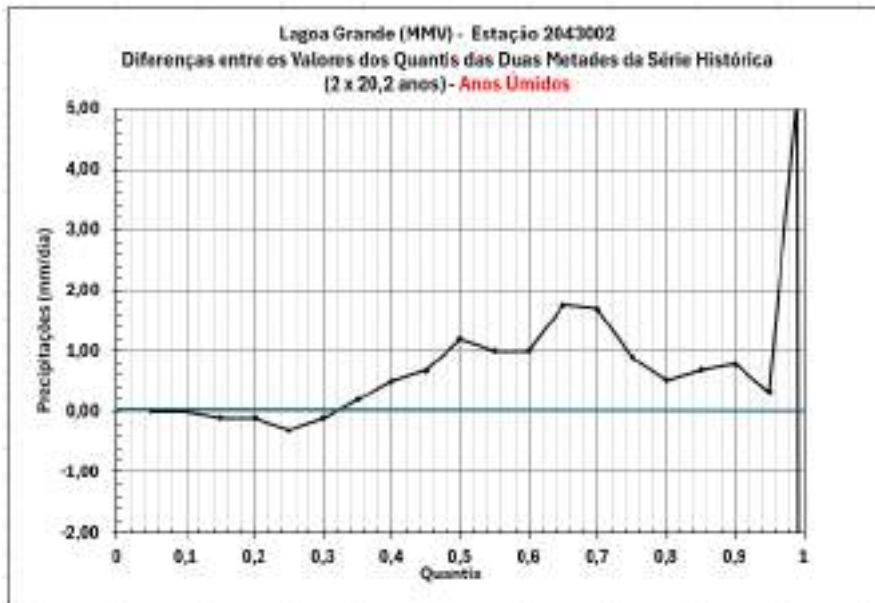




99,0%	77,29	82,46	5,17
99,5%	101,92	91,29	-10,63



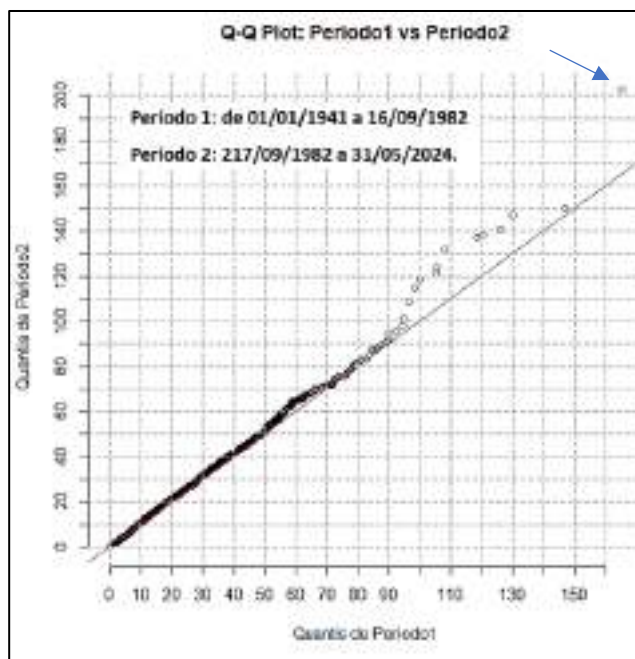
Conclusões da Análise por Quantis - Dois Segmentos Iguais de 26,3 anos – **Períodos Úmidos**

1. Nos últimos 20,2 anos (até 30/06/2024), em comparação com os 20,2 anteriores a eles, houve pequena redução da intensidade das chuvas para quantis iguais ou inferiores a 30% (6 mm/dia).
2. **Aumento geral das chuvas moderadas e fortes:** Nos últimos 20,2 anos, houve um aumento na intensidade das chuvas para todos os quantis iguais ou superiores a 30% (6 mm) e, de modo especial, das chuvas superiores a 50 mm/dia (95%).
3. **Riscos hidrológicos aumentados:** O crescimento das chuvas intensas e extremas tem implicações para enchentes, deslizamentos, rupturas de barragens e outros riscos ambientais e estruturais.
4. **Consistência com tendências globais:** O padrão observado segue a tendência mundial de aumento na intensidade e frequência de eventos extremos, possivelmente ligado às mudanças climáticas e ao aquecimento global.

4.9.6 Gráficos Q-Q Plot

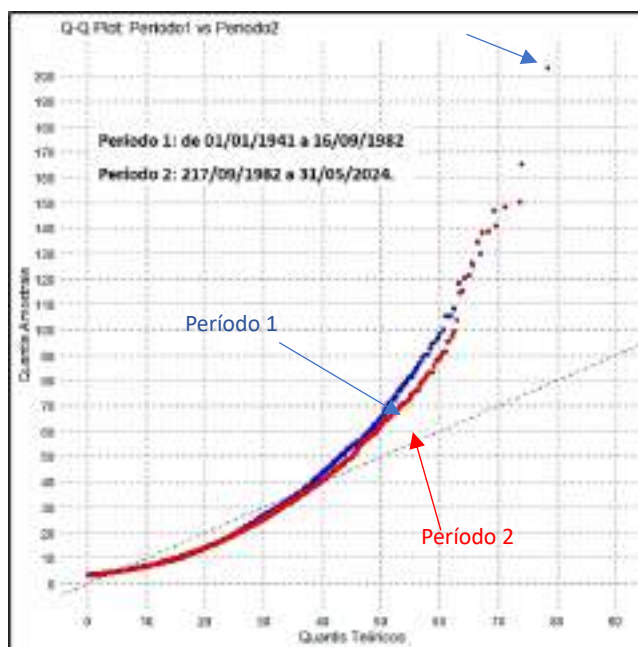
4.9.6.1 Dois Segmentos Iguais de 41,5 anos

Os dois gráficos a seguir apresentam a comparação dos dados dos dois períodos acima referidos, com igual duração: Período 1: de 01/01/1941 a 16/09/1982 e Período 2: 17/09/1982 a 31/05/2024.



No gráfico acima, fica evidente que as chuvas com valores superiores a 90 mm por dia foram mais frequentes no Período 2 que no Período 1, com destaque para o evento extremo de 202 mm do dia 08/01/2022. Confirma-se, portanto, a constatação já feita, de que nas últimas 4 décadas a intensidade das chuvas tem aumentado, o que implica em aumento dos riscos de enchentes e desastres.

O gráfico a seguir constitui outra forma de comparar os quantis dos dois períodos analisados. O gráfico compara a distribuição de dois conjuntos de dados em relação a uma distribuição teórica (neste caso, a distribuição normal, ou gaussiana).

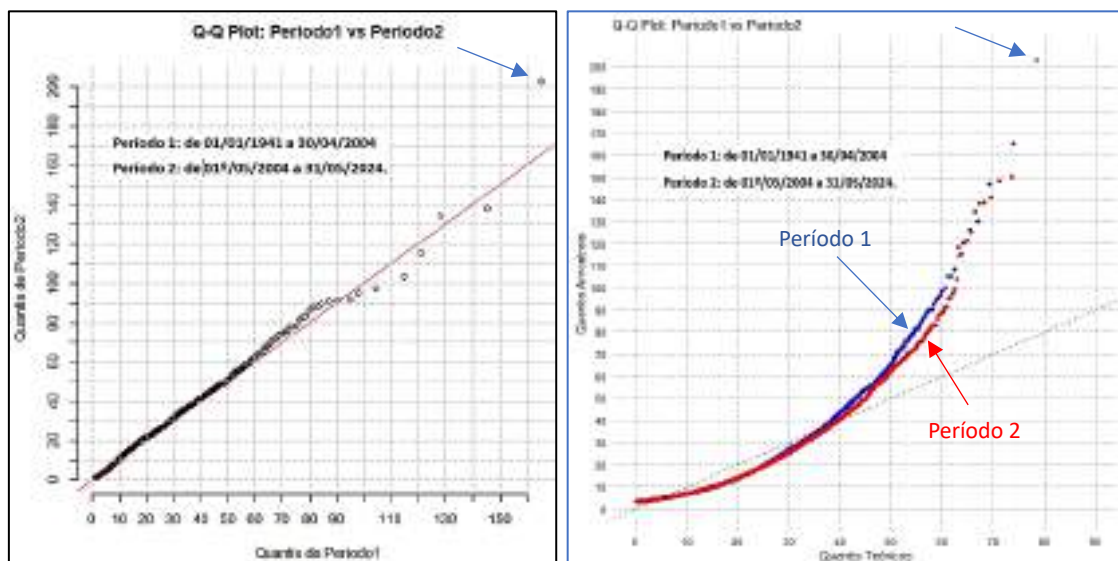


Pelo gráfico acima pode-se ver que as curvas dos dois períodos se aproximam de uma distribuição normal até o quantil teórico de 45% e desviam-se significativamente para cima da linha de referência a partir desse ponto, o que indica que os valores maiores de intensidade de chuva afastam-se dos valores esperados em uma distribuição normal, ou seja, a curva de

distribuição dos dados tem cauda mais pesada à direita, com valores extremos maiores do que os de uma distribuição normal.

4.9.6.2 Período 63,3 anos e Período dos 20 anos mais recentes

A tabela a seguir apresenta os valores dos quantis calculados para os dois segmentos com igual quantidade de dias (Período 1 de 27/04/1971 a 12/08/1997 e Período 2 de 13/08/1997 a 30/11/2023) em que o período de 27/04/1971 a 30/11/2023 da Estação Lagoa Grande (MMV) foi dividido:



O gráfico da esquerda mostra que, em comparação com os primeiros 63 anos da série, os últimos 20 anos apresentaram maior quantidade de chuvas na faixa de 60 a 90 mm por dia e menor quantidade na faixa acima de 90 mm por dia, exceto no que se refere ao evento extremo de 08/01/2022 (ponto mais alto dos gráficos).

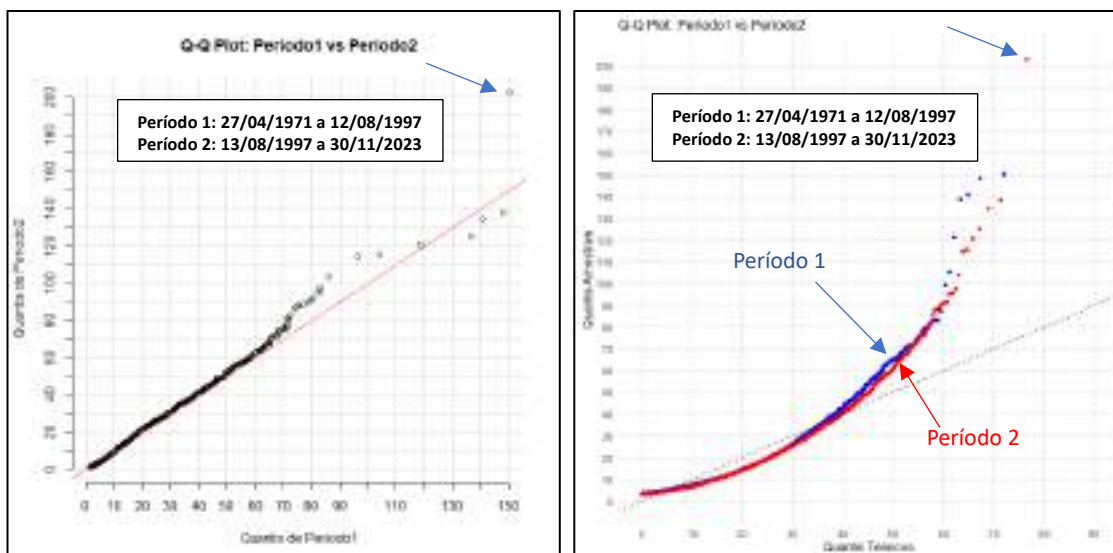
O gráfico da esquerda, como no caso anterior, mostra que os dados considerados não seguem uma distribuição normal e sua curva de distribuição têm cauda à direita mais pesada.

Se faz importante salientar que essa conclusão difere da comparação dos dois períodos com duração igual de 41,5 anos (ver gráficos mais acima), mostrando que as tendências podem variar dependendo dos períodos comparados.

