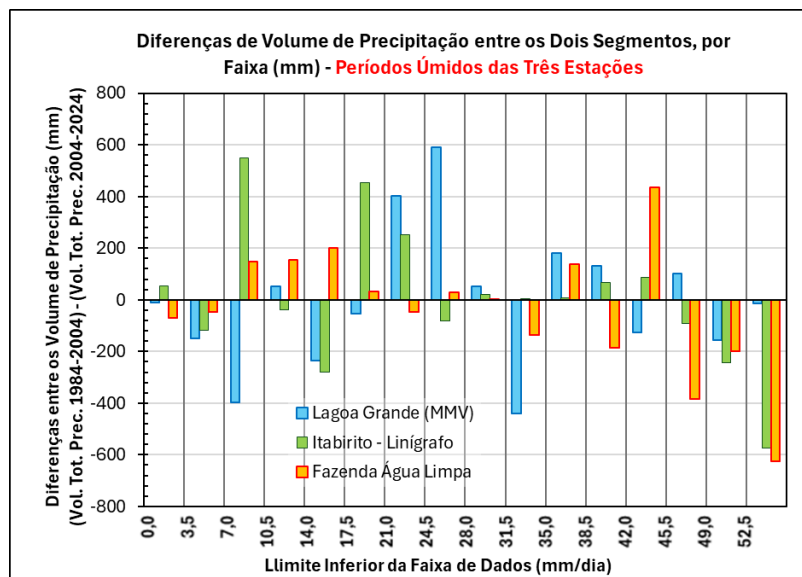




faixas com relação ao 1º segmento (%)				indicando uma uniformidade espacial das alterações.
Redução de dias nas demais faixas (número)	- 115 dias	- 58 dias	- 77 dias	Lagoa Grande teve maior redução de dias em faixas específicas de intensidade diária de precipitação. Itabirito Linígrafo apresentou a menor redução.
Redução do volume nas demais faixas (mm)	- 1.583 mm	- 1.429 mm	- 1.697 mm	A maior redução – em valores absolutos – da distribuição de volumes de chuvas por faixas de intensidade de precipitação (mm/dia) ocorreu na Fazenda Água Limpa.
Redução percentual do volume nas demais faixas com relação ao 1º segmento (%)	- 5,30%	- 5,46%	- 7,19%	Fazenda Água Limpa teve maior redução percentual; Itabirito e Lagoa Grande tiveram valores semelhantes.
Volume total precipitado nos períodos úmidos (mm)	59.776 mm	52.421 mm	46.666 mm	Lagoa Grande possui maior volume acumulado e a Fazenda Água Limpa, o menor. A redução dos volumes totais precipitados ocorre rumo a sudeste (da Lagoa Grande para Água Limpa), mostrando a distribuição espacial das chuvas na bacia do Alto Rio das Velhas.
Volume do primeiro segmento (1984 a 2004) (mm)	29.923 mm	26.179 mm	23.613 mm	Proporção dos volumes iniciais segue padrão dos totais: Lagoa > Itabirito > Fazenda. A perda total de volume precipitado nos períodos úmidos nas áreas representadas pelas três estações foi de 568 mm (62 – 71 – 559), ou seja, apenas 0,71% do total precipitado no primeiro segmento (29.923 + 26.179 + 23.613 = 79.715 mm)
Volume do segundo segmento (2004 a 2024) (mm)	29.852 mm	26.241 mm	23.053 mm	Pequenas variações entre segmentos em Lagoa Grande e Itabirito; Fazenda com queda mais sensível.

Os gráficos a seguir evidenciam as alterações nos volumes precipitados e na quantidade de dias de chuvas dos períodos úmidos das três estações.

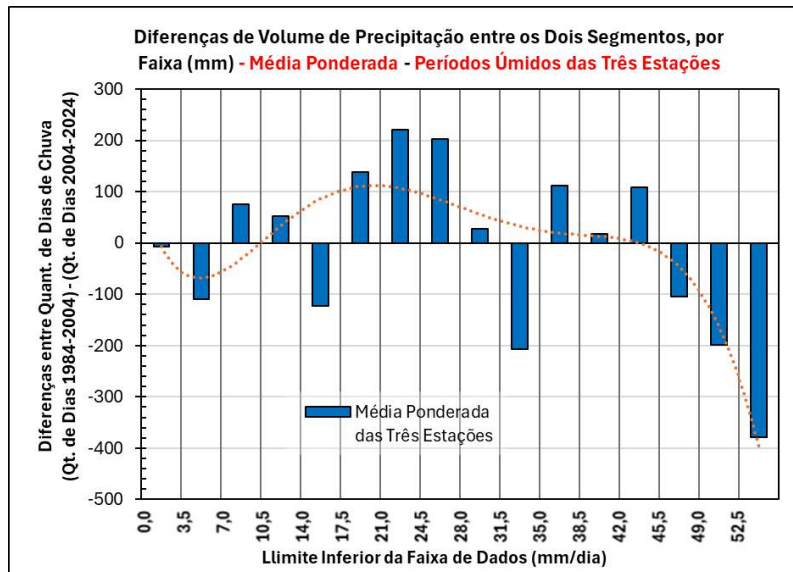




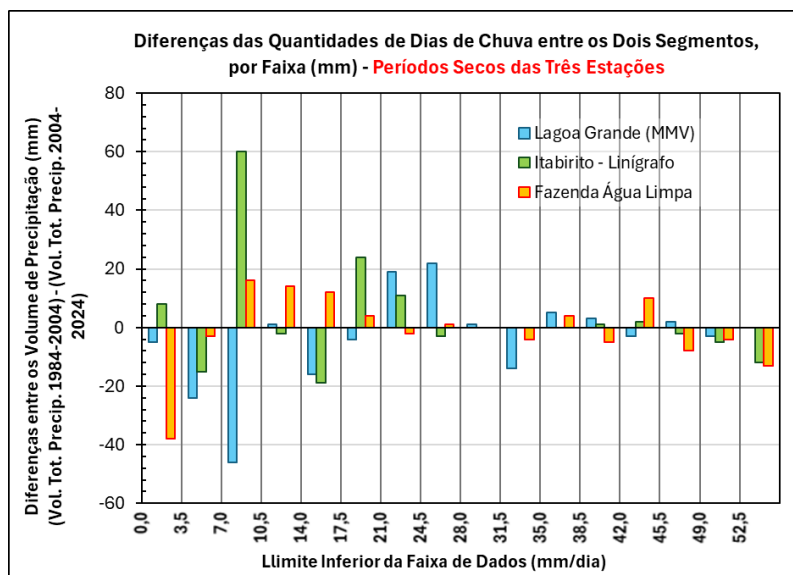
Pela quantidade e pela área das barras verticais que representam esses valores no gráfico acima, pode-se ver que, nos períodos úmidos, houve ganho de volumes precipitados em faixas intermediárias de valores diários e perdas em faixas de valores acima de 45,5 mm/dia. Ou seja, houve redução das chuvas mais intensas dos períodos úmidos nas três estações em um cenário de aumento dos valores pontuais de eventos extremos, como o do dia 08 de janeiro de 2022.

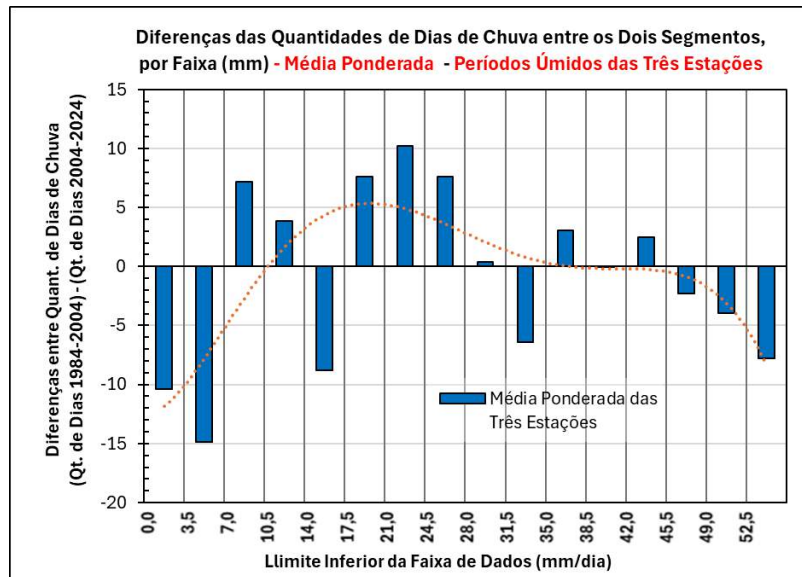
A tabela e o gráfico das médias a seguir podem ser considerados “fotografias” do comportamento das chuvas dos períodos anuais e mostram a redistribuição das chuvas por intensidade diária de precipitação por meio das diferenças médias, em cada faixa, dos valores precipitados nos dois períodos de 20,2 anos. De forma geral, houve mais perdas que ganhos de volumes precipitados nas faixas até 45,5 mm/dia e perdas em faixas acima de 45,5 mm/dia, ou seja aumento das chuvas de menor intensidade em detrimento das de maior intensidade. Como já explicado, esse gráfico permite a visualização do comportamento médio das chuvas nas estações, mas não representa o efeito real visto que esse depende de diversos parâmetros não espelhados pela média matemática (permeabilidade dos solos, dimensão da área representada por cada estação etc.)

Limites das Faixas de Precipitações		Diferenças Médias Ponderadas	
Inferior	Superior	Quant de Dados	Alturas de Precip. (mm)
0,0	3,5	-10	-7
3,5	7,0	-15	-110
7,0	10,5	7	76
10,5	14,0	4	53
14,0	17,5	-9	-122
17,5	21,0	8	138
21,0	24,5	10	220
24,5	28,0	8	203
28,0	31,5	0	27
31,5	35,0	-6	-206
35,0	38,5	3	112
38,5	42,0	0	17
42,0	45,5	2	109
45,5	49,0	-2	-104
49,0	52,5	-4	-198
52,5	300,0	-8	-378
Totais		-12	-171



Os gráficos a seguir evidenciam as alterações nas quantidades de dias de chuvas das três estações. Pode-se ver que, nos períodos úmidos, houve redução da quantidade de dias de chuvas principalmente nas faixas dos menores e dos maiores valores diários. O gráfico da média ponderada das alterações de quantidades de dias de chuva nas três estações, assim como no caso anterior, espelha a redistribuição dos volumes precipitados pelas faixas de intensidade diária de precipitação.





4.11.5 Análise Quantílica das Mudanças nos Padrões de Precipitação

Para explicações sobre esse tipo de análise, ver parte referente à Estação Lagoa Grande (MMV).

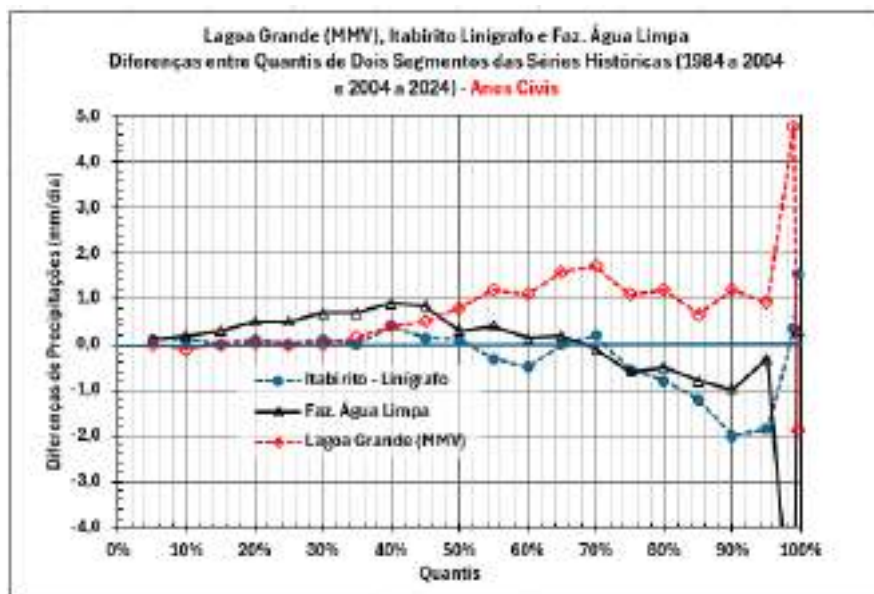
4.11.5.1 Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos

A tabela a seguir apresenta os valores dos quantis calculados para os dois períodos com igual quantidade de dias em que a série histórica completa da Estação Itabirito - Linígrafo foi dividida, sendo o primeiro de 1984 a 2004 e o segundo de 2004 a 2023:

ITABIRITO - LINÍGRAFO (MMV) – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043056			
	Quantis (mm/dia)		
Probabilidade	27/01/1984 a 31/03/2004	01/04/2004 a 30/06/2024	Diferenças (mm/dia)
5,0%	1,80	1,90	0,10
10,0%	2,30	2,40	0,10
15,0%	3,10	3,10	0,00
20,0%	3,80	3,90	0,10
25,0%	4,60	4,60	0,00
30,0%	5,40	5,50	0,10
35,0%	6,50	6,50	0,00
40,0%	7,30	7,70	0,40
45,0%	8,55	8,70	0,15
50,0%	9,80	9,90	0,10
55,0%	11,45	11,15	-0,30
60,0%	13,20	12,70	-0,50
65,0%	15,20	15,20	0,00
70,0%	17,50	17,70	0,20
75,0%	20,30	19,75	-0,55
80,0%	24,00	23,20	-0,80
85,0%	28,40	27,20	-1,20
90,0%	34,80	32,80	-2,00
95,0%	44,10	42,25	-1,85
99,0%	69,55	69,89	0,34
99,5%	80,31	81,87	1,55

A diferença entre os quantis da segunda e da primeira metade da série histórica de Itabirito Linígrafo (última coluna da tabela acima) pode ser visualizada por meio do gráfico a seguir. Para

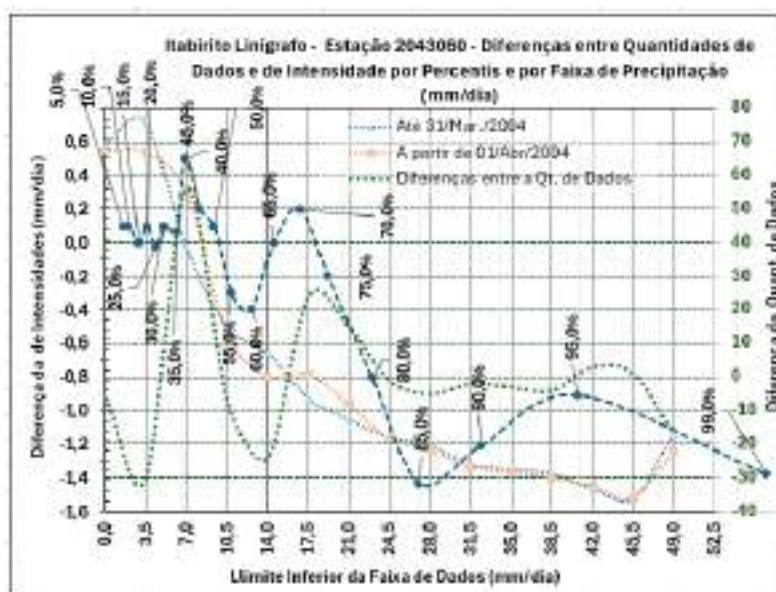
comparação, é incluída no gráfico a curvas referentes à Lagoa Grande (MMV) e à Fazenda Água Limpa.

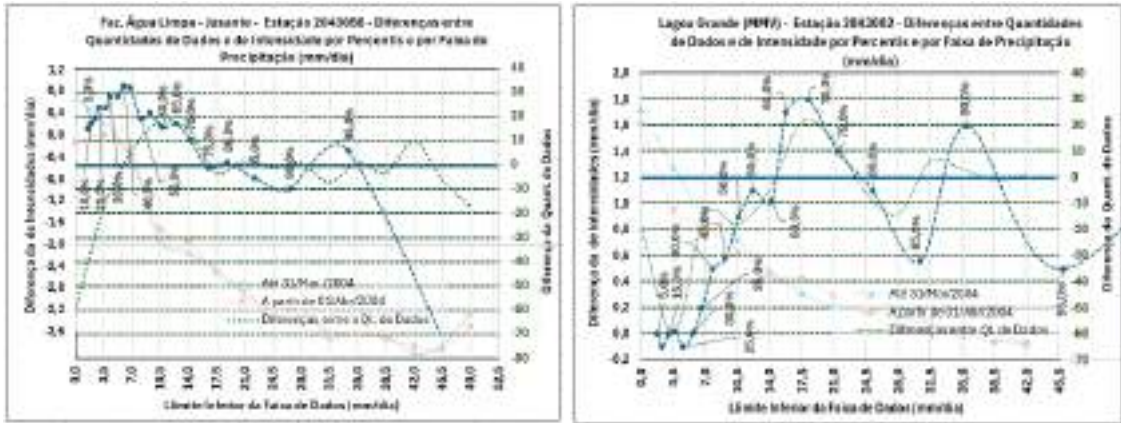


Com relação aos números e ao gráfico acima pode-se observar:

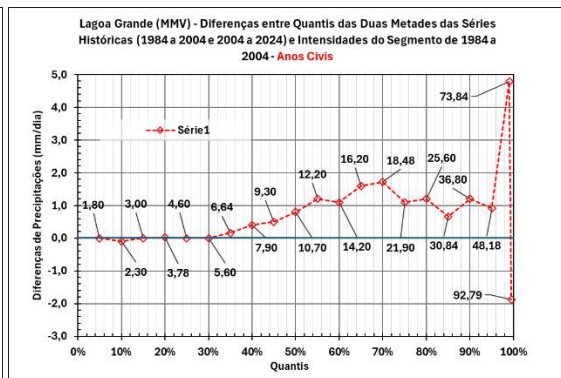
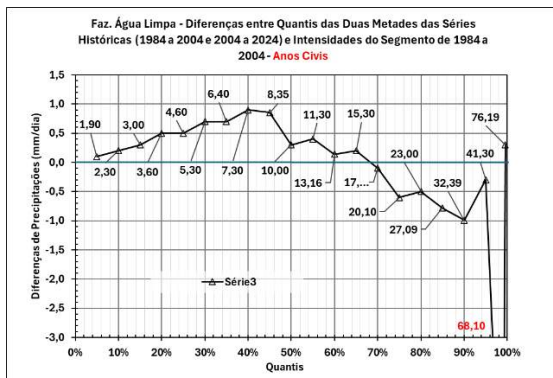
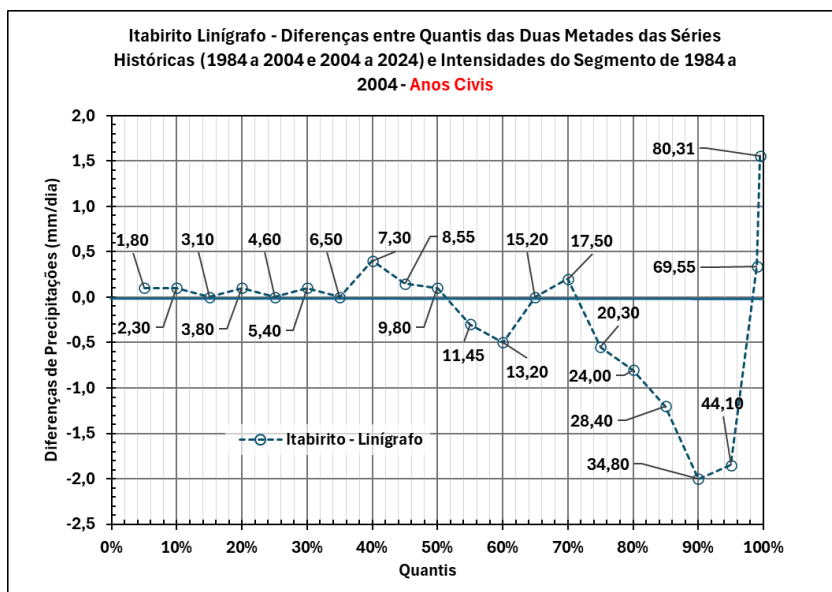
1. O primeiro aspecto que se destaca no gráfico é o da similaridade das curvas de Itabirito Linígrafo e da Fazenda Água Limpa. Ambas, situadas no vale do Rio das Velhas, apresentam diferenças negativas para quantis superiores a 70% e valores positivos para os quantis abaixo de 70%. A curva referente à Lagoa Grande, que está situada no alto da serra (Sinclinal Moeda), apresenta diferenças praticamente nulas para quantis até 30% e diferenças positivas em quantis superiores a 30%.
2. Outro destaque refere-se à grande variabilidade na faixa dos eventos de chuvas muito intensas, com quantis de 99% e 99,5%, com acentuadas diferenças entre os valores desses quantis nas três estações. Os valores positivos maiores indicam o aumento dos valores muito altos /ou da quantidade valores muito altos de precipitação diária, ou seja, aumento dos riscos de enchentes, deslizamentos e desastres nas áreas de mineração.
3. Os quantis dividem uma série ordenada de dados em partes iguais, com base em suas frequências (para a presente análise, a quantidade de dados dos dois períodos foi dividida em conjuntos com 5% do total de dados cada um). Em Itabirito Linígrafo, coincidentemente, a quantidade de dias de chuva (de intensidade igual ou superior a 1,3 mm/dia) do segundo período foi igual à do primeiro, ou seja, cada conjunto de 5% tem a mesma quantidade de dados (1928). Conforme visto no item anterior, houve redução de volumes precipitados e de dias de chuva com intensidade superior a 24,5 mm/dia e, assim, os valores dos quantis que correspondem a essa intensidade são menores no segundo período em relação ao primeiro. A diferenças negativas dos valores dos quantis (curva abaixo de zero no gráfico) mostram que, no período mais recente, houve redução da intensidade e/ou da quantidade das chuvas na área representada pela estação.
4. As diferenças positivas entre os valores dos quantis significam que as chuvas de baixa e de média intensidade do segundo período (2004-2024) ficaram mais intensas e/ou mais numerosas que as do primeiro período (1984-2004) para os mesmos quantis. Pode-se concluir que, em Itabirito Linígrafo, houve uma migração dos volumes precipitados nas faixas de maior intensidade para as de menor intensidade diária, o mesmo ocorrendo na área representada pela Fazenda Água Limpa. Isso pode ter tido influência negativa na recarga dos aquíferos.

5. Na área da representada pela estação Lagoa Grande (MMV) o comportamento das chuvas foi o oposto das duas outras estações. Na Lagoa Grande (MMV) o quantil de 30% corresponde a 5,6 mm/dia. Como a curva das diferenças apresenta valores positivos para quantis acima de 30%, pode-se concluir que houve aumento da intensidade e/ou da quantidade dessas chuvas, ou seja, na Lagoa Grande (MMV) as chuvas mais intensas que 5,6 mm/dia migraram para faixas de intensidade maiores no segundo período (2004 a 2024).
6. O comportamento dos valores dos quantis aponta para uma alteração na distribuição de probabilidade da precipitação entre os dois períodos de 20,2 anos. Não se trata apenas de um aumento ou diminuição geral, mas de uma mudança na forma da distribuição, sou seja, mudanças climáticas regionais, com **aumento das chuvas leves e moderadas e diminuição das chuvas mais fortes nas áreas mais baixas da bacia do Rio das Velhas e comportamento oposto nas áreas mais altas, mas com eventos muito intensos ou extremos aumentando de intensidade em todas as áreas**. O aumento da intensidade no Sinclinal Moeda eleva os riscos advindos de chuvas intensas e extremas nas extensas e numerosas áreas de mineração dessa região.
7. Na Lagoa Grande houve aumento das chuvas em todos os quantis superiores de 30%, que corresponde a 5,6 mm/dia nessa estação. Em Itabirito Linígrafo, houve redução das chuvas de intensidade superior a 10 mm/ dia (quantil de 50% para essa estação) e na Fazenda Água Limpa, redução das chuvas com intensidade superior a 17 mm/dia (quantil de 70%).
8. A superposição dos gráficos dos quantis aos das diferenças de quantidades de dias de chuva (ver a seguir) mostra a coerência dos dois tipos de análise: as curvas (pontilhada e tracejada) das duas variáveis apresentam comportamentos similares.





Para efeitos de comparação, os gráficos a seguir destacam, para cada estação, os valores dos quantis relativos aos dados dos **anos civis**:



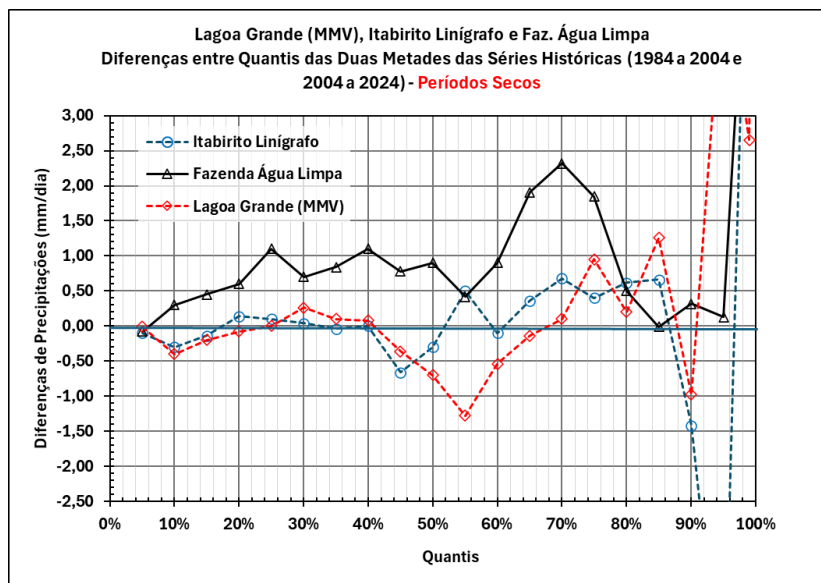
Ressalta-se a maior intensidade dos eventos de chuvas mais fortes na área do Sinclinal Moeda.

