

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JOICE ELIDER LIMA CORNÉLIO

**TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NAS SÉRIES HISTÓRICAS HIDROLÓGICAS DA
BACIA DO RIO IBIRAPUITÃ**

**Alegrete
2023**

JOICE ELIDER LIMA CORNÉLIO

**TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NAS SÉRIES HISTÓRICAS HIDROLÓGICAS DA
BACIA DO RIO IBIRAPUITÃ**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marília Ferreira
Tamosso

Coorientador: Eng. Pablo George da Silva
Freitas

**Alegrete
2023**

JOICE ELIDER LIMA CORNELIO

TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NAS SÉRIES HISTÓRICAS HIDROLÓGICAS DA BACIA DO RIO IBIRAPUITÃ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 06 de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

Profa. Dra. MARILIA FERREIRA TAMIOSSO - UNIPAMPA - Orientadora

Eng. PABLO GEORGE DA SILVA FREITAS - Coorientador - Externo

Profa. Dra. ADRIANA GINDRI SALBEGO - UNIPAMPA

Prof. Dr. CELSO NOBRE DA FONSECA - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **Pablo George da Silva Freitas, Usuário Externo**, em 18/12/2023, às 19:12, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ADRIANA GINDRI SALBEGO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 06:09, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARILIA FERREIRA TAMIOSSO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 08:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CELSO NOBRE DA FONSECA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/12/2023, às 10:31, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1334246** e o código CRC **92A45866**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus por conceder-me saúde e força em todos os momentos da minha jornada.

Em memória da minha querida mãe, agradeço por cada lição, sorriso e amor que moldaram quem sou. Sua presença está gravada em meu coração, e sua falta é sentida todos os dias. Obrigada por ser a luz que ilumina meu caminho, mesmo na saudade. Agradeço, também, à minha família, especialmente a meu pai e ao meu irmão, pelo incentivo constante nos estudos, compreensão nos momentos difíceis e paciência nas ausências.

Aos amigos que estiveram ao meu lado nesta fase tão esperada, gostaria de expressar meu profundo agradecimento pela presença constante em todos os momentos. Ao lembrar os anos que compartilhamos nesta jornada acadêmica, não posso deixar de expressar minha sincera gratidão a cada um de vocês: Naiéle, Tito, Isadora, Luíza, Andressa, Eduardo, Marcelo e Thiago. Vocês são peças essenciais das memórias mais valiosas que levo da faculdade. A jornada foi enriquecida pela amizade de vocês, e sou grata por cada riso, conselho e momento compartilhado.

Ao meu namorado, Rafael, quero expressar meu agradecimento pelo apoio, carinho e força que têm sido meu suporte nos momentos desafiadores. Sua chegada ocorreu no momento certo, e sou imensamente grata por isso, meu bem.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha orientadora Marília Tamiosso e ao meu coorientador Pablo Freitas pela orientação e apoio dedicados ao longo deste processo de elaboração do trabalho de conclusão. Professora Marília, sua sabedoria e orientação foram fundamentais para direcionar meus esforços de pesquisa. Pablo, agradeço pela sua paciência incansável e pelas valiosas contribuições que enriqueceram significativamente este trabalho. Ambos foram mais do que orientadores acadêmicos; foram mentores comprometidos, investindo tempo e esforço para me guiar através dos desafios e complexidades desta jornada acadêmica. Meu sincero agradecimento a vocês.

Meu reconhecimento também se estende a todos os professores e funcionários da Universidade Federal do Pampa que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista, meu sincero agradecimento. Cada um de vocês desempenhou um papel significativo, e sou verdadeiramente grata por fazerem parte desta jornada.

"Nas entrelinhas deste estudo, emerge não apenas uma compilação de dados e análises, mas uma narrativa de dedicação, superação e alicerces sólidos para o futuro, reafirmando que a busca pelo conhecimento é a chave para desbloquear as portas do progresso e da compreensão."

Autor: desconhecido.

RESUMO

As mudanças climáticas constituem um complexo e urgente desafio em escala global que deve ser enfrentado pelas nações de modo a controlá-lo da melhor e mais rápida forma possível. Este estudo concentra-se na área de contribuição da bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã, investigando eventuais tendências climáticas nos registros históricos de precipitação e vazão, para identificar padrões associados a mudanças climáticas. O objetivo principal é a aplicação de dois testes para detecção de tendências em distintos tipos de séries históricas de diversas estações de coleta, e, quando detectadas, calcular a magnitude destas para identificar se existe aumento ou diminuição da variável em questão. Os resultados revelaram padrões distintos de tendências climáticas na bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã, indicando certa influência das condições climáticas na região, visto que em algumas das estações em que foram detectadas tendências estão localizadas próximas às áreas urbanas da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: precipitação; vazão; tendência; mudanças climáticas.

ABSTRACT

Climate change constitutes a complex and urgent global scale challenge that must be faced by nations in order to control it in the best and fastest way possible. This study focuses in the Ibirapuitã river basin catchment area, investigating eventual climate trends in the historical data of rainfall precipitation and stream discharge, to identify patterns associated with climate change. The main objective is to apply two trend detection tests in distinct types of time series data of various collection gauges, and, when detected, calculate their magnitude to identify if there is an increase or decrease in the variable in question. The results revealed distinct patterns of climate trends in the Ibirapuitã river basin, indicating a certain influence of climatic conditions in the region, since in some of the gauges in which trends were detected are located next to urban areas of the basin.

Keyword: rainfall precipitation; stream discharge; trends; climate change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma para planejamento e organização de etapas.....	19
Figura 2 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã	20
Figura 3 – Maiores níveis registrados no rio Ibirapuitã.....	21
Figura 4 – Mapa da rede de drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã	22
Figura 5 – Estações pluviométricas, pluviográficas e fluviométricas selecionadas e descartadas.....	29
Figura 6 – Análise de consistência entre as estações pluviométricas e pluviográficas	30
Figura 7 – Análise de consistência entre as estações fluviométricas.....	31
Figura A.1 – Análise de dupla massa e correlação entre estações de chuva	44
Figura A.2 – Correlação entre estações de chuva e vazão.....	59
Figura A.3 – Correlação entre estações de vazão	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem de falhas das estações pluviométricas e período de atividade	28
Tabela 2 – Estatísticas dos testes de tendência de Mann-Kendall e Spearman para as estações de chuva	33
Tabela 3 – Magnitudes das tendências detectadas pelos testes para as estações de chuva.....	33
Tabela 4 – Estatísticas dos testes de tendência de Mann-Kendall e Spearman para as séries discretizadas em intervalos menores que um dia	35
Tabela 5 – Estatísticas dos testes de tendência de Mann-Kendall e Spearman para as séries das estações fluviométricas.....	35
Tabela 6 – Magnitudes das tendências detectadas pelos testes para as séries das estações fluviométricas	35
Tabela 7 – Estimativa de precipitações máximas anuais futuras com duração de 2 e 3 dias.....	36
Tabela B.1 – Resumo das séries históricas	64

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
COP – Conferência das Partes
DSCA – Quantidade anual de dias sem chuva
DSCM – Quantidade mensal de dias sem chuva
GEE – Gases de Efeito Estufa
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
OMM – Organização Meteorológica Mundial
P12H – Precipitação máxima anual com 12 horas de duração
P18H – Precipitação máxima anual com 18 horas de duração
P1D – Precipitação máxima anual com 1 dia de duração
P1H – Precipitação máxima anual com 1 hora de duração
P24H – Precipitação máxima anual com 24 horas de duração
P2D – Precipitação máxima anual com 2 dias de duração
P3D – Precipitação máxima anual com 3 dias de duração
P3H – Precipitação máxima anual com 3 horas de duração
P48H – Precipitação máxima anual com 48 horas de duração
P6H – Precipitação máxima anual com 6 horas de duração
P72H – Precipitação máxima anual com 72 horas de duração
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PTA – Precipitação total anual
PTM – Precipitação total mensal
RS – Rio Grande do Sul
UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
VMAX – Vazão máxima anual
VMDA – Vazão média anual
VMDM – Vazão média mensal
VMIN – Vazão mínima anual
VMM7 – Vazão mínima anual média de um período contínuo de 7 dias

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo Geral	11
1.2	Objetivos Específicos	11
1.3	Justificativa	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Tendências Climáticas	12
2.2	Estudos de tendência em séries temporais	14
2.2.1	Teste de Mann-Kendall	14
2.2.2	Teste de Spearman	16
2.2.3	Regressão Linear	17
2.2.4	Magnitude das tendências detectadas	18
3	METODOLOGIA	19
3.1	Área de estudo.....	20
3.2	Obtenção de dados e análise de consistência	22
3.3	Preparo das séries de dados	23
3.4	Testes para verificação de tendências e suas magnitudes.....	25
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	27
4.1	Obtenção de dados e análise de consistência	27
4.2	Testes para verificação de tendências e suas magnitudes.....	31
4.2.1	Resultado dos testes para as estações de chuva discretizadas em intervalos diários	32
4.2.2	Resultado dos testes para as estações de chuva discretizadas em intervalos menores que um dia	34
4.2.3	Resultados para as estações fluviométricas	35
4.3	Discussão dos resultados obtidos.....	36
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
	REFERÊNCIAS	41
	APÊNDICE A – Análise de consistência de dupla massa e correlação entre as estações pluviométricas e pluviográficas selecionadas	44
	APÊNDICE B – Resumo das séries históricas.....	64

1 INTRODUÇÃO

No momento atual, as mudanças climáticas são um dos desafios mais cruciais e urgentes que a humanidade está confrontando. Esse tema é fundamental devido às suas consequências abrangentes e impactos significativos em nosso planeta e nas futuras gerações. Segundo Santos (2008), os efeitos das mudanças climáticas apresentam uma variação significativa entre diferentes regiões e comunidades. De maneira geral, esses impactos são mais severos em áreas que possuem uma maior vulnerabilidade devido a uma série de fatores, incluindo condições socioeconômicas e climáticas específicas.