4.9.6.3 Dois Segmentos Iguais de 26,3 anos:

Para permitir a comparação direta das precipitações registradas na Estação Lagoa Grande (MMV) com as vazões registradas na Estação Honório Bicalho, considera-se a seguir somente os dados de precipitações que registradas na Lagoa Grande (MMV) a partir de 27/04/1971, quando foram iniciados os registros em Honório Bicalho, até 30/11/2023, data do último registro em Honório Bicalho

A tabela a seguir apresenta os valores dos quantis calculados para os dois segmentos com igual quantidade de dias (Período 1 de 27/04/1971 a 12/08/1997 e Período 2 de 13/08/1997 a 30/11/2023) em que o período de 27/04/1971 a 30/11/2023 da Estação Lagoa Grande (MMV) foi dividido:

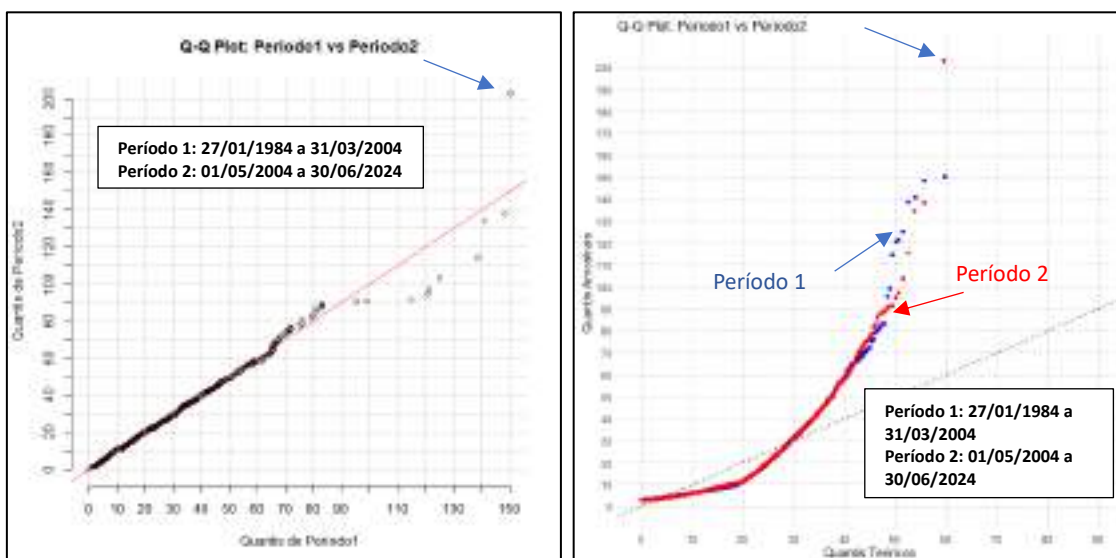


O gráfico da esquerda mostra que, em comparação com os primeiros 26,3 anos do período considerado, os últimos 26,3 anos apresentaram maior quantidade de chuvas na faixa de 65 a 100 mm por dia e menor quantidade na faixa acima de 135 mm por dia, exceto no que se refere ao evento extremo de 08/01/2022 (ponto mais alto dos gráficos). O gráfico da esquerda, como nos casos anteriores, mostra que os dados considerados não seguem uma distribuição normal e sua curva de distribuição têm cauda à direita mais pesada.

4.9.6.4 Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos:

Para permitir a comparação direta das precipitações registradas na Estação Lagoa Grande (MMV) com as vazões registradas nas estações Itabirito Linígrafo e Fazenda Água Limpa, considera-se a seguir somente os dados de precipitações que registradas na Lagoa Grande (MMV) a partir de 27/01/1984, quando foram iniciados os registros na Fazenda Água Limpa, até 30/06/2024.

A tabela a seguir apresenta os valores dos quantis calculados para os dois segmentos com igual quantidade de dias (Período 1 de 27/01/1984 a 31/03/2004 e Período 2 de 01/05/2004 a 30/06/2024):





O gráfico da esquerda mostra que, em comparação com os primeiros 20,2 anos do período considerado, os últimos 20,2 anos apresentaram menor quantidade de chuvas com valores superiores a 90 mm por dia exceto no que se refere ao evento extremo de 08/01/2022 (ponto mais alto dos gráficos). O gráfico da esquerda, como nos casos anteriores, mostra que os dados considerados não seguem uma distribuição normal e sua curva de distribuição têm cauda à direita mais pesada.

Conclusões da Análise por Gráficos Q-Q Plot

1. Intensidade das chuvas extremas no Período 2

- As chuvas mais intensas foram mais frequentes no Período 2 (1982 a 2023) em comparação com o Período 1 (1941-1982), porém menos intensas quando se compara o período de 1984 a 2004 com o de 2004 a 2024.
- Um exemplo marcante é o evento extremo de 202 mm em 08/01/2022, que destaca a tendência de aumento na intensidade das chuvas extremas.
- Esse aumento eleva os riscos de desastres naturais, como enchentes, deslizamentos, rupturas de barragens e outros impactos associados a chuvas intensas.
- Os últimos 20 anos, quando comparados com os 63 anos anteriores, registraram aumento na quantidade de chuvas na faixa de 60 a 90 mm/dia, mas uma redução na faixa acima de 90 mm/dia (exceto pelo evento extremo de 202 mm em 2022).
- Os últimos 20 anos, quando comparados com os 20 anos anteriores, registraram redução na quantidade de chuvas na faixa acima de 90 mm/dia, exceto pelo evento extremo de 202 mm em 2022.

2. Desvio da distribuição normal e necessidade de análises não paramétricas

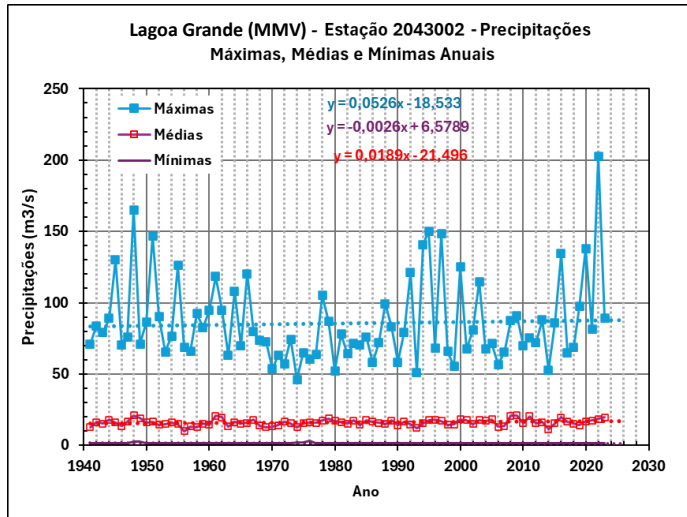
- As curvas dos dados dos dois períodos não seguem uma distribuição normal. Esse desvio sugere que a análise dos dados deve ser realizada por meio de testes estatísticos não paramétricos, que não assumem uma distribuição específica para os dados, bem como por outros métodos estatísticos.
- A presença de caudas mais pesadas (valores extremos maiores) reforça a importância de considerar métodos estatísticos robustos para avaliar tendências e riscos associados a eventos extremos.
- A comparação direta entre períodos, como a feita com os gráficos Q-Q Plot, pode levar a conclusões diferentes dependendo da duração dos períodos analisados.

3. Implicações para a gestão de riscos e planejamento

- O aumento na intensidade das chuvas extremas reforça a necessidade de medidas de gestão de riscos, como monitoramento de áreas vulneráveis, prevenção de desastres e adaptação às mudanças climáticas.
- A redução de chuvas moderadas (como observado em análises anteriores) e o aumento de chuvas extremas podem comprometer a recarga de aquíferos e a segurança hídrica, exigindo planejamento integrado de recursos hídricos.
- A variabilidade nas tendências ao longo do tempo ressalta a importância de análises contínuas e atualizadas para embasar decisões de políticas públicas e gestão ambiental.

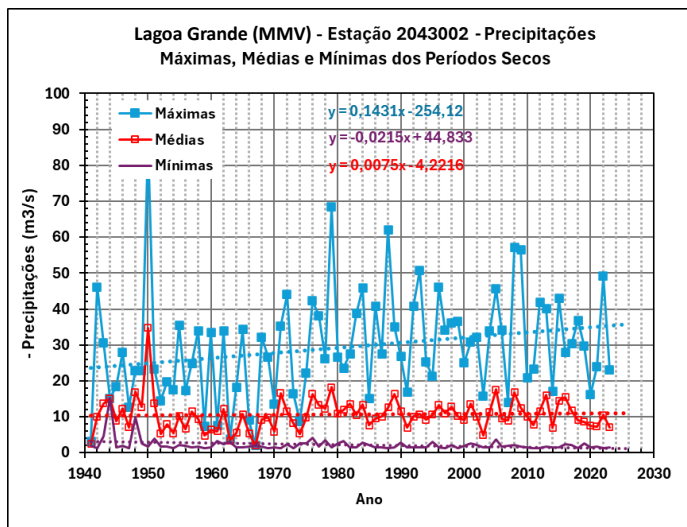
4.9.7 Precipitações Anuais Máximas, Médias e Mínimas

A seguir são apresentados os gráficos referentes ao comportamento das precipitações anuais máximas, e mínimas absolutas, comparando-as com as médias aritméticas das precipitações anuais.



Os coeficientes das retas de regressão, bem como o aspecto visual delas, mostram que as precipitações máximas absolutas de cada ano, aumentaram um pouco ao longo do período histórico da série, mas isso se deve apenas ao valor recorde de 2022. Se esse valor é desconsiderado, a tendência se inverte, com redução, não muito acentuada, ao longo da série.

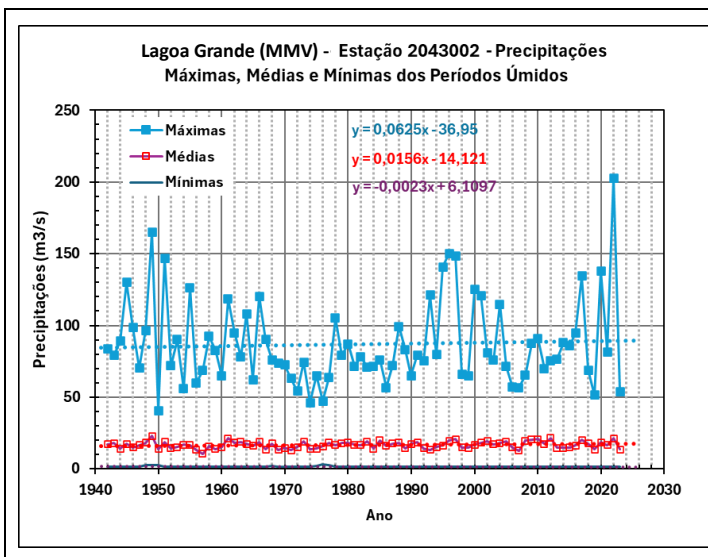
Por outro lado, as precipitações mínimas absolutas anuais apresentam alguma redução e as médias anuais mostram-se praticamente estáveis (coeficiente pequeno, positivo), embora com um pequeno crescimento.



Os coeficientes das retas e o aspecto visual delas mostram que as precipitações máximas absolutas dos períodos secos (maio a setembro), aumentaram ao longo do período.

As precipitações mínimas absolutas dos períodos secos apresentam alguma redução e as médias desses períodos secos mostram-se praticamente estáveis (coeficiente pequeno, positivo), embora com um pequeno crescimento.

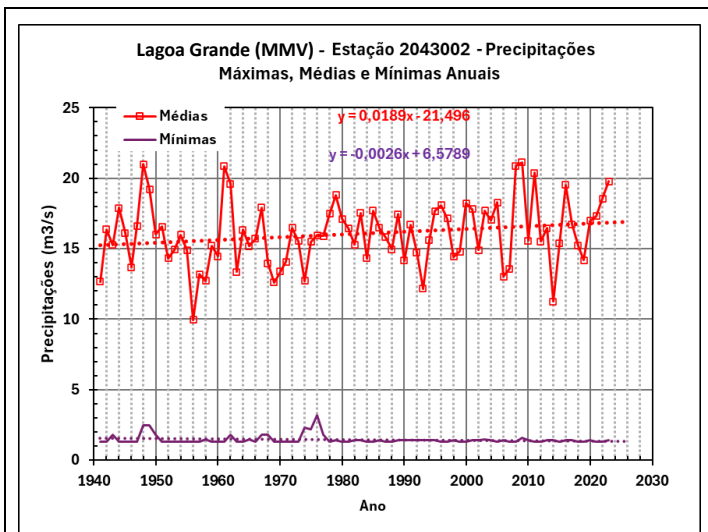
Alguns anos destacam-se com volumes diários de chuvas bem altos, ainda mais se considerarmos que alguns desses anos pertencem a ciclos de anos mais secos: 1950, 1979, 1988, 2008, 2009, 2018, 2019 e 2022.



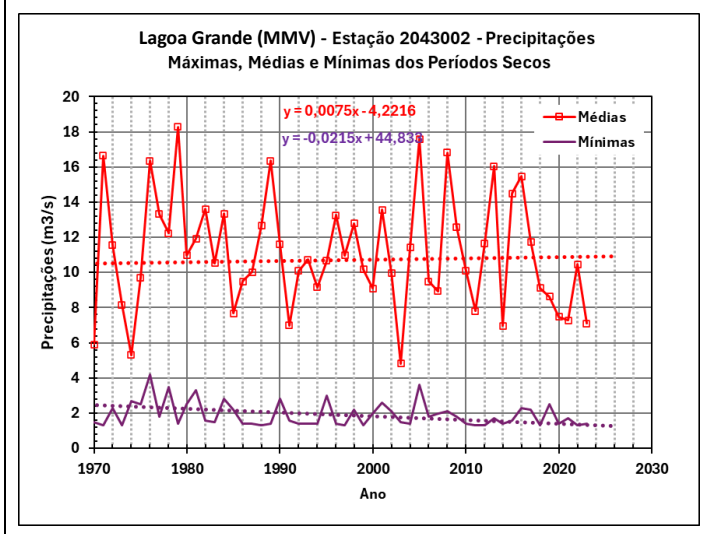
Os coeficientes das retas de regressão, bem como o aspecto visual delas, mostram que as precipitações máximas absolutas dos períodos úmidos, aumentaram um pouco ao longo do período histórico da série, mas isso se deve apenas ao valor recorde de 2022. Se esse valor é desconsiderado, a tendência se inverte, com redução, não muito acentuada, ao longo da série.

As precipitações mínimas absolutas dos períodos úmidos apresentam alguma redução e as médias desses períodos apresentam um nítido crescimento.