4.11.5.2 Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos – Períodos Secos

ITABIRITO - LINÍGRAFO (MMV) – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043056			
	Quantis (mm/dia)		
Probabilidade	27/01/1984 a 31/03/2004	01/04/2004 a 30/06/2024	Diferenças (mm/dia)
5,0%	1,80	1,70	-0,10
10,0%	2,30	2,00	-0,30



15,0%	2,60	2,46	-0,14
20,0%	2,94	3,08	0,14
25,0%	3,40	3,50	0,10
30,0%	3,96	4,00	0,04
35,0%	4,34	4,30	-0,04
40,0%	5,00	5,00	0,00
45,0%	6,14	5,48	-0,66
50,0%	6,80	6,50	-0,30
55,0%	7,40	7,90	0,50
60,0%	9,00	8,90	-0,10
65,0%	9,80	10,16	0,36
70,0%	11,80	12,48	0,68
75,0%	14,30	14,70	0,40
80,0%	17,20	17,82	0,62
85,0%	19,80	20,46	0,66
90,0%	25,08	23,66	-1,42
95,0%	34,08	28,40	-5,68
99,0%	41,08	48,60	7,52
99,5%	47,52	55,75	8,23



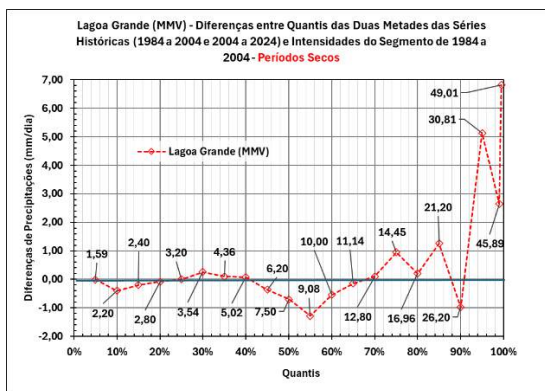
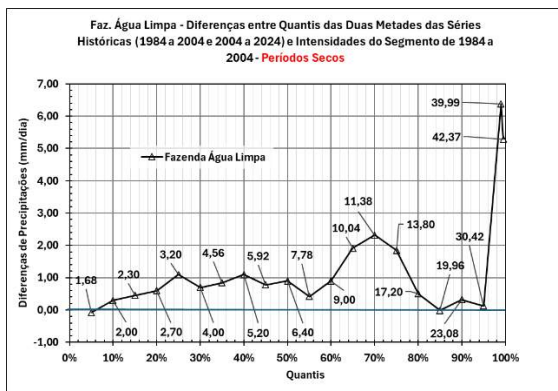
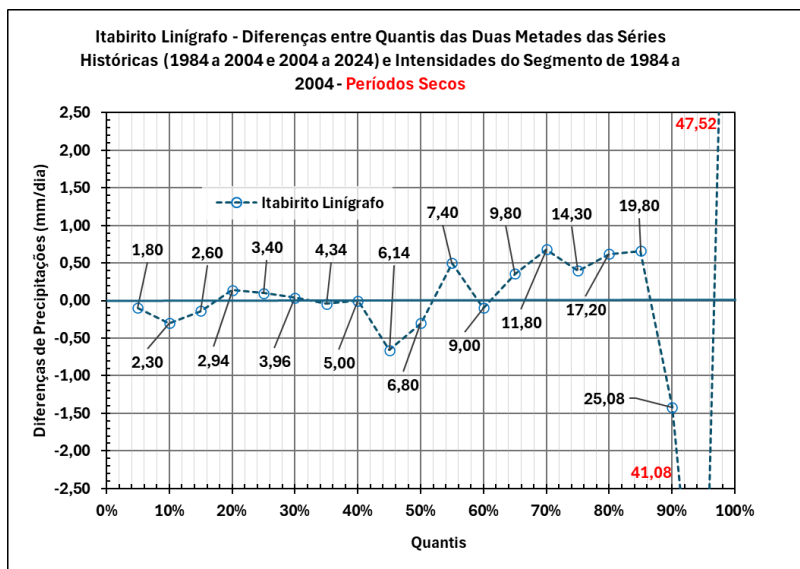
Com relação aos números e ao gráfico acima, referente aos **períodos secos**, pode-se observar:

1. Os valores dos quantis de 95%, 99% e 99,5% de Itabirito Linígrafo apresentaram grande variação entre os dois períodos, ao passo em que houve redução acentuada da intensidade das chuvas na faixa de aprox. 20 mm/dia até aprox. 35 mm/dia e forte aumento da intensidade das chuvas superiores a 35 mm/dia. Essa análise precisa levar em conta, entretanto que houve redução total de 48 dias de chuva no período mais recente, com relação ao anterior (-19,28%) o que, por si só, já implica em alterações dos valores dos quantis. No período de 1984 a 2004, durante os períodos secos, ocorreram 25 dias com chuvas de intensidade superior a 25 mm/dia e 10 dias com intensidade superior a 35 mm/dia, enquanto no período de 2004 a 2024 esses números foram 16 e 6. Assim, houve redução dos volumes precipitados nessas faixas, mas aumento da intensidade das chuvas intensas quando essas ocorreram.
2. Na Fazenda Água Limpa e na Lagoa Grande (MMV) também houve acentuado aumento dos valores dos quantis de 95%, 99% e 99,5%, o que significa intensificação dos eventos muito intensos de chuva dos períodos secos, quando esses ocorreram, em um cenário

de forte redução da quantidade de dias de chuva (-19,28%) e de volumes precipitados (-19,03%) nos períodos secos, conforme já apresentado no presente documento.

- Em Itabirito Linígrafo houve aumento da intensidade e/ou da quantidade das chuvas na faixa de 7 a 20 mm/dia (quantis de 50% a 85%), na Fazenda Água Limpa houve aumento em todas as faixas, exceto na de eventos com intensidade superior a 21 mm/dia e na Lagoa Grande praticamente não houve aumento de intensidade das chuvas, mas redução da intensidade das chuvas na faixa de 6 a 13 mm/dia e, principalmente, na faixa acima de 17 mm/dia.
- Como no caso dos dados dos anos civis, analisado acima, o comportamento dos valores dos quantis aponta para uma alteração na distribuição de probabilidade da precipitação entre os dois períodos de 20,2 anos, o que aponta para mudanças climáticas regionais refletidas nos períodos secos, com **aumento da intensidade das chuvas leves e moderadas em Itabirito Linígrafo e Lagoa Grande (MMV), aumento em todos os quantis na Fazenda Água Limpa e aumento forte dos eventos muito intensos ou extremos em todas as áreas.** O aumento de intensidade, concomitantemente, a redução dos dias de chuva e dos volumes precipitados marcam os últimos 20 anos com secas mais severas pontuadas de chuvas esporádicas de mais alta intensidade.

Para efeitos de comparação, os gráficos a seguir destacam, para cada estação, os valores dos quantis relativos aos dados dos **anos civis**:

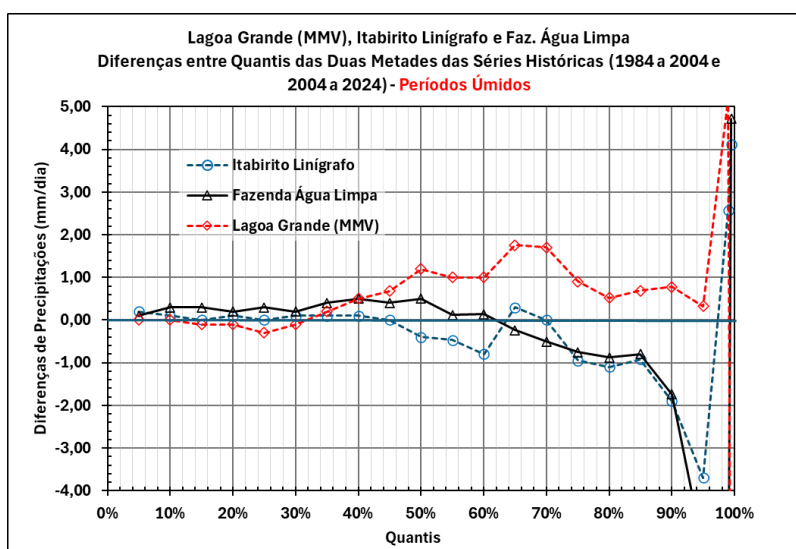


Ressalta-se a maior intensidade dos eventos de chuvas mais fortes na área do Sinclinal Moeda.



4.11.5.3 Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos –Períodos Úmidos

ITABIRITO - LINÍGRAFO (MMV) – CÓD. PLUVIOMÉTRICO: 2043056			
Probabilidade	Quantis (mm/dia)		Diferenças (mm/dia)
	27/01/1984 a 31/03/2004	01/04/2004 a 30/06/2024	
5,0%	1,80	2,00	0,20
10,0%	2,40	2,50	0,10
15,0%	3,20	3,20	0,00
20,0%	4,00	4,10	0,10
25,0%	5,00	5,00	0,00
30,0%	5,80	5,90	0,10
35,0%	6,80	6,90	0,10
40,0%	7,90	8,00	0,10
45,0%	9,10	9,10	0,00
50,0%	10,40	10,00	-0,40
55,0%	12,20	11,73	-0,47
60,0%	14,00	13,20	-0,80
65,0%	15,70	16,00	0,30
70,0%	18,20	18,20	0,00
75,0%	21,40	20,45	-0,95
80,0%	25,00	23,90	-1,10
85,0%	29,43	28,51	-0,92
90,0%	35,74	33,84	-1,90
95,0%	46,50	42,80	-3,70
99,0%	70,55	73,12	2,57
99,5%	81,33	85,45	4,12



O comportamento dos períodos úmidos praticamente reproduz o já apresentado para os anos civis (anos completos), pois a maior parte das chuvas ocorre nos períodos úmidos.

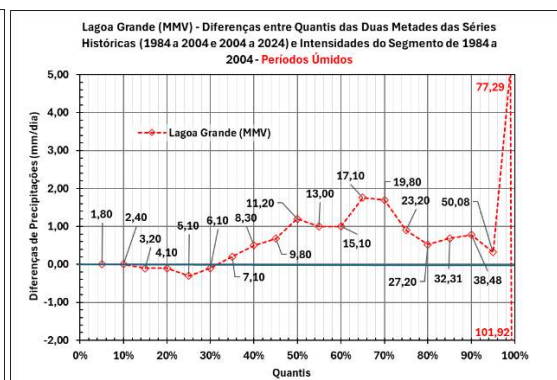
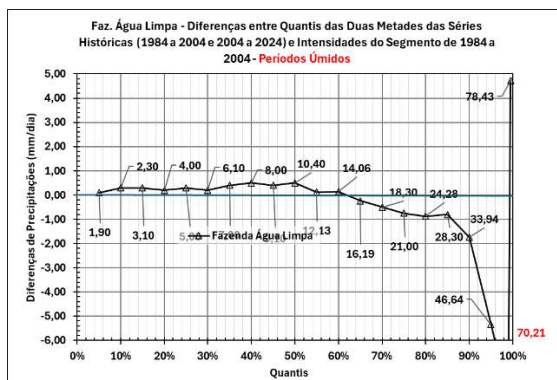
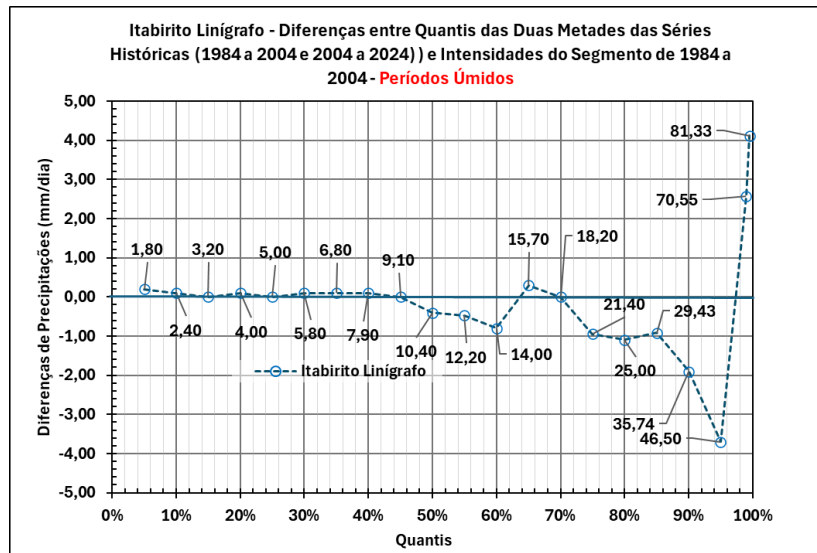
1. Tal como no caso já analisado dos dados dos anos civis, nota-se a similaridade das curvas de Itabirito Linígrafo e da Fazenda Água Limpa, sendo que essa apresenta diferenças negativas apenas para os valores dos quantis superiores a 60% e Itabirito Linígrafo apresenta em duas faixas: 45 a 60% e acima de 70%, com um significativo aumento nos valores dos quantis de 99% e 99,5%, de chuvas muito fortes, superiores a 70 mm/dia. Na Lagoa Grande houve aumento de valores praticamente em todos os quantis, incluindo o de 99%, mas forte redução do valor do quantil de 99,5% (eventos muito intensos). Essa redução na intensidade e/ou quantidade das chuvas de muito alta



intensidade dos períodos úmidos na Lagoa Grande (MMV) nos 20 anos mais recentes se deu ao mesmo tempo que ocorreu o evento extremo de 08/01/2025.

2. Em Itabirito Linígrafo a quantidade de dias de chuva (de intensidade igual ou superior a 1,3 mm/dia) do segundo período superou em 48 dias a do primeiro (1.725 dias x 1.677 dias), mas o total precipitado praticamente não se alterou de um período para o outro. Verificou-se, no entanto, uma redução geral da intensidade das chuvas nas faixas superiores a 9 mm/dia (quantil de 45%) na área representada pela estação.
3. Como o volume precipitado praticamente não mudou de um período para o outro (aumento de apenas 0,24%), pode-se concluir que, em Itabirito Linígrafo, houve uma migração dos volumes precipitados nas faixas de maior intensidade para as de menor intensidade diária e para a de eventos muito intensos ou extremos, o mesmo ocorrendo na área representada pela Fazenda Água Limpa. Isso pode ter tido influência negativa na recarga dos aquíferos e nos eventos de cheias (aumento das vazões máximas do rio), aumentando também os riscos de deslizamentos.
4. Na área da representada pela estação Lagoa Grande (MMV) o comportamento das chuvas foi o oposto das duas outras estações. Na Lagoa Grande (MMV) o percentil de 35% corresponde a 7 mm/dia. Como a curva das diferenças apresenta valores positivos para percentis acima de 35%, pode-se concluir que houve aumento da intensidade dessas chuvas, ou seja, na Lagoa Grande (MMV) as chuvas mais intensas que 7 mm/dia migraram para faixas de intensidade maiores no segundo período (2004 a 2024).
5. Na Lagoa Grande houve aumento das chuvas em todos os quantis superiores de 35%, que corresponde a 7 mm/dia nessa estação. Em Itabirito Linígrafo, houve redução das chuvas de intensidade superior a 9 mm/ dia (quantil de 45% para essa estação) e na Fazenda Água Limpa, redução das chuvas com intensidade superior a 14 mm/dia (quantil de 60%).
6. O comportamento dos valores dos quantis aponta para uma alteração na distribuição de probabilidade da precipitação entre os dois períodos de 20,2 anos, o que pode ser considerado resultado de mudanças climáticas regionais: **estabilidade da intensidade das chuvas leves e moderadas e redução da intensidade das chuvas mais fortes nas áreas mais baixas da bacia do Rio das Velhas (Itabirito Linígrafo e Fazenda Água Limpa); e comportamento oposto nas áreas mais altas, mas com eventos muito intensos ou extremos aumentando de intensidade em todas as áreas.**
7. Esse padrão assinala mudanças climáticas regionais, com redução geral da intensidade diária das precipitações nas áreas mais baixas da bacia do Rio das Velhas e aumento nas áreas mais altas, porém com aumento dos eventos muito intensos de chuva nas áreas representadas por Itabirito Linígrafo e Fazenda Água Limpa. O aumento da intensidade no Sinclinal Moeda eleva os riscos advindos de chuvas intensas e extremas nas extensas e numerosas áreas de mineração dessa região.

Para efeitos de comparação, os gráficos a seguir destacam, para cada estação, os valores dos quantis relativos aos dados dos **anos civis**:



Ressalta-se a maior intensidade dos eventos de chuvas mais fortes na área do Sinclinal Moeda.

4.11.5.4 Correlação entre Quantis de Precipitações Diárias, Horárias e Sub-Horárias (15 minutos)

Para avaliação da correlação entre dados de medições diárias, horárias e sub-horárias (15 minutos), foram calculados os valores dos quantis, a cada 5%, assim como os valores dos quantis de 99% e 99,5%, da série histórica de 40,4 anos de dados pluviométricos diários da estação convencional Itabirito Linígrafo (2043060), dados esses obtidos pelo sistema Hidroweb. Como já mencionado no presente documento, apenas os dados de precipitação diária superiores a 1,2 mm/dia foram considerados.

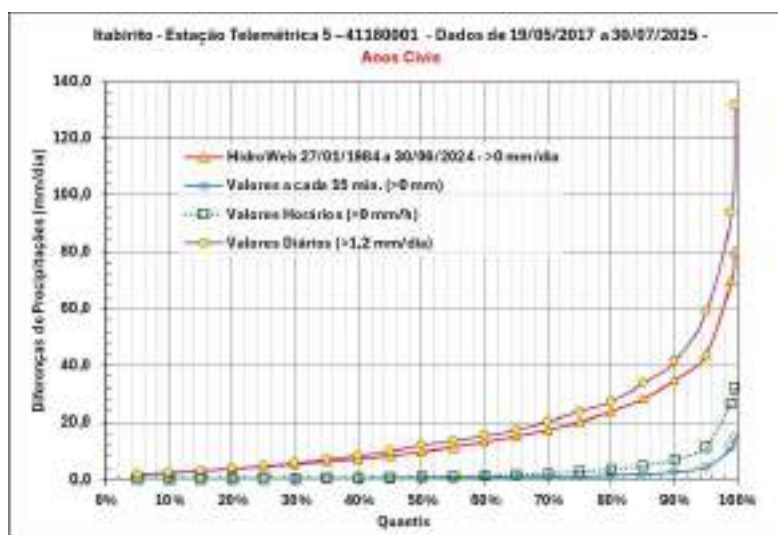
A estação Telemétrica Itabirito (5-41180001), instalada no mesmo local da estação convencional⁷, com dados medidos a cada 15 minutos começou a operar em 02/05/2016, porém tem registro de dados somente a partir de maio de 2017. Os dados de 19/05/2017 até 05/05/2025 (8 anos) apresentam muitas falhas, porém foram suficientes para a comparação com os dados da estação convencional. Os valores a cada 15 minutos de cada hora foram somados

⁷ Ver Relatório de Visita Técnica FPSF-RVT-03-2024. A estação fluviométrica opera com métodos de coleta de dados convencionais e telemétricos, uma vez que está equipada com uma plataforma de coleta de dados (PCD). No Portal HIDROWEB, para a coleta convencional de dados — que envolve a leitura manual da cota nas réguas duas vezes ao dia — a estação é identificada pelo código 41180000. Para a coleta automática e envio de dados telemétricos, a estação recebeu o código 41180001. De acordo com a ANA, essa prática de codificação segue uma metodologia estabelecida: quando uma estação convencional é equipada com uma PCD, o código original é mantido, substituindo o último algarismo por “1”. No Portal HIDROWEB, é possível acessar dados referentes a Cotas Médias, Cotas de Duas Leituras e Vazões Médias. No Portal de Telemetria, os dados de nível e vazões são atualizados a cada 15 minutos.

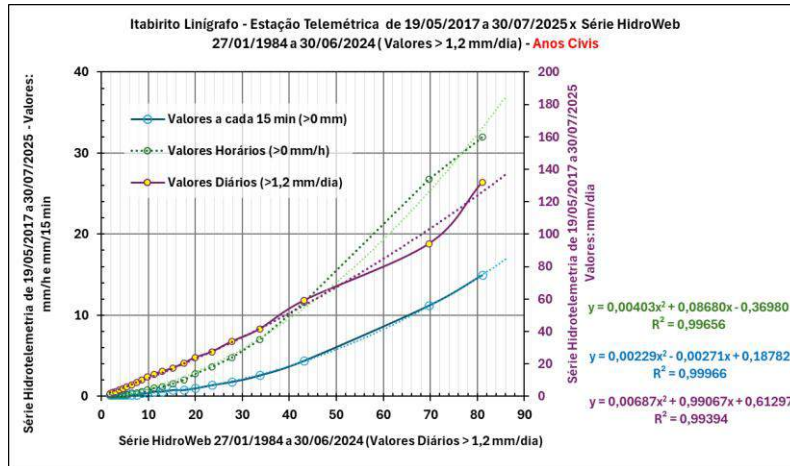
para gerar uma série de dados horários e os valores horários, por sua vez, foram somados para gerar uma série de dados diários, da qual, para comparação com a série estudada da estação convencional, foram considerados apenas os dias com precipitações superiores a 1,2 mm/dia. Para cada uma dessas três séries foram calculados os valores dos quantis cada 5% e dos quantis de 99% e 99,5%, obtendo-se a seguinte tabela:

Itabirito Linígrafo - Estação Telemétrica 5 – 41180001				Itabirito Linígrafo - Estação 2043060	
Probabilidade	Quantis (mm/dia)				27/01/1984 a 30/06/2024 Valores Diários (>1,2)
	Valores a cada 15 min. (>0)	Valores Horários (>0)	Valores Diários (>0)	Valores Diários (>1,2)	
5,0%	0,20	0,20	0,20	1,80	1,85
10,0%	0,20	0,20	0,20	2,40	2,35
15,0%	0,20	0,20	0,20	3,00	3,10
20,0%	0,20	0,20	0,20	3,80	3,85
25,0%	0,20	0,20	0,20	4,80	4,60
30,0%	0,20	0,20	0,40	5,80	5,45
35,0%	0,20	0,40	0,60	7,20	6,50
40,0%	0,20	0,40	1,00	8,60	7,50
45,0%	0,40	0,60	1,80	10,00	8,63
50,0%	0,40	0,80	3,00	12,00	9,85
55,0%	0,60	1,00	4,20	13,60	11,30
60,0%	0,60	1,20	6,20	15,40	12,95
65,0%	0,80	1,60	8,60	17,40	15,20
70,0%	0,80	2,00	11,38	20,48	17,60
75,0%	1,00	2,80	14,20	24,00	20,03
80,0%	1,40	3,60	17,72	27,52	23,60
85,0%	1,80	4,80	23,18	33,84	27,80
90,0%	2,60	7,00	31,52	41,60	33,80
95,0%	4,40	11,60	46,13	59,12	43,18
99,0%	11,20	26,79	81,53	93,95	69,72
99,5%	14,96	31,98	96,14	131,96	81,09

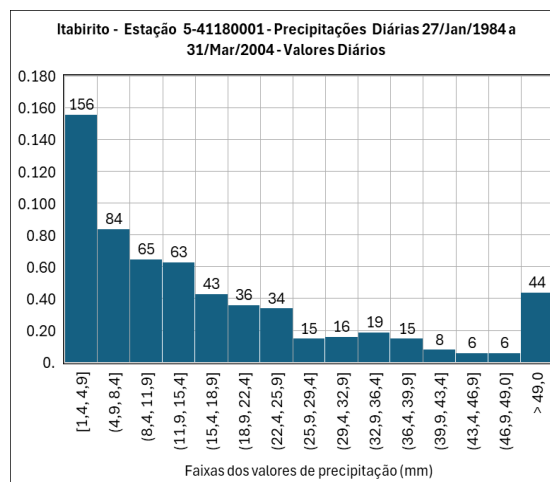
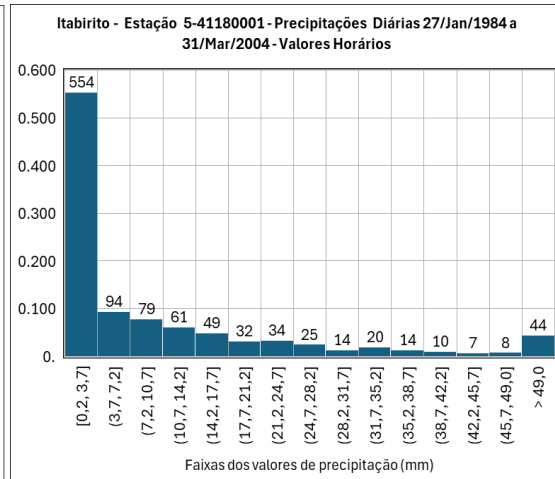
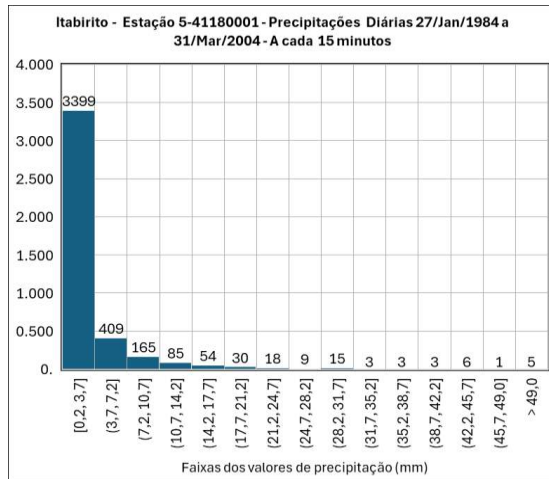
O gráfico a seguir apresenta os valores dos quantis da estação telemétrica e da convencional e nele pode-se ver que todas as curvas seguem um padrão bastante similar de distribuição.



