.

A análise de Changepoint indicou mudanças na média em 1948, 1949 e 1976, revelando uma fase excepcionalmente úmida em 1948–1949 (média = 20,61 mm), seguida de relativa redução (1949–1976: 16,01 mm) e posterior recuperação (1976–2023: 17,15 mm).

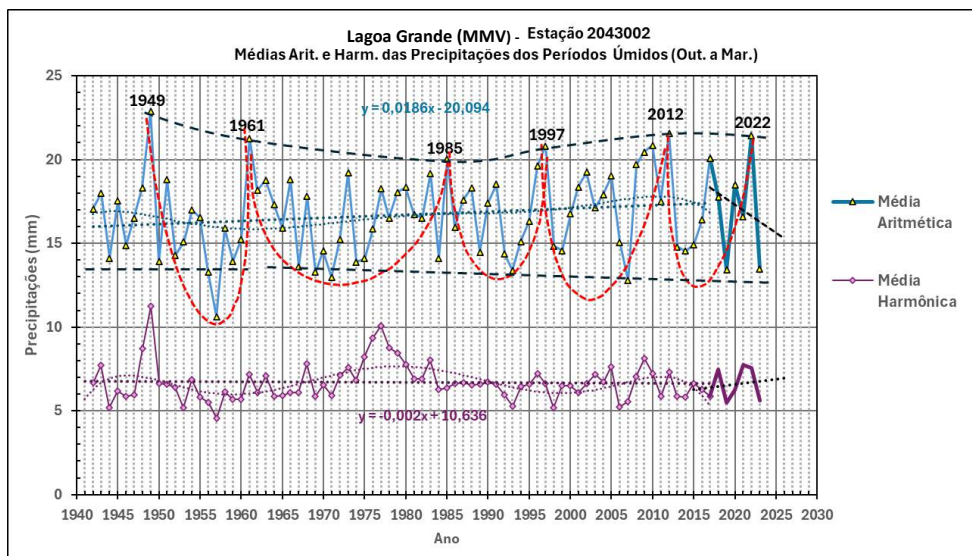
A mudança mais recente e significativa ocorreu em 2022, com queda da média para 13,46 mm, embora não tenha sido acompanhada por alteração na variância.

Conclusões Principais

A análise da série dos períodos úmidos em Lagoa Grande (1942–2023) mostra um regime pluviométrico historicamente mais estável e menos sujeito a extremos que o dos períodos secos, mas ainda marcado por oscilações estruturais.

Embora a regressão linear e os testes de tendência (Mann-Kendall, Spearman e Sen's Slope) não indiquem tendências estatisticamente significativas, o CUSUM e a análise de mudanças sugerem um padrão de leve aumento da precipitação a partir de meados da década de 1970, interrompido por uma redução expressiva em 2022.

Em síntese, não há evidência de tendência robusta e contínua, mas os resultados apontam para um histórico de aumento das precipitações nos períodos úmidos e oscilações com fases de maior e menor precipitação, cujo impacto pode ser relevante para a gestão hídrica e o planejamento agrícola na região.



Nesse gráfico estão sugeridos alguns ciclos de variação das precipitações ao longo de toda a série histórica, ciclos esses que poderão ou não ser confirmados pelos estudos subsequentes que farão parte do Projeto “De Olho no Velhas”

Tabela-Resumo da Análise da Série de 1941 a 2023 da Lagoa Grande – Médias Aritméticas das Precipitações Diárias (mm/dia)