As interferências do ser humano no equilíbrio natural do nosso planeta alcançaram proporções sem precedentes. As mudanças climáticas de origem antropogênica estão diretamente relacionadas às atividades humanas que resultam no aumento da emissão de gases de efeito estufa, incêndios, desmatamento e criação de ilhas urbanas de calor, entre outros impactos (Nobre; Sampaio; Salazar, 2007).

Para Conti (2005) a transformação climática apresenta um processo mais complexo do que simplesmente o aumento da temperatura média, uma vez que o clima não é definido apenas pela variação térmica. No entanto, é essencial analisar cuidadosamente a sequência de eventos desencadeados pelo aquecimento, a fim de compreender sua profundidade e impacto.

A atividade humana desempenha um papel central na origem do problema ambiental conhecido como mudanças climáticas, que traz consigo uma série de consequências prejudiciais intensificadas por nossas ações. Essas transformações constituem uma crise premente que requer a adoção de medidas de mitigação urgentes, com repercussões notáveis tanto no momento atual quanto nas gerações futuras (Farias, 2022).

Este estudo tem como intuito investigar as eventuais ocorrências de tendências climáticas nas chuvas que ocorrem na área de contribuição da bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã e analisar os dados de vazão para identificar qualquer padrão que possa ser associado a mudanças climáticas.

Serão analisados dados históricos de precipitação ao longo de um período significativo, com o objetivo de identificar padrões ou variações consistentes ao longo do tempo. A pesquisa busca compreender se há indícios de alterações nas chuvas, como aumento ou diminuição da quantidade de precipitação, bem como possíveis

alterações sazonais. A análise dos dados permitirá obter uma visão mais abrangente sobre a dinâmica climática nessa região específica, contribuindo para a compreensão dos potenciais impactos e aprimoramento do gerenciamento dos recursos hídricos locais.

1.1 Objetivo Geral

Analisar a existência de tendências climáticas nas séries temporais de vazões e precipitações ocorridas na área de contribuição da bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã.

1.2 Objetivos Específicos

- Aplicar testes para detecção de tendência em séries de precipitação e vazão;
- Aplicar testes para obtenção da magnitude da tendência da série na qual esta é detectada;

1.3 Justificativa

A problemática das cheias do rio Ibirapuitã na área urbana de Alegrete é uma questão de grande relevância, com impactos significativos para a comunidade local. Este estudo busca contribuir para a compreensão dessa problemática ao analisar se há uma possível tendência climática nas chuvas da área de contribuição da bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã. Através da identificação de padrões ou variações consistentes nas chuvas ao longo do tempo, este estudo pode indicar se há uma possibilidade de aumento da ocorrência de cheias, fornecendo subsídios importantes para o planejamento e gestão adequada dos recursos hídricos na área urbana de Alegrete.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão tratados alguns conceitos importantes, como tendências climáticas, estudos e projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, estudos relacionados à cidade de Alegrete e área da bacia do Ibirapuitã, além de métodos estatísticos utilizados para identificar tendências em séries temporais. A fundamentação teórica trará o embasamento necessário, e contribuirá para o norteamento da pesquisa.

2.1 Tendências Climáticas

Segundo Back (2001) a tendência climática refere-se a uma alteração gradual nos valores médios registrados ao longo de um período de tempo, resultando em um leve aumento ou diminuição. Essa mudança contínua é uma característica distintiva das mudanças climáticas, e pode ser observada através de um padrão consistente de acréscimo ou decréscimo nos valores médios climáticos.

Em 1988, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) se uniram para criar o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Seu objetivo é avaliar informações científicas sobre as mudanças climáticas, analisar as consequências ambientais e socioeconômicas decorrentes dessas mudanças, e formular estratégias realistas de resposta. Desde então, o IPCC desempenhou um papel crucial ao produzir avaliações abrangentes em diversos volumes, que auxiliam os governos na adoção e implementação de políticas relacionadas às mudanças climáticas. Essas avaliações têm sido particularmente relevantes como um parecer oficial para a Conferência das Partes (COP) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), estabelecida em 1992, e para o Protocolo de Quioto de 1997. O IPCC continua a ser uma autoridade confiável e influente, fornecendo informações essenciais para embasar a tomada de decisões e impulsionar ações globalmente para enfrentar os desafios das mudanças climáticas (IPCC, 2007).

Conforme destacado pelo IPCC, as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) estão impulsionando o aquecimento global, o qual terá repercussões contínuas no sistema climático do nosso planeta ao longo dos próximos séculos ou até mesmo milênios. Essas ramificações acarretam riscos significativos

para a segurança das pessoas, das diferentes formas de vida, dos Estados e do sistema global como um todo (IPCC, 2018).

De acordo com o relatório mais recente do IPCC (2023), em sua sexta edição, reafirma de maneira conclusiva que a mudança climática é uma realidade e que é resultado direto da atividade humana. Segundo o relatório, há a possibilidade de um aumento médio global de temperatura de até 4,4 graus Celsius até o final do século 21, o que resultará em consequências graves, como ondas de calor, tempestades intensas, inundações, secas prolongadas, perda de biodiversidade e aumento do nível do mar. O relatório destaca a importância urgente de reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa nas próximas décadas. Além disso, ressalta a necessidade de implementar políticas ambiciosas e eficazes para limitar as emissões, promover a adaptação às mudanças climáticas e garantir a justiça social e ambiental. Ressalta também que os efeitos da mudança climática já são visíveis em todo o mundo, manifestando-se através de uma série de impactos significativos. Estes incluem um aumento na frequência e intensidade das ondas de calor, tempestades mais poderosas, inundações e secas mais severas, perda de biodiversidade e o crescente nível do mar.

As consequências regionais para o Brasil são preocupantes, prevê-se que a região Norte se torne mais quente e seca, o que pode causar um impacto significativo no equilíbrio ecossistêmico da Amazônia como um todo. A região Nordeste, que já é naturalmente muito seca, enfrentaria os mesmos desafios, resultando em consequências extremamente sérias para a segurança hídrica, energética e alimentar da área. A região Centro-Oeste, que concentra a maior parte do agronegócio brasileiro, enfrentaria um aumento significativo das temperaturas e uma redução na disponibilidade de água, resultando em condições mais quentes e secas. Por sua vez, o Sudeste experimentaria não apenas um aumento nas temperaturas, mas também estaria sujeito a uma maior ocorrência de eventos climáticos extremos relacionados à água, como períodos de chuvas intensas e longos períodos de estiagem (IPCC, 2023).

Em relação à região Sul, mais especificamente a região do estudo, Sanches, Verдум e Fisch (2013), em sua pesquisa sobre a tendência de chuvas de longo prazo, realizaram análises das precipitações na região de Alegrete/RS no período de 1928 a 2009. Durante o estudo, aplicou-se o teste de Mann-Kendall nos conjuntos de dados, a fim de avaliar possíveis tendências ao longo do tempo. A aplicação do teste aos dados constatou que as tendências encontradas não puderam ser consideradas como

decorrentes das modificações climáticas, mas como resultado da variabilidade aleatória natural da série temporal.

Sanches (2013) identificou um aumento na frequência de chuvas máximas diárias durante os meses de novembro, janeiro e março no município de Alegrete, RS, conforme relatado em sua pesquisa.

2.2 Estudos de tendência em séries temporais

Uma série temporal é um conjunto de observações ordenadas no tempo. Segundo Naghettini e Pinto (2007) as séries hidrológicas podem apresentar uma tendência, ou um 'salto', ou uma periodicidade ao longo do tempo, como resultado de variações naturais do clima ou alterações induzidas pela ação do homem. Nesse caso, as séries hidrológicas seriam ditas não estacionárias ao longo do tempo, e do contrário, uma série estacionária é aquela que não se altera ao longo do tempo.

A identificação de alterações em uma série de dados meteorológicos é importante para estudos de engenharia que as utilizam, pois tanto as simulações como as aplicações de teorias de probabilidade são realizadas com a hipótese de que as séries históricas não apresentem tendências, sendo que sua dificuldade de detecção está na grande variabilidade natural dos dados meteorológicos (Back, 2001).

2.2.1 Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall é um método estatístico não-paramétrico, sequencial e robusto que é utilizado para determinar se uma série de dados possui uma tendência temporal de alteração estatisticamente significativa. O método é fundamentado na decisão de rejeitar ou não a hipótese nula (H_0), que postula a ausência de tendência na série de dados, com base em um nível de significância (α). O nível de significância pode ser entendido como a probabilidade de cometer um erro ao rejeitar H_0 quando ela é verdadeira (Salviano; Groppo; Pellegrino, 2016).

Segundo Back (2001), o nível de significância geralmente considerado é $\alpha = 0,05$. A hipótese nula é rejeitada quando existe uma tendência significativa na série temporal.

Este método é apropriado para dados que não apresentam variação sazonal, ou com sazonalidade já corrigida, e que não apresentem autocorrelação (Manly,

2009). Segundo Costa *et al.* (2015), o teste consiste em comparar cada valor da série temporal com os valores restantes, sempre em ordem sequencial, contando o número de vezes em que os termos restantes são maiores que o valor analisado.