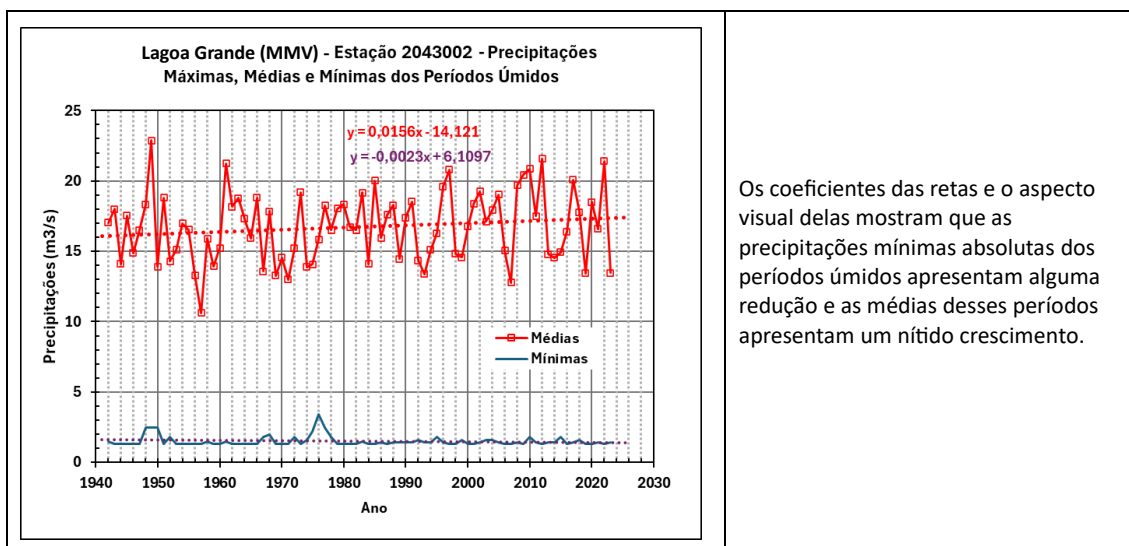
Para melhor visualização, os gráficos acima são reproduzidos a seguir, porém sem as curvas das precipitações máximas, o que permite aumentar a escala e, assim, evidenciar o comportamento das precipitações mínimas e das médias.



Os coeficientes das retas de regressão, bem como o aspecto visual delas, mostram que as precipitações mínimas absolutas anuais apresentam alguma redução e as médias anuais mostram-se ligeiro aumento (coeficiente pequeno, positivo).



As precipitações mínimas absolutas dos períodos secos apresentam alguma redução e as médias mostram-se praticamente estáveis (coeficiente pequeno, positivo), embora com um pequeno crescimento.



Os coeficientes das retas e o aspecto visual delas mostram que as precipitações mínimas absolutas dos períodos úmidos apresentam alguma redução e as médias desses períodos apresentam um nítido crescimento.

Conclusão Geral:

A série histórica de precipitações indica uma tendência de redução nas precipitações mínimas absolutas, tanto anuais quanto nos períodos secos e úmidos, enquanto as médias anuais e dos períodos secos se mantêm estáveis ou com pequeno crescimento, embora médias dos períodos úmidos mostre um aumento mais significativo. As precipitações máximas absolutas aumentaram levemente, mas essa tendência é influenciada por eventos extremos recentes, como o recorde de 2022. Sem esse valor, a tendência é de redução, embora não muito acentuada.

Alguns anos destacam-se com volumes diários de chuvas bem altos, ainda mais se considerarmos que alguns desses anos pertencem a ciclos de anos mais secos: 1950, 1979, 1988, 2008, 2009, 2018, 2019 e 2022. O aumento da frequência de eventos extremos indica uma maior variabilidade climática nas últimas décadas.

4.9.8 Índices de Anomalias

É comum que o monitoramento das condições climáticas de uma determinada região seja realizado por meio do emprego de índices climáticos. Com base neles, pode-se desenvolver um sistema de acompanhamento das características dos anos de seca ou úmidos, com informações anuais, sazonais ou mensais, com as quais pode-se conhecer a climatologia de uma região ou mesmo, a regionalização da precipitação para determinado local (Araújo et al., 2009, in Alves e Silva, 2010).

O índice para avaliação e precipitações proposto pela WMO (*Lincoln Declaration 78 on Drought Indices*, WMO 2009) é o denominado Standardized Precipitation Index (SPI). Ele foi desenvolvido por McKee et al. em 1993 e permite avaliar déficits ou excessos de precipitação em diferentes escalas de tempo (e.g., 1, 3, 6, 12 meses), assim como vários outros índices. O SPI mede a anomalia de precipitação em unidades de desvio padrão em relação à média histórica, ajustando os dados de precipitação a uma distribuição probabilística, normalmente a distribuição Gama (pois a precipitação geralmente não segue uma distribuição normal) e, a seguir, transformando a probabilidade acumulada da distribuição Gama a uma distribuição normal, por meio de uma função de transformação. O ajuste é feito utilizando métodos de máxima verossimilhança para estimar os parâmetros da distribuição Gama.

Trata-se, portanto, de um cálculo é complexo e, por isso, outros índices de cálculo mais simplificado e com resultados similares foram propostos e têm sido adotados em vários estudos (Hänsel, 2016).

No presente estudos utilizamos dois índices de cálculo mais simplificado e os aplicamos tanto para análise de precipitações como para a análise das vazões, pois ambas são grandezas hidrológicas similares e interrelacionadas.

4.9.8.1 Índice de Anomalia de Chuva – IAC (Rainfall Anomaly Index - RAI)

De acordo com Repelli et al. (1998), o Índice de Anomalia de Chuva (IAC) é apropriado para avaliação do grau de severidade e duração dos períodos secos e úmidos em regiões semiáridas e ou tropicais. Alatise & Ikumawoyi (2007) utilizaram 4 técnicas, o Componente Estocástico das Séries (CES), o Índice de Anomalia de Chuva (IAC), a Precipitação Acumulada de Informação (PAI) e o Índice de Gravidade da Seca (IGS) e constataram que, das quatro técnicas, o Índice de Anomalia de Chuva (IAC) mostrou-se como a técnica mais adequada, devido à sua capacidade de fornecer mais informações sobre a ocorrência, gravidade e impacto da seca na área de estudo. O IAC é um índice tão robusto quanto o SPI e será adotado no presente estudo.

O Índice de Anomalia de Chuva – IAC (Rainfall Anomaly Index – RAI) foi desenvolvido por Rooy (1965) e utilizado por Freitas (2004, 2005) e Araújo et al. (2007), que o adaptaram. Ele pode obtido a partir das equações:

$$IAC = 3 \left[\frac{N - \bar{N}}{M - \bar{N}} \right] \quad \text{para anomalias positivas, ou seja, } N - \bar{N} > 0.$$

$$IAC = -3 \left[\frac{N - \bar{N}}{\bar{X} - \bar{N}} \right] \quad \text{para anomalias negativas, ou seja, } N - \bar{N} < 0.$$

onde:

N: precipitação do período a ser analisado, ou seja, precipitação média de cada mês, ano ou outro período da série a ser analisada;

\bar{N} : Precipitação média de todo o período histórico da série a ser analisada;

\bar{M} : Média das 10 **maiores** precipitações de todo o período histórico da série a ser analisada;

\bar{X} : Média das 10 **menores** precipitações de todo o período histórico da série a ser analisada.

A constante de valor 3 é um simplesmente um fator de escala para facilitar a utilização dos resultados e sua comparação com limites propostos pelo autor (Rooy, 1965). Esse fator pode ser modificado, para comparação com outros índices, sem afetar em nada o significado dos resultados, pois o que importa são os valores relativos a serem comparados.

É importante ressaltar que este índice não apresenta um padrão de inclusão em uma categoria que qualifique o evento meteorológico. Um valor acima de zero significa que o resultado foi comparado com a média histórica, classificando o período como seco ou úmido, ou seja, quanto maior o valor (em modulo) mais intenso o fenômeno.

A classificação da intensidade dos fenômenos analisados pelo índice IAC (ou RAI), de acordo com suas definições originais, é apresentada na tabela a seguir (Hänsel, 2016):

Original definition (van Rooy 1965)	
RAI	Description
≥ 3.00	Extremely wet
2.00 to 2.99	Very wet
1.00 to 1.99	Moderately wet
0.50 to 0.99	Slightly wet
-0.49 to 0.49	Near normal
-0.99 to -0.50	Slightly dry
-1.99 to -1.00	Moderately dry
-2.99 to -2.00	Very dry
≤ -3.00	Extremely dry

A partir da metodologia de Freitas (2004 e 2005) e Araujo *et al.* (2007) será foi utilizada a seguinte classificação de anos secos e úmidos:

Índice de Anomalia de Chuva (IAC)	Faixa do IAC	Classe de Intensidade
	De 4 acima	Extremamente Úmido
2 a 4	Muito Úmido	
0 a 2	Úmido	
0 a -2	Seco	
-2 a -4	Muito Seco	
De -4 abaixo	Extremamente Seco	

Fonte: Araujo *et al.* (2007).

4.9.8.2 Índice de Anomalia de Precipitação Padronizado – IAPP (Standardized Rainfall Anomaly Index - SRAI)

O Índice de Anomalia de Precipitação Padronizado – IAPP foi utilizado por vários autores (Agnew e Chappel, 1999; Woldeamlak e Conway, 2007, entre eles) para examinar as tendências de séries históricas, permitindo a determinação dos anos secos e chuvosos e avaliar a frequência e a gravidade das secas Seu cálculo é feito pela seguinte fórmula:

$$Z = \frac{(Xi - \mu)}{s}$$

onde, Z é o IAPP; Xi é a precipitação do período específico em análise (ano ou mês, por exemplo); 's' é o desvio padrão da precipitação de todos os períodos, ou seja, de todos os valores da série analisada e μ é a precipitação média de todos os valores da série.

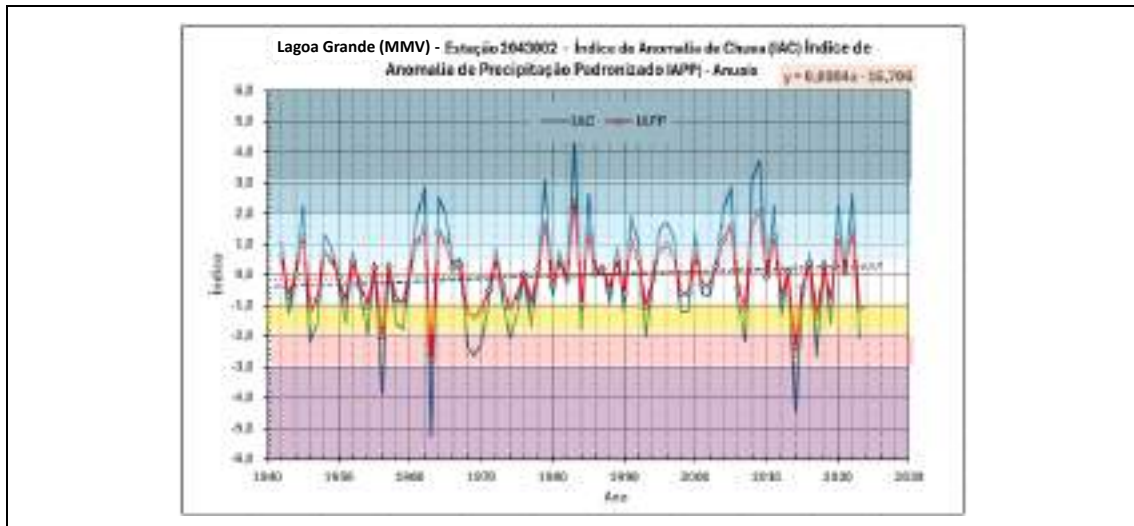
De acordo com Agnew e Chappel (1999), o valor do índice de anomalia de precipitação padronizada e as classes são os mostrados na seguinte tabela:

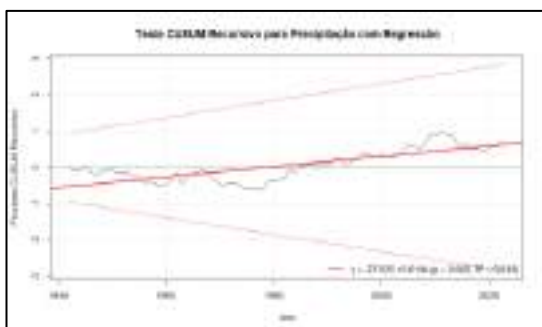
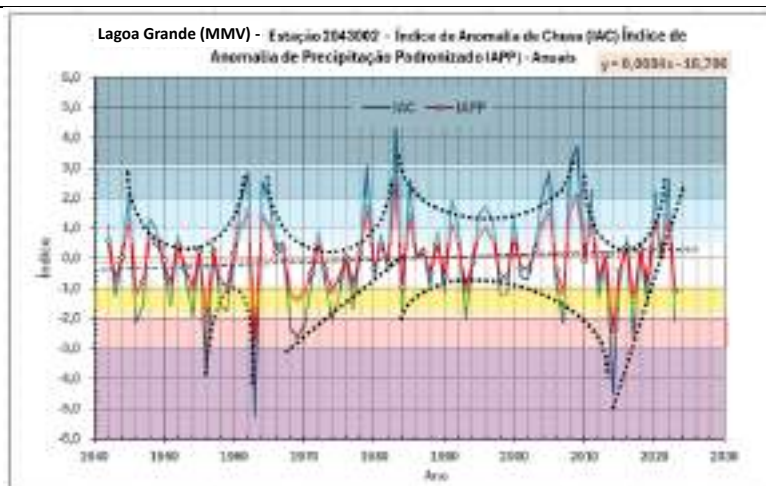
Standardized rainfall anomaly index value and classes	
Rainfall anomaly index (RAI)	RAI value Category/class
>2.0	Extremely wet
1.5 to 1.99	Very wet
1.0 to 1.49	Moderately wet
-0.84 to 0.99	Near normal
-0.84 to -1.28	Moderate drought
-1.28 to -1.65	Severe drought
< -1.65	Extreme drought

4.9.8.3 Índices de Anomalia Aplicados às Precipitações – Lagoa Grande (MMV) - Gráficos

Os gráficos a seguir apresentam os resultados dos cálculos dos índices IAC E IAPP aplicados aos valores acumulados anuais das precipitações registradas pela Estação da Lagoa Grande (MMV) e aos valores acumulados dos períodos secos e úmidos de cada ano.