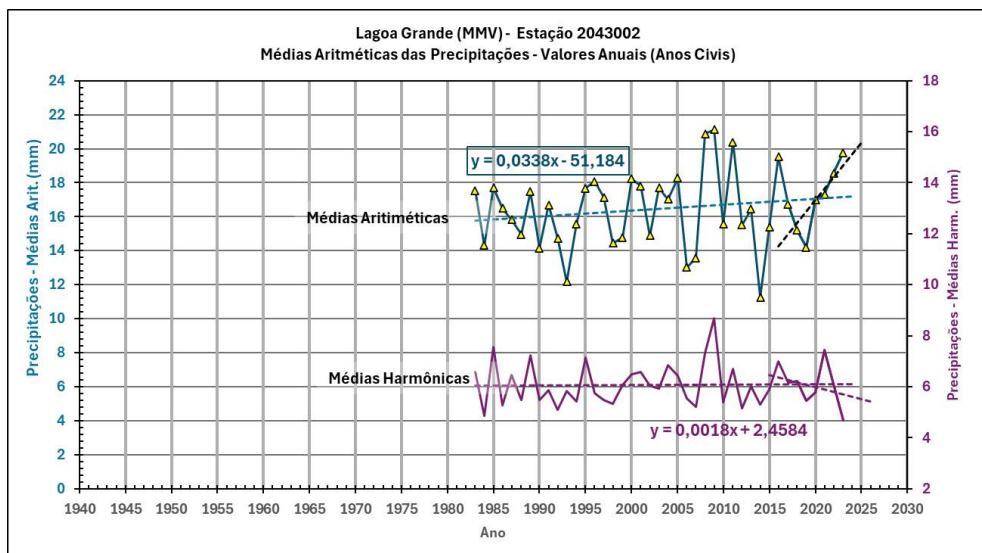
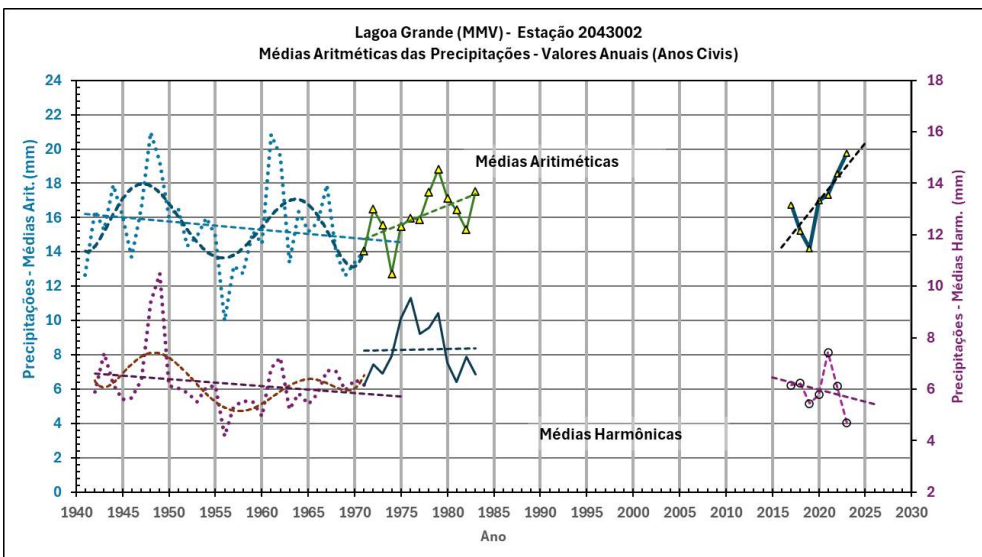
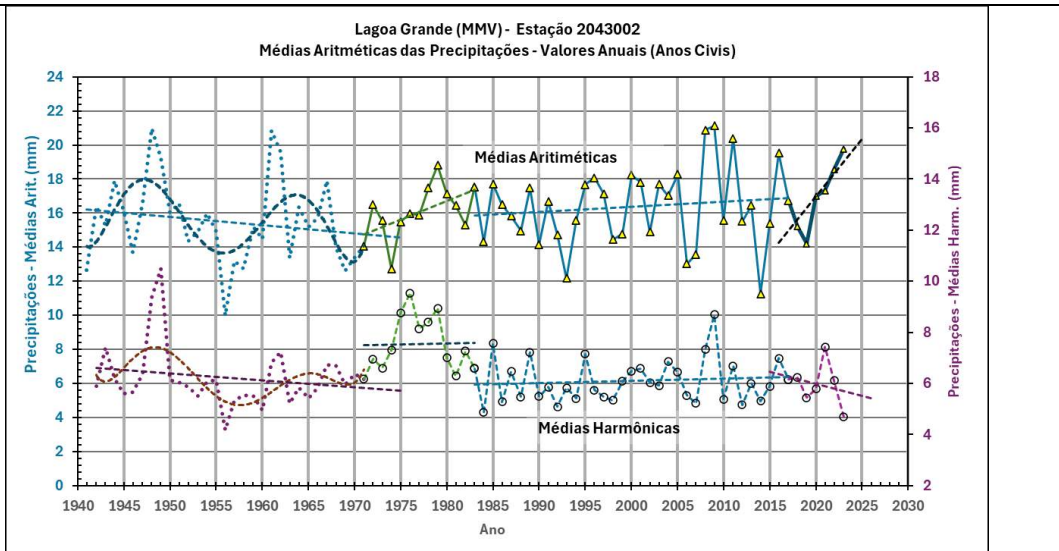
Indicador	Anos Cíveis (1941–2023)	Períodos Secos (1941–1983)	Períodos Úmidos (1942–1983)
Período analisado	1941–2023 (83 anos)	1941–2023 (83 anos)	1942–2023 (82 anos)
Quant. de Dados	83	83	82
Valor mínimo	9,97 mm/dia	2,00 mm/dia	10,63 mm/dia
Mediana	15,96 mm/dia	10,18 mm/dia	16,68 mm/dia
Média	16,06 mm/dia	10,69 mm/dia	16,73 mm/dia
Valor Máximo	21,12 mm/dia	34,75 mm/dia	22,89 mm/dia
Desvio Padrão	2,29 mm/dia	4,42 mm/dia	2,48 mm/dia
Regressão Linear – Coef. Angular	+0,0189 mm/dia/ano	+0,000375 mm/dia/ano	+0,0156 mm/dia/ano
Alteração em 83 anos	0,913 mm/dia	0,031 mm/dia	1,28 mm/dia
Varição percentual com relação à média total do segmento analisado	(+11,84%)	(+0,29%)	(+7,65%)
Teste Shapiro-Wilk	Resíduos normais	Resíduos não normais	Resíduos normais
Teste Anderson-Darling	Resíduos normais	Resíduos não normais	Resíduos normais
Kolmogorov-Smirnov	Normalidade não rejeitada	Normalidade rejeitada	Normalidade não rejeitada
Breusch-Pagan	Variância constante (homocedasticidade)	Variância constante (homocedasticidade)	Variância constante (homocedasticidade)
White	Variância constante (homocedasticidade)	Variância não constante (heterocedasticidade)	Variância constante (homocedasticidade)
Durbin-Watson	Resíduos autocorrelacionados	Resíduos autocorrelacionados	Resíduos independentes
Mann-Kendall	Sem tendência significativa	Sem tendência significativa	Sem tendência significativa
Sen's Slope	0,02291 mm/dia/ano Sem inclinação significativa (IC inclui zero)	0,010 mm/dia/ano Sem inclinação significativa (IC inclui zero)	0,018424 mm/dia/ano Sem inclinação significativa (IC inclui zero)