Com base nos estudos e conclusões de Guedes, Priebe e Manke (2019), os resultados revelam que existe uma possível relação entre o aumento da precipitação total anual nas séries temporais e os períodos de *El Niño* e *La Niña* na metade norte do estado do Rio Grande do Sul. No entanto, para confirmar essa hipótese, são necessários estudos mais específicos, considerando também a influência da variabilidade de precipitação devido a alterações hidrológicas relacionadas ao uso e ocupação do solo, bem como às atividades humanas na região. As análises de tendência da precipitação total anual no norte do estado do Rio Grande do Sul, utilizando o teste não-paramétrico Mann-Kendall, identificaram mudanças na tendência em 50% das estações pluviométricas, indicando um aumento na precipitação total anual.

A variável estatística S , utilizada no teste de Mann-Kendall para uma série de n dados, é calculada somando os sinais (função $sgn(\cdot)$) das diferenças entre todos os pares de valores da série (x_i) e seus valores subsequentes (x_j). Esse cálculo é expresso pelas Equações (1) e (2) (Salviano; Groppo; Pellegrino, 2016).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1; & \text{se } x_j > x_i \\ 0; & \text{se } x_j = x_i \\ -1; & \text{se } x_j < x_i \end{cases} \quad (2)$$

Quando o valor de n é maior ou igual a 10, é viável fazer uma comparação entre a variável S e uma distribuição normal. Nessa comparação, a variância de S , denominada $Var(S)$, pode ser obtida por meio da Equação (3). Nessa equação, o símbolo t_i representa a quantidade de repetições da extensão i (Salviano; Groppo; Pellegrino, 2016).

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i)(i-1)(2i+5)}{18} \quad (3)$$

O índice Z_{MK} é baseado em uma distribuição normal, em que sua média é zero. Valores positivos indicam uma tendência ascendente, enquanto valores negativos indicam uma tendência descendente. O cálculo do índice Z_{MK} na distribuição normal é realizado utilizando a Equação (4), que leva em consideração o sinal de S (Salviano; Groppo; Pellegrino, 2016).

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

É importante ressaltar que o teste de Mann-Kendall apenas detecta a presença de uma tendência e não fornece informações precisas sobre sua magnitude ou direção. Para isso, podem ser usados outros métodos complementares, como a inclinação de Sen e a regressão linear.

2.2.2 Teste de Spearman

O teste de Spearman é um teste não-paramétrico amplamente utilizado para verificar a presença de tendências em séries temporais. Semelhante ao teste de Mann-Kendall, o teste de Spearman possui uma potência uniforme para detectar tanto tendências lineares quanto não lineares (Gauthier, 2001).

A estatística r_s do teste de Spearman é representada pela Equação (5): (Naghettini; Pinto, 2007).

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (m_i - T_i)^2}{n^3 - n} \quad (5)$$

A estatística do teste padronizado T é apresentada conforme a Equação (6) (Naghettini; Pinto, 2007):

$$T = \frac{r_s}{\sqrt{\text{Var}(r_s)}} \quad (6)$$

2.2.3 Regressão Linear

A análise de regressão tem como objetivo descrever a relação entre duas variáveis por meio de um modelo matemático, utilizando um conjunto de observações. A reta de regressão, representada pela Equação (7) é mostrada a seguir: (Silva; Ferreira; Ávila, 2021).

$$Y = aX + b \quad (7)$$

Onde Y é a variável dependente, X é a variável independente, e a e b são os coeficientes angular e linear, respectivamente. A regressão linear possibilita fazer previsões com base nos dados disponíveis. Com o intuito de estabelecer a equação da reta, os coeficientes são calculados por meio das Equações (8) e (9): (Silva; Ferreira; Ávila, 2021).

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (8)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (9)$$

Considerando n como o número de observações, \bar{x} como a média dos valores observados x_i (anos, meses), e \bar{y} como a média dos valores observados y_i (precipitação, vazão).

Ao definir as retas de regressão, o coeficiente angular de cada uma delas representa a tangente do ângulo formado entre a reta de regressão e o eixo X . Essencialmente, o coeficiente angular determina a inclinação da reta, ou seja, quão íngreme ou suave ela é. O valor de a permite avaliar a importância da inclinação da reta, indicando se há uma tendência presente e o quão significativa ela é. Em outras palavras, o coeficiente a ajuda a determinar se a inclinação da reta é acentuada, sugerindo uma tendência forte, ou mais suave, indicando uma tendência fraca (Silva; Ferreira; Ávila, 2021).

Manly (2009) afirma que em casos simples, uma regressão da variável medida contra o tempo, com um teste de significância do coeficiente angular é suficiente para análise de tendências na série.

2.2.4 Magnitude das tendências detectadas

Caso detectada tendência nas séries temporais, esta pode ser estimada pelo coeficiente angular da regressão linear ou estimada pela equação de Sen (1968), aprimorada por Hirsch *et al.* (1982) *apud* Notaro *et al.* (2015), representada pela Equação (10):

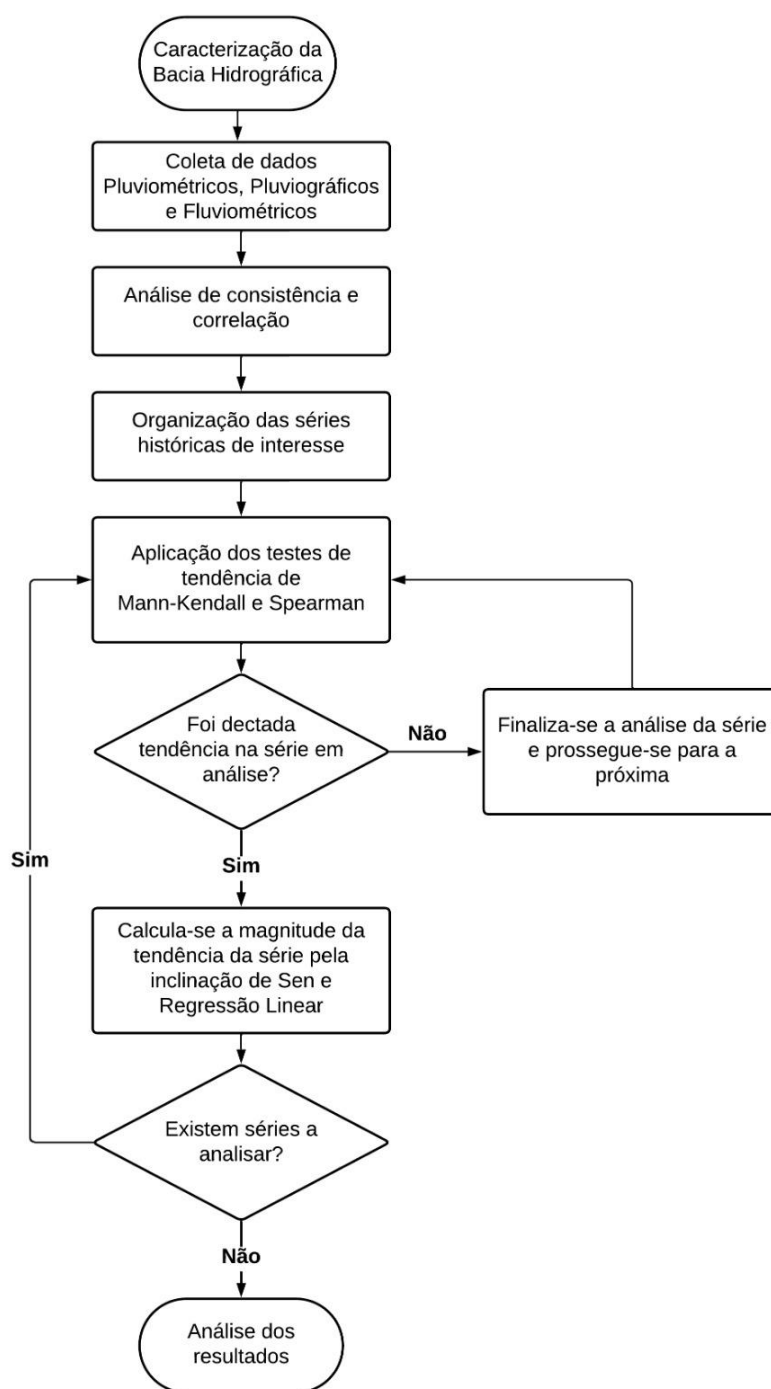
$$b = \frac{x_i - x_j}{i - j} \quad j < i \quad (10)$$

Sendo x_i e x_j os valores da série estudada, enquanto i e j representam o ano em que ocorre a observação de ordem i ou j . Para a magnitude da série adota-se a mediana dos valores de b encontrados.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, são expostos os procedimentos metodológicos que foram realizados de modo a atingir os objetivos propostos, tendo estes a sua sequência executiva apresentada na Figura 1, de modo a proporcionar uma melhor visualização.