Os gráficos a seguir apresentam as correlações obtidas entre os valores dos quantis da série de 40,4 anos da estação convencional e os valores dos quantis das séries de 8 anos da estação telemétrica (15 minutos, horária e diária). O ajuste polinomial obtido, com valor de R^2 praticamente igual a 1, demonstra a correlação integral entre as séries nas escalas temporais analisadas.



Os histogramas a seguir apresentados detalham a distribuição dos valores dos quantis da série original da Estação Telemétrica 5-41180001 (a cada 15 min) e das séries horária e diária geradas a partir dela.

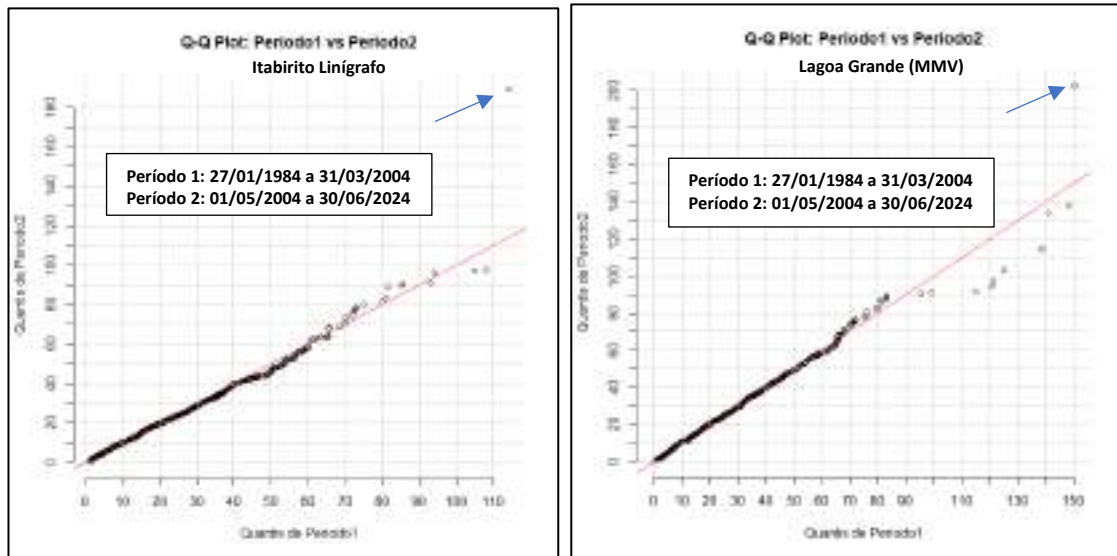


4.11.6 Gráficos Q-Q Plot

Para explicações sobre esse tipo de análise, ver parte referente à Estação Lagoa Grande (MMV).

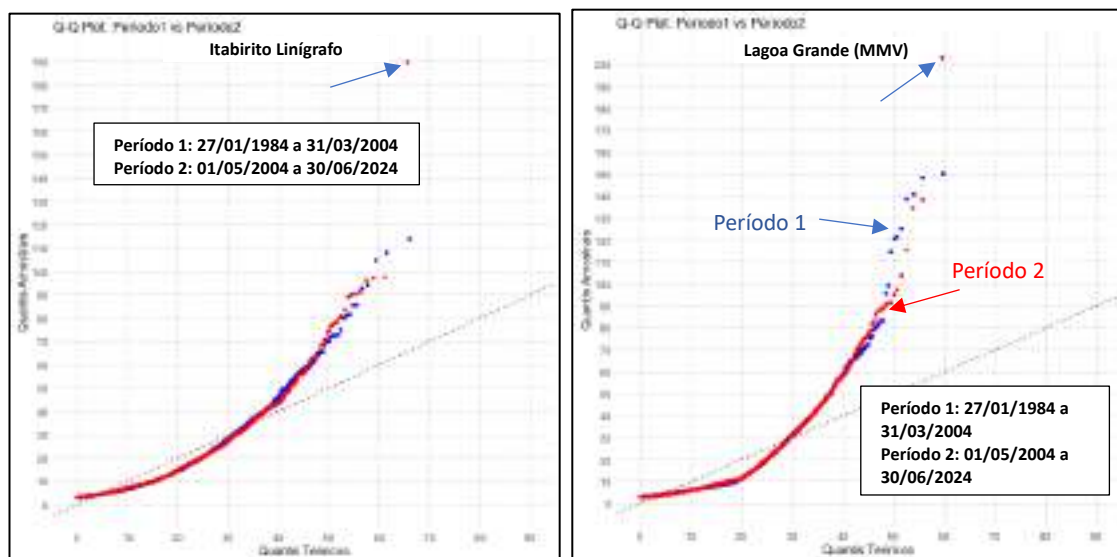
4.11.6.1 *Dois Segmentos Iguais de 20,2 anos*

Os dois gráficos a seguir apresentam a comparação dos dados dos dois períodos, com igual duração: Período 1, de 27/01/1984 a 31/03/2004, e Período 2, 01/04/2004 a 30/06/2024:



No gráfico da esquerda, referente à Estação Itabirito Linígrafo, pode-se ver que os pontos relativos aos dois períodos (Período 1 e Período 2) estão próximos da linha de referência até o valor de 40 mm/dia, ou seja, até esse valor os dois conjuntos de dados têm distribuições muito semelhantes, no caso, a distribuição dos valores de intensidade das chuvas ao longo dos períodos. Para a distribuição da Lagoa Grande esse ponto tem o valor de 30 mm/dia.

Pontos acima e abaixo da linha: os valores de Período 2 são maiores do que os de Período 1 para os mesmos quantis. Nos gráficos acima, fica evidente que, para Lagoa Grande (MMV) as chuvas com valores superiores a 90 mm por dia foram menos frequentes no Período 2 que no Período 1, com destaque para o evento extremo de 202 mm do dia 08/01/2022. Para Água Limpa as chuvas apresentam praticamente a mesma distribuição nos dois períodos, exceto no que diz respeito ao evento do dia 08/01/2022.

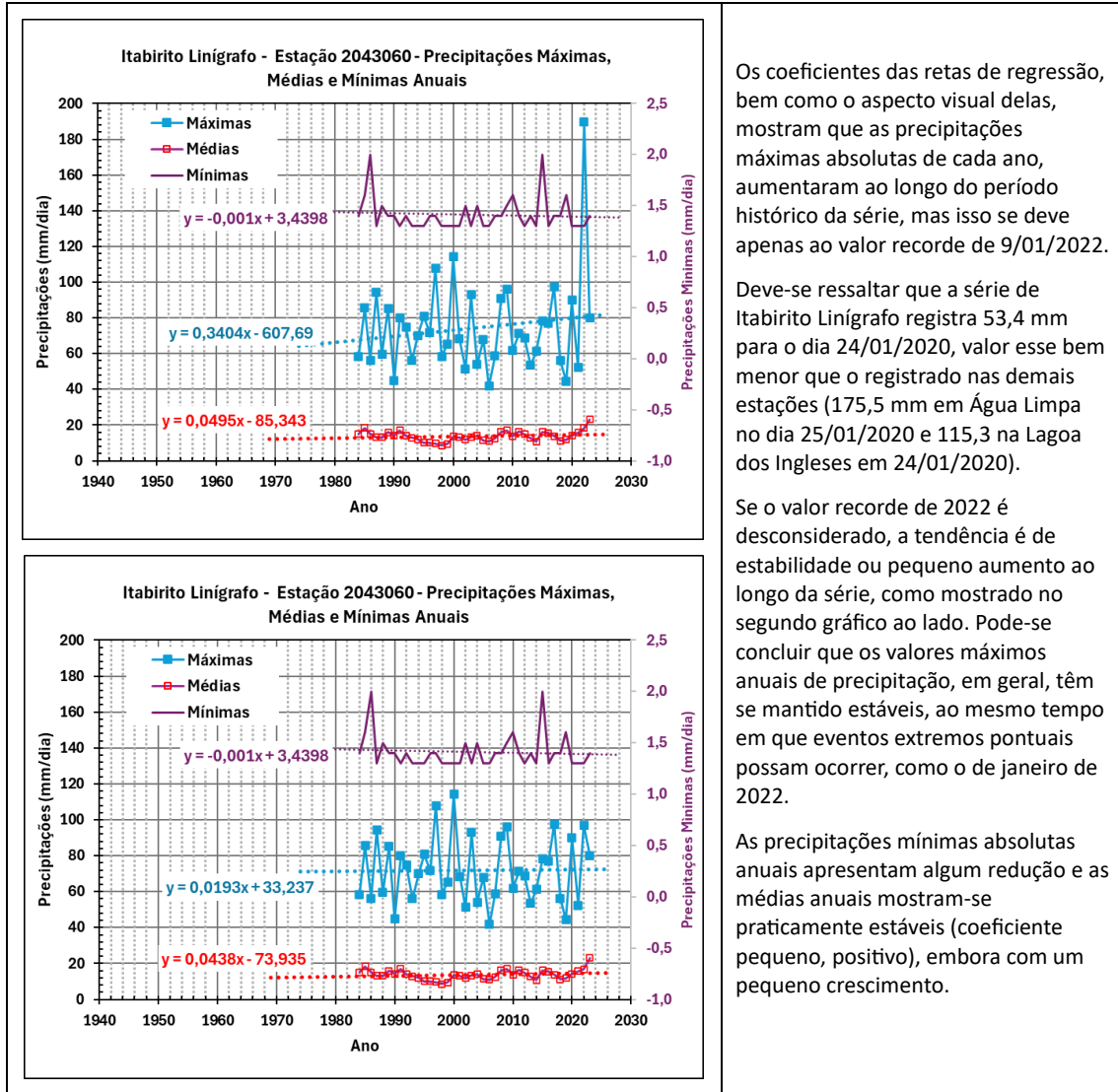


Nos dois gráficos acima pode-se ver que as duas curvas estão próximas uma da outra em sua parte inicial, o que indica que o Período 1 e o Período 2 têm distribuições semelhantes nessa parte, mas verifica-se um afastamento das duas curvas na faixa dos quantis teóricos superiores a 40 mm/ dia para Itabirito Linígrafo e 30 mm/dia para a Lagoa Grande (MMV), o que indica que

os valores maiores de intensidade de chuva afastam-se dos valores esperados em uma distribuição normal (cauda mais pesada à direita).

4.11.7 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 da Estação Itabirito – Linígrafo.



Os coeficientes das retas de regressão, bem como o aspecto visual delas, mostram que as precipitações máximas absolutas de cada ano, aumentaram ao longo do período histórico da série, mas isso se deve apenas ao valor recorde de 9/01/2022.

Deve-se ressaltar que a série de Itabirito Linígrafo registra 53,4 mm para o dia 24/01/2020, valor esse bem menor que o registrado nas demais estações (175,5 mm em Água Limpa no dia 25/01/2020 e 115,3 na Lagoa dos Ingleses em 24/01/2020).

Se o valor recorde de 2022 é desconsiderado, a tendência é de estabilidade ou pequeno aumento ao longo da série, como mostrado no segundo gráfico ao lado. Pode-se concluir que os valores máximos anuais de precipitação, em geral, têm se mantido estáveis, ao mesmo tempo em que eventos extremos pontuais possam ocorrer, como o de janeiro de 2022.

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

<p style="text-align: center;">Itabirito Linígrafo - Estação 2043060 - Precipitações Máximas, Médias e Mínimas dos Períodos Secos</p>	<p>Os coeficientes das retas e o aspecto visual delas mostram que as precipitações máximas absolutas dos períodos secos (maio a setembro), reduziram-se significativamente ao longo do período.</p> <p>As precipitações mínimas absolutas e as médias dos períodos secos apresentam alguma redução.</p> <p>Em geral, verificou-se um agravamento das secas ao longo de todo o período de 40,4 anos da série.</p>
<p style="text-align: center;">Itabirito Linígrafo - Estação 2043060 - Precipitações Máximas, Médias e Mínimas dos Períodos Úmidos</p>	<p>Como as máximas anuais ocorrem nos períodos úmidos, a curva das máximas desses períodos é praticamente igual à curva das máximas anuais.</p> <p>As precipitações mínimas absolutas dos períodos úmidos apresentam algum aumento e as médias desses períodos úmidos tiveram uma redução bastante pequena.</p>

Conclusão Geral:

A análise das tendências das precipitações ao longo da série histórica mostra que os valores máximos anuais aumentaram apenas devido ao evento extremo recente de 2022; ao desconsiderá-los, verifica-se uma tendência de estabilidade das máximas anuais, com um evento extremo recente. As precipitações mínimas absolutas anuais dos períodos secos reduziram-se um pouco e as dos períodos úmidos apresentam um leve aumento, enquanto as médias anuais dos dois períodos apresentaram leve redução.

4.11.8 Índices de Anomalias

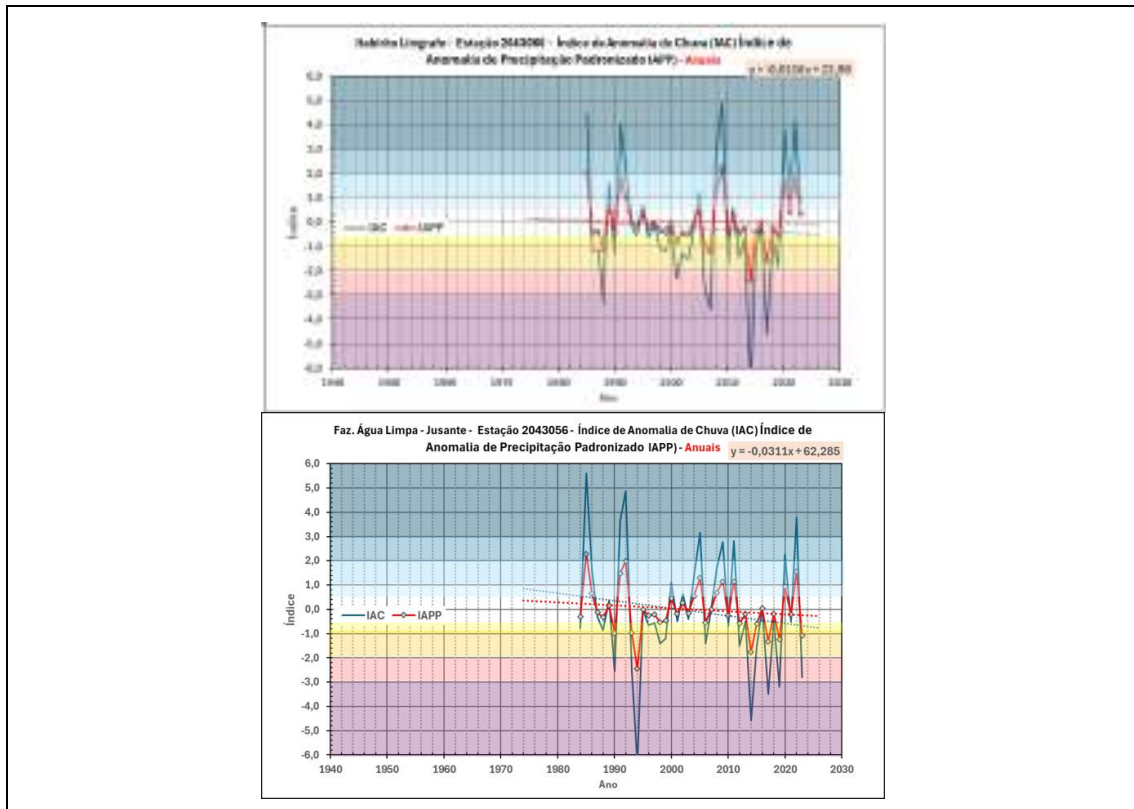
Para explicações sobre esse tipo de análise, ver parte referente à Estação Lagoa Grande (MMV).

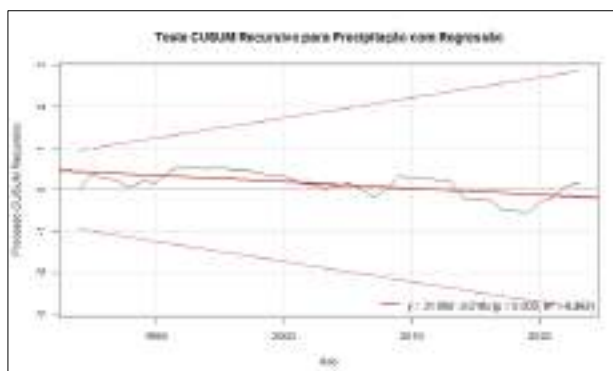
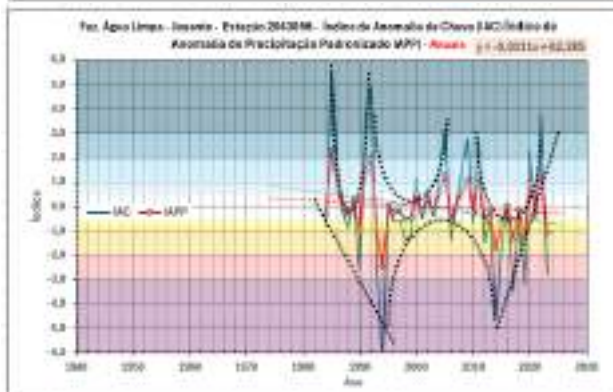
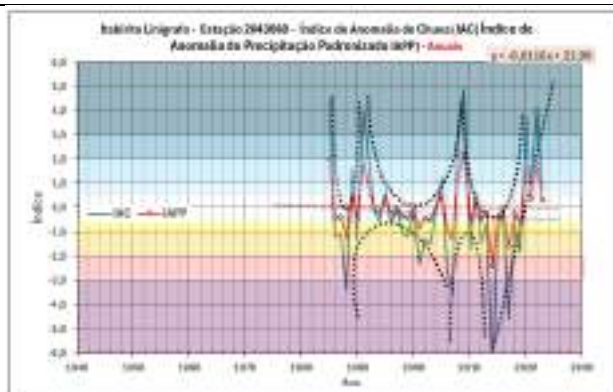
4.11.8.1 Índices de Anomalia Aplicados às Precipitações – Estação Itabirito - Linígrafo

Os gráficos a seguir apresentam os resultados dos cálculos dos índices IAC E IAPP aplicados aos valores das médias anuais das precipitações registradas pela Estação da Estação Itabirito - Linígrafo e das médias 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).

Para facilitar a comparação, foram acrescentados aos quadros a seguir os gráficos correspondentes da Estação Fazenda Água Limpa.





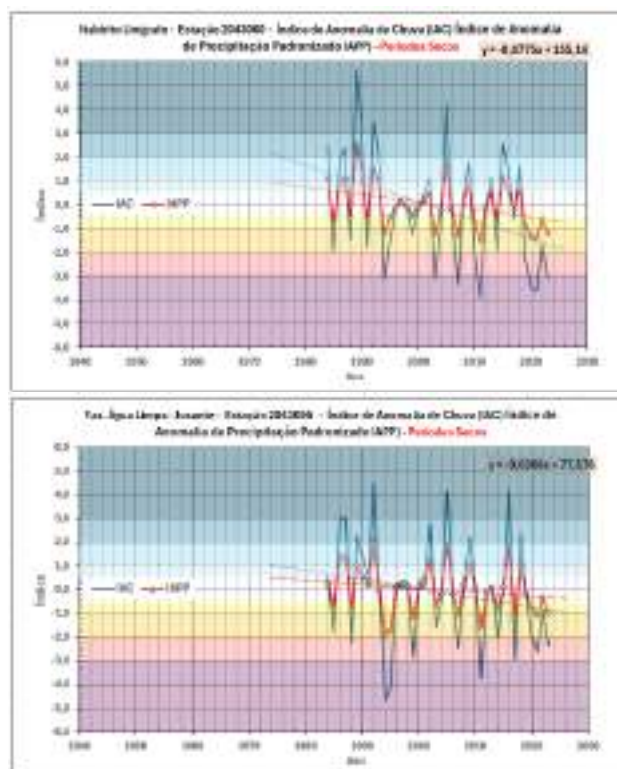
CUSUM Recursivo e CUSUM Tradicional	
Média (valor de referência)	-0.33
Desvio Padrão	2.52
Limiar de Decisão (H)	12.58
Nenhuma tendência de aumento detectada ($C^+ \leq H$)	
Tendência de DIMINUIÇÃO detectada ($C^- > H$)	
Quant. de Dados da Série Analisada	40
Valor mínimo	-6.86
1º Quartil	-1.48

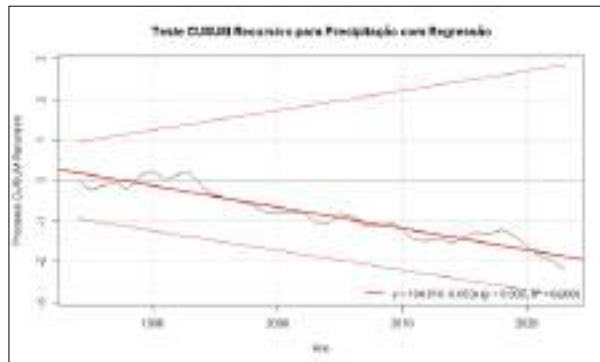
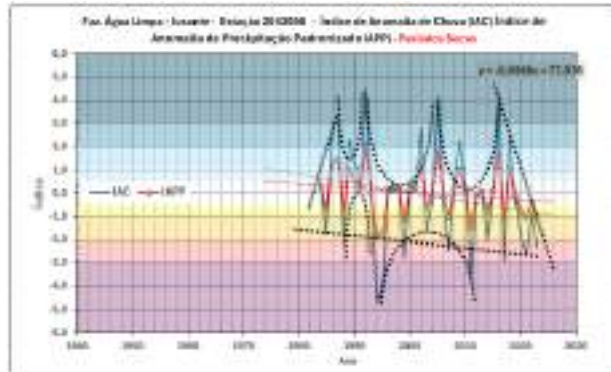
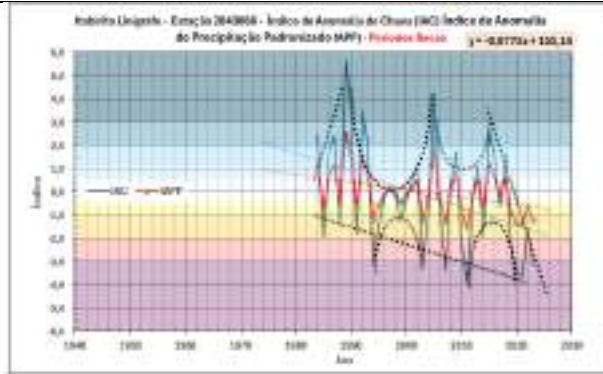
Mediana (2º Quartil)	-0.67
Média	-0.33
3º Quartil	0.77
Valor Máximo	4.88
Variância	6.33
Desvio Padrão	2.52
Equação	$y = 31.692 - 0.016x$ ($p = 0.000$, $R^2 = 0.392$)
Coefficiente angular	-0.016 (p -valor = 0.000)
R ² do modelo	0.392

Os índices de Anomalia de Chuva da Estação Itabirito – Linígrafo, assim como os da Fazenda Água Limpa, relativos aos valores anuais acumulados de precipitação apresentam tendência nítida de redução ao longo dos 40,4 anos da série histórica, ou seja, tendência de redução das anomalias positivas e aumento das negativas (as duas séries têm a mesma duração).

As linhas tracejadas superpostas aos gráficos dos índices anuais procuram destacar tendências e comportamentos de subperíodos da série. A anomalias positivas apresentaram picos em 1985, em 1992, 2005, 2009, 2020 e 2022, com ciclos de aproximadamente 7, 13, 4 e 2 anos, picos também verificados no gráfico da Fazenda Água Limpa.

As anomalias negativas apresentaram picos em 1988, 2002, 2007, 2014 e 2017, o que configura um quadro de aumento da frequência das anomalias negativas, como no caso da Fazenda Água Limpa.