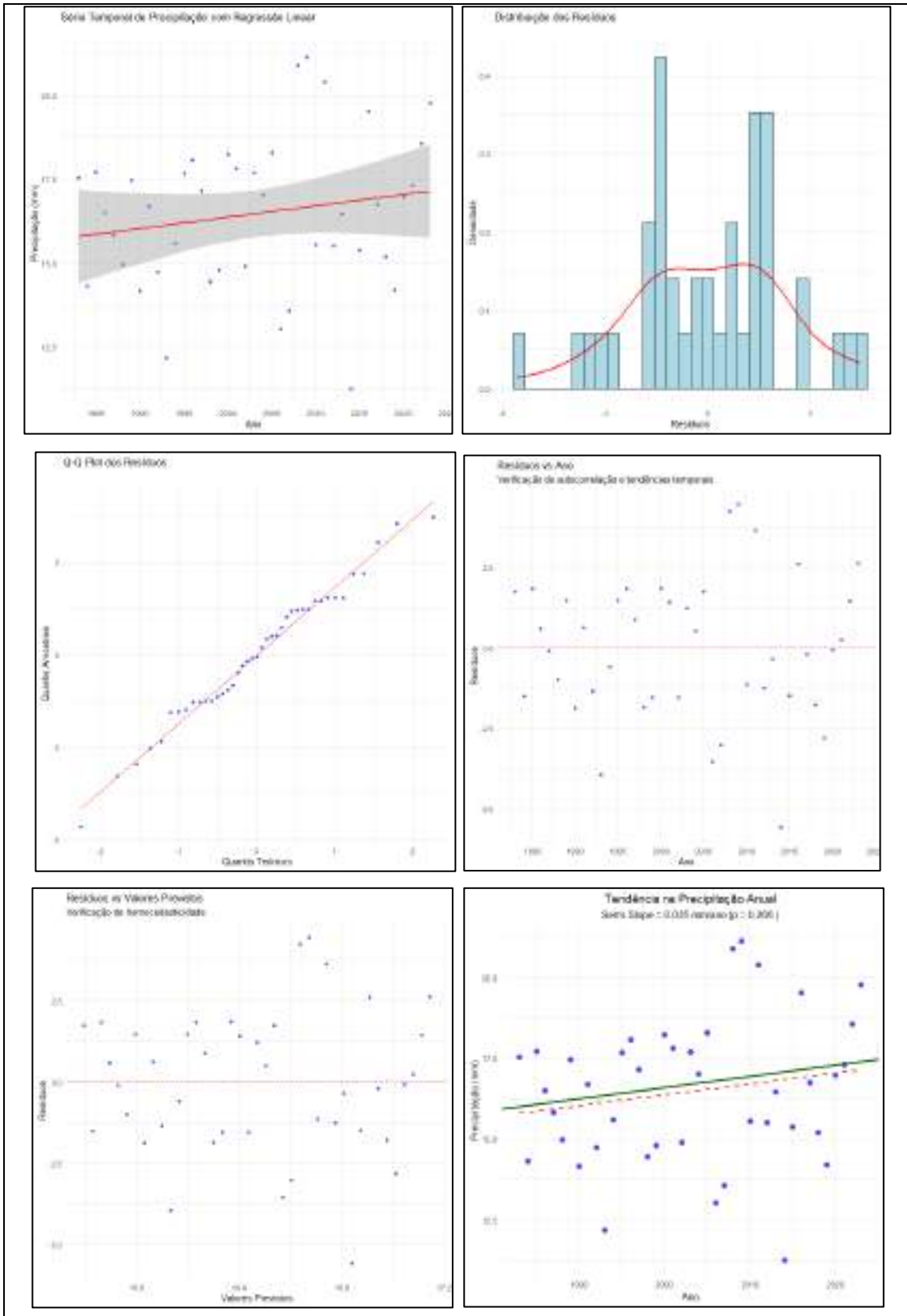
Indicador	Anos Cíveis (1941–2023)	Períodos Secos (1941–1983)	Períodos Úmidos (1942–1983)
Alteração em 83 anos pelo Sen's Slope	1.902 mm/dia	0,83 mm/dia	1,51 mm/dia
Varição percentual com relação à média total do segmento analisado	(+11,84%)	(+7,76%)	(+9,03%)
Pettitt	Nenhum ponto de mudança significativo detectado.	Nenhum ponto de mudança significativo detectado.	Nenhum ponto de mudança significativo detectado.
Spearman	Sem correlação significativa com o tempo	Sem correlação significativa com o tempo	Sem correlação significativa com o tempo
BFAST	Nenhuma mudança estrutural detectada	Nenhuma mudança estrutural detectada	Nenhuma mudança estrutural detectada
CUSUM Recursivo	Tendência de aumento das precipitações	Tendência de leve redução; curva predominantemente abaixo de zero	Tendência de aumento; curva abaixo de zero entre 1941 e 2000 e crescente a partir de 1975
CUSUM Recursivo Coef. angular	(+0,011)	(-0,003)	(+0,011)
CUSUM Tradicional – Tendência de AUMENTO	Detectada	Detectada	Detectada
CUSUM Tradicional – Tendência de DIMINUIÇÃO	Detectada	Detectada	Detectada
Changepoint – Mudança de Média	1994: 15,652 → 16,771 mm/dia; 2022: 19,779 mm/dia	Vários anos: 1947, 1949, 1951, 1970, 2017; média varia entre 7,572 e 20,383 mm/dia	1948, 1949, 1976; média varia entre 16,007 e 20,607 mm/dia
Changepoint – Mudança de Variância	2022 – mudança significativa na variância	1950 – mudança significativa na variância	Nenhuma mudança significativa
Changepoint – Média + Variância	2022 – mudança combinada detectada	2022 – mudança combinada detectada	2022 – mudança da média detectada