Figura 1 – Fluxograma para planejamento e organização de etapas

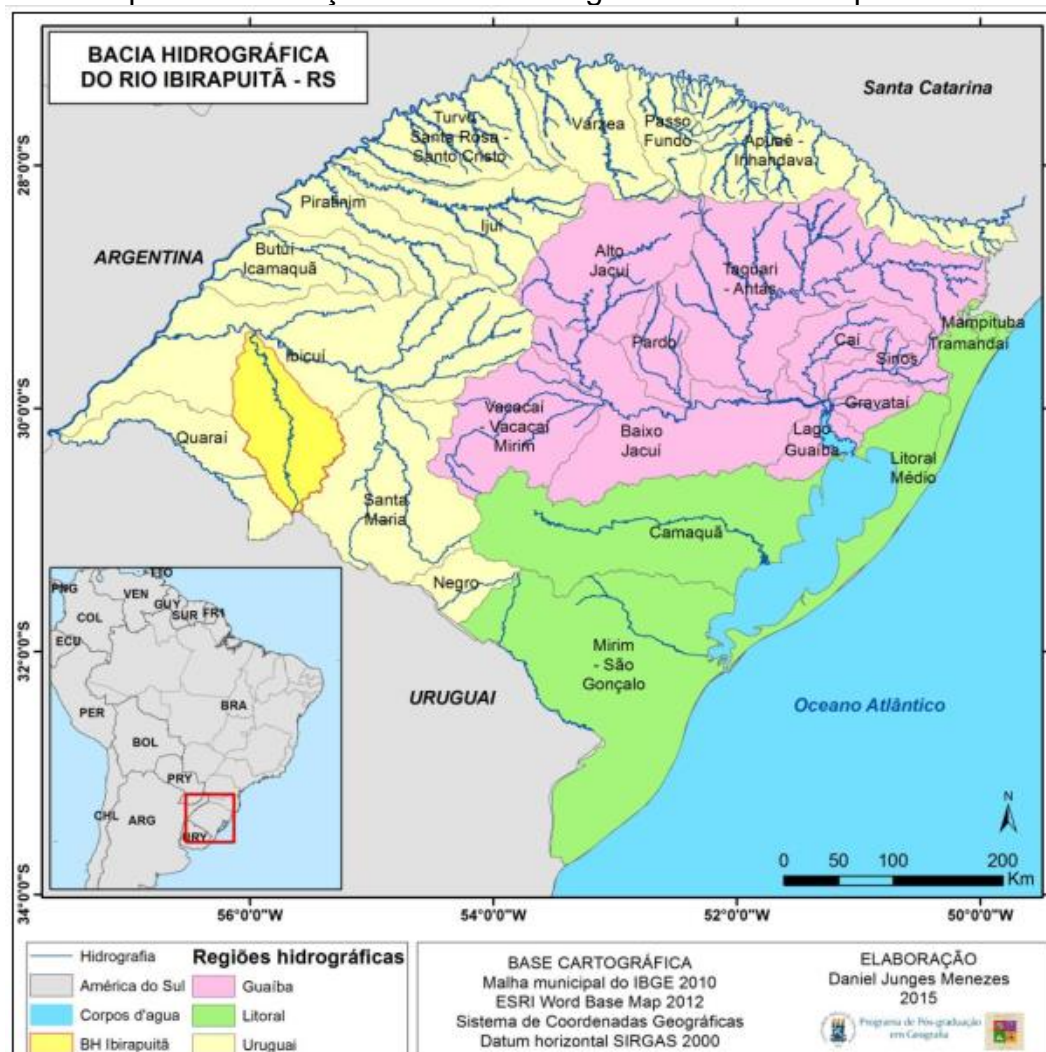


Fonte: Elaboração própria

3.1 Área de estudo

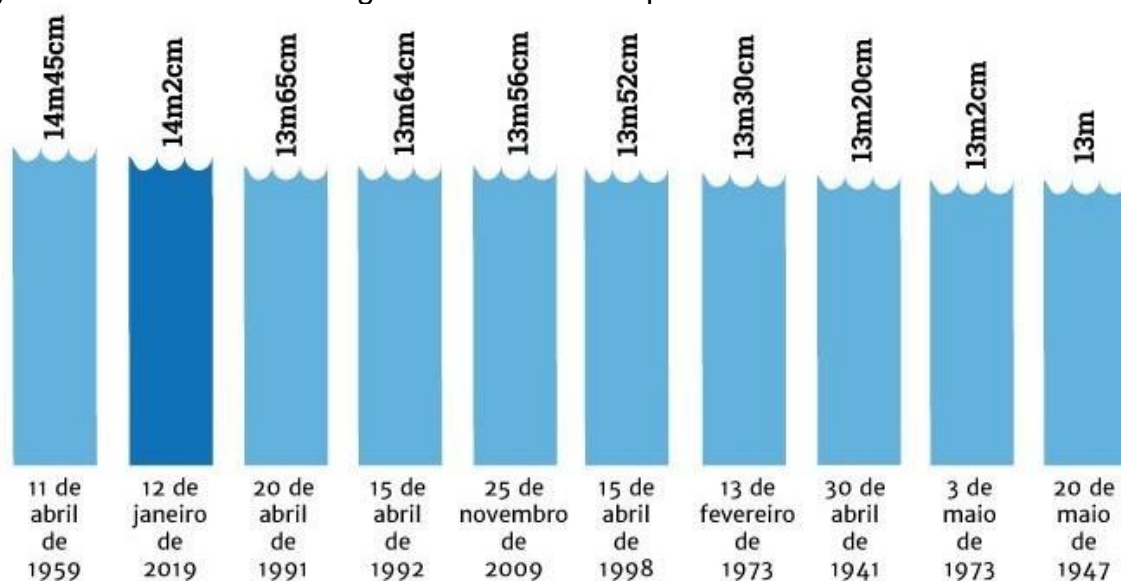
Como o presente trabalho visa apoiar os estudos de cheias que ocorrem no rio Ibirapuitã, as quais, frequentemente, deixam a população ribeirinha da área urbana do município de Alegrete/RS desabrigada, a área a ser estudada será toda sua bacia hidrográfica de contribuição. Para Menezes *et al.* (2017), na região de Alegrete, a bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã é notoriamente marcada pela ocorrência de processos erosivos e também por inundações que afetam a população local ao longo de seu curso médio. De acordo com a análise de Freitas e Tamiosso (2022), o extravasamento da calha maior do rio Ibirapuitã ocorre com período de retorno de aproximadamente 2 anos na área urbana do município de Alegrete. A localização da área de estudo é apresentada na Figura 2. Os maiores níveis ocorridos no rio Ibirapuitã podem ser observados na Figura 3 (SGB, 2019 *apud* Gonzatto, 2019).

Figura 2 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã



Fonte: Menezes *et al.* (2017)

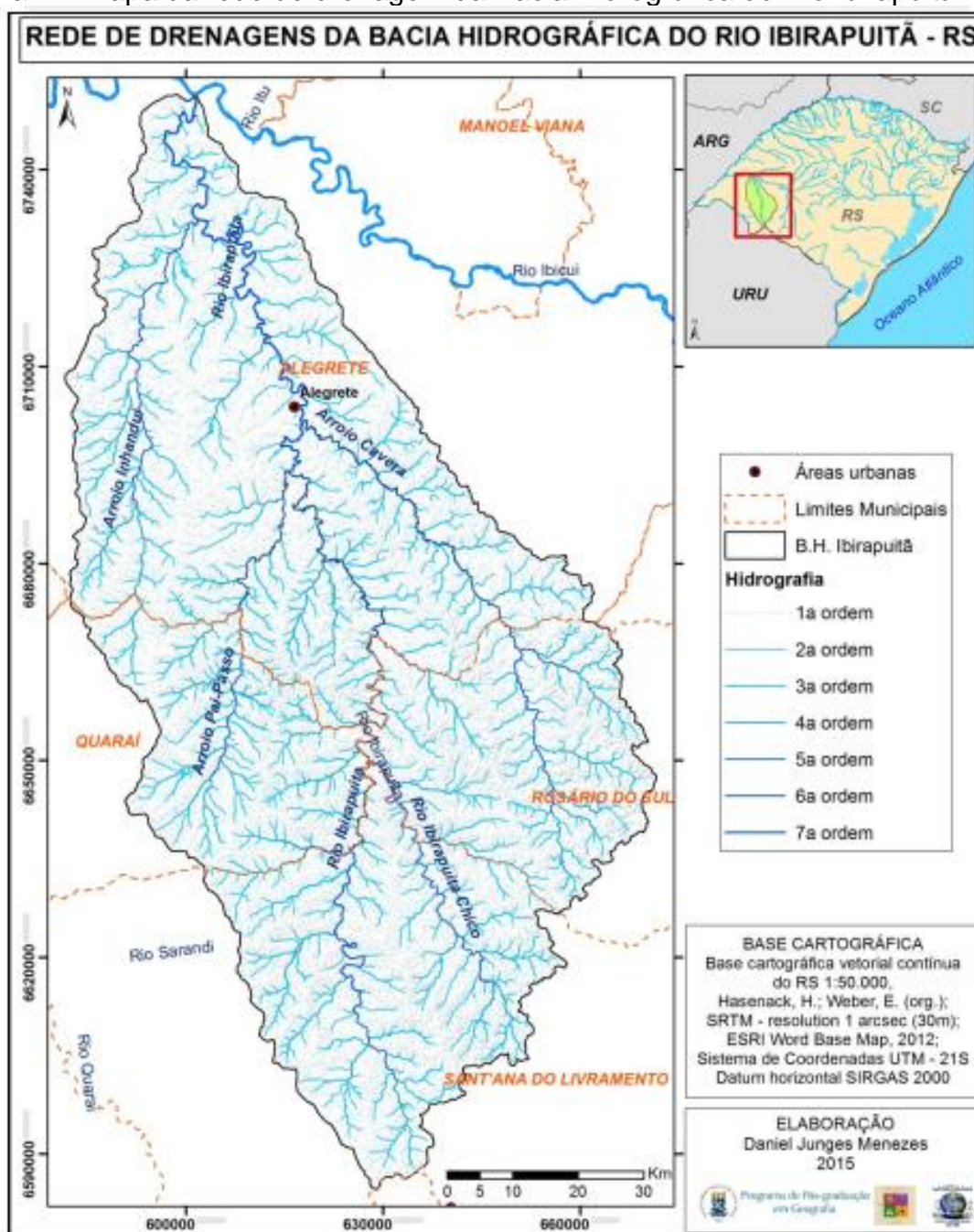
Figura 3 – Maiores níveis registrados no rio Ibirapuitã



Fonte: Adaptado de SGB (2019) *apud* Gonzatto (2019)

O Rio Ibirapuitã é um afluente localizado na margem esquerda do rio Ibicuí, que por sua vez é afluente do rio Uruguai. O Rio Ibirapuitã nasce na região sudoeste do Rio Grande do Sul e percorre uma extensão de aproximadamente 350 km até sua foz no rio Ibicuí, com área de drenagem de 7.978,7 km². O alto curso do rio está situado no território do município de Santana do Livramento, enquanto as porções oeste e leste da bacia hidrográfica estão localizadas, respectivamente, nos municípios de Quaraí e Rosário do Sul. A rede de drenagem da bacia analisada é mostrada na Figura 4.