CUSUM Recursivo e CUSUM Tradicional	
Média (valor de referência)	-0.24
Desvio Padrão	2.39
Limiar de Decisão (H)	11.93
Tendência de AUMENTO detectada (C ⁺ > H)	
Tendência de DIMINUIÇÃO detectada (C ⁻ > H)	
Quant. de Dados da Série Analisada	40
Valor mínimo	-4.04
1º Quartil	-1.97
Mediana (2º Quartil)	-0.49
Média	-0.24



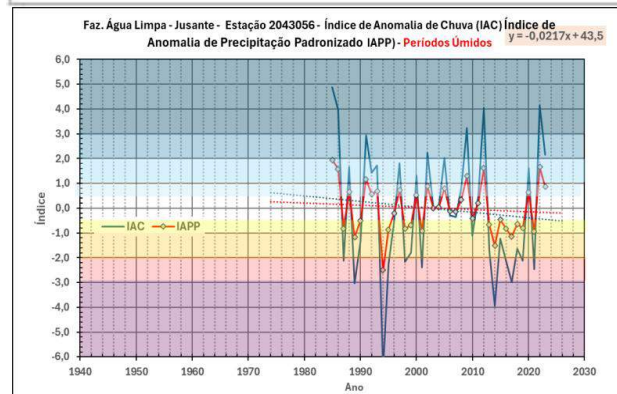
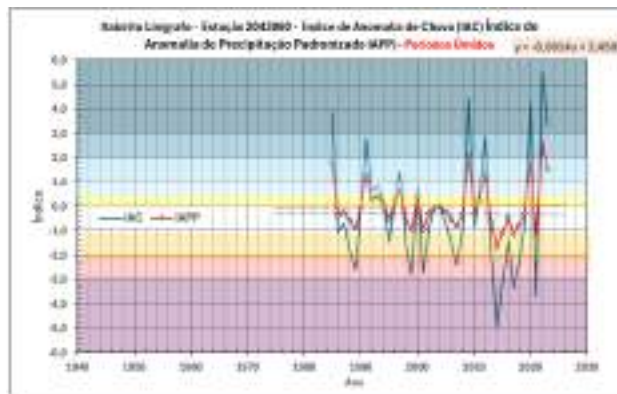
3º Quartil	1.71
Valor Máximo	5.54
Variância	5.69
Desvio Padrão	2.39
Equação	$y = 104.610 - 0.053x$ ($p = 0.000$, $R^2 = 0.900$)
Coefficiente angular	-0.053 (p -valor = 0.000)
R ² do modelo	0.900

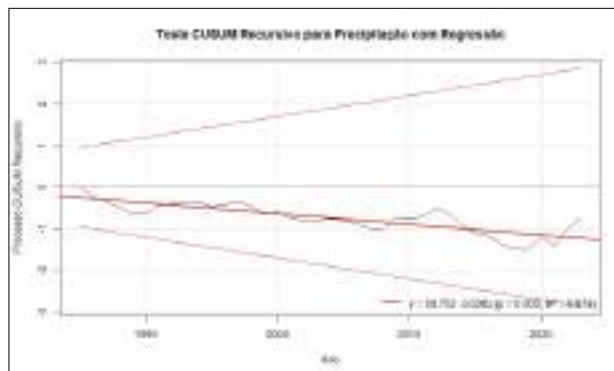
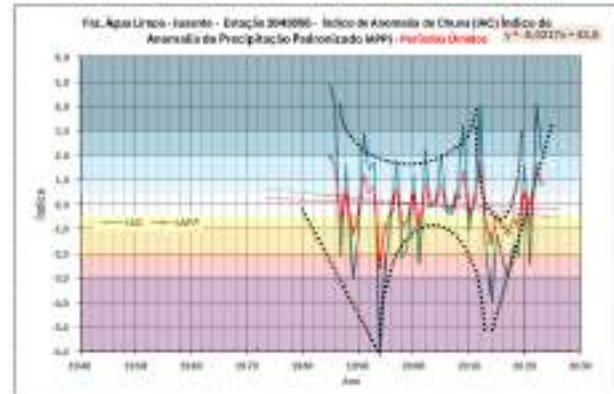
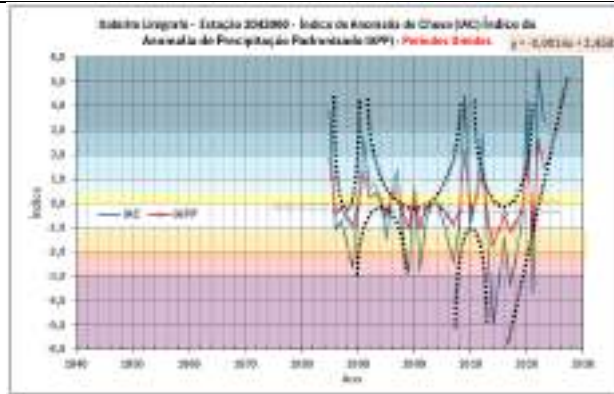
Os índices de Anomalia de Chuva da Estação Itabirito – Linígrafo, assim como os da Fazenda Água Limpa, relativos aos valores acumulados de precipitação dos períodos secos de cada ano (maio a setembro) também apresentam tendência nítida de redução ao longo dos 40,4 anos da série histórica, ou seja, tendência de redução das anomalias positivas e aumento das negativas. Essa tendência se mostra acentuada a partir de 2016.

Picos de anomalias positivas ocorreram em 1989, 1992, 2005, 2009, 2016 e 2018.

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

Nas duas estações observa-se que, de 1993 a 2001, predominaram anomalias negativas com índices altos, sugerindo uma alteração climática nos períodos secos. A partir de 2002 sucederam-se, com intervalos de 3 a 4 anos, picos com valores absolutos maiores, de índices positivos e negativos, indicando significativa instabilidade climática. De forma particular, nas duas estações, houve uma redução pronunciada dos índices positivos a partir de 2016, o que indica secas mais severas nos últimos 7 anos da série.





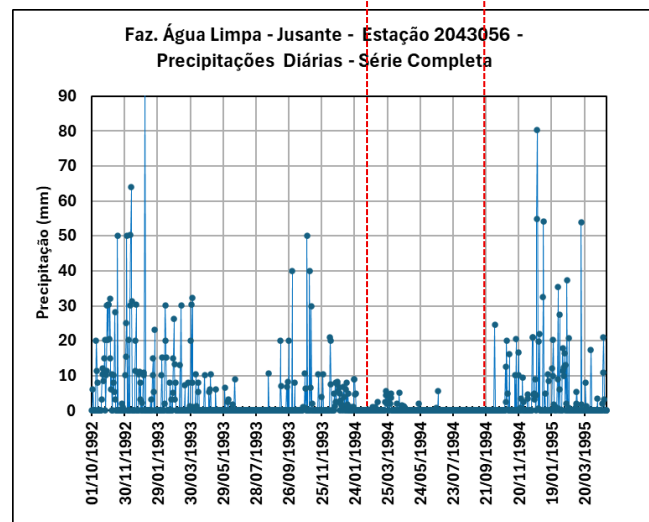
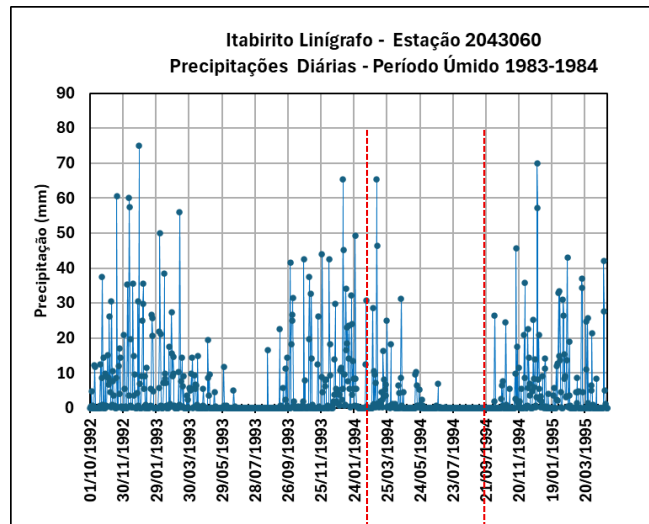
CUSUM Recursivo e CUSUM Tradicional	
Média (valor de referência)	-0.31
Desvio Padrão	2.43
Limiar de Decisão (H)	12.16
Nenhuma tendência de aumento detectada ($C^+ \leq H$)	
Tendência de DIMINUIÇÃO detectada ($C^- > H$)	
Quant. de Dados da Série Analisada	39
Valor mínimo	-4.97
1º Quartil	-1.72

Mediana (2º Quartil)	-0.79
Média	-0.31
3º Quartil	0.69
Valor Máximo	5.52
Variância	5.91
Desvio Padrão	2.43
Equação	$y = 50.752 - 0.026x$ ($p = 0.000$, $R^2 = 0.674$)
Coefficiente angular	-0.026 (p -valor = 0.000)
R ² do modelo	0.674

Os índices de Anomalia de Chuva da Estação Itabirito – Linígrafo, assim como os da Fazenda Água Limpa, relativos aos valores acumulados de precipitação dos períodos úmidos apresentam comportamento geral similar ao dos índices anuais, com tendência nítida de redução ao longo dos 40,4 anos da série histórica, ou seja, tendência de redução das anomalias positivas e aumento das negativas. No entanto, destaca-se uma tendência acentuada, a partir de 2009, de redução do módulo das negativas e aumento das positivas, o que aponta para o aumento dos eventos de alta pluviosidade, como os eventos extremos de 2020 e 2022.

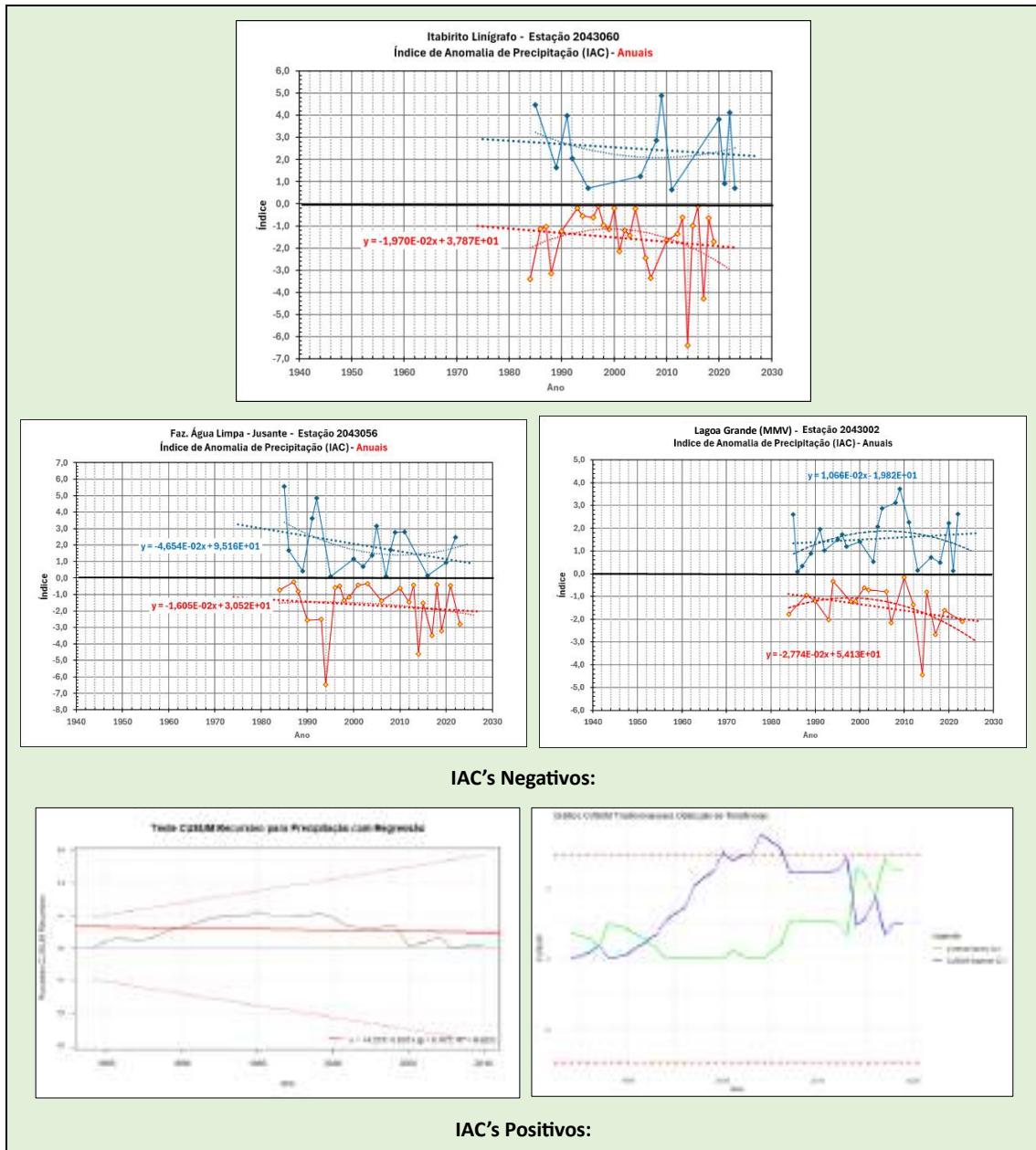
Tal como na Fazenda Água Lima, as anomalias positivas dos períodos úmidos apresentaram picos maiores em 1985, 1991, 2009, 2012 e 2022, com ciclos de aproximadamente 6, 18, 3 e 10 anos e as anomalias negativas apresentaram picos maiores em 1989, 1999, 2001, 2014, 2017 e 2021.

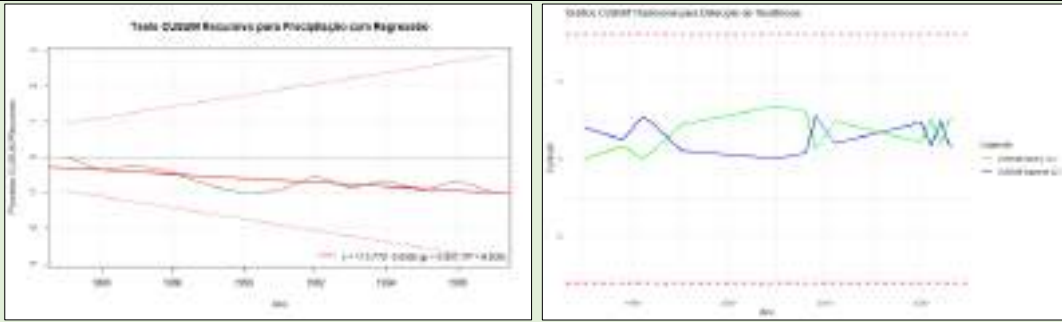
O pico de valor -8,0 da Fazenda Água Limpa no ano de 1994 não foi verificado na estação Itabirito - Linígrafo. Abaixo são apresentados os gráficos das precipitações diárias do período de 01/10/1992 a 30/04/1995 mostrando que na área da Fazenda Água Limpa o período úmido de 01/10/1983 a 30/4/1994 teve baixos valores de precipitação, o que justifica a alto índice negativo de anomalia. Essa diferença marcante – caso não possa ser atribuída a falhas ou imprecisões das medições a estação Água Lima – indica uma grande diferença climática entre dois pontos situados no vale do Rio das Velhas e distantes entre si de apenas 17 km em linha reta.



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.

Também aqui, para facilitar a comparação, foram acrescentados aos quadros a seguir os gráficos correspondentes da Estação Fazenda Água Limpa e da Lagoa dos Ingleses.

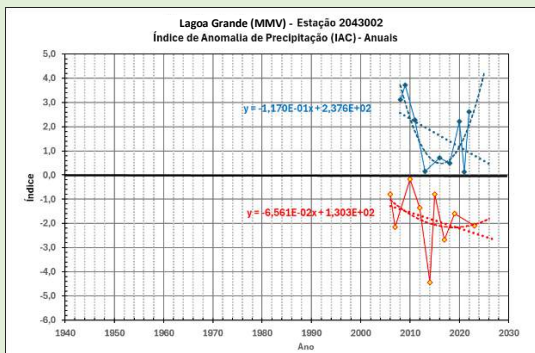
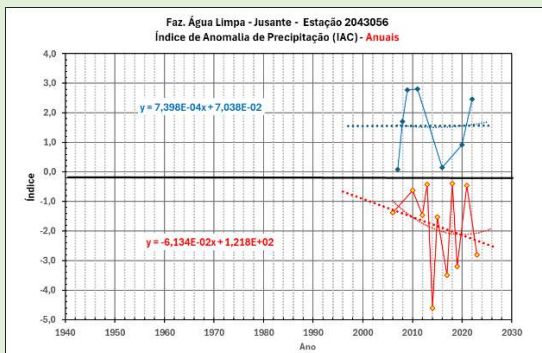
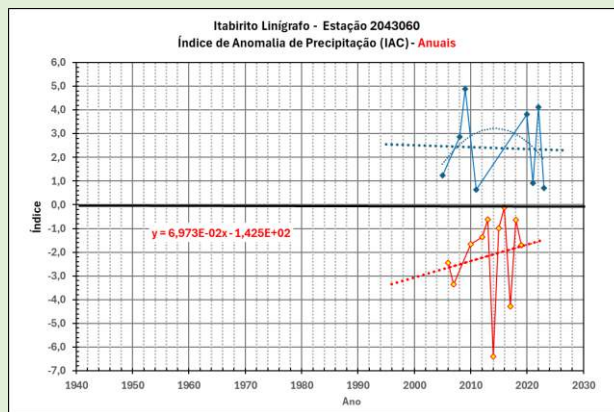




Considerando-se um período anual para a análise, o gráfico da Estação Itabirito Linígrafo, assim como o da Fazenda Água Limpa, mostra tendência, ao longo dos 40,4 anos das séries (as séries das duas estações têm a mesma duração), de redução do módulo dos valores das anomalias positivas e aumento do módulo das negativas, apesar dos ciclos de seca e umidade, o que indica uma tendência de redução da pluviosidade se a série é considerada em sua totalidade.

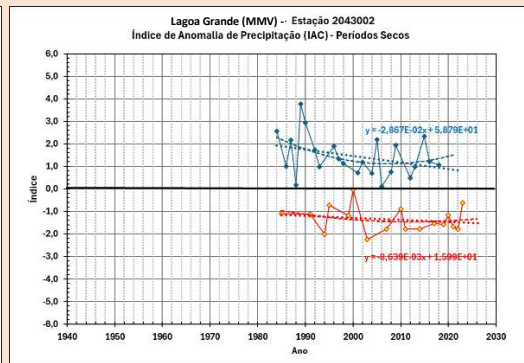
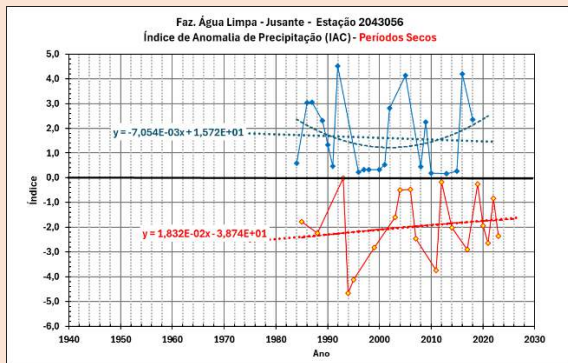
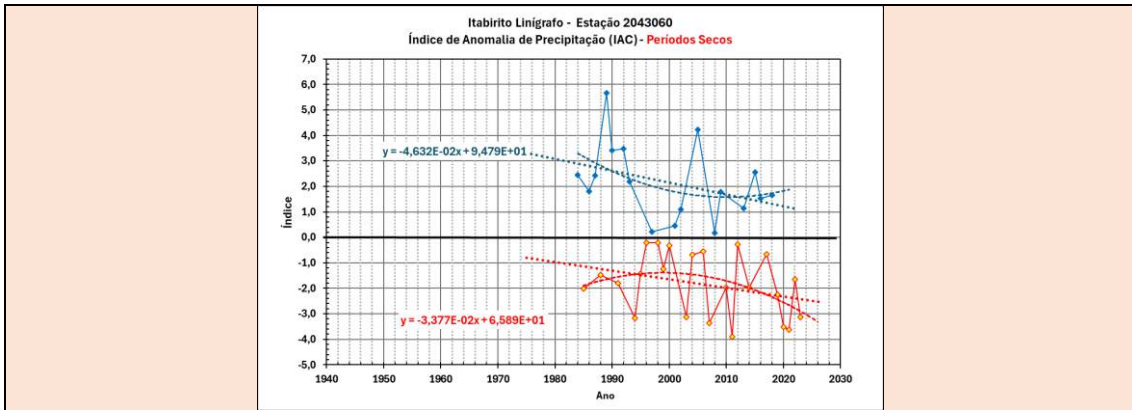
A tendência das anomalias positivas na áreas representadas pelas estações Itabirito – Linígrafo e Fazenda Água Limpa é oposta à verificada na Lagoa Grande (MMV) no mesmo período (1984 a 2023), como se pode ver pelo gráfico inferior da direita, ou seja, enquanto em Itabirito – Linígrafo e na Fazenda Água Lima (área do vale, junto ao Rio Itabirito e ao Rio das Velhas) houve redução significativa do módulo das anomalias positivas ao longo dos últimos 40,4 anos, na Lagoa Grande (MMV) (área da serra e dos aquíferos que alimentam nascentes) houve um aumento pequeno dos módulos dessas anomalias.

Na área das três estações houve aumento do módulo das anomalias negativas, ou seja, intensificação das negativas ao longo dos últimos 40,4 anos, sendo essa intensificação mais forte na serra, área da Lagoa Grande (MMV), o que denota agravamento das secas nas duas áreas.

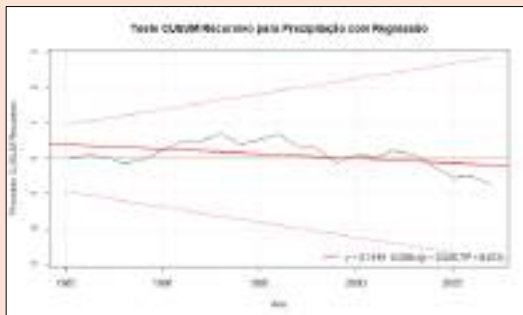


Se consideramos apenas os últimos 18 anos, a tendência anual na área das estações Itabirito – Linígrafo e Fazenda Água Limpa é de estabilidade dos valores das anomalias positivas. No mesmo período, na área da Lagoa Grande (MMV), a tendência foi de acentuada redução dos valores dos módulos das anomalias positivas.

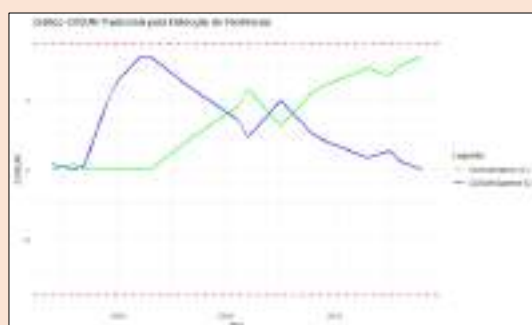
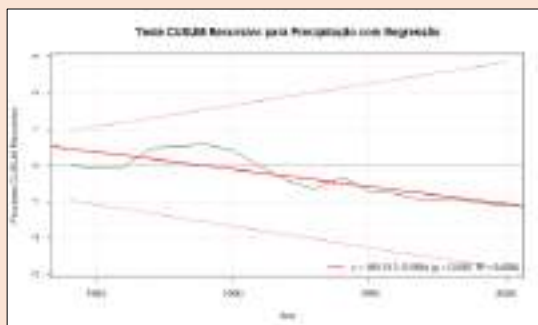
No entanto, em Itabirito – Linígrafo houve tendência de redução do módulo das anomalias negativas, enquanto na Fazenda Água Lima e na Lagoa Grande (MMV) houve aumento do módulo das negativas, ou seja, agravamento das secas. Essa diferença aponta para comportamentos climáticos um tanto distintos em áreas não muito distantes umas das outras.



IAC's Negativos:



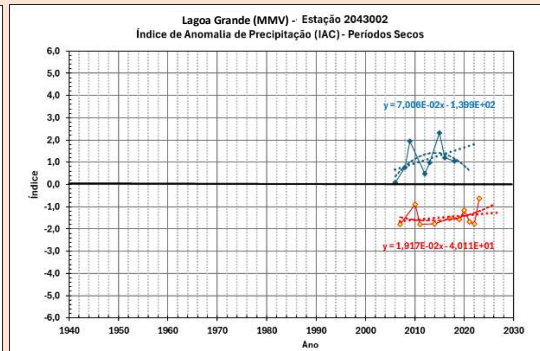
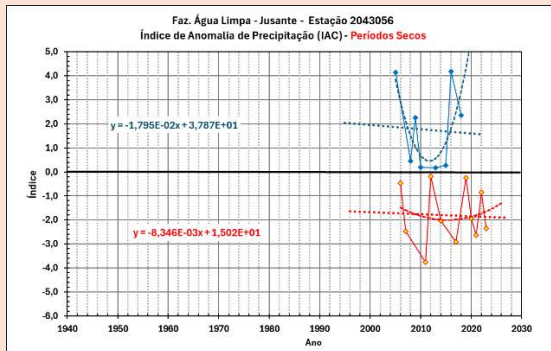
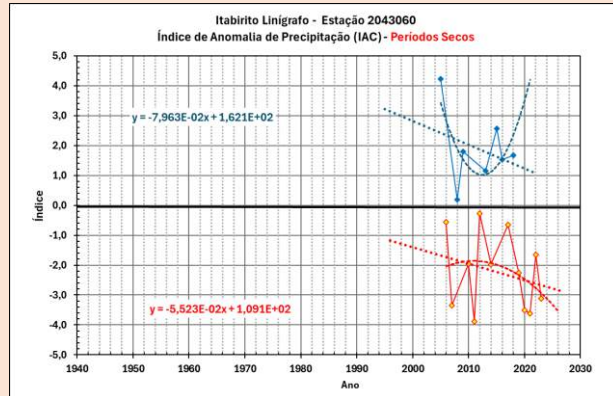
IAC's Positivos:



Considerando-se o período seco de cada ano (maio a setembro) da série histórica da Estação Itabirito - Linígrafo (gráfico superior), observa-se uma tendência geral, ao longo dos 40,4 anos da série, redução do módulo das anomalias positivas e aumento do módulo das negativas, comportamento similar ao da Lagoa Grande (MMV).