As faixas coloridas foram adicionadas aos gráficos para facilitar a visualização dos limites de severidade, conforme tabelas acima. Os gráficos dos períodos úmidos e secos apresentam 3 faixas para as anomalias negativas (seca) e três para as positivas (úmido), conforme tabela mais simplificada proposta por Araújo et al. (2007). Os gráficos dos valores anuais apresentam 4 faixas para as anomalias negativas (seca) e três para as positivas (úmido), além da faixa central considerada como sendo de valores próximos da normalidade, conforme tabela original de van Rooy (1965).



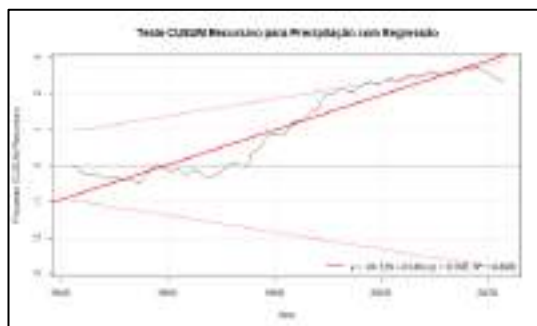
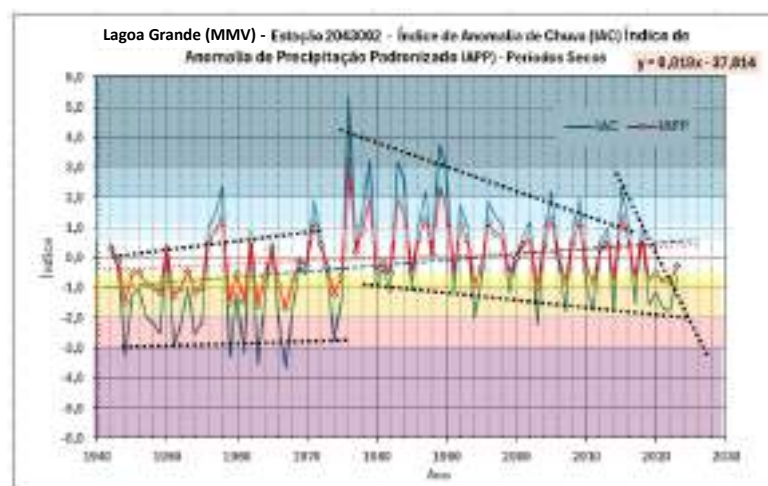
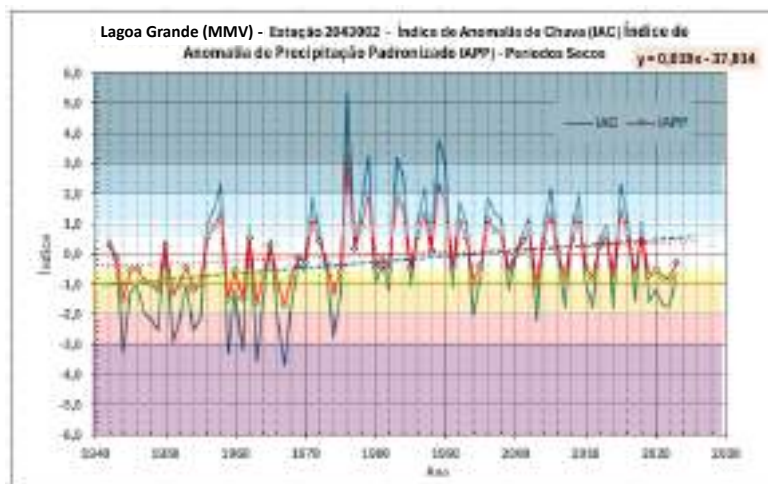


CUSUM Recursivo e CUSUM Tradicional	
Média (valor de referência)	-0.03
Desvio Padrão	1.88
Limiar de Decisão (H)	9.39
Tendência de AUMENTO detectada (C ⁺ > H)	
Tendência de DIMINUIÇÃO detectada (C ⁻ > H)	
Quant. de Dados da Série Analisada	82
Valor mínimo	-5.28
1º Quartil	-1.36
Mediana (2º Quartil)	-0.07
Média	-0.03
3º Quartil	1.17
Valor Máximo	4.34
Variância	3.52
Desvio Padrão	2.52
Equação	$y = -27.935 + 0.014x$ (p = 0.000, R ² = 0.618)
Coefficiente angular	-0.014 (p-valor = 0.000)
R ² do modelo	0.618

Os Índices de Anomalia de Chuva da Estação Lagoa Grande (MMV) relativos aos valores anuais acumulados de precipitação apresentam tendência nítida de crescimento ao longo dos 83 anos da série histórica, ou seja, tendência ao aumento das anomalias positivas e redução das negativas.

As linhas tracejadas superpostas ao gráfico dos índices anuais procuram destacar tendências e comportamentos de subperíodos da série. As anomalias positivas apresentaram picos em 1945, em 1962, 1964, 1979, 1983, 2005, 2009, 2020 e 2022, com ciclos de aproximadamente 18, 14, 26 e 14 anos.

As anomalias negativas apresentaram picos em 1956, 1963 e 2014, podendo-se destacar dois períodos de redução gradativa das anomalias negativas: de 1969 a 1983 e de 2004 a 2022.



CUSUM Recursivo e CUSUM Tradicional	
Média (valor de referência)	-0.22
Desvio Padrão	1.89
Limiar de Decisão (H)	9.45
Tendência de AUMENTO detectada ($C^+ > H$)	
Tendência de DIMINUIÇÃO detectada ($C^- > H$)	
Quant. de Dados da Série Analisada	82
Valor mínimo	-3.69
1º Quartil	-1.72
Mediana (2º Quartil)	-0.49
Média	-0.22
3º Quartil	1.04
Valor Máximo	5.33
Variância	3.57
Desvio Padrão	1.89
Equação	$y = -94.129 + 0.048x$ ($p = 0.000$, $R^2 = 0.898$)



Coeficiente angular	-0.048 (p-valor = 0.000)
R ² do modelo	0.898

Os Índices de Anomalia de Chuva da Estação Lagoa Grande (MMV) relativo aos valores acumulados de precipitação dos períodos secos de cada ano (maio a setembro) também apresentam tendência nítida de crescimento ao longo dos 82 anos da série histórica, ou seja, tendência ao aumento das anomalias positivas redução das negativas.

Aparentemente, há uma tendência de redução dos valores mais extremos dos índices (picos menores) a partir de 1990, o que sugere uma menor variabilidade climática dos períodos secos.

Picos de anomalias positivas ocorreram em 1958, 1971 e em 5 anos do período 1976 a 1989.

As linhas tracejadas superpostas ao gráfico dos índices dos períodos secos procuram destacar tendências e comportamentos de subperíodos da série.

Pode-se observar que o período de 1941 (início da série) a 1975 apresentou anomalias predominantemente negativas, indicando 34 anos de períodos secos com chuvas abaixo da média da série, porém com tendência de redução das anomalias negativas.

A partir de 1976 ocorreram várias anomalias positivas com índices altos, sugerindo uma alteração climática nos períodos secos, porém os índices positivos gradativamente se reduziram e os negativos se intensificaram até o final da série, em 2023, apontando uma tendência, ao longo dos últimos 47 anos, de agravamento das secas. De forma particular, houve uma redução pronunciada dos índices positivos a partir de 2015, o que indica secas mais severas nos últimos 8 anos da série.

CUSUM Recursivo

- 1943-1975: Oscilações entre -1 e 0: indicam que as anomalias de chuva nos períodos secos ficaram ligeiramente abaixo da média histórica; período com déficits pluviométricos moderados durante as estações secas; padrão típico de um regime mais seco, com anos normais a secos
- 1975-2023: Crescimento contínuo acima da linha zero, ultrapassando a reta vermelha superior em 1990
- Mudança estrutural clara a partir de 1975: as anomalias de chuva durante períodos secos tornaram-se consistentemente menos severas (mais próximas da média ou acima).
- Coeficiente fortemente positivo da reta de regressão confirma tendência de redução da severidade das secas
- Retas Divergentes (-3 a +3): ultrapassagem da reta superior em 1990 → mudança estatisticamente significativa no regime pluviométrico; tendência de crescimento sustentado → processo irreversível ou de longa duração (a evidência acumulada da mudança tornou-se estatisticamente incontestável).

CUSUM Tradicional

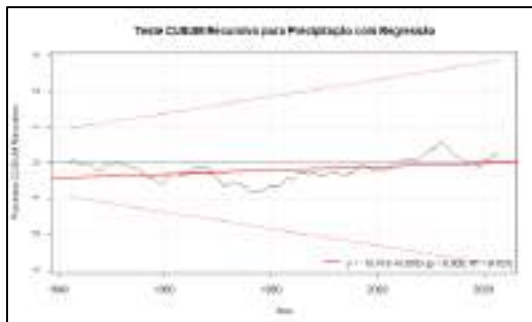
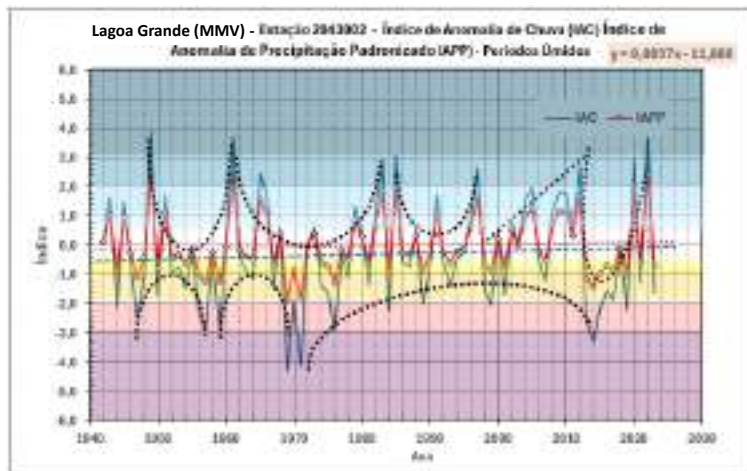
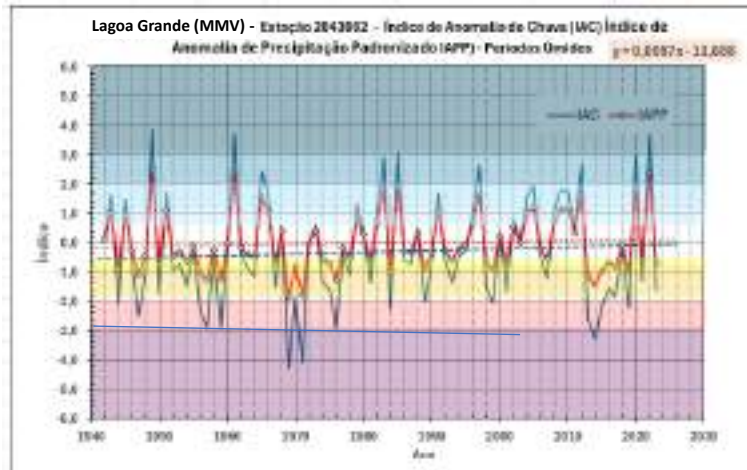
Curva CUSUM Superior (C⁺):

- 1943-1975: Oscilações entre 0 e +8: períodos secos dentro da variabilidade histórica; ausência de aumento persistente da média antes de 1975.
- 1975-2023: Crescimento acima do limiar (H=9.45), atingindo pico de ~37: tendência forte de redução na severidade das secas (os períodos secos ficaram mais úmidos em relação à média histórica); mudança positiva sustentada do nível do IAC, com grande magnitude (valores 30+ são muito acima do limiar).
- Queda recente (2017-2023): pode indicar ligeiro retorno a condições mais secas, mas ainda acima do limiar

Curva CUSUM Inferior (C⁻):

- 1943-1968: Crescimento até pico de 32: período com secas extremamente severas (anomalias negativas fortes).
- 1968-2002: O CUSUM inferior grande em 1968 mostra que, no período inicial, houve tendência a valores abaixo do alvo (anos relativamente secos); o retorno gradual a zero até 2002 indica que a pressão por quedas se dissipou no regime novo; ficar próximo de zero depois disso sugere nenhuma evidência de quedas persistentes recentes.
- 2002-2023: Oscilações próximas a zero: secas severas tornaram-se eventos raros

Em conjunto, os dois lados contam a mesma história: regime mais seco predominante antes de ~1975; transição em meados dos anos 1970; regime mais úmido e tendência positiva após 1975.