Figura 4 – Mapa da rede de drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Ibirapuitã



Fonte: Menezes *et al.* (2017)

3.2 Obtenção de dados e análise de consistência

Esta metodologia propõe a análise nas séries históricas hidrológicas da bacia do Rio Ibirapuitã em função das tendências climáticas. No transcorrer dos anos, são coletados registros reais de precipitação e vazão, dando origem às séries históricas. Esses dados encontram-se acessíveis para *download* no portal da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e o do Instituto Nacional de Meteorologia

(INMET), plataformas voltadas para informações sobre recursos hídricos e meteorológicos.

Devido à temática centrar-se na área urbana de Alegrete, local com ocorrência frequente de cheias, foi considerada a bacia hidrográfica contribuinte à esta seção, previamente delimitada por Freitas (2022). Portanto, foram buscados dados de vazões e precipitações disponíveis para esta área de abrangência junto às plataformas citadas.

Considerando a grande extensão da bacia hidrográfica em estudo, foi fundamental coletar dados de múltiplas estações. Para realizar a cobertura completa da bacia hidrográfica, além das estações localizadas dentro da área de estudo, também foram obtidos dados de estações pluviométricas circundantes à área.

Cada estação com série disponível foi analisada buscando selecionar o maior período possível com menor índice de falhas, priorizando também dados recentes. Assim, não foi realizado o preenchimento das falhas de forma a não interferir na série original.

Foram então realizadas análises de consistência nas séries previamente selecionadas, utilizando o *software* de planilhas eletrônicas Excel, por meio das seguintes atividades:

- i) identificação e correção de possíveis valores discrepantes ou duplicatas, de forma inicialmente manual;
- ii) avaliação se a diferença entre a precipitação acumulada e a média do período permanecia próxima para as estações que compartilhavam dados em períodos comuns. Essa verificação é importante para compreender a consistência das medições entre as estações e garantir a confiabilidade das relações identificadas na análise de correlação;
- iii) análise de dupla massa; e,
- iv) análise da correlação entre as estações, definindo coeficientes de determinação R^2 .

3.3 Preparo das séries de dados

A partir dos dados consistidos das estações selecionadas, foram criadas as seguintes séries históricas:

a) A partir dos dados diários de chuva (provenientes de estações pluviométricas), foram criadas as séries:

- Precipitações máximas anuais com 1 dia de duração: Identificada a maior precipitação em um único dia para cada ano;
- Precipitações máximas anuais com 2 dias de duração: Identificada a maior precipitação em um período contínuo de dois dias para cada ano;
- Precipitações máximas anuais com 3 dias de duração: Identificada a maior precipitação em um período contínuo de três dias para cada ano;
- Precipitações anuais: Calculada a precipitação total para cada ano;
- Precipitações mensais: Calculada a precipitação total para cada mês;
- Série anual de número de dias sem chuva: Contado o número de dias sem chuva para cada ano; e,
- Série mensal de número de dias sem chuva: Contado o número de dias sem chuva para cada mês.

b) A partir dos dados horários de chuva (provenientes de estações pluviográficas) foram criadas as mesmas séries do item a), mais as seguintes séries:

- Precipitações máximas anuais com 1h de duração: Identificada a maior precipitação em uma única hora para cada ano;
- Precipitações máximas anuais com 3h de duração: Identificada a maior precipitação em um período contínuo de três horas para cada ano;
- Precipitações máximas anuais com 6h de duração: Identificada a maior precipitação em um período contínuo de seis horas para cada ano;
- Precipitações máximas anuais com 12h de duração: Identificada a maior precipitação em um período contínuo de 12 horas para cada ano; e,
- Precipitações máximas anuais com 18h de duração: Identificada a maior precipitação em um período contínuo de 18 horas para cada ano.

c) A partir dos dados diários de vazão, foram criadas as séries:

- Vazões máximas anuais: Identificada a vazão máxima observada em um ano;
- Vazões mínimas anuais: Identificada a vazão mínima observada em um ano;
- Vazões médias anuais: Calculada a vazão média para cada ano;
- Vazões médias mensais: Calculada a vazão média para cada mês; e,

- Vazões anuais mínimas médias de 7 dias: Calculada a vazão mínima média em um período contínuo de sete dias para cada ano.

Em síntese, a obtenção das séries máximas varia conforme a duração. Para a série de 1 dia, é suficiente criar uma tabela dinâmica na qual é extraído o valor máximo por ano. No caso das séries de 2 e 3 dias, foi necessário realizar uma soma móvel antes de determinar o valor máximo anual. Os totais mensais e anuais foram obtidos de maneira simples por meio de tabelas dinâmicas, enquanto a contagem de dias sem chuva envolveu o registro mensal e anual quantas vezes foi observado o valor zero (correspondente a um dia registrado sem chuva) para uma estação específica.

As séries máximas anuais de precipitação de 1, 3, 6, 12, 18, 24, 48 e 72 horas de duração provenientes de pluviógrafos foram obtidas através de somas móveis devido à discretização dos registros ser em intervalos de 1 hora.

Para as estações fluviométricas, foram obtidas as séries de vazão máxima e mínima anual, as vazões médias mensal e anual, e a vazão mínima média de um período de sete dias consecutivos para cada ano utilizando o recurso de tabela dinâmica.

3.4 Testes para verificação de tendências e suas magnitudes

Para cada série criada no item anterior, foram aplicados dois testes de tendência, Mann-Kendall e Spearman, assim como realizado um ajuste de regressão linear, todos descritos na seção 2.2. Como cada teste possui uma metodologia distinta, um dos testes pode acusar a não-estacionariedade, enquanto o outro não. Por este motivo, foram aplicados mais de um teste, e caso detectado a tendência com 5% de significância em algum deles, a magnitude será calculada de duas formas, pelo coeficiente angular da regressão linear e pela inclinação de Sen.

A aplicação do teste de tendência exige que não exista sazonalidade e autocorrelação. Como a grande maioria das séries testadas são valores máximos ou mínimos anuais, assume-se que não há autocorrelação nas mesmas. No entanto, séries mensais de vazões podem apresentar autocorrelação, principalmente em rios perenes.

O teste de Mann-Kendall e inclinação de Sen foram conduzidos utilizando o complemento *Real Statistics* no Excel (Zaiontz, 2023), embora seja possível obter

resultados idênticos por meio de cálculo manual. Essa abordagem enfatiza a versatilidade das ferramentas disponíveis e sua aplicação eficaz na análise estatística.

Para o teste de Spearman, foi realizado o cálculo de forma manual na área de trabalho do Excel.

Para a análise de regressão linear, optou-se pelo uso das fórmulas nativas de INCLINAÇÃO e INTERCEPÇÃO do Excel para calcular os coeficientes angular e linear, respectivamente, simplificando o processo de avaliação dos padrões de comportamento nas séries. Essa escolha ressalta a praticidade de empregar funcionalidades incorporadas na ferramenta para a realização eficiente de testes estatísticos.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Obtenção de dados e análise de consistência

Foram obtidos dados de 28 estações pluviométricas durante o período entre 01/01/1940 e 31/12/2022 utilizando o complemento *ANA Data Acquisition* (Petry; Jardim; Fan, 2021) diretamente na área de trabalho do QGIS, conforme observado na Tabela 1.

Na Tabela 1 são apresentadas quais estações possuem registros e a porcentagem de falhas destes. Após a análise, foram então selecionadas nove estações pluviométricas (destacadas na Tabela 1) para utilização no estudo: 3056006, 3055011, 3055008, 3055007, 3055004, 3055003, 3055001, 2955013 e 2955001.

Em relação às estações pluviométricas, optou-se por descartar da análise os anos hidrológicos que apresentavam mais de 60 registros de falhas, visando garantir a integridade e confiabilidade dos resultados. Essa abordagem é essencial para assegurar que os dados utilizados representem com precisão as condições meteorológicas ao longo do tempo. Além disso, foi dada preferência àquelas que possuíam, no mínimo, 20 anos de registros. Essa decisão teve como objetivo fortalecer a consistência temporal dos dados, proporcionando uma base mais sólida para análises de longo prazo. Como resultado dessa seleção criteriosa, houve uma redução substancial na quantidade de estações, de 28 para 9, focando em conjuntos de dados mais robustos e representativos.