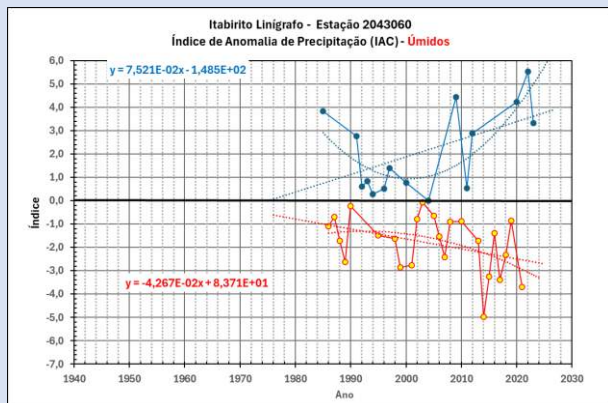
No mesmo período de 40,4 anos, na área da Fazenda Água Limpa (gráfico inferior da esquerda), houve redução do módulo tanto das anomalias positivas quanto das negativas.

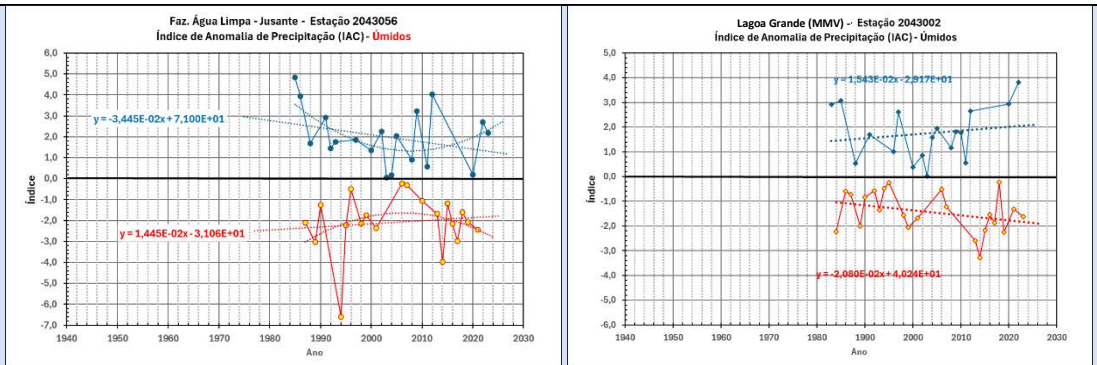
Dessa forma, verifica-se uma redução das anomalias positivas, que pode estar associada a uma redução da pluviosidade, nas áreas das três estações e uma leve redução da severidade das secas somente na área da Fazenda Água Limpa.



Considerando-se o período seco de cada ano (maio a setembro) das séries históricas de Itabirito Linígrafo (gráfico superior) e da Fazenda Água Limpa observa-se uma tendência geral, ao longo dos últimos 18 anos da série, redução do módulo das anomalias positivas e aumento do módulo das negativas, o que denota agravamento da severidade das secas nos últimos 18 anos, tendência essa que é mais pronunciada na área da estação Itabirito – Linígrafo.

Por outro lado, nos últimos 18 anos os períodos secos na área da Estação Lagoa Grande (MMV) houve tendência oposta, com redução da severidade das secas (gráfico inferior da direita).

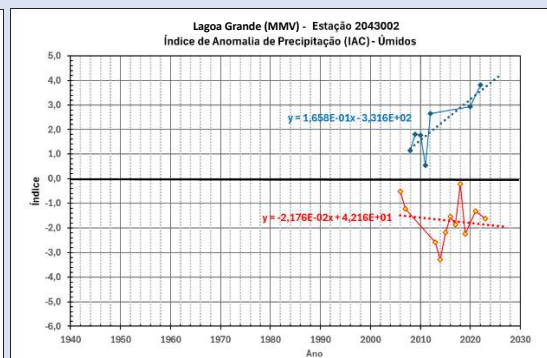
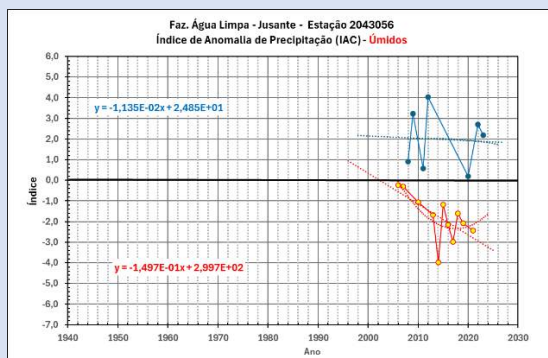
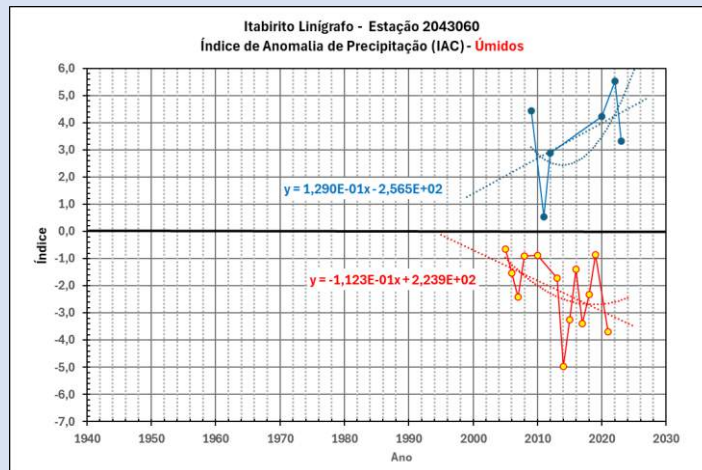




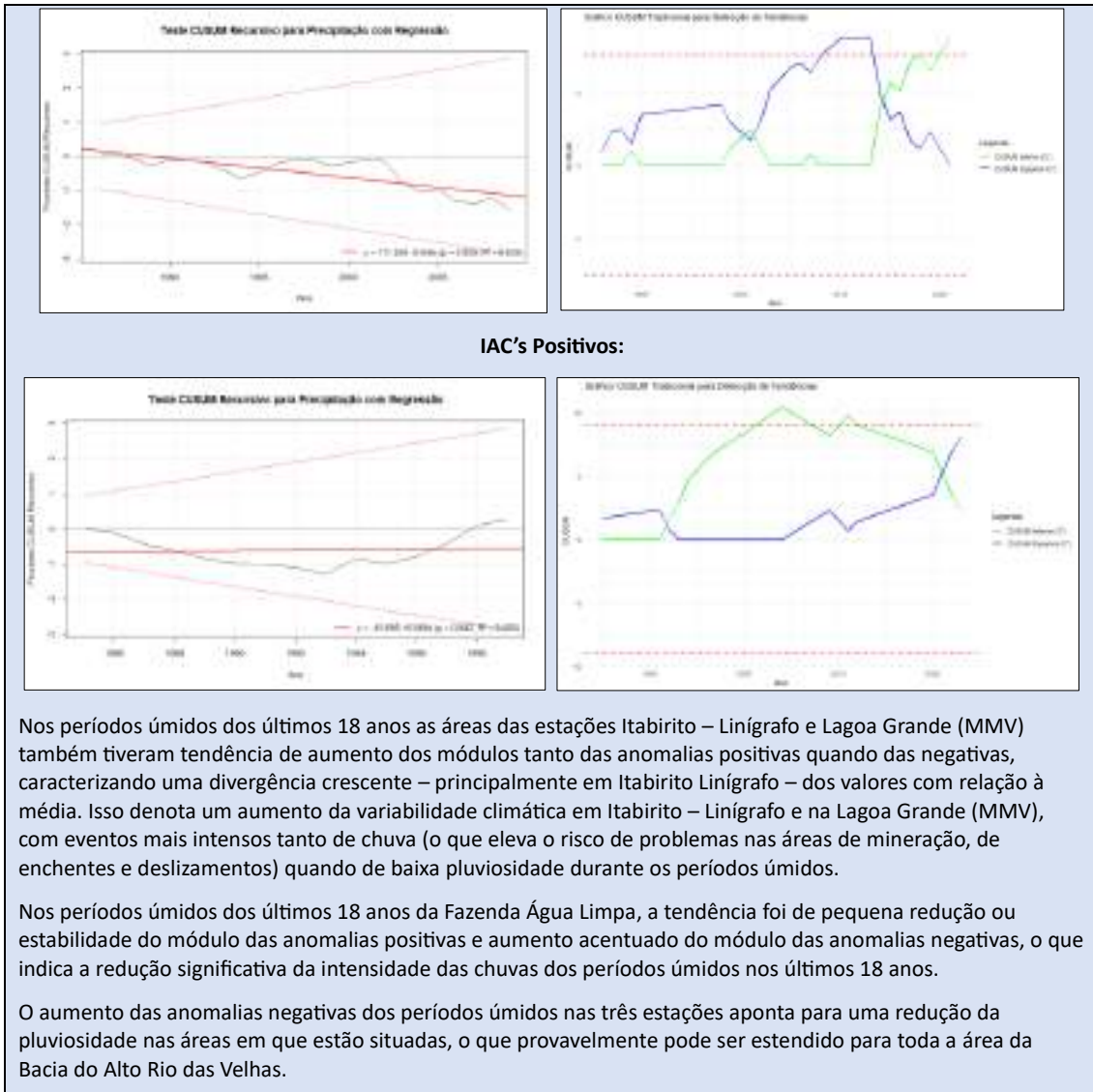
Nos períodos úmidos dos últimos 40,4 anos, as áreas das estações Itabirito – Linígrafo e Lagoa Grande (MMV) tiveram tendência de aumento dos módulos tanto das anomalias positivas quanto das negativas, caracterizando uma divergência crescente – principalmente em Itabirito Linígrafo – dos valores com relação à média. Isso denota um aumento da variabilidade climática em Itabirito – Linígrafo e na Lagoa Grande (MMV), com eventos mais intensos tanto de chuva quando de baixa pluviosidade durante os períodos úmidos.

Essa tendência é oposta à da Fazenda Água Limpa, onde houve tendência de redução tanto do módulo das anomalias positivas quanto das negativas, com convergência dos valores para a média histórica.

Essa diferença aponta para comportamentos climáticos um tanto distintos em área não muito distantes umas das outras.



IAC's Negativos:



Conclusões – Série de 40,4 anos

Ao longo dos 40,4 anos, a área representada pela Estação Itabirito - Linígrafo apresentou redução do módulo das anomalias positivas e aumento do módulo das negativas nos valores anuais, indicando tendência de redução da pluviosidade e agravamento das secas, comportamento similar ao verificado na Fazenda Água Limpa.

No mesmo período, a área representada pela Lagoa Grande (MMV), quando se toma em conta os valores anuais das anomalias, verifica-se ligeiro aumento das anomalias positivas e intensificação mais forte das negativas. Essa tendência é similar, porém menos intensa que a dos períodos úmidos da área da Estação Itabirito – Linígrafo e denota agravamento mais severo tanto das secas quando dos eventos de maior pluviosidade, ou seja, uma tendência à extremização do clima.

Nos períodos secos (maio a setembro) em Itabirito – Linígrafo, assim como na Lagoa Grande (MMV), porém de forma mais intensa em Itabirito - Linígrafo, houve redução do módulo das anomalias positivas e aumento do módulo das negativas, indicando agravamento das secas. Esse comportamento difere do verificado na Fazenda Água Limpa, onde houve tendência de



convergência das anomalias positivas e negativas para a média histórica, sinalizando estabilização climática nesse recorte.

Conclusões – Últimos 18 anos

Nos valores anuais de Itabirito - Linígrafo, houve redução do módulo das anomalias positivas e aumento do módulos das negativas, indicando agravamento das secas recentes, comportamento similar ao da Lagoa Grande (MMV). Na Fazenda Água Limpa também ocorreu agravamento das secas, com estabilidade das anomalias positivas e aumento do módulo das negativas.

Nos períodos secos, em Itabirito – Linígrafo também houve redução do módulo das anomalias positivas e aumento do módulos das negativas, indicando agravamento das secas recentes, comportamento similar, porém de maior intensidade que o da Fazenda Água Limpa. Na Lagoa Grande (MMV), por outro lado, os períodos secos mostraram redução da severidade das secas, com tendência de aumento dos módulos das anomalias positivas e redução dos módulos das negativas

Nos períodos úmidos, em Itabirito – Linígrafo, assim como na Lagoa Grande (MMV), porém de forma mais intensa em Itabirito - Linígrafo, houve aumento do módulo das anomalias positivas e redução do módulo das negativas, indicando uma extremização do clima. Esse comportamento difere pouco do verificado na Fazenda Água Limpa, onde houve tendência pequena de redução do módulo das anomalias positivas e também aumento das negativas. Os eventos mais intensos de chuva elevam s riscos de problemas nas áreas de mineração, de enchentes e deslizamentos e não representam recarga equivalente dos aquíferos, pois o escoamento superficial aumenta sem tempo suficiente para que a água penetre no solo. Por outro lado, a baixa pluviosidade dos anos de anomalias negativas dos períodos úmidos também pode resultar em menor recarga dos aquíferos.

4.11.8.2 Índices de Anomalia Aplicados às Precipitações – Itabirito Linígrafo – 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.

4.11.8.2.1 Série Completa – 1984 a 2023

As tabelas a seguir compilam o somatório dos valores dos Índices de Anomalias de Chuva referentes à série completa 1984 a 2023) e permitem comparações úteis à análise das anomalias da série.

Estação Pluviométrica Itabirito - Linígrafo						
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	12	27,19	2,27	27	-42,36	-1,57
Seco	17	36,29	2,13	23	-42,43	-1,84
Úmido	15	31,91	2,13	24	-43,89	-1,83

Análise dos valores da tabela:



Anos Cíveis:

A quantidade de anos com chuvas acima da média (12 anos, 30%) é menor que a de anos com chuvas abaixo da média (27 anos, 67,5%). Isso aponta para uma forte predominância de anos secos sobre os anos úmidos ao longo da série. Ou seja, a quantidade de anos secos foi 2,25 vezes maior que a de anos úmidos.

Além da maior quantidade de anos negativos, a soma dos IAC negativos (-42,36) também foi substancialmente superior, em módulo, à soma dos positivos (+27,19), revelando que as secas foram não só mais comuns, como também mais intensas que os anos com excesso de precipitação. Isso tem implicações importantes:

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

Média dos Índices por Grupo

- Média dos anos úmidos (positivos): $(27,19 \div 12) \approx +2,27$
- Média dos anos secos (negativos): $(-42,36 \div 27) \approx -1,57$

Isso reforça que os anos úmidos apresentaram anomalias mais intensas (em média +2,27) do que os anos secos (-1,57).

Conclusão – Valores Anuais:

A série histórica de IAC da Estação revela um comportamento climático com predominância de anos secos. No entanto, a intensidade dos anos úmidos foi maior, indicando que os anos úmidos, embora menos frequentes, foram mais severos em termos de intensidade de chuva. Isso caracteriza um regime climático com eventos úmidos mais impactantes, o que pode demandar atenção especial na gestão dos riscos derivados da maior pluviosidade, e com secas mais constantes, que resultam em um cenário de maior vulnerabilidade hídrica e ambiental.

É importante salientar que esse padrão é o mesmo verificado na área representada pela Estação Fazenda Água Limpa.

Períodos Secos:

A quantidade de anos com anomalias positivas (23) é maior que o de negativas (17) nos períodos secos, evidenciando uma **predominância de períodos secos com chuvas abaixo da média** ao longo da série. Isso representa cerca de **57,5%** dos anos com anomalias negativas e **42,5%** com anomalias positivas, confirmando a **tendência de recorrência de secas sazonais**. Esse comportamento difere do verificado na Fazenda Água Limpa, onde não houve predomínio claro de seca ou umidade na frequência da série de períodos secos.

Intensidade Média das Anomalias



A soma dos IAC negativos (-42,43) é maior, em módulo, do que a soma dos positivos (+36,29), o que revela uma assimetria na distribuição das anomalias.

- Média dos anos com anomalias positivas: $(36,29 \div 17) \approx +2,14$
- Média dos anos com anomalias negativas: $(-42,43 \div 23) \approx -1,85$

Essa diferença revela que, quando os períodos secos têm precipitação abaixo da média, esses déficits tendem a ser menos intensos do que os eventos de chuva acima da média.

Conclusão – Períodos Secos:

A análise dos períodos secos da série revela um quadro de desequilíbrio climático, marcado por uma maior frequência de anos com precipitações abaixo da média, indicando recorrência de secas. Embora os anos com anomalias positivas tenham apresentado maior intensidade média, sua ocorrência reduzida não compensa os impactos acumulados das secas mais frequentes. Isso evidencia uma tendência climática desfavorável à disponibilidade hídrica durante os meses secos na região de Itabirito, com possíveis implicações para o abastecimento de água, a recarga de aquíferos e a sustentabilidade dos ecossistemas locais.

Esse padrão é coerente com o dos períodos secos da Fazenda Água Limpa, que mostra uma frequência quase equilibrada entre anos úmidos e secos, mas com anomalias negativas mais intensas, em média.

Períodos Úmidos:

Na área da Estação Itabirito – Linígrafo houve clara predominância de anos com anomalias negativas nos períodos úmidos: 24 anos (60% da série), contra 15 anos (37,5%) com anomalias positivas. Isso indica que, ao longo da série, foi mais comum haver chuvas abaixo da média nos períodos em que historicamente se espera maior precipitação. Esse comportamento difere do verificado na Fazenda Água Limpa, onde não houve predomínio claro de seca ou umidade na frequência da série de períodos úmidos.

Intensidade Média das Anomalias

A soma das anomalias negativas (-43,89) é maior, em módulo, do que a soma das positivas (+31,91). Isso indica uma forte predominância de intensidade das secas em relação às chuvas excessivas nos períodos úmidos, o que sugere maior severidade dos anos secos.

- Média dos anos positivos: $(31,91 \div 15) \approx +2,13$
- Média dos anos negativos: $(-43,89 \div 24) \approx -1,83$

A média das anomalias negativas é maior que a das positivas, indicando anos com excesso de chuva foram mais intensos individualmente, mas menos frequentes do que os anos com déficit hídrico.

Conclusão – Períodos Úmidos:

Os dados apontam para uma tendência climática desfavorável durante os períodos úmidos, com predominância de chuvas abaixo da média, o que compromete justamente a estação responsável por repor os recursos hídricos e recarregar os aquíferos. Embora os anos com anomalias positivas tenham sido mais intensos, eles foram menos frequentes, o que significa



que eventos chuvosos extremos foram pontuais e não compensaram a frequência das deficiências hídricas. Em termos climáticos, o cenário sugere um risco crescente de instabilidade e variabilidade nas chuvas dos períodos úmidos, com impactos potenciais sobre abastecimento, agricultura e meio ambiente na região de Itabirito.

Esse padrão é coerente com o dos períodos úmidos da Fazenda Água Limpa, que mostra uma frequência quase equilibrada durante os períodos úmidos, mas com anomalias negativas mais intensas, em média.

Conclusão – Série Completa – Valores Anuais, Períodos Úmidos e Secos

A análise consolidada evidencia que a Estação Pluviométrica Itabirito – Linígrafo apresentou, ao longo de 40 anos, uma clara predominância de anomalias negativas (anos secos), especialmente no acumulado anual, com chuvas abaixo da média em dois terços dos anos. Ainda que os anos com anomalias positivas tenham sido mais intensos individualmente, eles ocorreram com muito menos frequência, o que caracteriza um quadro climático com tendência à redução da pluviosidade, tanto anual quanto nos períodos seco e úmido. Essa condição sugere risco crescente de déficit hídrico e aumento da vulnerabilidade climática na região.

4.11.8.2.2 Comparação dos Períodos de 1984 a 2004 e 2004 a 2023

As tabelas a seguir compilam o somatório dos valores dos Índices de Anomalias de Chuva referentes aos períodos de 1984 a 2004 e 2004 a 2023.

Estação Pluviométrica Itabirito - Linígrafo 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	5 (24%)	12,87	2,57	16 (76%)	-18,80	-1,17
Seco	10 (48%)	23,19	2,32	11 (52%)	-15,64	-1,42
Úmido	9 (43%)	11,00	1,22	11 (57%)	-15,92	-1,45

Estação Pluviométrica Itabirito - Linígrafo 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	8 (42%)	19,20	2,05	11 (58%)	-23,56	-2,14
Seco	7 (37%)	13,10	1,87	12 (63%)	-26,80	-2,23
Úmido	6 (32%)	20,92	3,49	13 (68%)	-27,97	-2,15

A comparação das médias dos índices permite a conclusões:

Anos Cívis:

Redução da frequência de anos com chuvas abaixo da média: A predominância de anos secos (IAC negativo) é observada em ambos os períodos, o que indica persistência da seca ao longo dos 40 anos de duração da série. No primeiro segmento (1984–2004), a proporção de anos com



IAC negativo é significativamente maior (16 de 21 anos \approx 76%) que no segundo (58%). No segundo segmento (2005–2023), há redução relativa na frequência de anos secos.

Aumento na frequência e redução da intensidade dos anos chuvosos: O número de anos com IAC positivo aumentou de 5 para 8, mas a média desses valores caiu de +2,57 para +2,05, o que assinala uma redução da intensidade das chuvas no segundo período.

Agravamento dos anos secos: A média dos IAC negativos aumentou em módulo ($-1,17 \rightarrow -2,14$), o que significa que, nos últimos 20 anos, os anos secos tornaram-se mais secos, o que deve ser considerado em conjunto com o fato de que os anos úmidos tiveram redução da intensidade das chuvas.

Persistência de um balanço negativo: Em ambos os períodos, a soma total das anomalias (positivas + negativas) é negativa, o que aponta para uma tendência geral de déficit de precipitação. Porém, o déficit acumulado foi menor no segundo período ($-4,37$ contra $-5,92$), indicando certa atenuação no desequilíbrio hídrico.

Conclusão – Valores Anuais:

A estação Itabirito – Linígrafo apresentou uma tendência geral de déficit de precipitação nos últimos 40 anos. Entretanto, há sinais de mudança no padrão, com menor frequência de anos secos, e maior intensidade e frequência dos anos chuvosos no período mais recente. Apesar disso, o balanço continua negativo, revelando que as secas ainda dominam, embora com menor intensidade e frequência.

Esse padrão difere pouco do verificado na Fazenda Água Limpa, onde, nos últimos 20 anos, houve uma redução na frequência e intensidade das anomalias positivas, mas agravamento das anomalias negativas.

Essas mudanças reforçam a preocupação com escassez hídrica, resiliência de ecossistemas e planejamento de uso da água em cenários futuros.

Períodos secos:

Mudança na frequência de anos secos e úmidos durante o período seco: No primeiro segmento (1984–2004) houve um equilíbrio de anos com anomalias positivas (10 anos) e com anomalias negativas (11 anos). No segundo segmento (2005–2024), houve alteração no padrão, com predomínio de anomalias negativas (12 anos) sobre as positivas (7 anos), refletindo aumento da frequência de secas mais severas durante o período secos do ano.

Aumento da severidade das secas no segundo período: A média dos IAC positivos caiu de +2,32 para +1,87, indicando que os anos com períodos secos mais chuvosos ficaram menos intensos no segundo segmento. A média dos IAC negativos aumentou em magnitude, de $-1,42$ para $-2,23$. Assim, no segundo períodos os anos secos tornaram-se mais frequentes e mais severos no segundo período.

Balanço líquido de anomalias: O primeiro período apresentou saldo positivo, ou seja, predomínio de anos chuvosos em intensidade acumulada (1984–2004: $+23,19 - 15,64 = +7,55$). Já o segundo período apresenta saldo negativo acentuado, com domínio das secas severas, tanto em frequência quanto intensidade total (2005–2023: $+13,10 - 26,80 = -13,70$).

Conclusão – Períodos Secos:

Houve uma inversão no padrão das anomalias de precipitação entre os dois segmentos:



- 1984–2004: períodos secos com eventos úmidos mais intensos que os eventos secos e frequência praticamente igual dos dois.
- 2005–2023: aumento dos eventos secos, que se tornaram mais frequentes e muito mais intensos. Redução da frequência e da intensidade dos eventos úmidos

O desequilíbrio climático se intensificou no segundo período, com redução da quantidade e intensidade dos anos chuvosos e agravamento dos déficits hídricos devido a secas mais prolongadas e severas.

Esse padrão é similar ao verificado na Fazenda Água Limpa, onde, nos últimos 20 anos, houve:

- maior frequência de secas e menos anos úmidos, embora as secas tenham se tornado menos intensas em média;
- os poucos anos com chuvas acima da média mostraram-se mais intensos que no passado, indicando eventos pontuais de chuva mais fortes em meio a uma tendência geral de seca.