CUSUM Recursivo e CUSUM Tradicional	
Média (valor de referência)	-0.29
Desvio Padrão	1.86
Limiar de Decisão (H)	9.28
Tendência de AUMENTO detectada ($C^+ > H$)	
Tendência de DIMINUIÇÃO detectada ($C^- > H$)	
Quant. de Dados da Série Analisada	82
Valor mínimo	-4.26
1º Quartil	-1.60
Mediana (2º Quartil)	-0.54
Média	-0.29
3º Quartil	1.03
Valor Máximo	3.87
Variância	3.45
Desvio Padrão	1.86



Equação	$y = -10.418 + 0.005x$ ($p = 0.000$, $R^2 = 0.167$)
Coefficiente angular	-0.005 (p -valor = 0.000)
R ² do modelo	0.167

Os Índices de Anomalia de Chuva da Estação Lagoa Grande (MMV) relativo aos valores acumulados de precipitação dos períodos úmidos apresentam comportamento geral similar ao dos índices anuais, com tendência nítida de crescimento ao longo dos 82 anos da série histórica, ou seja, tendência ao aumento das anomalias positivas e redução das negativas.

Como nos dois casos anteriores, as linhas tracejadas superpostas ao gráfico dos índices anuais procuram destacar tendências e comportamentos de subperíodos da série. A anomalias positivas dos períodos úmidos apresentaram picos em 1949, em 1961, 1965, 1983, 1985, 1997, 2012, 2020 e 2022, com ciclos de aproximadamente 12, 18, 12, 15 e 9 anos.

As anomalias negativas apresentaram picos em 1956, 1963 e 2014, podendo-se destacar dois períodos de redução gradativa das anomalias negativas: de 1969, 1971 e 2014.

CUSUM Recursivo

- 1943-2003: Oscilações entre -1 e 0: as anomalias ficaram ligeiramente abaixo do padrão histórico; período com possíveis déficits pluviométricos moderados.
- 2003-2023: Oscilações entre 0 e +0,5: mudança para anomalias ligeiramente acima da média histórica; sugere um período mais úmido recente.
- Reta de Regressão Positiva: tendência de aumento gradual nas anomalias ao longo do tempo; pode indicar mudança climática regional (aumento de chuvas) e/ou alterações no uso do solo.
- estabilidade de parâmetros ao nível usual (5%): não há evidência estatística forte de quebra estrutural nos resíduos do modelo monitorado (curva entre as retas divergentes vermelhas (-3 a +3): nenhum cruzamento significativo → mudanças estruturais não detectadas); leve viés positivo após ~2003 sugere deriva fraca para cima (tendência/modulação de baixa magnitude), insuficiente para romper as bandas.

CUSUM Tradicional

Curva CUSUM Superior (C⁺):

- 1943-1995 - Oscilações entre 0 e +8; anomalias próximas à média, sem tendência clara.
- 1995-2010: Crescimento até pico de 20 (acima de H=9,38): tendência forte de aumento nas anomalias positivas (deslocamento positivo da média a partir de meados dos anos 1990); ex.: eventos extremos como chuvas intensas frequentes.
- 2010-2019: Queda para 9,5 (limiar): manutenção de anomalias positivas, porém menos intensas.
- A partir de 2019: persistência do regime mais úmido.

Curva CUSUM Inferior (C⁻):

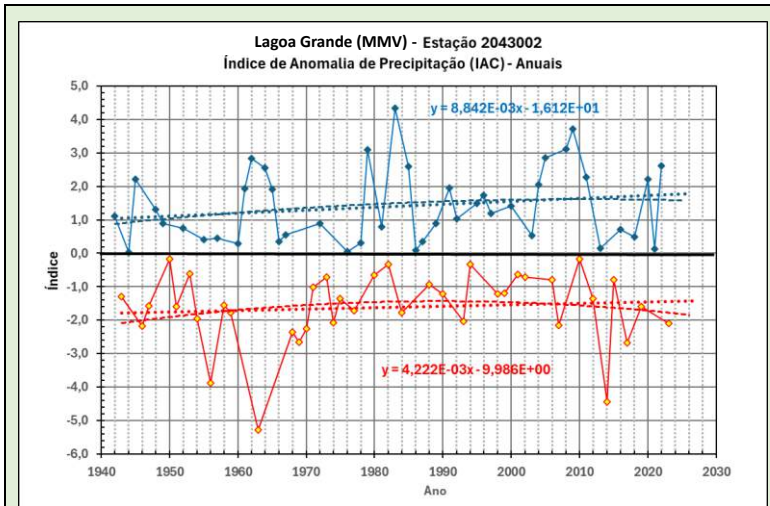
- 1943-1975: picos em 1960 (9,5) e 1975 (17): períodos de anomalias negativas extremas (secas severas).
- 1975-2010: Queda sustentada das anomalias negativas até zero; redução na frequência/intensidade de secas.
- 2010-2019: pequeno pico (+3): retorno moderado de condições mais secas

Resumo:

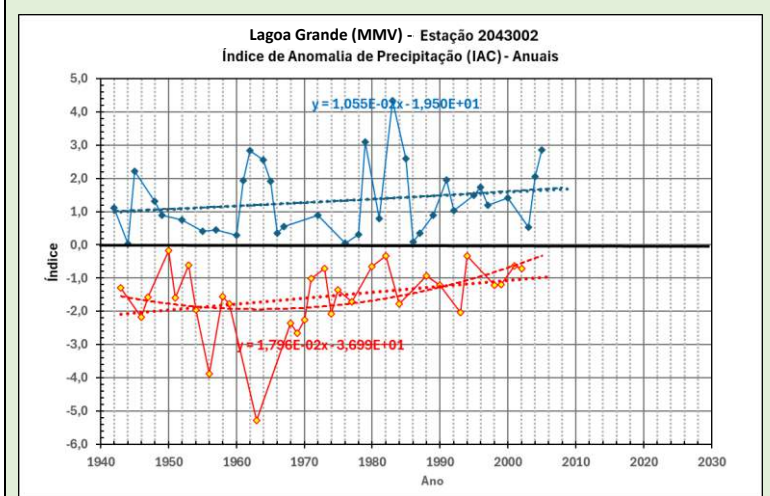
Há evidência robusta (via CUSUM tradicional) de que a série entrou num regime mais úmido a partir de meados dos anos 1990, com máximo por volta de 2010, arrefecimento em seguida, e persistência do regime (não houve retorno ao patamar antigo do período 1943-1975).

O Rec-CUSUM indica que, do ponto de vista de estabilidade dos resíduos do modelo, não houve ruptura forte; o que se vê é viés positivo fraco pós-2003, coerente com a leitura de mudança de regime de baixa/média magnitude, prolongada, porém sem evidência de quebra brusca no processo gerador (ao nível padrão).

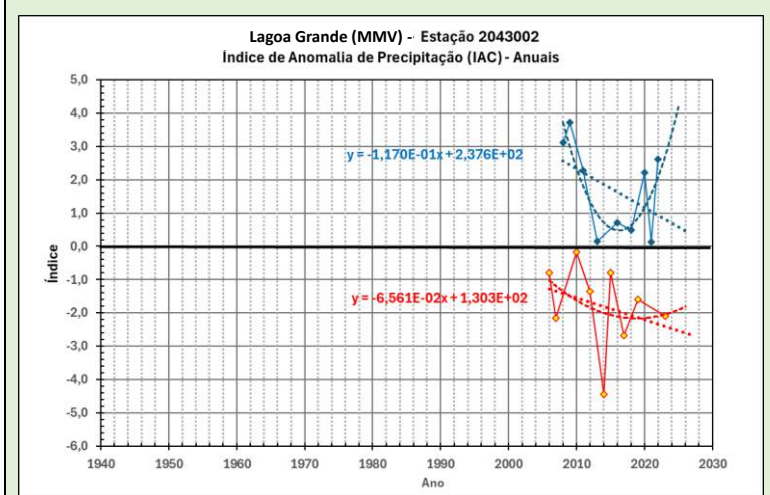
Com o objetivo de evidenciar visualmente, ainda mais, o comportamento das anomalias dos valores acumulados de precipitação anuais e dos períodos úmido e seco, apresentamos os gráficos a seguir nos quais os conjuntos de anomalias positivas e negativas foram separados em duas séries, permitindo o traçado de curvas de regressão separadas para cada conjunto. Para cada conjunto, são adicionadas ao gráfico duas curvas, sendo uma de regressão linear e outra, polinomial de segundo grau.



Considerando-se um período anual para a análise, o gráfico mostra tendência, ao longo dos 83 anos da série, de aumento do módulo dos valores das anomalias positivas e redução do módulo das negativas, apesar dos ciclos de seca e umidade, o que indica uma tendência de aumento da pluviosidade se a série é considerada em sua totalidade.

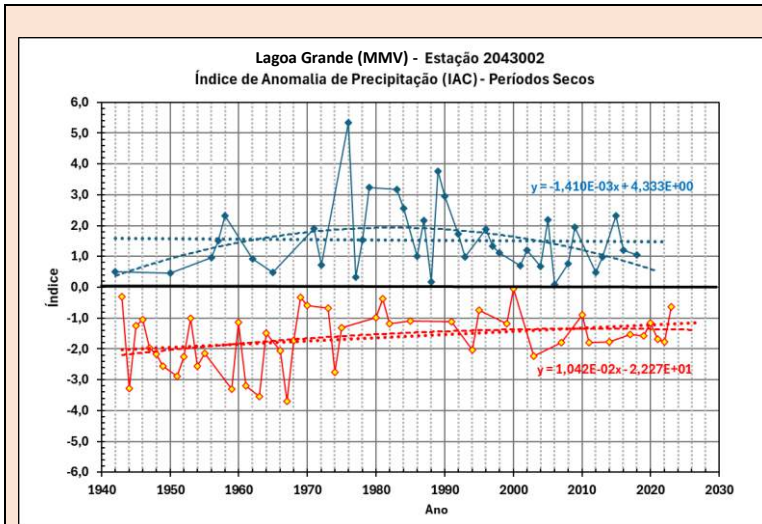


Se, no gráfico acima, consideramos apenas os primeiros 65 anos (até 2005), a tendência (gráf. ao lado) é de aumento do módulo dos valores das anomalias positivas e redução do módulo das negativas, o que indica uma tendência de aumento da pluviosidade nos primeiros 65 anos da série.

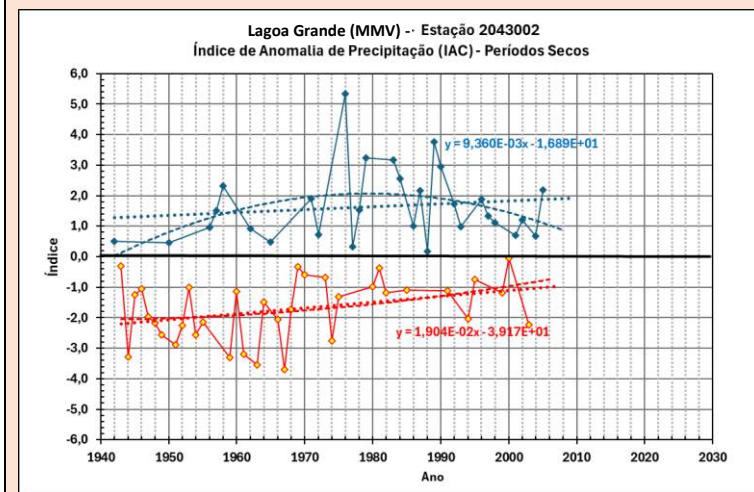


Se consideramos apenas os últimos 18 anos, a tendência anual é de acentuada redução dos valores dos valores absolutos das anomalias positivas e aumento dos valores absolutos das negativas, o que denota uma tendência de redução da pluviosidade nos últimos 18 anos.

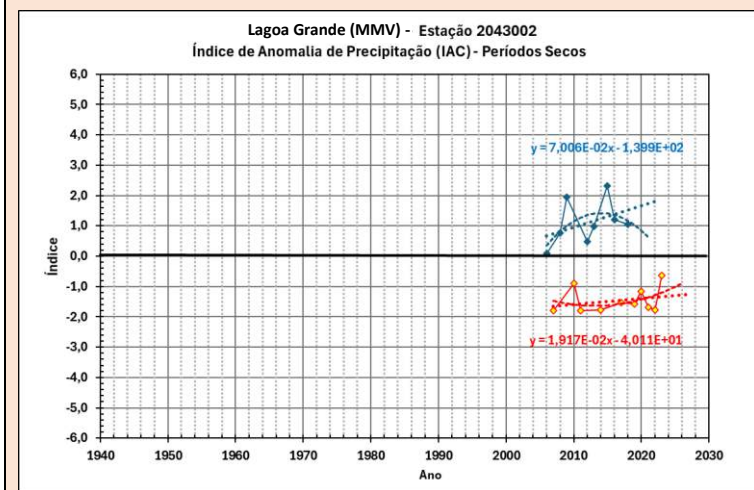
Essas tendências são opostas às da série considerada como um todo, assim como dos primeiros 65 anos da série.



Considerando-se o período seco de cada ano (maio a setembro) da série histórica da Lagoa Grande (MMV), observa-se uma tendência geral, ao longo dos 83 anos da série, de estabilidade dos valores absolutos dos índices das anomalias positivas e redução dos valores absolutos dos índices das negativas, ou seja, uma leve tendência de aumento da pluviosidade dos períodos secos.



Se, no gráfico acima, dos períodos secos da Lagoa Grande (MMV), consideramos apenas os primeiros 65 anos (até 2005), a tendência (gráf. ao lado) é de aumento do módulo dos valores das anomalias positivas e redução do módulo das negativas, o que indica uma tendência de aumento da pluviosidade dos períodos secos nos primeiros 64 anos da série.