Tabela 1 – Porcentagem de falhas das estações pluviométricas e período de atividade

Estação	Ano de início de atividade	Ano de término de atividade	Falhas
3056030	Sem registros	Sem registros	100%
3056029	Sem registros	Sem registros	100%
3056006	1978	Em atividade	7,56%
3055021	Sem registros	Sem registros	100%
3055020	Sem registros	Sem registros	100%
3055019	Sem registros	Sem registros	100%
3055018	Sem registros	Sem registros	100%
3055017	Sem registros	Sem registros	100%
3055016	Sem registros	Sem registros	100%
3055015	Sem registros	Sem registros	100%
3055012	Sem registros	Sem registros	100%
3055011	2000	Em atividade	6,46%
3055008	1988	Em atividade	15,08%
3055007	1986	Em atividade	6,82%
3055006	Sem registros	Sem registros	100%
3055004	1976	Em atividade	3,58%
3055003	1976	Em atividade	3,09%
3055002	Sem registros	Sem registros	100%
3055001	1940	1998	38,43%
2956002	1951	1959	32,34%
2955020	Sem registros	Sem registros	100%
2955019	Sem registros	Sem registros	100%
2955017	2004	Em atividade	8,33%
2955015	1999	2000	71,27%
2955013	1986	Em atividade	4,79%
2955012	1985	1992	80,49%
2955011	Sem registros	Sem registros	100%
2955001	1940	1989	28,76%

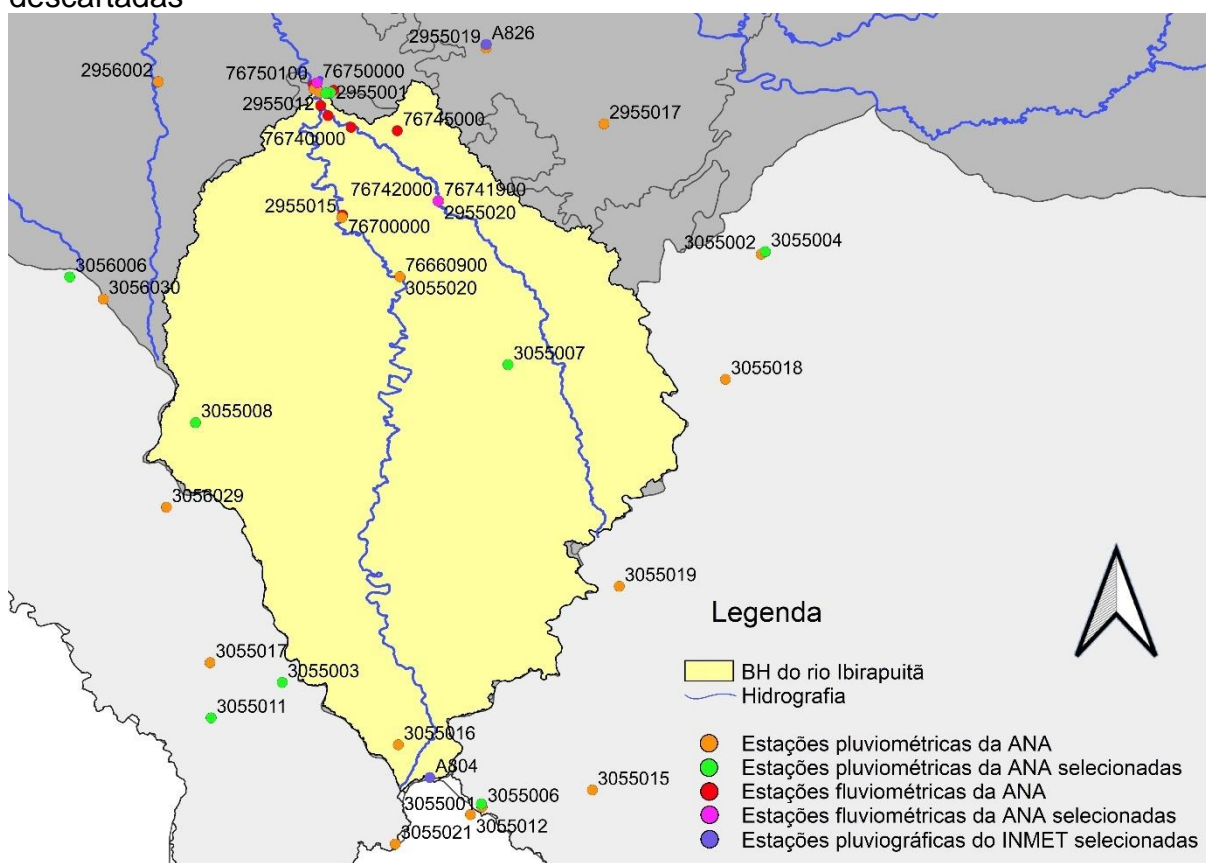
Fonte: Elaboração própria

Para as séries históricas provenientes do INMET, foram utilizadas as estações pluviográficas A804 (Santana do Livramento, 23,98% de falhas de 22/11/2001 à 31/10/2023) e A826 (Alegrete, 11,51% de falhas de 28/09/2006 à 31/10/2023), com dados discretizados em intervalos horários. Os anos hidrológicos com mais de 90 dias de falhas eram descartados.

Já para as estações fluviométricas foram selecionadas as estações 76742000 (2,73% de falhas de 1977 à 2022) e 76750000 (0,43% de falhas de 1941 à 2022).

A localização das estações previamente analisadas, assim como todas selecionadas para o estudo estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Estações pluviométricas, pluviográficas e fluviométricas selecionadas e descartadas

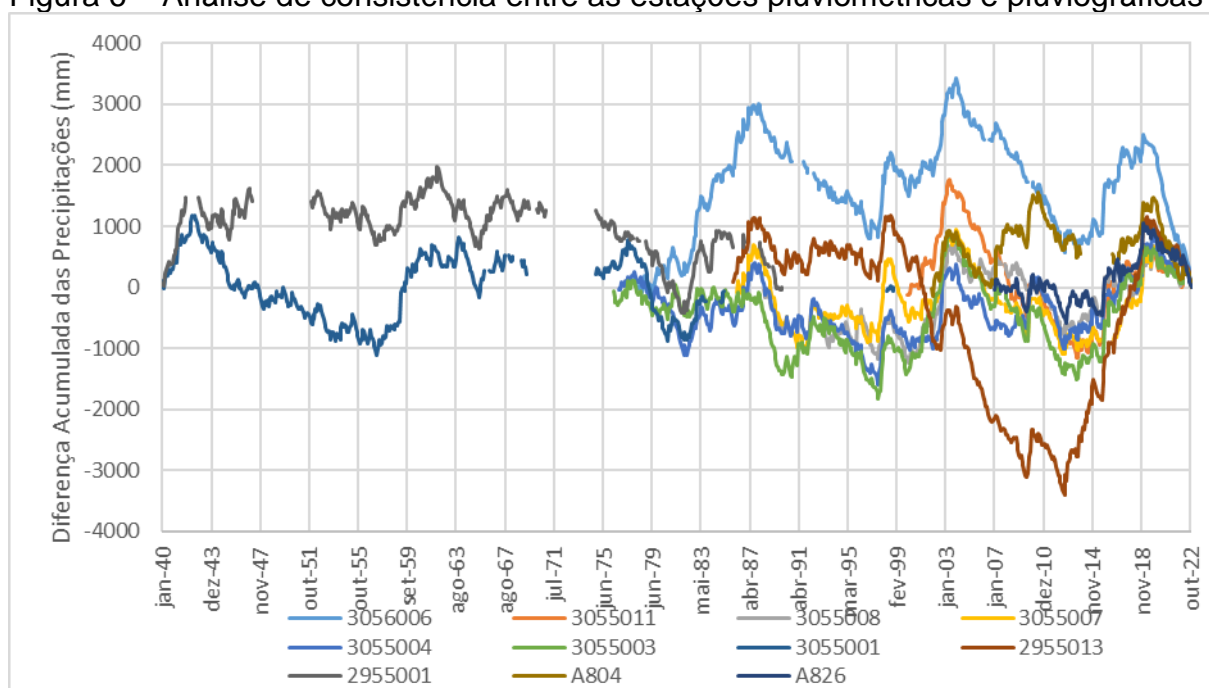


Fonte: Elaboração própria

Com a seleção refinada dos anos e das estações, avançou-se para a fase de análise de consistência entre as estações meteorológicas. A diferença entre a precipitação acumulada e a média está ilustrada na Figura 6. A mesma análise está apresentada na Figura 7 para as vazões médias mensais. As análises de dupla massa e correlação estão apresentadas no Apêndice A. A análise da dupla massa mostrou a

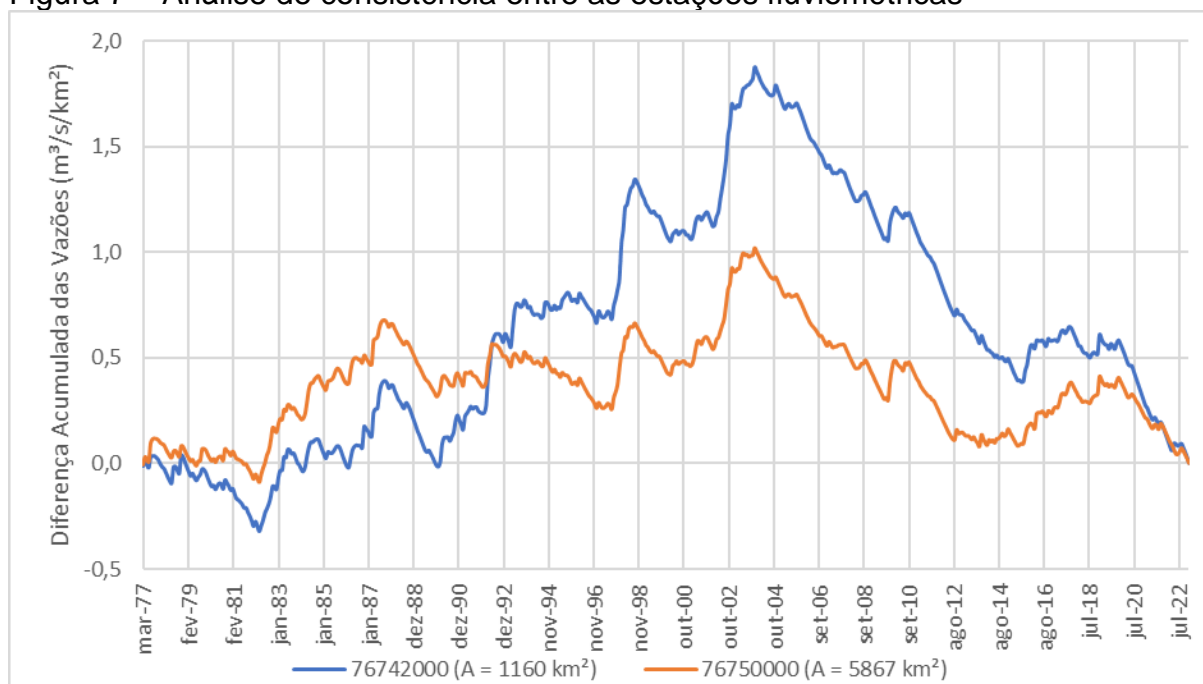
consistência entre as estações e os coeficientes de determinação R^2 obtidos se mantiveram em torno do 0,4 a 0,6 para a maioria dos casos, indicando uma correlação moderada entre as variáveis em questão, justificada pela grande área da bacia analisada. Destaca-se a análise entre as estações 3055001 e 2955001, mostrando que não há correlação entre as mesmas, visto que estão em extremos opostos da bacia, ao sul e ao norte, respectivamente. Outro destaque, observando a Figura 6 e as análises de dupla massa, é a estação 2955013, que a partir de um período próximo ao ano de 1998/1999, apresentou uma leve mudança no comportamento em relação às demais estações.