Períodos úmidos:

Aumento da frequência de anos secos e redução da frequência dos úmidos: No primeiro período (1984–2004) houve menor predominância de anos com anomalias positivas (9 anos) que positivas (11 anos), indicando mais anos com chuvas abaixo da média nos períodos úmidos. No segundo período (2005–2024) houve agravamento desse padrão, com mais anos secos (13 negativos) e menos anos úmidos (6 positivos), ou seja, maior frequência de déficits hídricos nas estações chuvosas mais recentes.

Aumento da intensidade das anomalias: As médias das anomalias positivas aumentaram expressivamente no segundo período (+1,22 para +3,49), o que mostra que anos úmidos se tornaram menos frequentes, mas muito mais intensos no segundo segmento. As médias das anomalias negativas também aumentaram no segundo período (-1,45 → -2,15), o que indica que, nos 20 anos mais recentes, períodos úmidos menos chuvosos, além de mais frequentes, foram mais severos, em média, que nos primeiros 20 anos.

Balanco líquido das anomalias

Ambos os períodos apresentaram saldos negativos, indicando predomínio de déficits hídricos mesmo nos períodos úmidos. No primeiro período (1984–2004) o déficit foi de $+11,00 - 15,92 = -4,92$. No segundo período (2005–2023) o déficit se agravou: $+20,92 - 27,97 = -7,05$.

Conclusão – Períodos Úmidos:

Houve aumento da variabilidade climática nos períodos úmidos:

- Menor frequência de anos úmidos, porém com chuvas bem mais intensas.
- Maior frequência e severidade de anos secos.

A soma total dos déficits (IAC negativos) aumentou, levando a um maior desequilíbrio hídrico nos últimos 20 anos. O aumento da intensidade das chuvas nos poucos anos úmidos não compensou a frequência e gravidade dos anos secos. Esses dados apontam para um cenário climático mais extremo e irregular, com picos de excesso e escassez, típico de regiões sob influência de alterações no padrão climático regional e global.

Esse padrão difere pouco do verificado na Fazenda Água Limpa, onde, entre 1984 e 2004, os períodos úmidos foram marcados por maior frequência e intensidade de chuvas acima da média,



enquanto entre 2005 e 2024 houve uma inversão, com mais anos de chuvas abaixo da média, embora menos severos.

Nas duas estações, as tendências apontam para uma redução da dominância dos anos chuvosos e um aumento de anos com precipitação insuficiente durante a estação úmida, o que pode ter impacto direto sobre a recarga hídrica, a agricultura e a sustentabilidade ecológica da região.

Observações Gerais:

- Nos períodos secos e úmidos houve redução na frequência de anomalias positivas nos últimos 20 anos e aumento da frequência no recorte anual.
- A intensidade dos IAC positivos caiu nos recortes anuais e secos, mas subiu significativamente nos úmidos.
- No recorte anual, os anos com IAC negativos tornaram-se menos frequentes nos últimos 20 anos, mas os dos recortes secos e úmidos aumentaram.
- A severidade das secas (média dos IAC negativos) aumentou em todos os três recortes.

Conclusões Gerais:

As análises das anomalias de precipitação (IAC) da Estação Itabirito – Linígrafo ao longo de 40 anos revelam mudanças significativas tanto nos valores anuais, quanto nos valores dos períodos secos e dos períodos úmidos.

Nos períodos secos, observou-se uma redução na frequência e na intensidade média dos anos com mais chuvas nesses períodos, ao passo que os anos com menos chuvas nesses períodos tornaram-se mais frequentes e significativamente mais intensos. Essa mudança resultou em um saldo negativo de anomalias muito acentuado no segundo segmento (2005–2023), evidenciando um agravamento das secas e uma perda da regularidade das chuvas.

Nos períodos úmidos, embora os anos mais chuvosos tenham se tornado bem mais intensos, sua frequência diminuiu. Como resultado, o saldo final também foi negativo, com déficit ainda maior no segundo período.

Essa combinação de menor regularidade e maior intensidade dos extremos climáticos aponta para um aumento na variabilidade interanual da precipitação. Em conjunto, os dados indicam uma tendência de intensificação de eventos hidrológicos extremos — secas mais severas e chuvas concentradas em poucos anos — o que reforça a importância de estratégias de gestão hídrica adaptadas às novas condições climáticas.

4.11.9 Comparação Entre as Anomalias das Estações Itabirito – Linígrafo, Fazenda Água Limpa e Lagoa Grande (MMV)

4.11.9.1 Período Anual

Aspecto	Fazenda Água Limpa	Lagoa Grande (MMV)	Itabirito – Linígrafo
1º Segmento (1984–2004)	Mais negativos (12) que positivos (9); anomalias negativas mais intensas que positivas	Mais positivos (12) que negativos (9); anomalias positivas mais intensas que negativas	Mais negativos (16) que positivos (5); anomalias positivas mais intensas que negativas

Aspecto	Fazenda Água Limpa	Lagoa Grande (MMV)	Itabirito – Linígrafo
2º Segmento (2005–2024)	Mantém mais negativos (11) que positivos (8); aumento na severidade dos negativos e dos positivos	Frequência semelhante (10/9), mas aumento na severidade dos negativos e dos positivos	Mais negativos (11) que positivos (8); redução da intensidade dos positivos e aumento da intensidade dos negativos
Comparação Geral	Tendência de redução da pluviosidade e agravamento das secas. Tendência de maior variabilidade climática com extremos mais frequentes.	Tendência de redução da pluviosidade e agravamento das secas. Tendência de maior variabilidade climática com extremos mais frequentes.	Tendência de redução da pluviosidade e agravamento das secas. Tendência de maior variabilidade climática com extremos mais frequentes.

4.11.9.2 Período Seco (maio–setembro)

Aspecto	Fazenda Água Limpa	Lagoa Grande (MMV)	Itabirito – Linígrafo
1º Segmento (1984–2004)	Mais positivos (13) que negativos (8); anomalias negativas e positivas com intensidades semelhantes	Mais positivos (14) que negativos (7); anomalias positivas mais intensas que negativas	Frequência equilibrada: 10 positivos e 11 negativos; positivos mais intensos que os negativos
2º Segmento (2005–2024)	Inversão: mais negativos (11) que positivos (8); queda na intensidade dos positivos e dos negativos	Inversão também: mais negativos (10) que positivos (9); queda da intensidade dos positivos e aumento da intensidade dos negativos	Inversão clara: 12 negativos e 7 positivos; positivos menos intensos e negativos significativamente mais severos
Comparação Geral	Agravamento das secas.	Agravamento das secas, mas com queda ainda mais acentuada das chuvas que superam a média dos períodos secos.	Agravamento das secas, com aumento da severidade dos eventos negativos e redução da frequência e intensidade dos positivos.

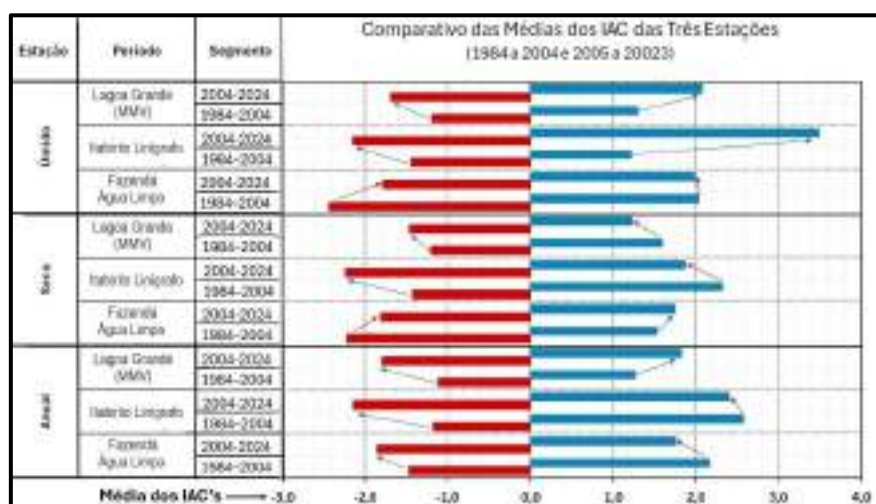
4.11.9.3 Período Úmido (outubro–abril)

Aspecto	Fazenda Água Limpa	Lagoa Grande (MMV)	Itabirito – Linígrafo
1º Segmento (1984–2004)	Leve predominância de positivos (11 vs 9); anomalias negativas e positivas com intensidades semelhantes	Mais negativos (12) que positivos (9); anomalias negativas e positivas com intensidades semelhantes	Mais negativos (11) que positivos (9); positivos menos frequentes e menos intensos; saldo final negativo
2º Segmento (2005–2024)	Inversão: mais negativos (11) que positivos (8); aumento na severidade	Mesma frequência (11 negativos / 8 positivos); aumento na severidade	Mais negativos (13) que positivos (6); positivos muito mais intensos, mas

Aspecto	Fazenda Água Limpa	Lagoa Grande (MMV)	Itabirito – Linígrafo
	dos negativos e dos positivos, mas com aumento maior dos positivos	dos negativos e dos positivos, com destaque para os positivos	não suficientes para compensar os negativos; saldo final ainda mais negativo
Comparação Geral	Aumento da variabilidade climática: extremos mais intensos tanto de excesso quanto de escassez de chuva	Aumento da variabilidade climática: extremos mais intensos tanto de excesso quanto de escassez de chuva	Aumento da variabilidade climática: extremos mais intensos tanto de excesso quanto de escassez de chuva

4.11.9.4 Gráficos Comparativos

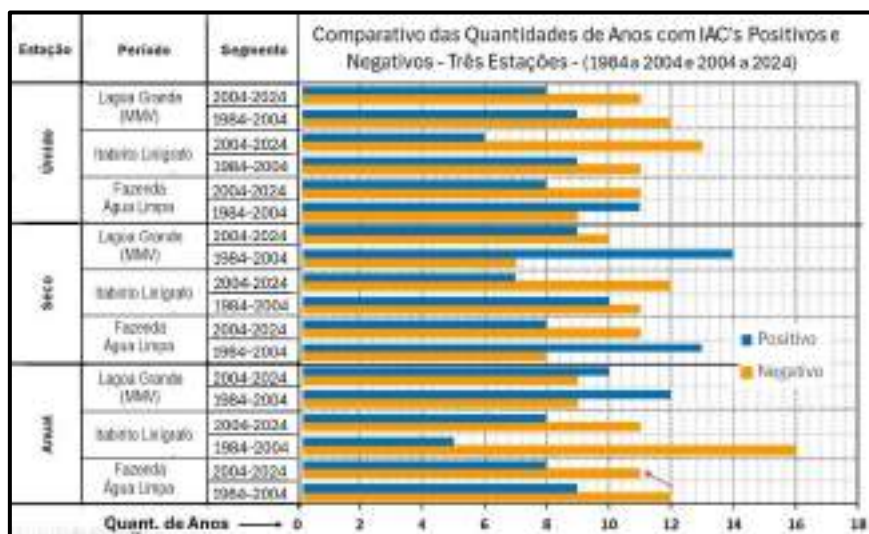
Os gráficos a seguir apresentam a comparação entre os valores de IAC's das três estações nos dois períodos de aprox. 20 anos. Para facilitar a visualização das alterações foram adicionadas setas que as indicam.



Pode-se ver no gráfico acima que, comparadas com as dos primeiros 20 anos das séries selecionadas, as anomalias negativas se tornaram mais intensas em todos os recortes (anual, seco e úmido), exceto nos recortes dos períodos seco e úmido da Fazenda Água Limpa, o que denota agravamento geral das secas em toda a região representada pelas estações, podendo-se estender a conclusão para toda a bacia do Alto Rio das Velhas.

As anomalias positivas reduziram em 5 casos, podendo significar não apenas redução das chuvas intensas e extremas, mas também redução de disponibilidade hídrica. Os 4 casos em que ocorreram aumentos – com ênfase nos períodos úmidos da Lagoa Grande (MMV) e Itabirito – Linígrafo – indicam o agravamento dos eventos extremos e das chuvas intensas. Pode-se considerar que a Estação Lagoa Grande (MMV) representa a região do Sinclinal Moeda, em que existe uma grande quantidade de áreas de mineração, com pilhas e barragens de rejeitos que podem ser impactadas pelas chuvas intensas e extremas. A região da Estação Itabirito – Linígrafo, ao sul da cidade de Itabirito, situa-se no vale do rio do mesmo nome, porém próxima das áreas de mineração da parte sul do Sinclinal (com minas da Vale e barragens tais como as Forquilhas).

O gráfico a seguir apresenta a comparação a comparação das quantidades de anos, das três estações, nos dois períodos de aprox. 20 anos, com valores de IAC's positivos e negativos e represente a frequência de ocorrência das anomalias.



Os gráficos acima foram elaborados com base nos seguintes valores:

Tabela Comparativa dos Índices de Anomalias de Chuvas das Três Estações

Est.	Período	Segmento	IAC Neg.	Soma IAC Neg.	Média IAC Neg.	IAC Pos.	Soma IAC Pos.	Média IAC Pos.	Balço IAC
Úmido	Lagoa Grande	2004-2024	11	-18,59	-1,69	8	16,62	2,08	-1,97
		1984-2004	12	-14,35	-1,20	9	11,74	1,30	-2,61
	Itabirito - Linígrafo	2004-2023	13	-27,97	-2,15	6	20,92	3,49	-7,05
		1984-2004	11	-15,92	-1,45	9	11,00	1,22	-4,92
	Faz. Água Limpa	2004-2024	11	-19,64	-1,79	8	15,86	1,98	-3,78
1984-2004		9	-21,95	-2,44	11	22,31	2,03	0,36	
Seco	Lagoa Grande	2004-2024	10	-14,65	-1,47	9	11,03	1,23	-3,62
		1984-2004	7	-8,43	-1,20	14	22,24	1,59	13,81
	Itabirito - Linígrafo	2004-2023	12	-26,80	-2,23	7	13,10	1,87	-13,70
		1984-2004	11	-15,64	-1,42	10	23,19	2,32	7,55
	Faz. Água Limpa	2004-2024	11	-19,84	-1,80	8	14,02	1,75	-5,82
1984-2004		8	-17,72	-2,22	13	19,85	1,53	2,13	
Anual	Lagoa Grande	2004-2024	9	-16,09	-1,79	10	18,30	1,83	2,21
		1984-2004	9	-10,04	-1,12	12	15,29	1,27	5,25
	Itabirito - Linígrafo	2004-2023	11	-23,56	-2,14	8	19,20	2,40	-4,36
		1984-2004	16	-18,80	-1,18	5	12,87	2,57	-5,93
	Faz. Água Limpa	2004-2024	11	-20,36	-1,85	8	14,08	1,76	-6,28
1984-2004		12	-17,69	-1,47	9	19,47	2,16	1,78	

A última coluna contém a soma dos valores dos IAC's positivos e negativos de cada linha e pode ser considerada como um indicativo adicional do comportamento dos valores dos segmentos de séries comparados. A maior parte das somas tem resultado negativo, indicando a predominância de anomalias negativas (anos de menor pluviosidade que a média histórica) e déficits hídricos a elas associados. O somatório desses valores (-26,95) e a média deles (-1,5) também apontam para um histórico de déficits hídricos.

5 CONCLUSÕES - PLUVIOMETRIA

5.1 Observações Principais

Ao se traçar os gráficos de parâmetros estatísticos podemos visualizar a ocorrência, nos últimos anos, de fortes chuvas pontuais com volumes muito maiores do que a maioria registrada nas séries históricas, o que indica **o aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos de chuva**, os quais constituem grave ameaça à estabilidade e integridade das barragens de rejeitos e das encostas de toda a região do Alto Rio das Velhas. Um rompimento de barragem certamente inviabilizará a captação de água para abastecimento público da RMBH, com **consequências sabidamente catastróficas sob os pontos de vista social, econômico e ambiental**.

Outra tendência identificada nas análises é que, em geral, as vazões mínimas do Rio das Velhas (ver Parte II do presente trabalho), na época da recessão (período seco) estão, como tendência geral, se tornando cada vez menores, mas nos últimos sete anos houve um aumento dessas vazões mesmo com redução da pluviosidade dos períodos secos. Pode-se inferir que esse aumento anômalo das vazões constitui uma intervenção antrópica no regime natural do rio, para evitar vazões menores que a Q_{7,10}, e é resultado do aporte de volumes adicionais de água provenientes das Lagoas do Miguelão, Ingleses e Codornas, vem como do reservatório da PCH Rio de Pedras, além de possíveis aportes de águas retiradas das cavas de mineração para rebaixamento do lençol freático.

Em geral, pode-se visualizar uma tendência de queda nos valores das médias e da mediana das vazões, o que indica que, de forma geral, as vazões têm se reduzido nos períodos mais recentes na bacia do Alto Rio das Velhas enquanto, na mesma região e ao mesmo tempo, observa-se, pela análise dos dados pluviométricos, uma redução da pluviosidade nas últimas décadas. Essas tendências indicam que a **redução da disponibilidade de água ao longo do tempo** pode estar relacionada tanto a fatores climáticos específicos (como distribuição das chuvas e efeitos das mudanças climáticas) quanto a **alterações no uso das águas superficiais e subterrâneas, tais como rebaixamento do nível dos lençóis freáticos devido à captação em poços, tanto de núcleos urbanos e imobiliários quando de cavas de mineração, existentes em grande quantidade na região**.

A série do Portal HidroWeb para Honório Bicalho informava, até meados de 2025, uma vazão de 311,52 m³/s no dia 08/01/2022 e uma de 505,43 m³/s no dia 09/01/2024, porém cálculos pelo método dupla massa entre as estações fluviométricas de Raposos e Rio Acima e Honório Bicalho indicaram valores próximos de 435,00 e 700,00 m³/s.

Como esses números, por serem os maiores de toda a série histórica de Honório Bicalho, são de crucial importância para a estimativa dos tempos de retorno das vazões do rio, assim como para os estudos aqui apresentados, em 14/01/2025 enviamos e-mail à ANA com nossos ponderações, cálculos e justificativas e em 09/07/2025 recebemos da ANA a confirmação de que as alterações foram feitas. De fato, a ANA alterou todas as vazões dos meses de Janeiro e Fevereiro em Honório Bicalho, e os dois valores acima referidos, da série disponível na Hidroweb atualmente, são 407,0 e 715 m³/s.

5.2 Considerações sobre a Análise de Distribuição Volumétrica da Precipitação Diária por Classes de Intensidade e Frequências das Três Estações

Para efeitos de detecção de tendências, no âmbito da análise de que trata o presente documento, as séries das estações pluviométricas Lagoa Grande (MMV), Itabirito – Linígrafo e

Fazenda Água Limpa foram divididas em dois segmentos de 20,2 anos cada, sendo o primeiro de 27/01/1984 a 30/03/2004 e o segundo de 01º/04/2004 a 30/06/2024. Os valores de precipitação (maiores ou iguais 1,3 mm/dia) foram classificados em 14 faixas, de largura 3,5 mm cada uma, e uma faixa com valores superiores a 49,0 mm diários.

Os totais precipitados nos períodos úmidos durante 20,2 anos praticamente não se alteraram de um segmento das séries para o outro nas áreas representadas pelas estações Lagoa Grande (MMV) e Itabirito Linígrafo ($\pm 0,24\%$). Na área representada pela Fazenda Água Limpa houve uma redução de 2,37% do primeiro para o segundo segmento. No entanto, mesmo sem uma redução significativa do valor total das precipitações, as alterações ocorridas na distribuição das chuvas por faixas de intensidade diária (mm/dia) podem ter influenciado na recarga dos aquíferos e no comportamento de médio e longo prazo das vazões do Rio das Velhas. **Essas alterações de distribuição podem não ser suficientes para explicar a redução sistemática das vazões do Rio das Velhas, o que aponta para uma influência maior de fatores antrópicos, tais como:**

- a ampliação das áreas de mineração:
 - remoção da cobertura de canga ferruginosa;
 - remoção dos corpos minerais que armazenam água: os principais aquíferos da região são predominantemente fissurais e fraturados, em itabiritos, quartzitos e outros metassedimentos; têm recarga difusa nas encostas e concentrada nas linhas de fratura e nos contatos litológicos.
 - bombeamento contínuo para rebaixamento dos níveis freáticos;
 - alterações da permeabilidade das áreas por meio de implantação de extensas pilhas de rejeitos e de estéreis, de vias de acesso e de pátios; aumento da velocidade de escoamento por meio das canaletas e outros sistemas de drenagem);
- alterações do uso do solo:
 - aumento das áreas urbanizadas e pavimentadas
 - perda da vegetação nativa;
- aumento das captações em poços, outorgadas ou não;
- mudanças na evapotranspiração, que poderiam aumentar as perdas atmosféricas de água, diminuindo a recarga e disponibilidade hídrica), decorrentes de alterações:
 - dos tipos, da extensão e da distribuição da cobertura vegetal;
 - da temperatura média;
 - da umidade do ar.

Seriam necessárias, também, para uma identificação mais precisa das causas da redução contínua das vazões médias do Rio das Velhas ao longo das últimas décadas, uma avaliação consistente das alterações da distribuição horária das intensidades de chuva ao longo dos 40,4 anos – o que somente poderia ser feito caso tivesse havido medições horárias (telemétricas ou não) ao longo de todos esses anos, nas três estações – bem como uma avaliação sistemática e adequada da variação espacial e temporal da permeabilidade dos solos em toda a bacia (para estudo das taxas de infiltração).

Possíveis reduções, durante os períodos úmidos nas áreas das três estações, dos eventos mais intensos na faixa de valores superiores a 45 mm/dia podem ter contribuído para reduzir as cheias no rio, atenuando o efeito do aumento das precipitações nessa faixa em outras áreas da bacia. Por outro lado, uma desagregação dos valores diários dessas chuvas em valores horários poderia indicar que chuvas nessa faixa, predominantemente, durante os 40,4 anos analisados, tiveram uma distribuição, ao longo do dia, favorável para a recarga dos aquíferos, ou seja, uma distribuição mais compatível com as taxas de infiltração dos solos das áreas representadas pelas estações e, nesse caso, a perda de volume que ocorreu nessa faixa na região implicaria em redução da recarga dos aquíferos.



A esses estudos e avaliações deveriam ser somados, ainda, os estudos referentes às características dos aquíferos nas áreas de serras e vales representadas pelas três estações:

- se freáticos ou confinados, se fraturados ou porosos;
- capacidade de armazenamento dos aquíferos;
- profundidade do lençol freático;
- tempo de resposta dos aquíferos à recarga;
- contribuição das nascentes para a composição da vazão do Rio das Velhas nos períodos de recessão.

Essa redução de recarga seria mais expressiva caso tenha havido uma alteração da distribuição horária das chuvas – mm/h, assim como houve alteração na distribuição por valores diários de precipitação – mm/dia, ou seja, aumento de intensidades horárias (e não apenas redução do volume precipitado por dia): um aumento de intensidade implica em maiores cheias e em menor recarga de aquíferos devido à intensificação do escoamento superficial. No entanto, a telemetria dos dados, com valores medidos a cada 10 ou 15 minutos, somente foi implantada em 2017, o que impede o conhecimento da distribuição horária da chuva durante o período de 40,4 anos analisado.

5.3 Conclusões dos Estudos Estatísticos e Limitações dos Estudos Realizados

5.3.1 Escopo e limitações metodológicas

Este estudo segmentou cada ano, para comparação dos valores de precipitação, em 5 meses secos e 7 meses úmidos e analisou os valores anuais (anos civis) das precipitações. Ainda não foi realizada a avaliação da duração real dos períodos seco/úmido, ou seja, se as secas têm sido cada vez mais prolongadas ao longo dos anos, o que pode ter implicações nas vazões de base do rio.

Não existem, até hoje, estações pluviométricas nas áreas ao longo da margem direita, a maior distância delas (Gandarela). Séries de longa duração dessa área seriam de extrema importância para a avaliação da pluviometria da região da Serra do Gandarela e sua comparação com as da Serra da Moeda e das áreas do vale mais ao sul, onde situam-se as estações Itabirito Linígrafo e Fazenda Água Limpa.

5.3.2 Principais achados (com base no recorte 5 meses secos / 7 úmidos)

Os estudos estatísticos detalhados da Estação Lagoa Grande (MMV), que pode ser considerada representativa da parte alta da bacia, situada na margem esquerda (Sinclinal Moeda), e da Estação Itabirito Linígrafo, representativa da parte baixa, o vale do rio, mostraram o seguinte:

Lagoa Grande

- **Totais anuais:** tendência média discreta e não significativa de redução;
- **Períodos secos:** queda estatisticamente significativa (Sen $\approx -2,20$ mm/ano; ~ -88 mm em 40 anos; variação $\approx -65\%$ da média do segmento), corroborada por regressão e CUSUM.
- **Períodos úmidos:** variações pequenas e sem tendência significativa (Sen $\approx +0,21$ mm/ano; IC inclui zero).
- **Mudança combinada (média + variância):** detecção em **2022** nas três segmentações.