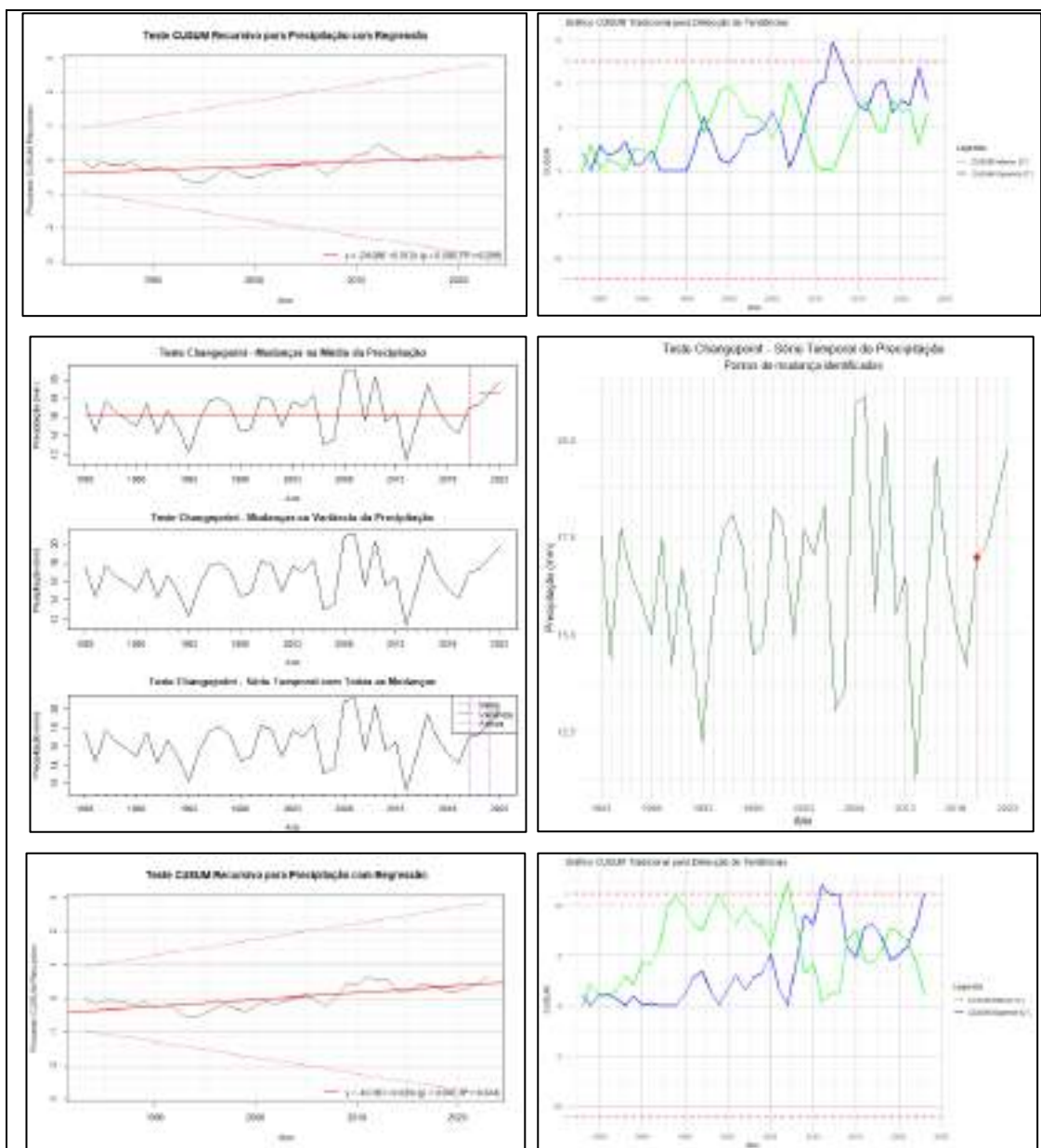
4.9.3.4.3 Segmento da Série – 1983 a 2023 – Valores Anuais (Anos Cíveis)