Figura 6 – Análise de consistência entre as estações pluviométricas e pluviográficas



Fonte: Elaboração própria

Figura 7 – Análise de consistência entre as estações fluviométricas



Fonte: Elaboração própria

4.2 Testes para verificação de tendências e suas magnitudes

São apresentados os resultados das estatísticas para os testes de Mann-Kendall e Spearman, a magnitude das tendências detectadas para o teste da inclinação de Sen e os coeficientes de ajuste da regressão linear.

Para facilitar a identificação do tipo de dados que constituem as séries históricas criadas e a apresentação dos resultados nas tabelas resumo nas seções seguintes, temos a lista de denominações:

- P1D: precipitação máxima anual com 1 dia de duração;
- P2D: precipitação máxima anual com 2 dias de duração;
- P3D: precipitação máxima anual com 3 dias de duração;
- PTA: precipitação total anual;
- PTM: precipitação total mensal;
- DSCA: quantidade anual de dias sem chuva;
- DSCM: quantidade mensal de dias sem chuva;
- P1H: precipitação máxima anual com 1 hora de duração;
- P3H: precipitação máxima anual com 3 horas de duração;
- P6H: precipitação máxima anual com 6 horas de duração;
- P12H: precipitação máxima anual com 12 horas de duração;

- P18H: precipitação máxima anual com 18 horas de duração;
- VMAX: vazão máxima anual;
- VMIN: vazão mínima anual;
- VMDA: vazão média anual;
- VMMD: vazão média mensal; e,
- VMM7: vazão mínima anual média de um período contínuo de 7 dias.

A tabela resumo das séries com suas principais características estão apresentadas no Apêndice B.

Para os testes de tendência de Mann-Kendall e Spearman, foi considerado o nível de significância com $\alpha = 0,05$, assim, as estatísticas de teste foram comparadas ao escore padrão (*Z-Score*) da distribuição Normal, o qual foi adotado como $Z_{1-\alpha/2} = 1,96$, obtido através da fórmula $INV.NORMP.N(1 - 0,05/2)$ diretamente no Excel. Quando o módulo da estatística de teste é maior que o escore padrão, é detectada tendência na série, assim, o referido valor é grafado em negrito nas tabelas correspondentes.

Nas tabelas apresentadas nas seções seguintes, temos as convenções de siglas: MK para o teste de Mann-Kendall, S para o teste de Spearman, IS para a magnitude calculada pela inclinação de Sen e RL para a magnitude calculada pela regressão linear.

4.2.1 Resultado dos testes para as estações de chuva discretizadas em intervalos diários

Os resultados da aplicação dos testes de Mann-Kendall e Spearman são apresentados na Tabela 2. A magnitude das tendências calculada pela inclinação de Sen e pelo coeficiente angular da regressão linear são apresentadas na Tabela 3.

Na Tabela 3, a unidade da magnitude da tendência para as séries P1D, P2D, P3D e PTA é *mm/ano*, para a série PTM é *mm/mês*, para a série DSCA é *dias/ano*, e para a série DSCM é *dias/mês*.

Tabela 2 – Estatísticas dos testes de tendência de Mann-Kendall e Spearman para as estações de chuva

Estações	P1D		P2D		P3D		PTA		PTM		DSCA		DSCM	
	MK	S	MK	S	MK	S	MK	S	MK	S	MK	S	MK	S
3056006	-0,38	-0,49	-0,52	-0,75	-0,55	-0,62	-1,74	-1,92	-3,52	-3,52	2,76	3,02	6,20	6,13
3055011	0,35	0,13	-0,49	-0,54	0,00	0,04	-0,07	-0,08	-1,05	-1,05	0,28	0,48	1,25	1,17
3055008	0,02	-0,06	1,54	1,55	2,00	1,88	0,34	0,24	0,15	0,15	0,83	0,85	1,28	1,39
3055007	1,16	1,12	0,63	0,65	1,22	1,23	0,27	0,26	0,51	0,55	-0,31	-0,32	0,68	0,45
3055004	-0,39	-0,43	0,17	0,29	0,84	0,96	0,30	0,24	0,06	0,08	-1,42	-1,55	-1,48	-1,17
3055003	0,67	0,76	1,06	1,19	1,14	1,13	0,65	0,51	0,62	0,61	-1,47	-1,54	-1,33	-1,35
3055001	0,11	0,16	-0,08	0,03	-0,37	-0,30	1,02	0,91	0,62	0,60	-3,09	-3,10	-3,56	-3,34
2955013	1,74	1,73	2,45	2,28	2,28	2,02	0,73	0,68	0,19	0,20	0,84	0,77	1,49	1,38
2955001	-1,99	-2,06	-1,04	-0,97	-0,73	-0,73	-1,74	-1,53	-1,09	-1,11	1,32	1,22	2,90	4,04
A804	-0,68	-0,66	-0,61	-0,85	0,08	0,09	-0,91	-1,17	-1,57	-1,64	0,83	0,57	3,47	4,24
A826	0,95	1,07	1,04	1,09	1,31	1,29	-0,05	-0,38	-0,19	-0,23	-0,09	-0,23	1,23	1,77

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 – Magnitudes das tendências detectadas pelos testes para as estações de chuva

Estações	P1D		P2D		P3D		PTA		PTM		DSCA		DSCM	
	IS	RL	IS	RL	IS	RL	IS	RL	IS	RL	IS	RL	IS	RL
3056006									-0,097	-0,002	0,830	0,644	0,006	0,001
3055011														
3055008					2,614	1,602								
3055007														
3055004														
3055003														
3055001											-1,000	-0,987	-0,005	-0,001
2955013			2,078	2,204	2,731	2,356								
2955001	-1,157	-0,787											0,007	0,001
A804													0,007	-0,026
A826														

Fonte: Elaboração própria

Destaca-se que, na estação 3056006, foram identificadas tendências negativas na precipitação total mensal e positivas na quantidade anual de dias sem chuva e quantidade mensal de dias sem chuva, revelando uma redução ao longo do tempo na precipitação total de cada mês e um aumento na quantidade de dias sem chuva.

Na estação 3055008, a série de precipitação com três dias de duração apresentou tendência positiva. Para a estação 3055001, os testes revelaram que existe uma tendência negativa nos dias sem chuva anual e mensal. Quanto à estação 2955013, foram identificadas tendências de crescimento para as séries de precipitação máxima anual com duração de 2 e 3 dias. Já na estação 2955001, evidenciou-se uma tendência de decréscimo para precipitação máxima anual com 1 dia de duração, acompanhada por um aumento da quantidade mensal de dias sem chuva.

Nas séries das estações pluviográficas do INMET, constatou-se que apenas uma série apresentou tendência: quantidade mensal de dias sem chuva da estação A804, por ambos testes. Ao analisar as magnitudes observa-se um comportamento conflitante, pois um teste indica crescimento (inclinação de Sen) e o outro decréscimo (regressão linear) da quantidade mensal de dias sem chuva, com direções inversas de magnitude. Assim, não é possível realizar nenhuma conclusão assertiva sobre estas séries sem possuir uma quantidade maior de dados e realizar uma análise mais refinada.

Para as estações 3055011, 3055007, 3055004, 3055003 e A826 não foram detectadas tendências significativas em nenhuma das séries analisadas, assim como as séries PTA (precipitações totais anuais) não apresentaram tendência significativa em nenhuma estação analisada.

4.2.2 Resultado dos testes para as estações de chuva discretizadas em intervalos menores que um dia

Os resultados da aplicação dos testes de Mann-Kendall e Spearman são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Estatísticas dos testes de tendência de Mann-Kendall e Spearman para as séries discretizadas em intervalos menores que um dia

Estações	P1H		P3H		P6H		P12H		P18H	
	MK	S	MK	S	MK	S	MK	S	MK	S
A804	-1,44	-1,71	-1,36	-1,51	-0,83	-1,11	-0,98	-0,79	-0,76	-0,74
A826	-0,09	-0,22	1,31	1,37	1,31	1,29	1,22	1,31	1,04	1,17

Fonte: Elaboração própria

Para as séries apresentadas na Tabela 4, não foram detectadas tendências significativas, logo, não foram calculadas as suas magnitudes.