Itabirito Linígrafo



- **Precipitações médias dos dias de chuva:** quedas modestas nas três visões (anuais, secos, úmidos), sem significância estatística pelos testes não-paramétricos; CUSUM sugere perdas após 2017 e mudança combinada em 2022.
- **Volumes anuais de precipitação:** sem tendência significativa ($Sen \approx +0,11$ mm/ano; IC inclui zero).
- **Volumes de precipitação dos períodos secos:** **redução estatisticamente significativa** ($Sen \approx -1,67$ mm/ano; ~ -67 mm em 41 anos; variação $\approx -56\%$ da média), com CUSUM consistente.
- **Volumes de precipitação dos períodos úmidos:** resultados mistos (regressão positiva, porém heteroscedasticidade; Sen não significativo).
- **Mudança combinada:** também detectada em **2022**.

Síntese

Dentro do recorte adotado (5 secos / 7 úmidos), a evidência mais robusta é de redução das precipitações nos 5 meses secos, enquanto os 7 meses úmidos mostram pouca ou nenhuma mudança estatisticamente robusta. Não há comprovação de queda relevante nos totais anuais. Isso não implica secas mais longas (o que ainda não foi analisado) — apenas menor volume precipitado no bloco de meses que definimos como “secos”.

5.3.3 Implicações para a segurança hídrica, social e econômica

A redução de chuva nos meses secos tem efeitos práticos relevantes:

Baseflow e abastecimento: Menos chuva nos meses secos tende a diminuir a recarga de aquíferos e o escoamento de base (vazões mínimas), agravando estiagens fluviais justamente no período de maior demanda. Considerando o bombeamento contínuo de aquíferos para aprofundamento de cavas e a informação de que, desde 2005, a extração supera a recarga, o risco de desequilíbrio hídrico estrutural tem aumentado continuamente.

Serviços urbanos e indústria: Vazões mais baixas nos meses secos aumentam a probabilidade de restrições de abastecimento, de elevação dos custos operacionais e do aumento conflitos de uso, afetando uma região com mais 6 milhões de habitantes e forte atividade econômica, inclusive a capital do estado.

Mineração e estruturas associadas: A persistência de picos anuais expressivos (por exemplo, máximos anuais elevados em 2009 e 2022) mantém a necessidade de projeto e operação conservadores das drenagens das minas, pilhas e barragens de rejeito, sobretudo porque a combinação “meses secos mais pobres em chuva” com “eventos intensos em janelas úmidas” pressiona tanto a estabilidade (por saturação rápida) quanto a capacidade de descarregamento de sistemas de contenção (vertedouros e sistemas de drenagem das pilhas).

Gestão de risco socioambiental: Menos água nos meses secos expõe a populações à escassez, enquanto a ocorrência de eventos intensos (ainda que não crescentes estatisticamente neste estudo) pode exacerbar inundações pontuais e processos erosivos/assoreamento quando acontecem. Deve ser considerado como exemplo, o evento de chuva do dia 08/01/2022, o maior já registrado na região e, talvez, no Estado de Minas Gerais, resultou na vazão recorde de 787 m³/s medida em Raposos, em deslizamentos (inclusive o da pilha Cachoeirinha da Vallourec) e danos em áreas urbanas e em áreas de mineração e

5.3.4 Agenda de estudos complementares (prioridades)

- Distribuição intra-anual (mensal/quinzenal):
 - Tendências por mês (com foco em outubro e abril).



- Changepoint mensais e BFAST em frequência mensal.
- Frequência e intensidade de eventos:
 - Contagem de dias de chuva ($\geq 1,2$ mm) por mês; duração de sequências secas/húmidas.
 - Índices climáticos de extremos (p.ex., R95p/R99p, Rx1day, CDD/CWD).
 - Regressão Quantílica para caudas (p10, p50, p90) em secos/úmidos e por mês.
- Evolução do início/fim da estação chuvosa:
 - Métodos de datação do início/fim; variabilidade interanual das datas.
 - Diferença entre “estação úmida climatológica” e “estação úmida efetiva”.
- Qualidade estatística:
 - Verificação de homogeneidade das séries, lacunas, ajustes e metadata de estação.
 - Tratamento de heteroscedasticidade (p.ex., GLM/GAMLSS) onde detectada.
- Risco para estruturas de mineração:
 - Atualização das chuvas de projeto e checagem de capacidade de descarga. Atualização urgente dos estudos de PMP e TR 10.000 anos (Resolução ANA 95/2022)
 - Acoplamento chuva + nível freático + pressões de poro em taludes/barragens (modelos acoplados).

5.3.5 Recomendações de Gestão (ação imediata)

- **Água subterrânea:** estabelecer metas de redução/compensação do bombeamento; auditoria independente e fiscalização constante e geral de volumes; monitoramento piezométrico público e em tempo quase real; revisão urgente das outorgas; identificação e solução para as captações não outorgadas.
- **Abastecimento:** preparar planos de contingência para estiagens, com diversificação de mananciais, redução de perdas e tarifação sazonal/incentivos à eficiência; construção de reservatórios (lagos) nas partes mais altas da bacia, similares às lagoas do Miguelão, das Codornas e dos Ingleses.
- **Mineração e estruturas:** revisão de planos de segurança de barragens, checagem de drenagens e vertedouros para cenários de pico; integração com alertas hidrometeorológicos; revisão dos valores de TR 10.000 anos e PMP; disponibilizar para a sociedade civil todos os cálculos que envolvem a segurança das estruturas; integrar as estações meteorológicas de todas as minas à rede da ANA e tornar públicas as séries de medições já existentes, desde o seu início.

5.3.6 Ações "No-Regret" Relevantes

São ações ou medidas que trazem benefícios independentemente de o cenário futuro se confirmar ou não. Ou seja, mesmo que a previsão de risco não se materialize, ainda assim a ação terá trazido ganhos, então não há “arrependimento” em tê-la implementado.

- **Gestão Integrada de Recursos Hídricos** considerando a variabilidade climática e a necessidade de garantir abastecimento hídrico sustentável
 - Redução de perdas em redes de distribuição de água → melhora eficiência e reduz pressão sobre mananciais.
 - Uso mais eficiente da água na agricultura (ex.: irrigação localizada, manejo de solo e cultivares adaptados).



- Proteção e recuperação de nascentes e matas ciliares, que aumentam infiltração e regulam vazão.
 - **Monitoramento contínuo das precipitações e das vazões fluviais**, para prever e mitigar impactos relacionados a eventos extremos e a secas.
 - Fortalecimento de sistemas de monitoramento hidrometeorológico (chuva, vazão, lençol freático).
 - Integração de bancos de dados de precipitação, vazão e uso do solo para análises preditivas.
 - Modelagem de cenários de disponibilidade hídrica para subsidiar decisões futuras.
- É necessário que os estudos mais detalhados iniciados com o presente trabalho sejam completados e continuados, por meio de atualização periódica das séries, para permitir o acompanhamento dos comportamentos e tendências.**
- **Planejamento Territorial e Ambiental**
 - Controle da ocupação em áreas de risco de inundação (zonas ribeirinhas e várzeas).
 - Incorporação de variabilidade climática no licenciamento e no planejamento de obras hidráulicas.
 - Adoção de soluções baseadas na natureza (ex.: áreas alagáveis planejadas para amortecer cheias).
 - **Resiliência e Gestão de Riscos**
 - Planos de contingência e protocolos de resposta rápida a secas e enchentes.
 - Campanhas educativas e capacitação de gestores locais para resposta a eventos extremos.
 - Incentivo a práticas de armazenamento descentralizado (armazenamento de água de chuva em residências, indústrias e instalações comerciais; pequenas barragens; recarga artificial de aquíferos).

Essas medidas trazem ganhos imediatos (eficiência, segurança, preservação ambiental) e ao mesmo tempo aumentam a resiliência frente a futuros incertos.

5.4 Recomendações

Diante das mudanças observadas no regime de chuvas e seus impactos, são recomendadas medidas de **gestão adaptativa** para mitigar os efeitos negativos das alterações climáticas na disponibilidade hídrica, incluindo:

- **Adoção de medidas de conservação do solo e reflorestamento**, para aumentar a infiltração da água e reduzir o escoamento superficial.
- **Controle da urbanização, do uso do solo**, para minimizar impactos da impermeabilização e permitir maior infiltração da água.
- **Revisão urgente e profunda da política e dos critérios relativos às atividades de mineração**, para minimizar os riscos hídricos derivados do rebaixamento dos lençóis freáticos, da remoção de volume de armazenamento subterrâneo devido à abertura e ampliação das cavas e minimizar os riscos de perda do Rio das Velhas por rompimento de barragens, como ocorreu com os rios Doce e Paraopeba, ou por deslizamento de pilhas.
- **Desenvolvimento de políticas para mitigação de enchentes e secas**, como sistemas de retenção de água similares aos das Lagoas dos Ingleses, Codornas e Miguelão, **sem**



barragens no leito do rio, as quais, além dos impactos ambientais bem conhecidos, podem ser **assoreadas** e ter seu volume perdido seja por efeito de rompimento seja por contaminação por resíduos de mineração ou ainda por efeitos naturais, como aconteceu com o **reservatório da PCH Rio de Pedras**, tendo-se em conta que na bacia do Alto Velhas existem 63 barragens de rejeito e inúmeras pilhas que podem romper ou deslizar por efeito de chuvas extremas, cada vez mais frequentes.

5.5 Resumo Executivo – Chuvas e Vazões na Bacia do Alto Rio das Velhas

Achados Principais

O estudo alisou dados das estações pluviométricas e fluviométricas convencionais (que coletam dados diários) e telemétricas (dados a cada 15 minutos ou horários). A partir desses dados foram organizadas tabelas de dados com valores anuais (anos civis) e com valores relativos aos 5 meses de período seco (1º/mai. a 30/set.) e 7 meses de período úmido (1º/out. a 30/abr.).

Estudos, cálculos estatísticos, gráficos e avaliações detalhadas foram realizados para as séries de maior duração da Bacia do Alto Rio das Velhas:

- Vazões diárias do Rio das Velhas registradas na Estação de Honório Bicalho: abr./1971 a nov./2023
- Chuvas na Estação Lagoa Grande (Lagoa dos Ingleses): jan./1941 a mai./2024
- Chuvas na Estação Itabirito Linígrafo (próx. a cidade de Itabirito): jan./1984 a jun./2024.
- Chuvas na Estação Fazenda Água Limpa (entre Glaura e São Bartolomeu , Ouro Preto): jan./1984 a jun./2024.

Diversos tipos de metodologias de análise estatísticas foram utilizados para permitir a comparação dos resultados de comportamentos e tendências plurianuais por elas obtidos.

As análises indicaram que:

- Comparando-se os 26 do período mais recente de 1997 a 2023 com os 25 do período anterior (1971 a 1997), constatou-se que houve uma **redução expressiva do volume de água escoado pelo Rio das Velhas, com uma perda de 3.352 Mm³ no período mais recente** em comparação com o período anterior. Esse valor representa 13,2% do volume escoado nos primeiros 26 anos.
- Considerando que a ETA Bela Fama retira em média 7,0 m³/s do Rio das Velhas para abastecer a RMBH, **o déficit total de volume de 3.352 Mm³ dos últimos 26 anos, em comparação com os 26 anos anteriores, seria suficiente para abastecer a RMBH por 5.543 dias (aproximadamente 15,2 anos).**
- as precipitações dos períodos úmidos nos últimos 26 anos apresentam pouca variação, sem tendência clara de aumento ou diminuição.
- as precipitações dos períodos secos estão comprovadamente em queda ao longo dos anos, indicando um aporte hídrico cada vez menor nesse intervalo.
- tem havido, ao longo dos anos uma redistribuição das intensidades de chuva, com maiores volumes de chuva fracas e moderadas, menores volumes de chuvas fortes e alguns eventos extremos de chuva, que provocam cheias intensas.
- as perdas de
- anomalias



Riscos Identificados

- **Gestão de recursos hídricos fragilizada:** a queda de chuvas no período seco pode reduzir ainda mais a resiliência do rio em anos críticos, que se tem tornado cada vez mais frequentes, ou seja, “o novo normal”.
- **Possível mudança climática local/regional:** se meses de transição (como outubro e abril) estiverem perdendo chuvas, o período úmido pode estar “encurtando” na prática, o que teria forte impacto nos aquíferos e na sustentabilidade do abastecimento.

Euler de Carvalho Cruz

Belo Horizonte, 30 de agosto de 2025

ANEXO 1 – Pluviometria

1 Conceitos Básicos

1.1 Estudos Pluviométricos

Estudos pluviométricos são análises e investigações científicas que têm como objetivo medir, registrar e compreender a distribuição, intensidade e frequência da precipitação (chuva) em uma determinada área ao longo do tempo. Esses estudos são fundamentais para diversas áreas, como hidrologia, meteorologia, engenharia civil, agricultura e gestão de recursos hídricos.

1.2 Componentes dos Estudos Pluviométricos

Medição da Precipitação: Utilização de pluviômetros ou pluviógrafos para coletar dados sobre a quantidade de chuva. Os pluviômetros são usados para medir a altura da lâmina de água de chuva que cai em um determinado período, geralmente em milímetros (mm). Pluviógrafo é um pluviômetro que registra automaticamente a quantidade de chuva caída

Análise de Dados: Processamento e interpretação dos dados coletados para identificar padrões de precipitação. Inclui, entre outros, o cálculo de médias, máximos e mínimos de precipitação para diferentes períodos (diários, mensais, anuais).

Distribuição Temporal e Espacial: Estudo da variação da precipitação ao longo do tempo (sazonalidade, tendências climáticas). Análise da distribuição geográfica da chuva, identificando áreas mais ou menos chuvosas.

Frequência e Intensidade: Determinação da frequência com que determinadas intensidades de chuva ocorrem. Análise de eventos extremos, como tempestades intensas e eventos extremos, que podem causar inundações e catástrofes.

Aplicações: Projeto de drenagens (dimensionamento de sistemas de drenagem para evitar enchentes e suas consequências); planejamento de irrigação e manejo de culturas; projeto de reservatórios, de barragens e de sistemas de abastecimento de água; identificação de áreas de risco para inundações e deslizamentos de terra.

Métodos e Técnicas:

Rede de Pluviômetros: Instalação de uma rede de estações pluviométricas para cobrir uma área geográfica.

Sensoriamento Remoto: Uso de satélites e radar para estimar a precipitação em grandes áreas.

Modelagem Matemática: Uso de modelos matemáticos e computacionais para prever a precipitação e seus impactos.



1.3 Intensidade de Chuva

A intensidade de uma chuva é a quantidade de chuva que cai em uma determinada área e em determinado período, medida em milímetros por hora (mm/h). Normalmente uma chuva de menos de 2,5 mm/h é considerada fraca e acima de 50 mm/h, muito forte.

A intensidade da chuva é medida por meio do índice pluviométrico e pode ser calculada através de equações IDF (curva intensidade-duração-frequência). Além da intensidade, é importante saber a duração da precipitação e sua distribuição geográfica.

1.4 Classificação das Chuvas

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) adota a seguinte classificação padrão baseada na intensidade da chuva em milímetros (mm/h), que é bastante utilizada em estudos hidrológicos e meteorológicos:

Volume Diário de Chuva (mm)	Classificação
0	Sem precipitação
0,1 a 2,4	Chuvisco
2,5 a 10	Chuva fraca
10,1 a 20	Chuva moderada
20,1 a 50	Chuva forte
50,1 a 100	Chuva muito forte
Acima de 100	Chuva extrema ou torrencial

Para efeitos dos estudos apresentados no presente documento, adotamos essa nomenclatura para os volumes de chuvas diárias, alterando o limiar entre chuvisco e chuva fraca para 3,5 mm.

Bom base nessa terminologia e nos dados da Estação Lagoa Grande (MMV), pode-se concluir, portanto, que nas últimas quatro décadas houve aumento dos dias apenas com chuvisco, aumento significativo das chuvas muito fortes e redução dos dias com chuva fraca. O resultado geral, houve aumento do volume total anual de chuvas, mais dias com chuvas muito fortes, mais dias com chuvisco e queda das médias anuais.

1.5 Tempo de Retorno da Chuva

1.5.1 Cálculo

O tempo de retorno é uma variável extremamente importante nos cálculos hidrológicos e não é um valor calculado, mas um valor assumido como premissa para os cálculos.

Toda obra que pode sofrer influência de precipitações tem uma chance anual de falha devido possibilidade de não resistir a uma quantidade de chuva superior àquela para a qual foi projetada. Essa chance anual é expressa em termos do tempo de retorno.

Por exemplo, se uma chuva de intensidade X mm/hora tem tempo de retorno de 100 anos isso significa que, em média, um evento de chuva com intensidade igual ou superior a esse é esperado ao menos uma vez em 100 anos. Ou ainda, que em um ano qualquer, a probabilidade de se ter uma chuva mais intensa que X mm/h é $1/100 = 0,01\%$

Portanto, a probabilidade é, matematicamente, o inverso do tempo de retorno esperado para um determinado valor de precipitação:



$$P = \frac{1}{T}$$

onde P é probabilidade de ocorrência e T o tempo de retorno, em anos.

Embora o tempo de retorno muitas vezes seja função de critérios regulatórios como normas, resoluções e manuais, ele pode ser selecionado, em certos casos, com base no cálculo do custo x benefício, ou seja, o tempo de retorno ideal seria aquele que produz a melhor relação entre benefício (custos evitados por enchentes) e custo de implantação e manutenção da obra.

Por exemplo, uma obra hidráulica que evita qualquer enchente tem praticamente custo zero de danos causados por enchentes. Porém, essa obra pode ser extremamente cara com relação ao benefício dela obtido. Assim, o problema consiste em se estimar os danos evitados pelas enchentes versus o custo de se fazer a obra hidráulica.

Quando a obra pode ocasionar danos de grande extensão e de vários tipos, como os ocasionados, por exemplo, pelo rompimento da barragem de Fundão, da Samarco, em Marina, e da barragem B1 da Vale, em Brumadinho, deve-se selecionar tempos de retorno que resultem na segurança máxima e, nos tempos atuais, levar em conta parâmetros e coeficientes de segurança que tomem em conta os efeitos crescentes das mudanças climáticas.

1.5.2 Tempo de Retorno para Dimensionamento de Barragens de Mineração

A Resolução ANM Nº 95, de 07 de fevereiro de 2022, consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração e determina que os empreendedores devem elaborar periodicamente, entre outros relatórios, os seguintes:

- *XLIV - Relatório de Inspeção de Segurança Regular (RISR): documento integrante da Inspeção de Segurança Regular, que compila as informações coletadas em campo e que balizará as análises técnicas sobre a estabilidade da estrutura;*
- *XLV - Revisão Periódica de Segurança de Barragem (RPSB): estudo cujo objetivo é diagnosticar o estado geral de segurança da barragem, considerando o atual estado da arte para os critérios de projeto, a atualização de dados hidrológicos, as alterações das condições a montante e a jusante do empreendimento, e indicar as ações a serem adotadas pelo empreendedor para a manutenção da segurança;*

O Art. 24 dessa resolução tem a seguinte redação:

- *Art. 24. A RISR deve levar em consideração séries históricas de precipitação e vazão, estudos hidrológicos e hidráulicos, visando atestar a segurança da estrutura.*
- *§ 1º A capacidade de escoamento do vertedouro dos reservatórios, de acordo com o tempo de retorno previsto, deve ser reavaliada com base nos dados disponíveis de precipitação e vazão da bacia hidrográfica do reservatório, considerando as incertezas dos estudos de vazão máxima de projeto.*
- *§ 2º O tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor durante o período de operação da barragem, deve atender aos seguintes critérios, em consonância com o DPA (“Dano Potencial Associado”):*
 - *I - DPA baixo: 500 (quinhentos) anos;*
 - *II - DPA médio: 1.000 (mil) anos; e*
 - *III - DPA alto: 10.000 (dez mil) anos ou PMP (Precipitação Máxima Provável), a que for mais restritiva para a duração crítica do sistema hidrológico avaliado.*



- *§ 3º O período de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor para o período de desativação ou descaracterização da estrutura, deve atender, independentemente do DPA, a 10.000 (dez mil) anos ou PMP (Precipitação Máxima Provável), a que for mais restritiva para a duração crítica do sistema hidrológico avaliado.*

O valor da PMP deve ser, portanto determinado e comparado com o valor da intensidade de chuva correspondente ao tempo de retorno de 10.000 anos para que o maior dos dois valores seja utilizado no dimensionamento das estruturas.

1.6 PMP e CMP

PMP (Precipitação Máxima Provável) e CMP (Chuva Máxima Provável) são conceitos hidrológicos fundamentais usados no projeto de estruturas hidráulicas críticas, tais como barragens, pilhas, vertedouros e canais de escoamento para tentar evitar falhas catastróficas decorrentes de eventos pluviométricos extremos.

1.6.1 PMP - Precipitação Máxima Provável

A Precipitação Máxima Provável (PMP) é definida como a quantidade máxima de precipitação que pode ocorrer em uma determinada região e período, com base em condições meteorológicas mais severas fisicamente possíveis, ou seja, considerando os limites máximos de vapor de água precipitável comportados pela troposfera. Essa estimativa é obtida a partir de análises de tempestades históricas, modelos atmosféricos e fatores como umidade disponível e dinâmica atmosférica.

Devido as incertezas que envolvem a determinação da PMP, essa deve ser encarada como um evento cuja superação está associada a uma probabilidade muito baixa de ocorrência e não como um limite físico que pode ocorrer para as condições analisadas (Bertoni e Tucci, 1993).

De acordo com Benson (1973) apud Koutsoyiannis (1999) o método da PMP tem sido utilizado e aceito por um longo tempo, não pelos seus méritos, mas por uma única razão: porque permite uma solução que retira do projetista a responsabilidade de tomar importantes decisões sobre o grau de risco ou proteção. Entretanto esta remoção de responsabilidade é ilusória, pois Dooge (1986), apresenta algumas precipitações registradas nos Estados Unidos que extrapolaram as estimativas da PMP.

1.6.2 CMP - Cheia Máxima Provável

A PMP é utilizada para estimar a Cheia Máxima Provável (CMP), que é o total de chuva considerando a conversão da PMP em escoamento superficial e sua distribuição espacial e temporal em uma bacia hidrográfica. A CMP permite definir as características dos projetos de proteção contra grandes vazões.

Em outras palavras, a CMP é a vazão máxima esperada que resulta da PMP em uma bacia hidrográfica específica, ou na área da barragem, da pilha de rejeitos ou de estêreis, por exemplo. Por conta desse conceito, **a PMP representa a chuva de projeto ideal** para o cálculo da cheia de projeto de estruturas de alta responsabilidade, tais como vertedouros das barragens de grande e médio porte e alto risco a jusante em caso de rompimento do maciço.

O cálculo da CMP envolve modelos hidrológicos que consideram fatores como:

- Coeficientes de escoamento da bacia ou da área considerada nos estudos;
- Características geomorfológicas, como declividade e tipo de solo;



- Distribuição espacial e temporal da chuva.

1.6.3 Relação entre PMP e CMP

A PMP é a entrada (input) do sistema hidrológico, enquanto a CMP é a resposta hidrológica ao evento extremo de precipitação. A CMP é sempre menor que a PMP, pois parte da precipitação é infiltrada no solo, armazenada na superfície ou evapotranspirada antes de se transformar em escoamento. A transformação da PMP em CMP depende das características da bacia hidrográfica, como permeabilidade do solo, cobertura vegetal e declividade.

Portanto, a PMP representa o maior volume de chuva fisicamente possível sobre uma área, enquanto a CMP representa o maior escoamento resultante dessa chuva. Ambos os conceitos são essenciais para garantir segurança hídrica e estrutural em projetos de engenharia.

O eng. Mário Cicareli Pinheiro informa em seu trabalho de 2011, intitulado “Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração”, trabalho esse utilizado para o dimensionamento das estruturas do Projeto Apolo, o seguinte:

*A determinação da PMP se faz por cálculos mais complexos e requer o processamento de registros de estações climatológicas e o conhecimento da dinâmica climática regional, demandando um estudo técnico altamente especializado. Embora existam vários estudos de cálculo de PMP aplicados para bacias hidrográficas de grande porte, feitos pelas empresas do setor elétrico, **pode-se considerar que há uma carência de estudos de determinação de PMP pontual, para aplicação em bacias hidrográficas de pequeno porte, que representa a quase totalidade dos casos de interesse para a mineração.***

Não cabendo no objeto do presente documento discorrer sobre a metodologia de cálculo da PMP, recomenda-se a contratação de profissionais experientes ou de estudos específicos para as aplicações nas obras hidráulicas em mineração (PINHEIRO, 2011). (Grifos nossos)

1.7 Hidrogramas e Hietogramas

Um **hietograma** e um **hidrograma** são ferramentas fundamentais em hidrologia, utilizadas para analisar e compreender o comportamento da água em bacias hidrográficas, para o planejamento e gestão de recursos hídricos, prevenção de desastres naturais e para projetos de engenharia hidráulica.

1.7.1 Hietograma

Um hietograma é um gráfico que representa a distribuição temporal da precipitação (chuva) em uma determinada área durante um período específico. Ele mostra a intensidade da chuva (em mm/h ou mm/min) ao longo do tempo. Para a sua obtenção, o ideal é que se disponha de dados de precipitação coletados por pluviômetros automáticos ou por estações meteorológicas em menores intervalos de tempo (por exemplo, a cada 5, 10 ou 60 minutos). O hietograma é então plotado, com o tempo no eixo horizontal e a intensidade da chuva no eixo vertical.