Se consideramos apenas os últimos 18 anos dos períodos secos da Lagoa Grande (MMV), a tendência é, também, de aumento do módulo dos valores das anomalias positivas e redução do módulo das negativas, o que indica uma tendência de aumento da pluviosidade dos períodos secos últimos 18 anos da série.

<p style="text-align: center;">Lagoa Grande (MMV) - Estação 2043002 Índice de Anomalia de Precipitação (IAC) - Úmidos</p>	<p>Quando se analisa os períodos úmidos da Lagoa Grande (MMV) (outubro a dezembro de um ano e janeiro a abril do ano seguinte) observa-se uma estabilidade nos valores dos módulos tanto das anomalias positivas quanto das negativas, o que indicaria pouca variação das características climáticas dos períodos úmidos da região durante os 83 anos da série.</p>
<p style="text-align: center;">Barragem das Codornas - Estação 2043002 Índice de Anomalia de Precipitação (IAC) - Úmidos</p>	<p>Entretanto, se, consideramos apenas os primeiros 65 anos (até 2005), a tendência dos períodos úmidos, mostrada no gráfico ao lado, é de redução dos valores absolutos tanto das anomalias positivas quanto das negativas (retas convergentes), ou seja, uma certa estabilização dos valores médios das precipitações dos períodos úmidos em torno da média desses períodos ao longo dos primeiros 65 anos da série.</p>
<p style="text-align: center;">Lagoa Grande (MMV) - Estação 2043002 Índice de Anomalia de Precipitação (IAC) - Úmidos</p>	<p>Mas, se consideramos apenas os períodos úmidos dos últimos 18 anos, a tendência é de acentuado aumento dos valores absolutos tanto das anomalias positivas quanto das negativas, ou seja, o que indica um agravamento da variabilidade climática dos períodos úmidos nos últimos 18 anos, ou seja, alguns períodos úmidos com chuvas mais extremas e outros com menor pluviosidade.</p>

4.9.8.4 Índices de Anomalia Aplicados às Precipitações – Lagoa Grande (MMV) - Valores

Para completar a análise feita por meio dos gráficos apresenta-se a seguir uma análise comparativa dos valores dos índices baseada em somatórios de conjuntos e subconjuntos.



4.9.8.4.1 Série Completa

As tabelas a seguir compilam o somatório dos valores dos Índices de Anomalias de Chuva referentes à série completa (1941 a 2023) e permitem comparações úteis à análise das anomalias da série.

Estação Pluviométrica Lagoa Grande (MMV)						
IAC - Índice de Anomalias de Chuva – Série Completa						
Período	IAC Positivo			IAC Negativo		
	Anos com IAC Positivo	Soma	Média	Anos com IAC Negativo	Soma	Média
Anual	43	60,67	1,41	39	-63,14	-1,62
Seco	37	56,65	1,53	45	-74,85	-1,66
Úmido	31	52,17	1,68	51	-75,95	-1,49

Análise dos valores da tabela:

Anos Cívis:

A quantidade de anos com chuvas acima da média (43) é ligeiramente maior que a de anos com chuvas abaixo da média (39). Isso sugere uma distribuição quase equilibrada entre anos úmidos e secos ao longo da série, com uma leve predominância dos anos úmidos (53% positivos).

Apesar da maior quantidade de anos positivos, a soma dos IAC negativos (-63,14) é maior em módulo do que a dos positivos (+60,67). Isso tem implicações importantes:

- Os anos secos foram, em média, mais severos do que os anos úmidos foram excessivos.
- Isso indica uma assimetria negativa na distribuição das anomalias: as secas foram menos frequentes, mas mais intensas, enquanto os anos úmidos foram mais numerosos, porém menos extremos.

Média dos Índices por Grupo

- Média dos anos úmidos (positivos): $+60,67/43 \approx +1,41$
- Média dos anos secos (negativos): $-63,14/39 \approx -1,62$

Isso reforça que os anos secos apresentaram anomalias mais intensas (em média -1,62) do que os anos úmidos (+1,41).

Conclusão: A série histórica de IAC da Estação revela um comportamento climático quase equilibrado na frequência entre anos secos e úmidos, com leve predominância de anos chuvosos. No entanto, a intensidade das secas foi maior, indicando que os anos secos, embora ligeiramente menos frequentes, foram mais severos. Isso aponta para um regime climático com eventos secos mais impactantes, o que pode demandar atenção especial na gestão de recursos hídricos e planejamento de estiagens.

Períodos Secos:

A maioria dos anos apresentou anomalias negativas durante o período seco (45 anos, ou 55% do total). Apenas 37 anos (45%) apresentaram anomalias positivas, ou seja, chuvas acima da média no período seco. Isso sugere que os períodos secos realmente apresentaram tendência a ser mais secos, mas com frequência considerável de exceções úmidas (quase metade dos anos).

A soma dos IAC negativos (-74,85) é substancialmente maior em módulo que a soma dos positivos (+56,65). Isso indica que:



- Os anos secos no período seco foram mais intensamente secos do que os anos úmidos foram chuvosos.
- Há uma assimetria negativa acentuada, o que reforça a ocorrência de secas mais severas do que os excessos de chuva nesse período.

Intensidade Média das Anomalias

- Média dos anos com anomalias positivas: $+56,64/37 \approx +1,53$
- Média dos anos com anomalias negativas: $-74,85/45 \approx -1,66$

Essa diferença mostra que as secas foram mais intensas, em média, do que os episódios de chuva acima da média durante os períodos secos o que pode indicar eventos extremos de estiagem.

Conclusão: A análise dos IAC nos períodos secos mostra um domínio dos anos com anomalias negativas, tanto em frequência quanto em intensidade. Apesar de uma quantidade significativa de anos com chuvas acima da média, os períodos secos são marcados por secas mais frequentes e severas do que os excessos de chuva. Isso indica um comportamento climático mais crítico na estação seca, exigindo atenção especial à gestão de estiagens, armazenamento de água e planejamento agrícola.

Períodos Úmidos:

51 anos (61%) apresentaram anomalias negativas, ou seja, a maioria dos anos teve chuvas abaixo da média durante o período úmido. Apenas 31 anos (39%) registraram anomalias positivas, com chuvas acima da média. Isso indica uma tendência predominante à redução da pluviosidade nos períodos tradicionalmente chuvosos, o que é um comportamento preocupante do ponto de vista climático.

A soma das anomalias negativas ($-75,95$) é bem maior (em módulo) do que a soma das positivas ($+52,17$). Isso indica uma assimetria negativa acentuada, significando que:

- Os anos com chuvas abaixo da média foram mais numerosos e mais severos do que os anos úmidos foram intensos.
- O período chuvoso se tornou menos confiável como estação de recarga hídrica.

Intensidade Média das Anomalias

- Média dos anos positivos: $+52,17/31 \approx +1,68$
- Média dos anos negativos: $-75,95/51 \approx -1,49$

Assim, ainda que as anomalias negativas sejam mais frequentes, as positivas são ligeiramente mais intensas, em média. Isso sugere que, quando ocorrem, os períodos úmidos com chuva acima da média tendem a ser bem chuvosos, mas são menos frequentes.

Conclusão: A análise dos IAC dos períodos úmidos revela um comportamento climático preocupante:

- A maior parte dos anos tem registrado chuvas abaixo da média durante a estação úmida, contrariando a expectativa de que esse período compense os déficits dos períodos secos.
- A predominância de anos mais secos (chuvas abaixo da média) na estação chuvosa indica uma tendência de comprometimento da regularidade e confiabilidade hídrica anual. Isso pode ser reflexo de mudanças climáticas regionais e aponta para maior risco de estresse hídrico, mesmo em anos sem secas extremas nos períodos secos.
- Por outro lado, embora menos frequentes, os anos com chuvas acima da média no período úmido tendem a ser mais intensos. Isso sugere uma maior propensão à

ocorrência de eventos extremos de chuva durante a estação chuvosa, capazes de produzir volumes significativamente acima da média, o que pode estar associado a fenômenos como enchentes, deslizamentos ou alagamentos, especialmente se concentrados em períodos curtos. Assim, mesmo em um contexto de predomínio de déficits pluviométricos nos períodos úmidos, os eventos extremos de chuva permanecem como uma ameaça climática relevante e crescente.

4.9.8.4.2 Comparação dos Períodos de 1941 a 2005 e 2006 a 2023

As tabelas a seguir compilam o somatório dos valores dos Índices de Anomalias de Chuva referentes aos períodos de 1941 a 2005 e de 2006 a 2023.

Estação Pluviométrica Lagoa Grande (MMV)						
IAC - Índice de Anomalias de Chuva - 1941 a 2005						
Período	IAC Positivo			IAC Negativo		
	Anos com IAC Positivo	Soma	Média	Anos com IAC Negativo	Soma	Média
Anual	34	45,23	1,33	30	-47,05	-1,57
Seco	29	47,80	1,65	35	-60,21	-1,72
Úmido	24	37,49	1,56	40	-57,36	-1,43

Estação Pluviométrica Lagoa Grande (MMV)						
IAC - Índice de Anomalias de Chuva - 2006 a 2023						
Período	IAC Positivo			IAC Negativo		
	Anos com IAC Positivo	Soma	Média	Anos com IAC Negativo	Soma	Média
Anual	9	15,44	1,72	9	-16,09	-1,79
Seco	8	8,85	1,11	10	-14,65	-1,46
Úmido	7	14,68	2,10	11	-18,59	-1,69

A comparação das médias dos índices permite a conclusões:

Anos Cíveis:

Aumento da intensidade das anomalias extremas: A média das anomalias positivas aumentou de +1,33 (primeiros 64 anos) para +1,72 (18 anos mais recentes), o que significa que os anos chuvosos tiveram sua pluviosidade aumentada no período mais recente em comparação com o anterior. Simultaneamente, a média das anomalias negativas também aumentou em módulo de -1,57 (primeiros 64 anos) para -1,79 (18 anos mais recentes), indicando que os anos secos se tornaram mais secos. Ou seja, tanto as anomalias positivas quanto as negativas tornaram-se mais intensas nos últimos 18 anos. Isso reflete uma maior variabilidade climática recente, com episódios mais extremos de excesso e de déficit de chuvas.

A presença de eventos mais extremos tanto de seca quanto de chuva nos anos recentes é consistente com os efeitos esperados de mudanças climáticas, que tendem a amplificar a variabilidade do regime hidrológico.

Períodos secos:

Redução da intensidade das anomalias em geral: Tanto os IAC positivos quanto os negativos apresentaram redução de intensidade média nos últimos 18 anos, o que indica que os eventos extremos (tanto úmidos quanto secos) durante o período seco estão se tornando menos



intensos, ou seja, ocorreu uma certa estabilização do clima durante os períodos secos, com uma redução na ocorrência de secas extremas e de chuvas anormalmente elevadas nesse período.

A queda na média dos IAC positivos (de 1,65 para 1,11) aponta para uma menor frequência ou intensidade de chuvas significativas durante a estação seca nos últimos anos, ou seja, uma diminuição da contribuição pluviométrica no período seco, o que pode ter implicações para a recarga hídrica e sustentabilidade dos ecossistemas nesse intervalo. Já a redução da média dos negativos (de -1,72 para -1,46) sugere que, embora ainda ocorram secas, elas são menos severas do que no passado.

Períodos úmidos:

Aumento da intensidade das anomalias positivas e das negativas nos últimos anos: a média dos IAC positivos subiu de 1,56 para 2,10, indicando que os anos com chuvas acima da média no período úmido tornaram-se muito mais intensos. Esse aumento aponta para uma elevação no potencial de eventos extremos de chuva (como tempestades intensas, enchentes e alagamentos).

A média dos IAC negativos também aumentou em módulo, de -1,43 para -1,69, o que indica que os anos com chuvas abaixo da média também se tornaram mais secos, ou seja, as secas no período úmido são mais acentuadas do que eram anteriormente.

Resumo: O fato de tanto as anomalias positivas quanto as negativas terem se tornado mais intensas demonstra um claro agravamento da variabilidade climática da estação chuvosa. Isso aponta para uma alternância mais frequente entre anos de chuvas excessivas e deficiências severas, o que compromete a previsibilidade e aumenta os riscos hidrológicos.

Pode-se concluir que nos últimos 18 anos os períodos úmidos da série tornaram-se muito mais instáveis, com eventos de chuva mais intensos e secas mais severas do que nos primeiros 65 anos. Esse comportamento reforça a evidência de mudança climática regional, com maior propensão a extremos pluviométricos que podem impactar gravemente o abastecimento de água, a agricultura e a segurança da população. Trata-se de um aumento da vulnerabilidade climática da estação chuvosa, com oscilações mais amplas entre excesso e escassez de precipitação.

4.9.8.4.3 Comparação dos Períodos de 1984 a 2004 e 2005 a 2023

Para permitir uma comparação direta com as precipitações das estações Fazenda Água Limpa e Itabirito Linígrafo, cujas séries iniciam-se em janeiro de 1984, as tabelas a seguir, referentes à Estação Lagoa Grande (MMV), compilam o somatório dos valores dos Índices de Anomalias de Chuva referentes aos períodos de 1984 a 2005 e de 2006 a 2023.