Para permitir a comparação direta com as séries de Itabirito Linígrafo e Fazenda Água Limpa, a seguir são apresentados os resultados da análise do segmento da série da Lagoa Grande (MMV) que vai de 1983 a 2023.



Anos Cívís – Segmento: 1983 a 2023





Lagoa Grande – Anos Cíveis (1983 a 2023) – Médias Aritméticas Anuais	Resultados
Período analisado:	1983 a 2023
Quant. de Dados da Série Analisada:	41
Valor mínimo:	11.26
1º Quartil:	14.90
Mediana (2º Quartil):	16.69
Média:	16.47
3º Quartil:	17.71
Valor Máximo:	21.12
Variância:	5.04
Desvio Padrão:	2.25
Regressão Linear	
Equação da reta:	Precipitação = 3.38e-02 * tempo + 51.184
Coefficiente angular (variação por ano):	3.38e-02
p-valor do coeficiente angular:	2.6e-01
Intervalo de Confiança: IC95% para a inclinação:	(-0.02595, 0.0935)
R ² do modelo:	0.03246
Interpretação:	

	Há evidências de aumento na precipitação ao longo do tempo, com 0.0338 mm a mais na precipitação média dos dias de chuva por ano da série (1.386 mm em 41 anos, 8,41% da média total do segmento analisado (16.47 mm/dia de chuva).
Testes de Pressupostos da Regressão:	
Teste Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos Interpretação:	W = 0.9837 p-valor = 8.12e-01 Resíduos seguem distribuição normal
Teste Anderson-Darling para normalidade dos resíduos Interpretação:	A = 0.2796 p-valor = 6.28e-01 Resíduos seguem distribuição normal
Kolmogorov-Smirnov para normalidade dos resíduos: Interpretação:	D = 0.08027 p-valor = 0.9351 (p > 0,05) Não há evidências para rejeitar a normalidade dos resíduos
Teste de Breusch-Pagan para heterocedasticidade: Interpretação:	LM = 2.0181 p-valor = 1.55e-01 Variância constante (homocedasticidade)
Teste de White para heterocedasticidade: Interpretação:	Chisq = 1.8702 p-valor = 1.71e-01 Variância constante (homocedasticidade)
Teste de Durbin-Watson para autocorrelação: Interpretação:	DW = 1.828 p-valor = 2.34e-01 Resíduos independentes (não autocorrelacionados)
Testes de tendências e mudanças	
Mann-Kendall: Interpretação:	tau = 0.122 p-valor = 0.2662 Não há evidência de tendência significativa
Sen's Slope: Coeficiente angular (Sen's Slope): Intervalo de Confiança 95%: Valor-p: R2 Interpretação:	0.034597 IC95% = (-0.02599 , 0.09363) 0.2661545 0.03246399 Não há evidências de tendência estatisticamente significativa (p ≥ 0.05 e IC95% inclui zero)
Teste de Pettitt para mudança de ponto: Interpretação:	U = 110 p-valor = 0.7152 (p>0.05) Nenhum ponto de mudança significativo detectado
Teste de Spearman: Interpretação:	rho = 0.1707 p-valor = 0.2859 Não há correlação significativa com o tempo
BFAST:	Nenhuma mudança estrutural detectada
CUSUM Recursivo: Equação da reta: Coeficiente angular: R ² da regressão: Limiar de Decisão (H): Tendência de AUMENTO Tendência de DIMINUIÇÃO Interpretação:	– $y = -40.383 + 0.020x$ (p = 0.000, R ² = 0.544) – (ver reta vermelha no gráfico) – +0.020 (positivo: Indica um aumento sistemático nos valores de precipitação ao longo do tempo). – 0.544 (valor de R2 baixo, ajuste pequeno) – 11.23 – detectada (C ⁺ > H) – detectada (C ⁻ > H) • Curva predominantemente abaixo de zero entre 1983 e 2009 e com tendência sistemática crescente a partir de 1995: • Flutuações não ultrapassam as bandas de confiança: são estatisticamente insignificantes.
CUSUM Tradicional	A curva C- atinge o limite máximo em 1995 e se mantém próxima dele até 2007, quando começa a baixar. A curva C+ (azul) mantém-se próxima de zero até 2007 e se eleva até cruzar a banda superior em 2011, quando começa a baixar novamente. A partir de 2019 sobe até atingir a banda superior.
Changepoint: Análise de Mudança na Média:	– Mudanças detectadas nos anos: 2020 – Período 1983-2020: Média = 16.305 mm – Período 2020-2023: Média = 18.157 mm