O hietograma permite analisar padrões de chuva, como picos de intensidade e duração e serve como entrada para modelos hidrológicos que simulam o escoamento superficial. É utilizado para projetar sistemas de drenagem, estruturas de controle de enchentes, barragens etc.



Exemplo de hietograma sintético. Demonstração da distribuição por meio do método de blocos alternados de evento de 8,57 mm acumulados em 4 horas. (Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-35-Exemplo-de-hietograma-sintetico-Demonstracao-da-distribuicao-por-meio-do_fig19_313854924)

1.7.2 Hidrograma

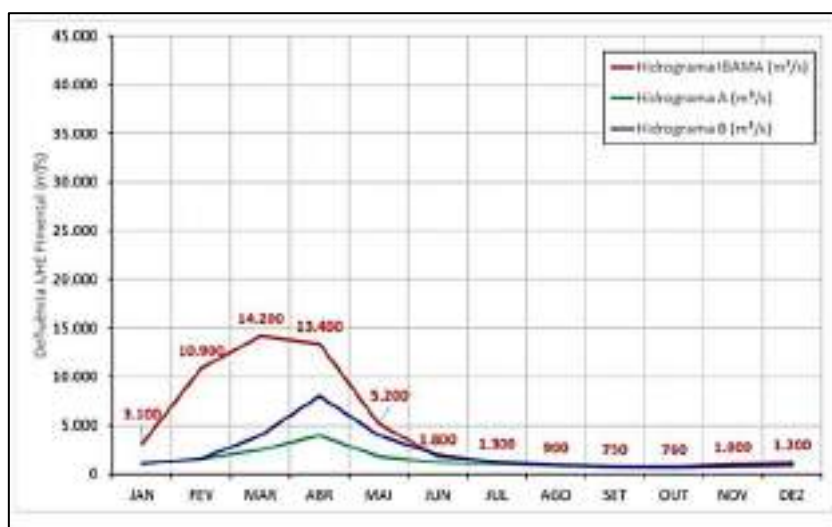
O hidrograma é um gráfico que representa a vazão (volume de água por unidade de tempo) de um rio ou curso d'água em função do tempo. Ele mostra como a vazão varia em resposta a eventos de chuva. Para elaboração do hidrograma é necessário dispor de dados de vazão coletados por estações fluviométricas.

O hidrograma é utilizado para estudar o comportamento de bacias hidrográficas durante e após eventos de chuva, incluindo: prever enchentes e planejar medidas de mitigação; projetar reservatórios, barragens e outras estruturas hidráulicas; avaliar impactos de mudanças no uso do solo ou climáticas sobre os recursos hídricos etc.

1.7.3 Relação entre Hietograma e Hidrograma

O hietograma representa a entrada de água no sistema (precipitação), enquanto o hidrograma representa a resposta da bacia hidrográfica a essa entrada (escoamento).

A análise conjunta dos dois permite entender como a chuva se transforma em escoamento superficial e subsuperficial, considerando fatores como infiltração, evapotranspiração e características da bacia.



Hidrogramas do Rio Xingu para Operação da Usina de Belo Monte

1.8 Chuva de Projeto

Denomina-se **chuva de projeto**, determinada com base em metodologia que representa a distribuição temporal da precipitação, é a precipitação que tem pequena probabilidade de ser igualada ou superada pelo menos uma vez durante um determinado período, denominado **tempo de retorno**. É um evento de precipitação hipotético, definido por sua **intensidade** (quantidade de chuva por unidade de tempo, geralmente em mm/h) e **duração** (período em que a chuva ocorre) e é utilizado como base para projetar sistemas de drenagem capazes de lidar com eventos de chuva sem causar inundações ou danos. Esse evento é escolhido com base em critérios técnicos e estatísticos, considerando as características da região e o nível de segurança desejado para o sistema de drenagem.

A probabilidade a ser selecionada para cada tipo de obra depende principalmente da extensão do dano que pode resultar da falha da estrutura (barragem, dique, sump, pilha etc. no caso de minerações) no caso de ocorrência de um evento extremo de chuva.

A chuva de projeto é utilizada como entrada em modelos de simulação chuva-vazão, para determinar a **vazão de projeto** a ser utilizada para dimensionamento de estruturas hidráulica.

A duração da chuva é um dado utilizado para se obter hietogramas e hidrogramas de projeto, partindo-se, geralmente, de uma Equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF). A duração é selecionada com base no **tempo de concentração** da bacia hidrográfica, que é o tempo necessário para que toda a área contribua para o escoamento no ponto de interesse.

As curvas ou equações IDF relacionam a intensidade da chuva, sua duração e o tempo de retorno. São específicas para cada região e derivadas de análises estatísticas dos dados pluviométricos.

A escolha adequada da chuva de projeto é crucial para garantir a eficiência e a segurança do sistema de drenagem. Valores subestimados podem levar a inundações e danos significativos, enquanto valores superestimados podem resultar em custos excessivos. Portanto, a análise deve ser feita com base em dados confiáveis e critérios técnicos bem definidos.

1.9 Vazão de Projeto

Tendo-se determinado a intensidade da chuva de projeto e com base nas características da bacia hidrográfica (área da bacia, tipo e uso de solo, cobertura vegetal etc.) onde o sistema de drenagem será implantado é possível calcular a vazão de projeto utilizando-se métodos hidrológicos. A vazão de projeto representa a **quantidade (vazão) máxima** de água (em volume por unidade de tempo) para um determinado evento de chuva que o sistema de drenagem deve ser capaz de escoar sem causar inundações, transbordamentos ou danos.

Um dos métodos hidrológicos mais utilizados para dimensionamento de drenagens urbanas é o **Método Racional**, que é adequado para bacias pequenas (menores que 1 km²). Para bacias maiores e para áreas não urbanas e/ou com empreendimentos de maior envergadura e de maiores impactos potenciais, métodos mais complexos devem ser utilizados.

1.9.1 O Método Racional

O Método Racional, normalmente utilizado em obras de drenagens urbanas constitui uma metodologia simplificada, baseada nas seguintes hipóteses:

- a chuva é uniformemente distribuída na bacia e tem intensidade constante;
- o tempo de duração da precipitação é igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica;



- hidrograma é um triângulo isósceles, isto é, sai da vazão nula no tempo zero, chega na vazão máxima no tempo igual ao tempo de concentração e retorna à vazão nula no tempo igual ao dobro do tempo de concentração.

Essas hipóteses são razoavelmente aceitas para bacias pequenas com baixos níveis de heterogeneidade e o método é válido para bacias com área até 1,00 km², onde a complexidade hidrológica é menor. Porém quando se tem necessidade de um projeto mais confiável, esta metodologia pode não ser adequada, necessitando-se de modelos hidrológicos mais confiáveis (Tucci, 2007). Para determinar a vazão Q (m³/s) utiliza um coeficiente C de escoamento superficial, determinado a partir do tipo e do uso do solo, a área da bacia (km²) e da intensidade média da chuva $i_{t,T}$ (mm/h) para uma duração t e um tempo de retorno T:

$$Q_p = \frac{C_{t,T} \cdot A}{3,6}$$

Entre as desvantagens desse método pode-se citar:

- o método não considera a variabilidade espacial e temporal da chuva na bacia;
- não leva em conta a evaporação, infiltração inicial ou acumulação de água em depressões do terreno;
- ignora o efeito da umidade do solo antes da chuva, que pode aumentar o escoamento superficial;
- o hidrograma triangular assumido pode não representar adequadamente a dinâmica do escoamento em bacias complexas;
- a escolha do coeficiente de escoamento deve ser cuidadosa, considerando o uso e ocupação do solo, tipo de cobertura vegetal, solo e declividade; valores incorretos podem levar a sub ou superestimativas das vazões;
- para o cálculo do tempo de concentração deve-se utilizar preferencialmente modelos hidrológicos (e não fórmulas empíricas) para garantir que represente corretamente o tempo que a água leva para percorrer a bacia até o ponto de saída;
- a intensidade da chuva deve ser obtida de séries históricas confiáveis e, como será visto na presente Nota Técnica, tais séries não são disponíveis para a área do Projeto Apolo;
- para tentar aumentar a segurança dos resultados obtidos por esse método, eles devem ser comparados com dados observados de vazões em bacias semelhantes para validar os parâmetros utilizados;
- para se aumentar a confiabilidade, deve-se realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros (como C, intensidade da chuva e tempo de concentração) para identificar quais variáveis têm maior impacto nos resultados;
- para estruturas críticas, como pilhas de rejeitos e de estéreis, barragens e outras, é recomendável adotar um fator de segurança no cálculo da vazão, considerando incertezas nos parâmetros e possíveis eventos extremos.

Os parâmetros que devem ser utilizados em projetos de engenharia de obras que podem causar maiores impactos devem considerar a pior situação que, no caso de modelos hidrológicos, se reflete na maior vazão de pico ou ainda no maior volume gerado pela precipitação. Desta forma, o tempo de duração da chuva, não necessariamente será o tempo de concentração da bacia, sendo necessário determinar o tempo de duração da chuva que provoca o pior cenário.

1.9.2 Outros Métodos de Cálculo de Vazões de Projeto

A seguir são listados os métodos mais aplicados para o cálculo das vazões de projeto, por ordem de precisão, a começar dos mais confiáveis. Essa ordenação considera a complexidade e a abrangência dos métodos, bem como sua aplicabilidade em diferentes contextos hidrológicos:



- **Modelos Hidrológicos Completos** – São os mais precisos, pois consideram detalhadamente os processos hidrológicos, como uso do solo, infiltração, evapotranspiração, armazenamento e escoamento superficial. Exemplos: Hidrograma Unitário de Santa Bárbara (HUSB), SWAT, HEC-HMS e MGB-IPH. Eles permitem uma análise detalhada e abrangente do ciclo hidrológico, considerando fatores como a série histórica de chuvas, características físicas da bacia e parâmetros hidrológicos complexos.
- **Método do Hidrograma Unitário** – É amplamente utilizado e considerado preciso para determinação da vazão de projeto, especialmente quando bem calibrado e aplicado em bacias com dados hidrológicos consistentes. Ele permite estimar a resposta da bacia a eventos de chuva específicos, considerando a duração e intensidade da precipitação.
- **Método SCS (Soil Conservation Service)** – É bastante utilizado e confiável para estimar vazões de projeto, especialmente em bacias urbanas. Ele se baseia no conceito de chuva efetiva e no número da curva (CN), que considera o tipo de solo, uso da terra e condições de umidade antecedentes, mas simplifica alguns processos hidrológicos. No entanto, sua precisão pode ser limitada em bacias com características muito heterogêneas. Sua precisão pode ser menor para a estimativa de eventos extremos de chuva.
- **Método I-PAI-WU** – É aplicável em bacias com áreas de tamanho médio (2 a 30 km²) e pode ser menos preciso em áreas maiores ou menores que essas. Ele é baseado em coeficientes de escoamento superficial e distribuição espacial da chuva, mas sua precisão depende da qualidade dos dados de entrada e da calibração dos parâmetros.
- **Método de Blocos Alternados** – É utilizado para distribuir temporalmente a precipitação e estimar o escoamento superficial. Embora seja útil para análises hidrológicas, sua precisão é limitada por ser um método simplificado, que não considera todos os fatores hidrológicos de forma detalhada.
- **Método Racional** – É o mais simplificado e menos preciso dessa lista. Utiliza um coeficiente de escoamento superficial (C) e a intensidade da chuva para estimar a vazão de pico. Assume que toda a precipitação acima de uma determinada taxa de infiltração se transforma diretamente em escoamento superficial, sem considerar armazenamento ou variação temporal da chuva nem a complexidade do escoamento em bacias maiores ou mais heterogêneas.

1.10 Escoamento Superficial

O escoamento superficial é gerado quando a precipitação excede a capacidade de infiltração da bacia hidrográfica. Portanto, os fatores que mais alteram a capacidade de infiltração estão intrinsecamente ligados ao uso e ocupação da bacia. Outros fatores importantes que alteram o escoamento superficial são:

- a **abstração inicial**: é a parcela de água que, no começo da chuva, é armazenada nas copas das árvores, reservatórios e depressões naturais;
- **alterações antrópicas**: a retificação de canais naturais, por exemplo, que antes possuíam sinuosidades que retardavam a onda de cheia, faz com que a água chegue mais rápido nos pontos mais baixos da bacia hidrográfica e isso aumenta as vazões de pico e o risco de cheias. A pavimentação ou a compactação do solo e a remoção da cobertura vegetal reduzem a infiltração, aumentando o escoamento superficial.



1.11 Chuva Efetiva

Chuva efetiva é a parcela da precipitação que de fato gera escoamento superficial. Em outras palavras, a chuva efetiva é a diferença entre a chuva total e as perdas por infiltração e abstração inicial. Toda a chuva que incide em um telhado de metal, por exemplo, vira chuva efetiva, mas em uma bacia natural, com solo permeável, boa parte da chuva infiltra e portanto não gera escoamento superficial.

A distribuição da chuva, ou seja, como ela varia ao longo do tempo, tem um papel muito importante na geração de chuva efetiva. Se ela ocorre constante, se ocorre alternada, se tem o pico no início ou no fim muda todo o processo de infiltração – que é um processo não linear. Portanto, duas chuvas com mesmo volume e mesma duração na mesma bacia podem ter respostas diferentes no exutório (saída) caso a distribuição da chuva seja diferente. Quando a chuva tem maior duração o solo vai se saturando e diminuindo sua capacidade de infiltração fazendo com que praticamente toda chuva se torne escoamento superficial. "Chuvas intensas aumentam o escoamento superficial, pois a infiltração no solo é limitada pelo alto volume de água em um curto período.

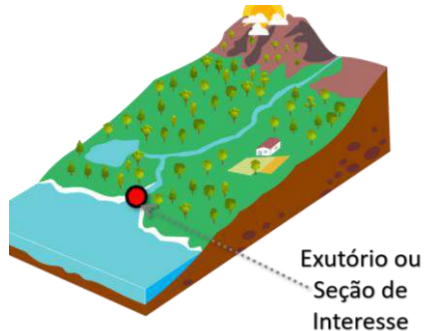
A chuva efetiva pode ser calculada por métodos que estimam as perdas por abstração inicial e infiltração. A seguir são listados os principais métodos utilizados, a começar do mais preciso para o de menor precisão.

1. **Equação de Richards:** É uma equação diferencial que descreve o movimento da água no solo em condições saturadas e não saturadas, considerando a variação da umidade e da condutividade hidráulica ao longo do tempo e da profundidade. É um modelo mais complexo e preciso, mas requer dados detalhados do solo e é computacionalmente intensivo. Representa com precisão os processos de infiltração e redistribuição de água no solo e é recomendado para estudos de obras e empreendimentos de maior vulto e responsabilidade.
2. **Método de Green-Ampt:** Baseia-se na física da infiltração, considerando a umidade inicial do solo, a condutividade hidráulica e a sucção na frente de umedecimento. Simula a infiltração de forma mais realista que métodos empíricos, com menor complexidade que a equação de Richards e requer parâmetros específicos do solo, como condutividade hidráulica e sucção.
3. **Método de Horton:** Considera que a taxa de infiltração diminui exponencialmente com o tempo, partindo de uma taxa inicial máxima até atingir uma taxa constante. Não considera variações espaciais do solo e assume um comportamento simplificado da infiltração.
4. **Método SCS (Soil Conservation Service):** desenvolvido pelo Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos, é um método simplificado baseado em uma relação empírica entre a precipitação total e o escoamento superficial, considerando as perdas por infiltração e abstração inicial. O método utiliza um parâmetro chamado Número da Curva (CN), que varia de 0 a 100 e representa a capacidade de infiltração do solo e o uso da terra. Valores mais altos indicam maior potencial de escoamento superficial. A abstração inicial é uma fração da capacidade máxima de retenção do solo (S), a qual é calculada por uma fórmula. Baseia-se em relações empíricas e não considera a dinâmica temporal da infiltração.
5. **Índice Φ (Fi):** É um método simplificado que assume uma taxa constante de infiltração durante o evento de chuva. A chuva efetiva é calculada subtraindo essa taxa constante do total de precipitação. Não considera variações temporais ou espaciais da infiltração,



sendo pouco preciso para eventos complexos e é utilizado apenas para estimativas rápidas e preliminares em estudos hidrológicos.

1.12 Exutório de uma Bacia Hidrográfica



Exutório é o ponto ou seção que recebe todo o escoamento gerado pela bacia hidrográfica. Geralmente é o ponto mais baixo da bacia hidrográfica.

1.13 Tempo de Concentração de uma Bacia Hidrográfica

Tempo de concentração é o tempo que uma gota de chuva que cai no ponto mais distante hidráulicamente do exutório de uma bacia leva para chegar ao exutório e é uma das variáveis da hidrologia mais difíceis de se mensurar.

O conceito de “distância hidráulica” envolve tanto a distância efetiva quanto a resistência ao escoamento. Ex.: um ponto extremamente distante do exutório de uma bacia hidrográfica pode ter um tempo de concentração muito baixo caso a superfície tenha baixa resistência ao escoamento (um canal liso, por exemplo). Já um ponto, às vezes, extremamente perto do exutório pode ter um maior tempo de concentração por estar em uma área mais rugosa, mais arborizada, mais vegetada.

O tempo de concentração é uma das principais variáveis da hidrologia de bacias hidrográficas e está totalmente relacionado com a geração de escoamento superficial e determinação de vazões de pico.

Referências para Consulta sobre Conceitos Básicos:

https://slideplayer.com.br/slide/2577720/#google_vignette

<https://engenheiroplanilheiro.com.br/2020/08/16/19-principais-duvidas-hidrologia/#header5>

ANEXO 2 – Parâmetros e Testes Estatísticos

2 Conceitos Básicos

2.1 Parâmetros e Estatísticas Utilizados na Análise Descritiva

2.1.1 Médias

As médias aritmética, geométrica e harmônica são ferramentas fundamentais em matemática e estatística, cada uma com aplicações distintas. A escolha do tipo de média adequada a cada aplicação depende da natureza dos dados e do tipo de problema que está sendo analisado.

Normalmente, em análises hidrológicas, é utilizada a média aritmética – normalmente denominadas somente “média” – dos períodos considerados, sejam eles o dia, o mês ou o ano. Embora pouco comum, nesse estudo foi utilizada também a média harmônica do período, pelos motivos a seguir apresentados.

2.1.1.1 Média Aritmética

A **média aritmética** é a média mais comum e mais intuitiva. Ela é simplesmente a soma de todos os valores dividida pelo número de valores. Assim, quando disponíveis valores de medições horários de uma variável hidrológica (vazão, por exemplo) a média diária é calculada somando-se os valores medidos a cada hora e dividindo-se o total por 24.

Quando usar:

- Quando os valores são aproximadamente homogêneos ou não têm grandes variações.
- Para dados lineares onde as unidades são diretamente comparáveis.
- Em situações cotidianas, como calcular a média de notas escolares, temperaturas, ou rendimento de um ativo em um determinado período.

Entretanto, quando existe acentuada diferença entre os valores dos dados analisados, a média aritmética torna-se menos representativa do conjunto, principalmente quando a série de dados analisada é formada por uma grande parte de dados de valores menores e apenas alguns dados com valores maiores, pois um dado com valor muito alto pesa, no cálculo, bem mais que vários dados com valores baixos. Esse é o caso das séries de vazões e das precipitações analisadas no presente relatório.

Ao deslocar para cima o valor da média aritmética da série, os poucos dados de altas vazões (eventos extremos de cheia, por exemplo) fazem com que se tenha a impressão de que as vazões, em média, têm valores mais altos e que o rio, de forma geral, não apresenta um comportamento muito preocupante em termos de perda de vazões nos períodos de estiagem.

2.1.1.2 Média Geométrica

A **média geométrica** é mais usada quando se tem taxas de crescimento ou proporções, o que não é o caso de séries temporais de dados hidrológicos.

Essa média é obtida multiplicando-se todos os valores e, em seguida, tirando a raiz n -ésima do produto.

Quando usar:

- Quando os dados envolvem taxas de crescimento ou razões percentuais.



- Para calcular médias de mudanças relativas (exemplo: crescimento populacional, crescimento econômico, taxas de retorno de investimentos).
- Quando os dados variam em escala logarítmica ou quando se está interessado no produto dos dados em vez de sua soma.

2.1.1.3 Média Harmônica

A **média geométrica** é mais usada quando a diferença de valores entre os dados do conjunto analisado é mais pronunciada, principalmente quando a quantidade de dados com valores altos é significativamente menor que a de dados com baixos valores. Ela é calculada com o uso do inverso dos valores dos dados:

$$H = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}$$

onde “n” é a quantidade de dados do conjunto analisado e “xi” é o valor de cada dado.

Ao se tomar o inverso de um valor muito alto de vazão, por exemplo (evento extremo de cheia ou de chuva, ocorrido em um dia apenas ou em algumas horas de um dia), o seu inverso é um número pequeno, que tem pouca influência na soma que constitui o denominador e, assim, ao se dividir o número “n” pela soma dos inversos, o valor referente à alta vazão precipitação não é tão significativo. Quanto maior o valor do dado, menos significativo ele se torna no caso do cálculo dessa média, o que é exatamente o oposto do que ocorre com a média aritmética: quanto mais alto o valor, mais ele pesa no valor da média.

Portanto, a média harmônica permite que se tenha uma boa ideia do comportamento das vazões menores de um rio, por exemplo, vazões essas que constituem a maior parte dos dados das séries analisadas e que são os mais importantes quando se trata de estudos de segurança hídrica.

O uso da média harmônica constitui uma proposta, introduzida no presente trabalho, de uma nova métrica a ser utilizada em estudos hidrológicos.

2.1.1.4 Relação entre as Médias Harmônica e Geométrica

Para efeitos do presente estudo, introduziu-se também o conceito de relação entre a média harmônica e a média aritmética, relação essa que constitui uma primeira ferramenta para avaliar o peso relativo dos eventos esporádicos de cheia no cálculo da média aritmética – a que é normalmente utilizada.

2.1.1.5 Média Móvel

A média móvel é uma técnica estatística para analisar pontos de dados criando uma série de médias de subconjuntos diferentes de um conjunto de dados completo. Essencialmente, é uma forma de suavizar as flutuações de curto prazo para destacar tendências de longo prazo.

O método mais comum é a média móvel simples (SMA), pela qual calcula-se a média aritmética de um número específico de pontos de dados e, em seguida, “move-se” a janela de cálculo para a frente, descartando o primeiro ponto e incluindo o próximo. Por exemplo, uma média móvel de 5 dias em dados de vazões diárias calcularia a média das vazões de segunda a sexta, depois de terça a sábado, e assim por diante. Essa abordagem é particularmente útil para séries temporais, como dados de vazões ou precipitações, onde o objetivo é remover o ruído aleatório para ver o panorama.

O principal propósito da média móvel é a análise de tendências. Ao suavizar o ruído, ela revela a direção subjacente de um conjunto de dados. Se a média móvel estiver consistentemente subindo, isso sugere uma tendência de alta; se estiver descendo, uma tendência de baixa. A inclinação da linha da média móvel também pode indicar a força dessa tendência. Além disso, a



média móvel pode ser usada para identificar pontos de inflexão, como quando uma tendência de alta começa a perder força ou se inverte.

2.1.2 Mediana

A mediana é o valor central de um conjunto de dados, separando a metade inferior da metade superior. Em outras palavras, é o ponto que divide o conjunto em duas partes iguais, onde 50% dos valores estão abaixo da mediana e 50% estão acima dele.

O cálculo da mediana depende se o número de observações (n) é par ou ímpar:

- Para um conjunto de dados com número ímpar de observações: a mediana é o valor central do conjunto ordenado.
- Para um conjunto de dados com número par de observações: a mediana é a média aritmética dos dois valores centrais do conjunto ordenado.

Em um gráfico, a mediana pode ser representada, por exemplo, por uma linha vertical em um histograma, indicando o ponto que divide a distribuição de frequências ao meio.

A mediana é especialmente útil para conjuntos de dados com valores atípicos, pois, diferentemente da média, ela não é influenciada por valores extremos. Isso a torna uma medida mais robusta para representar o "centro" de distribuições assimétricas. No caso de séries com alguns valores muito altos (tais como eventos extremos de cheia ou de precipitação), a mediana normalmente se aproxima do valor da média harmônica.

2.1.3 Variância e Desvio Padrão

O desvio padrão é uma medida estatística de dispersão dos dados da série e indica o quanto os valores de um conjunto de dados variam em relação à média (valor central). Ele mostra a "dispersão" ou "espalhamento" dos dados: quanto maior o desvio padrão, mais dispersos estão os valores em torno da média; quanto menor, mais concentrados estão. O desvio padrão é a raiz quadrada da variância.

O desvio padrão é amplamente utilizado para avaliar a consistência dos dados em relação à média. Em finanças, por exemplo, ele mede o risco associado a um ativo; em ciência, ajuda a avaliar a variabilidade dos experimentos e a confiabilidade dos resultados.

A variância é calculada como a média dos quadrados das diferenças entre cada ponto de dado e a média do conjunto. Essencialmente, assim como o desvio padrão, ela informa o quão "espalhados" os dados estão. Sua relação com o desvio padrão é direta: o desvio padrão é simplesmente a raiz quadrada da variância. Enquanto a variância é útil em cálculos teóricos, o desvio padrão é mais frequentemente usado na prática, pois sua unidade de medida é a mesma dos dados originais, tornando-o mais fácil de interpretar e comparar.