Estação Pluviométrica Lagoa Grande (MMV)						
IAC - Índice de Anomalias de Chuva - 1984 a 2004						
Período	IAC Positivo			IAC Negativo		
	Anos com IAC Positivo	Soma	Média	Anos com IAC Negativo	Soma	Média
Anual	12	15,29	1,27	9	-10,04	-1,12
Seco	14	22,24	1,59	7	-8,43	-1,20
Úmido	9	11,74	1,30	12	-14,35	-1,20

Estação Pluviométrica Lagoa Grande (MMV)
--

IAC - Índice de Anomalias de Chuva - 2005 a 2023						
Período	IAC Positivo			IAC Negativo		
	Anos com IAC Positivo	Soma	Média	Anos com IAC Negativo	Soma	Média
Anual	10	18,30	1,83	9	-16,09	-1,79
Seco	9	11,03	1,23	10	-14,65	-1,46
Úmido	8	16,62	2,08	11	-18,59	-1,69

A comparação das médias dos índices permite a conclusões:

Anos Civi:

Frequência de anomalias: A frequência de anos com IAC positivos diminuiu ligeiramente de 12 para 10, enquanto a de negativos permaneceu estável (9 em ambos os períodos). Isso indica uma leve redução na recorrência de anos com chuvas acima da média.

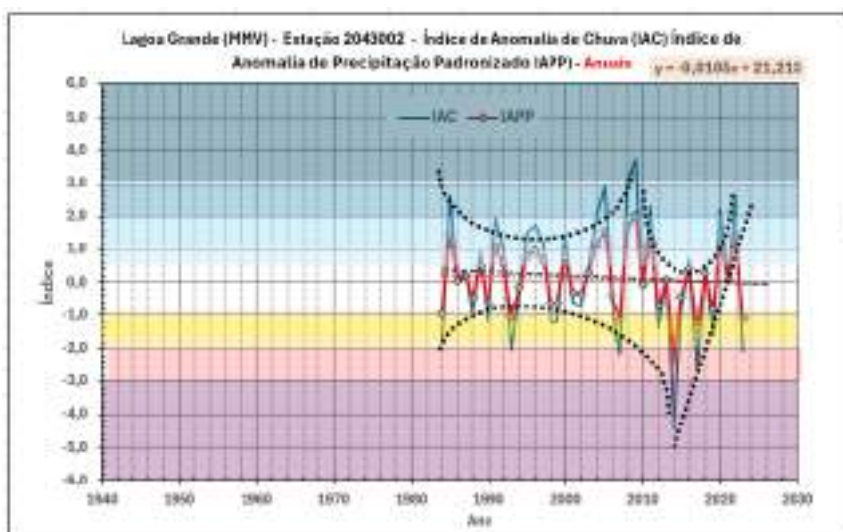
Intensidade das anomalias positivas: A média dos IAC positivos aumentou de +1,27 para +1,83, mostrando que, quando ocorrem anos úmidos, eles tiveram precipitações mais intensas no segundo período.

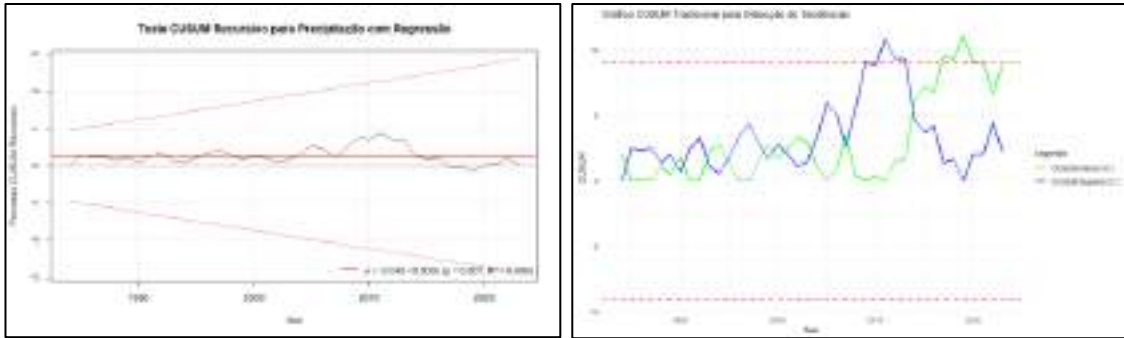
Intensidade das anomalias negativas: A média dos IAC negativos aumentou também, de -1,12 para -1,79, o que revela que os anos secos também se tornaram mais severos no período mais recente.

Aumento da variabilidade climática: A elevação simultânea das intensidades de anomalias positivas e negativas indica um aumento da variabilidade interanual da precipitação, com eventos extremos (tanto de excesso quanto de escassez) mais pronunciados nos últimos 20 anos.

Resumo: Apesar de uma frequência quase constante de anos secos e úmidos, a intensidade dos desvios aumentou, indicando que os eventos de precipitação na Lagoa Grande (MMV) tornaram-se mais extremos desde 2005, o que pode refletir mudanças climáticas locais ou regionais com implicações importantes para a gestão de recursos hídricos e riscos naturais.

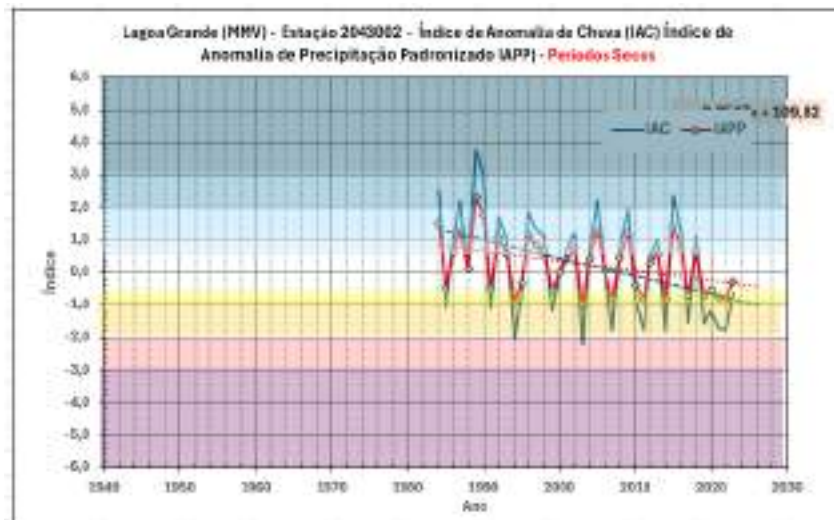
As conclusões acima são coerentes com os resultados do teste CUSUM do segmento da série de 1984 a 2023, conforme mostrado nos gráficos e tabelas a seguir. O CUSUM Recursivo mostra uma estabilidade geral dos IAC ao longo dos 40,4 anos da série analisada, porém com variações de tendência marcantes desde 2007 aprox.

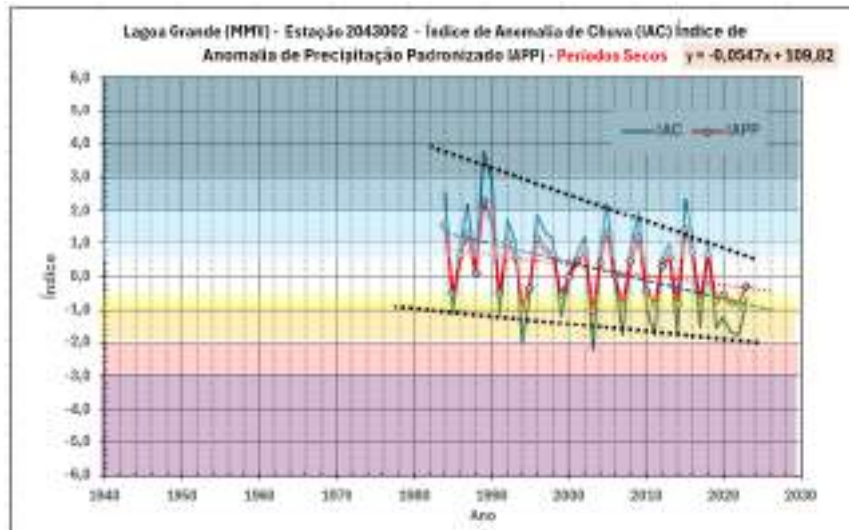




CUSUM Recursivo e CUSUM Tradicional	
Média (valor de referência)	-0.19
Desvio Padrão	1.82
Limiar de Decisão (H)	9.09
Tendência de AUMENTO detectada ($C^+ \leq H$)	
Tendência de DIMINUIÇÃO detectada ($C^- > H$)	
Quant. de Dados da Série Analisada	40
Valor mínimo	-4.45
1º Quartil	-1.20
Mediana (2º Quartil)	-0.14
Média	-0.19
3º Quartil	1.55
Valor Máximo	3.72
Variância	3.31
Desvio Padrão	1.82
Equação	$y = -0.540 + 0.000x$ ($p = 0.901$, $R^2 = 0.000$)
Coefficiente angular	-0.057 (p -valor = 0.901)
R^2 do modelo	0.000

Períodos Secos:





Redução da frequência de anos úmidos no período seco: O número de IAC positivos caiu de 14 para 9, indicando que os períodos secos com chuvas acima da média tornaram-se menos frequentes nos últimos 20 anos.

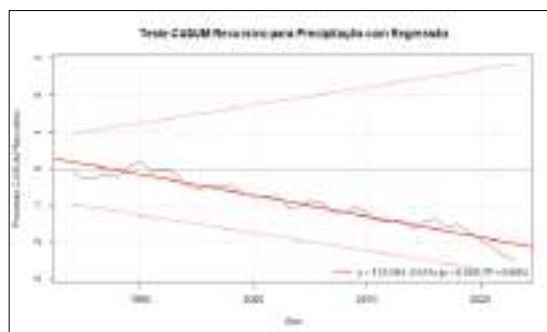
Aumento da frequência de anos secos: O número de IAC negativos subiu de 7 para 10, ou seja, anos com déficit de precipitação no período seco tornaram-se mais comuns nos últimos 20 anos.

Redução da intensidade das anomalias positivas: A média dos IAC positivos caiu de +1,59 para +1,23, mostrando que quando ocorrem anos chuvosos no período seco, eles foram menos intensos nos últimos 20 anos.

Aumento da intensidade das anomalias negativas: A média dos IAC negativos aumentou de -1,20 para -1,47, o que indica que os períodos secos mais recentes registraram déficits mais severos.

Resumo: Entre os dois segmentos analisados, observa-se uma deterioração das condições de umidade nos períodos secos na área representada pela Lagoa Grande (MMV). Houve uma queda na frequência e intensidade de anos mais úmidos, combinada com maior recorrência e severidade de secas, apontando para um agravamento climático da estação seca entre 2005 e 2024. Esse cenário pode ter impactos relevantes sobre a disponibilidade hídrica, recarga de aquíferos e sustentabilidade ecológica da região serrana.

As conclusões acima são coerentes com os resultados do teste CUSUM do segmento da série de 1984 a 2023, conforme mostrado nos gráficos e tabelas a seguir:



Nota: A interpretação dos gráficos apresentada a seguir deve ser considerada como modelo – ou exemplo típico - aplicáveis aos demais gráficos CUSUM do presente documento

Descrição:

- Rec-CUSUM: estabilidade perto de zero entre 1984–1992; a partir de 1992, curva descendente contínua e praticamente paralela à banda inferior, atingindo $-2,5$ em 2023.
- CUSUM tradicional (C+): $C+ \approx 0$ em 1983, sobe rápido, ultrapassa a banda superior (8,02), fica um pouco acima dessa banda até 2019, depois cai fortemente e vai a zero em 2023.
- CUSUM tradicional (C–): C– oscila 0–5 até 2017, a partir de 2017 sobe rápido e atinge pico 11 (acima da banda) em 2023.

Rec-CUSUM (resíduos recursivos)

- A descida regular e paralela à banda inferior desde 1992 indica acumulação sustentada de desvios negativos padronizados — isto é, os resíduos ou as anomalias estão, em média, sendo sistematicamente menores que a referência (tendência de IAC para valores negativos).
- O fato de ser lento e praticamente paralelo à banda sugere uma mudança gradual e persistente (deriva) em vez de uma quebra instantânea brusca.
- Como o Rec-CUSUM não ultrapassou formalmente a banda inferior, estatisticamente a prova de “quebra” de regime pode ser fraca ao nível usual — porém o padrão temporal (declínio contínuo por três décadas) é um sinal forte de mudança prática/convincente, mesmo que formais limites não sejam rompidos.
- Conclusão (Rec-CUSUM): há evidência de deriva de longo prazo para valores mais negativos do IAC desde ~ 1992 → interpretação física provável: intensificação/maior frequência de condições mais secas nos subperíodos secos, ou redução da magnitude das anomalias positivas nos “picos” dos secos.

CUSUM tradicional (C+ e C–)

- $C+ > h$ entre ~ 1983 e 2019: durante boa parte do período a série apresentou sequências acumuladas de desvios positivos (mais acima do alvo), suficientes para que o acumulado excedesse o limiar — isto indica episódios ou fases com persistente excesso relativo
- Queda de $C+$ para 0 em 2023: sugere que, no período mais recente, não há mais acumulação persistente de desvios positivos; anomalias positivas cessaram ou foram compensadas por negativas.
- C– crescendo e ultrapassando banda (pico 11 em 2023): indica que, muito recentemente (após 2017), apareceram desvios negativos persistentes e fortes — ou seja, forte acumulação de valores abaixo do alvo.
- Conclusão (CUSUM tradicional): existe uma fase histórica com acumulação positiva (até ~ 2019) e uma transição recente para acumulação negativa (pós 2017, muito forte até o final da série analisada). Isso aponta para mudança de regime: período em que predominavam anomalias de sinal A ($C+$) foi sucedido por um período com predominância de anomalias do sinal oposto ($C-$).