Análise de Mudança na Variância:	Nenhuma mudança significativa na variância detectada.
Análise de Mudança na Média e na Variância:	<ul style="list-style-type: none"> – Mudança mais significativa detectada em: 2022 – Nova média: 19.779 mm – Nova variância: NA mm

Características Gerais da Série

A série histórica de **médias anuais** de precipitação dos **anos civis** da Lagoa Grande **no segmento de 1983–2023**, com 41 anos de dados, apresenta valores entre 11,26 mm e 21,12 mm, revelando uma variação moderada entre anos mais secos e mais chuvosos.

A média (16,47 mm) e a mediana (16,69 mm) são muito próximas, indicando distribuição aproximadamente simétrica. A dispersão é relativamente baixa, com desvio padrão de 2,25 mm e variância de 5,04 mm², o que sugere estabilidade interanual em torno da média.

Os quartis (Q1 = 14,90 mm; Q3 = 17,71 mm) mostram que metade dos valores se concentram em uma faixa estreita de cerca de 2,8 mm, evidenciando homogeneidade e ausência de extremos acentuados.

Regressão Linear:

A regressão linear ajustada apresentou coeficiente angular positivo de +0,0338 mm/ano, o que implicaria em aumento acumulado de 1,39 mm ao longo de 41 anos (cerca de 8,4% da média da série). Contudo, esse resultado não foi estatisticamente significativo ($p = 0,260$; IC95% = $-0,02595$ a $0,0935$; inclui zero) e o modelo mostrou baixo poder explicativo ($R^2 = 0,0325$).

Testes de Pressupostos da Regressão:

O pressupostos da regressão foram plenamente atendidos:

- os resíduos seguem distribuição normal (Shapiro-Wilk, Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov, $p > 0,6$);
- não há evidência de heterocedasticidade (Breusch-Pagan e White, $p > 0,15$);
- os resíduos são independentes (Durbin-Watson, $p = 0,234$).

Assim, embora estatisticamente consistente em termos de pressupostos, o modelo não evidencia tendência significativa.

Testes Não-Paramétricos:

Os testes de tendência não paramétricos corroboram a ausência de alterações robustas.

O Mann-Kendall ($\tau = 0,122$; $p = 0,266$) e o Spearman ($\rho = 0,1707$; $p = 0,286$) não identificaram tendências significativas.

O Sen's Slope estimou inclinação de +0,0346 mm/ano, mas o intervalo de confiança inclui zero ($-0,026$ a $0,094$; $p \geq 0,05$), confirmando a não significância estatística.

O Pettitt ($p = 0,715$) e o BFAST não detectaram pontos de ruptura relevantes.

Já o CUSUM tradicional ajustou uma reta positiva ($y = -40,38 + 0,020x$; $R^2 = 0,544$), indicando aumento sistemático ao longo do tempo, embora com baixo poder explicativo. A análise da curva mostra oscilações negativas até 2009, crescimento após 1995 e cruzamento da banda superior em 2011, com nova intensificação a partir de 2019.

A análise de Changepoint apontou alterações na média em 2020 e 2022: entre 1983–2020, a média foi 16,31 mm, passando para 18,16 mm em 2020–2023, e atingindo 19,78 mm em 2022. Nenhuma mudança significativa na variância foi identificada.

Conclusões Principais

A série de **médias anuais** de precipitação dos **anos civis** da Lagoa Grande no **segmento de 1983–2023** apresenta comportamento estável e homogêneo, com média de 16,5 mm e baixa dispersão. Embora a regressão linear, Sen’s Slope e os testes de Mann-Kendall e Spearman não indiquem tendências estatisticamente significativas, o CUSUM e a análise de mudança de média sugerem intensificação das chuvas a partir de 1995 e, sobretudo, após 2020, quando a média se elevou de 16,3 mm para 18,2 mm, atingindo 19,8 mm em 2022. Portanto, a série mantém estabilidade de longo prazo, mas exibe sinais recentes de aumento da precipitação, que merecem monitoramento, pois podem representar o início de uma fase mais úmida na região.

4.9.3.4.4 Segmento da Série – 1983 a 2023 – Períodos Secos e Úmidos