Resumo:

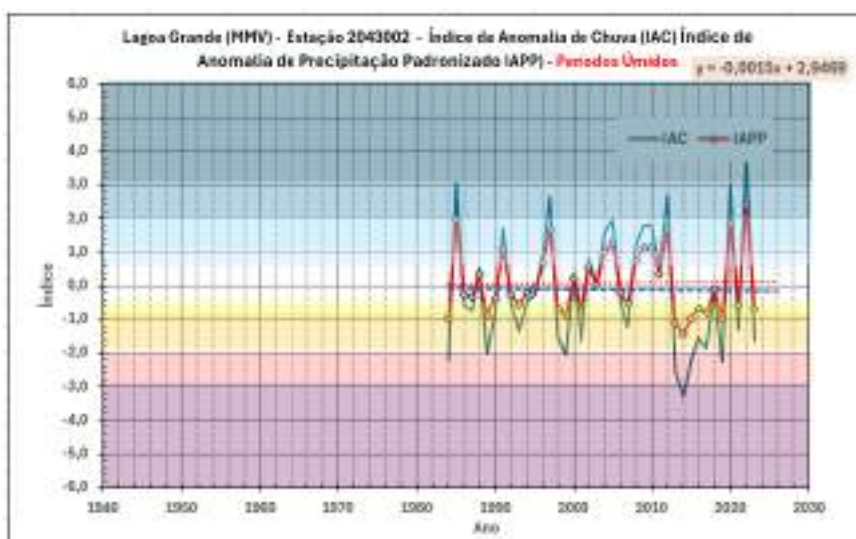
- **Fase 1** (1984 até $\sim 1990s$ – $2000s$): episódios que somaram desvios positivos ($C+$ acumulou e ficou acima do limiar superior).
- **Fase 2** (a partir ~ 1992): porém, já desde 1992 existia uma tendência lenta para valores menores (Rec-CUSUM descendo). Essa tendência gradual foi mascarada por episódios positivos intermitentes que mantiveram $C+$ elevado até ~ 2019 .
- **Fase 3** (últimos anos, >2017): episódios negativos fortes se tornaram dominantes. O valor $C-$ sobe rapidamente e ultrapassa o limiar superior até o final da série; $C+$ retorna

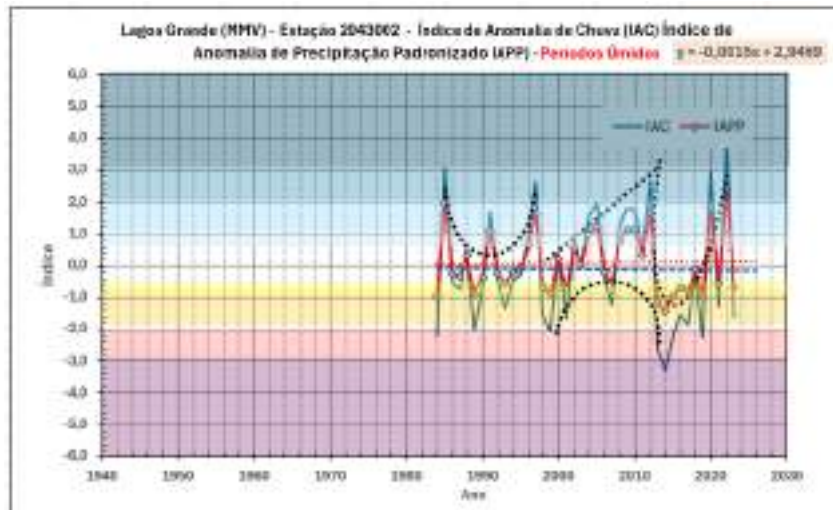
a zero. Ou seja, a tendência de seca (detectada lentamente pelo Rec-CUSUM) acabou por se materializar como acumulação negativa forte detectada pelo CUSUM tradicional.

- Tendência de longo prazo ao aumento da severidade dos períodos secos: tanto a deriva negativa do Rec-CUSUM quanto o recente aumento do valor C- apontam que os períodos secos ficaram progressivamente mais negativos (ou mais intensos) e que essa alteração se consolidou muito recentemente (pós ~2017).
- Transição de regime: a série sugere um regime em que havia maior presença de anomalias do sinal oposto (por isso o C+ alto historicamente) mas que gradualmente foi deslocado por uma tendência para secas mais pronunciadas.
- Consequências práticas: aumento do risco de déficit hídrico nos períodos secos, possíveis impactos em recarga, agricultura, reservatórios etc.

CUSUM Recursivo e CUSUM Tradicional	
Média (valor de referência)	-0.25
Desvio Padrão	1.60
Limiar de Decisão (H)	8,02
Tendência de AUMENTO detectada ($C^+ \leq H$)	
Tendência de DIMINUIÇÃO detectada ($C^- > H$)	
Quant. de Dados da Série Analisada	40
Valor mínimo	-2.23
1º Quartil	-1.18
Mediana (2º Quartil)	-0.59
Média	-0.25
3º Quartil	1.24
Valor Máximo	3.77
Variância	2.57
Desvio Padrão	1.60
Equação	$y = 112.594 - 0.057x$ ($p = 0.000$, $R^2 = 0.925$)
Coefficiente angular	-0.057 (p -valor = 0.000)
R ² do modelo	0.925

Períodos Úmidos:





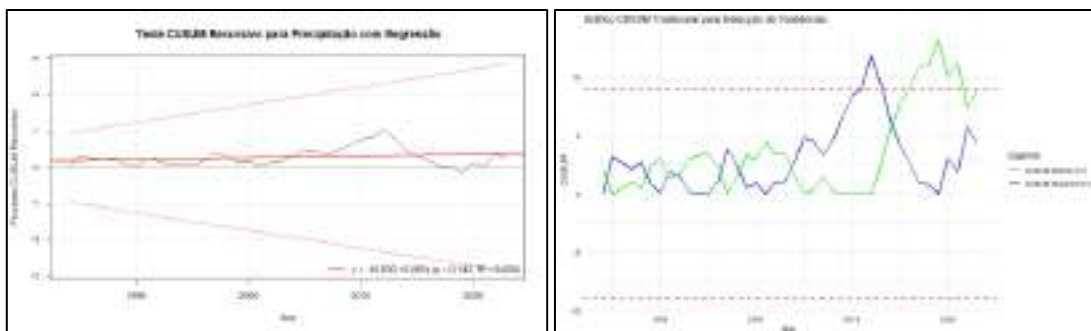
Frequência relativamente estável de anomalias: A quantidade de IAC positivos e negativos manteve-se próxima entre os dois períodos, indicando uma estabilidade na frequência de anos úmidos e secos, embora com pequena redução dos positivos e dos negativos.

Aumento da intensidade das anomalias positivas: A média dos IAC positivos aumentou de +1,30 para +2,08, mostrando que os anos com chuvas acima da média tornaram-se mais intensos, indicando eventos de chuva mais extremos.

Aumento da intensidade das anomalias negativas: A média dos IAC negativos aumentou de – 1,20 para –1,69, indicando que os anos com chuvas abaixo da média tornaram-se mais severos, reforçando a presença de déficits mais acentuados.

Maior amplitude entre extremos: O aumento simultâneo das intensidades das anomalias positivas e negativas mostra que há uma ampliação da variabilidade dos períodos úmidos, com maior oscilação entre anos muito chuvosos e anos com forte deficiência de precipitação.

Resumo: Apesar de pouca variação na frequência de eventos, houve intensificação significativa dos extremos climáticos nos períodos úmidos da Lagoa Grande (MMV) nos últimos 20 anos. O aumento tanto dos IAC positivos quanto dos negativos evidencia uma maior instabilidade climática, com episódios mais marcantes de excesso e escassez de chuva — fator crítico para a gestão de riscos ambientais, segurança hídrica e planejamento territorial da região serrana.



Nota: A interpretação dos gráficos apresentada a seguir deve ser considerada como modelo – ou exemplo típico - aplicáveis aos demais gráficos CUSUM do presente documento



- Entre 1984 e 1997, a curva oscila pouco acima de zero (0 a 0,5): isso indica estabilidade da média da série durante esse período. Pequenas oscilações acima de zero sugerem uma ligeira tendência positiva, mas dentro de limites normais da variabilidade da série.
- Entre 2007 e 2013, a curva sobe continuamente, atingindo +1 em 2013: indica desvios persistentes acima da média histórica, sugerindo que os valores de IAC estão sistematicamente mais altos que a média do período inicial (1984–1997).
- De 2013 a 2019, a curva desce até zero, voltando à média: retorno à normalidade, ou seja, os desvios da média inicial deixam de se acumular positivamente.
- Após 2019 até 2023, a curva sobe ligeiramente acima de zero novamente: nova acumulação positiva, mas de magnitude menor, ainda dentro de limites relativamente estáveis.
- A série apresenta períodos longos de estabilidade, com episódios curtos de desvios positivos acumulados. Não há sinais de instabilidade extrema; a tendência média é ligeiramente positiva, mas a série retorna à média regularmente.

CUSUM Tradicional (dois lados)

CUSUM superior:

- Até 2007, oscila entre 0 e 5, abaixo da banda de controle superior (9,03), indicando estabilidade.
- De 2007 a 2012, sobe rapidamente até 14, ultrapassando a banda superior, mostrando mudança significativa e rápida nos valores positivos do IAC — um período de anomalias de chuva acima da média (anomalias positivas).
- De 2012 a 2019, cai fortemente até zero, indicando retorno rápido à média histórica.
- De 2019 a 2023, sobe novamente até 6, sugerindo nova tendência positiva moderada.

CUSUM inferior:

- Até 2012, oscila entre 0 e 5, abaixo da banda de controle superior, sem indicar desvios negativos significativos.
- De 2012 a 2019, aumenta fortemente, atingindo 16, acima da banda, indicando forte acumulação negativa relativa à média anterior — sinal de períodos mais secos ou menores valores de IAC que geram acúmulo na estatística inferior.
- Após 2019, cai para 8 em 2023, mostrando retorno parcial à média.

Resumo:

- A série dos períodos úmidos apresenta períodos de estabilidade e mudanças abruptas alternadas.
- O Rec-CUSUM indica leve tendência positiva no longo prazo, enquanto o CUSUM tradicional revela episódios curtos de extrema umidade ou seca relativa, capturando variações mais abruptas que não são totalmente refletidas pela Rec-CUSUM.

CUSUM Recursivo e CUSUM Tradicional	
Média (valor de referência)	-0.11
Desvio Padrão	1.82
Limiar de Decisão (H)	9.03
Tendência de AUMENTO detectada ($C^+ \leq H$)	
Tendência de DIMINUIÇÃO detectada ($C^- > H$)	
Quant. de Dados da Série Analisada	40
Valor mínimo	-3.29
1º Quartil	-1.57
Mediana (2º Quartil)	-0.49
Média	-0.11
3º Quartil	1.26



Valor Máximo	3.80
Variância	3.26
Desvio Padrão	1.81
Equação	$y = -10.030 + 0.005x$ ($p = 0.143$, $R^2 = 0.056$)
Coefficiente angular	-0.005 (p -valor = 0.143)
R ² do modelo	0.056

Conclusões da Análise de Índices de Anomalias:

7. Tendência Geral da Pluviosidade Anual – Série completa (1941 a 2023)

- Crescimento das anomalias positivas e redução das negativas ao longo dos 83 anos, indicando uma tendência geral de aumento da pluviosidade anual.
- Ciclos identificados nas anomalias positivas (~14 a 26 anos), com picos em anos como 1945, 1964, 1983, 2020.
- As anomalias negativas também mostraram picos (ex.: 1956, 1963, 2014), mas com redução gradativa em períodos como 1969–1983 e 2004–2022.

8. Períodos Secos (Maio a Setembro) – Série completa (1941 a 2023)

- Tendência geral, ao longo dos 83 anos, de pequeno aumento ou estabilidade das anomalias positivas e redução das negativas, ou seja, chuvas um pouco mais intensas também nos períodos secos.
- Após 1990, há indícios de redução da variabilidade climática nos períodos secos (menores extremos).
- De 1941 a 1975: anomalias predominantemente negativas, indicando 34 anos de períodos secos.
- Evidência de mudança climática a partir de 1976 com relação aos 35 anos anteriores, com aumento de anomalias positivas, seguido por sua gradativa redução até o final da série; tendência forte de agravamento das secas a partir de 2015 (redução das anomalias positivas e intensificação das negativas).

9. Períodos Úmidos (Outubro a Abril) – Série completa (1941 a 2023)

- Pequeno crescimento ou estabilidade das anomalias positivas e redução das negativas ao longo dos 83 anos, indicando uma tendência geral de aumento da pluviosidade anual.
- Ciclos de ~9 a 18 anos identificados nas anomalias positivas (ex.: 1949, 1983, 2022). Anomalias negativas apresentaram picos em 1956, 1963 e 2014.

10. Análise Segmentada da Série Histórica: Primeiros 65 anos (até 2005) x Últimos 18 anos (2006–2023)

- Anual (Ano completo)

Houve aumento da intensidade tanto das anomalias positivas (+1,35 → +1,72) quanto das negativas (−1,56 → −1,79), o que indica uma maior variabilidade climática recente, com eventos de chuva e seca mais extremos. O clima se tornou mais instável e menos previsível nos últimos 18 anos.

- Períodos Secos (Maio a Setembro)

Tanto as anomalias positivas (1,65 → 1,11) quanto as negativas (−1,72 → −1,46) diminuíram de intensidade, o que sugere uma redução da variabilidade e dos extremos no período seco.

- Períodos Úmidos (Outubro a Abril)