4.2.3 Resultados para as estações fluviométricas

Os resultados da aplicação dos testes de Mann-Kendall e Spearman são apresentados na Tabela 5. A magnitude das tendências calculada pela inclinação de Sen e pelo coeficiente angular da regressão linear são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 5 – Estatísticas dos testes de tendência de Mann-Kendall e Spearman para as séries das estações fluviométricas

Estações	VMAX		VMIN		VMDA		VMDM		VMM7	
	MK	S	MK	S	MK	S	MK	S	MK	S
76742000	-1,23	-1,27	1,03	1,08	-2,03	-2,27	-2,90	-2,97	0,73	0,80
76750000	0,14	0,10	1,01	1,08	0,93	0,89	2,45	2,41	0,68	0,67

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 – Magnitudes das tendências detectadas pelos testes para as séries das estações fluviométricas

Estações	VMAX		VMIN		VMDA		VMDM		VMM7	
	IS	RL	IS	RL	IS	RL	IS	RL	IS	RL
76742000					-0,303	-0,325	-0,014	-0,001		
76750000							0,015	0,001		

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 6, a unidade da magnitude da tendência para as séries VMAX, VMIN, VMDA e VMM7 é $m^3/(s \cdot ano)$, e para a série VMDM é $m^3/(s \cdot mês)$.

Os resultados dos testes para as séries de vazões das estações fluviométricas indicaram uma tendência negativa nas vazões médias anuais e mensais para a

estação 76742000. No caso da estação 76750000, uma tendência positiva foi observada apenas nas vazões médias mensais, conforme evidenciado na Tabela 6.

4.3 Discussão dos resultados obtidos

A estação 3055001 está localizada na área urbana do município de Santana do Livramento, e as estações 2955013 e 2955001 estão localizadas na área urbana do município de Alegrete. Logo, é possível que as mudanças antropológicas causadas pela urbanização tenham influência na existência de tendência das séries destas estações.

É possível também citar o caso da estação pluviométrica 2955013 e da estação fluviométrica 76750000, ambas localizadas na área urbana de Alegrete e em atividade de coleta de dados. Nestas, os testes detectaram um aumento tanto de precipitação quanto nas vazões mensais.

A bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã apresenta tempo de concentração maior que um dia de duração, com valor próximo a *1,6 dias*, segundo Freitas (2022). Nesse sentido, as chuvas que causam as cheias são justamente as com durações maiores que um dia, como as séries P2D e P3D, com tendências positivas detectadas em mais de uma estação analisada.

Podemos realizar uma estimativa simplificada, analisando as magnitudes encontradas para as precipitações máximas anuais com duração de 2 e 3 dias, conforme temos na Tabela 7. A estação 3055008 encontra-se localizada na região oeste da bacia, enquanto a estação 2955013 localiza-se na área urbana de Alegrete. Esta última estação pode não apresentar tanta influência nas cheias, visto que está próxima do exutório da área analisada. No entanto, detectando nessa região, toda região do entorno pode estar também suscetível à ocorrência da mesma tendência.

Tabela 7 – Estimativa de precipitações máximas anuais futuras com duração de 2 e 3 dias

Estimativas	Séries	Estações	
		3055008	2955013
Média das magnitudes calculadas (mm/ano)	P2D	-	2,141
	P3D	2,108	2,544
Último valor observado da série (mm)	P2D	-	83,2
	P3D	249,3	83,2

Continua

Continuação

Estimativas	Séries	Estações	
		3055008	2955013
Estimativa das precipitações para 20 anos futuros	P2D	-	126,0
	P3D	291,5	134,1
Estimativa das precipitações para 50 anos futuros	P2D	-	190,3
	P3D	354,7	210,4
Estimativa das precipitações para 100 anos futuros	P2D	-	297,3
	P3D	460,1	337,6

Conclusão

Fonte: Elaboração própria

A estimativa calculada na Tabela 7 foi realizada considerando um aumento linear ao longo do tempo dos valores médios, com variância e a magnitude se mantendo constante. Observa-se que ao longo de 100 anos, podemos ter precipitações máximas anuais com 3 dias de duração de *460,1 mm* e *337,6 mm*, para as estações 3055008 e 2955013, respectivamente. A estação 2955013 é justamente a estação que apresentou uma leve mudança de comportamento nas análises de consistência. É importante buscar os motivos dessa mudança, se são devido a mudanças climáticas ou a alguma alteração na operação da estação pluviométrica. São necessários estudos nesse sentido para conclusões mais assertivas.

Estas análises mostram que os eventos de cheia poderão se tornar mais críticos na área urbana de Alegrete, afetando negativamente a população caso não sejam tomadas medidas preventivas.

Para uma estimativa de como essa precipitação impactará ao se transformar em vazão, é importante a realização de um estudo de modelagem hidrológica na bacia estudada, buscando definições de vazões e áreas alagadas em situações futuras.

Em relação à tendência positiva na série de vazões mensais, sugere-se que sejam realizadas análises estatísticas adicionais para detecção e remoção de autocorrelação e sazonalidade da série, caso existam, para que possam ser tomadas maiores conclusões.

Outro ponto a ser destacado é a tendência detectada no aumento dos dias sem chuva na estação 3056006. Esta estação localiza-se na região sul do estado, em Santana do Livramento, podendo ser um indicativo de possível acentuação de períodos secos na região.

Cabe ainda salientar que as estações pluviográficas analisadas ainda possuem séries relativamente curtas, necessitando de maior período de observação para que possam ser realizadas análises mais conclusivas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que os objetivos propostos foram atingidos, pois as tendências foram identificadas e as análises foram conduzidas. A exploração das séries históricas hidrológicas na bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã destaca a presença de padrões distintos de tendências climáticas. A análise desses dados revela variações ao longo do tempo em vários parâmetros hidrológicos, indicando uma clara influência das condições climáticas na região. No entanto, é importante mencionar que o resultado dos testes pode ser decorrente de sazonalidade causada por algum fenômeno climático. A rede de monitoramento existente ainda não possui séries longas suficientes que permitam conclusões mais assertivas, sendo necessários que estes estudos sejam sempre continuados e atualizados.

Apesar das incertezas relacionadas às mudanças climáticas e, conseqüentemente, aos possíveis impactos dessas alterações nas séries temporais, os testes de tendências representam uma ferramenta amplamente utilizada para a detecção de padrões significativos em séries temporais. Estudos desse tipo são relevantes e oportunos, contribuindo de maneira ampla para a compreensão abrangente das dinâmicas hidrológicas na bacia, fornecendo informações essenciais para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos na área do Rio Ibirapuitã.

Os resultados do estudo são de extrema importância para embasar a formulação de políticas públicas eficazes relacionadas ao gerenciamento de recursos hídricos, possibilitando a implementação de medidas de mitigação de riscos, adoção de práticas sustentáveis de uso da água e o desenvolvimento de estratégias de adaptação às mudanças climáticas. Dessa forma, este trabalho contribui para o planejamento adequado e a resiliência da região diante dos desafios climáticos.

Para trabalhos futuros, sugere-se que os dados históricos sejam analisados conjuntamente com o avanço da urbanização do município de Alegrete, para que seja obtida uma conclusão de como um fenômeno interage com o outro, e também considerar este tipo de comportamento nos dados históricos quando utilizados em projetos hidrológicos-hidráulicos.

Este trabalho faz parte de um projeto onde será dada continuidade às pesquisas, sendo que ainda são necessárias as seguintes atividades para continuidade da investigação:

- Analisar a sazonalidade e correlação das séries e formas de remover, caso detectadas;
- Analisar tendência em séries históricas de precipitações máximas anuais com durações de 5, 7 e 10 dias, assim como máximas anuais com 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11 horas de duração;
- Analisar a tendência na série de dados de número de dias por ano com vazão maior que um valor estimado (valor que extravasa a calha rio);
- Analisar tendência em dados de temperatura;
- Espacializar os resultados;
- Desenvolver modelos estatísticos para previsões das variáveis analisadas; e
- Calibrar um modelo hidrológico a partir dos dados atuais e testar resultados futuros em situação de tendência climática, possibilitando assim estimar áreas afetadas.

REFERÊNCIAS

- BACK, Á. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717–726. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000500001>. Acesso em: 04 jul. 2023.
- CONTI, J. B. Considerações sobre as mudanças climáticas globais. **Revista do Departamento de Geografia**, Universidade de São Paulo (USP). [S. l.], v. 16, p. 70-75, 2005. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0007>. Acesso em: 21 jun. 2023.
- COSTA, C.E.A. de S.; ARAÚJO JUNIOR, A.J.S.; VIEIRA, A.S.A.; MATOS, T.R. de; SANJAD, H.C.; CARVALHO, B.G.P.; SILVA, I.Q. da. Estudo de tendência pluviométrica na bacia do rio Guamá no período de 30 anos. *In*: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 12., 2015, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: ABRH, 2015.
- FARIAS, A. C. de. **O futuro importa: uma investigação exploratória da relação entre orientação de futuro e a percepção das mudanças climáticas**. 2022. Tese (Doutorado em Psicologia) - Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.
- FREITAS, P. G. da S. **Aplicação de métodos estatísticos e empíricos para estimativa do nível máximo do rio Ibirapuitã devido a eventos hidrológicos extremos**. 2022. 88p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Civil, Alegrete, 2022.
- FREITAS, P. G. da S; TAMIOSSO, M. F. Frequência das enchentes do Rio Ibirapuitã associadas às cotas atingidas e áreas alagadas. *In*: SANTOS, F. F. dos; CECHIN, N. F. (org.). **Estudos científicos com enfoque no desenvolvimento sustentável - Volume IV**. 1. ed. Bagé: Editora Faith, 2023. v. 4, p. 92–111. Disponível em: <http://www.editorafaith.com.br/ebooks/grat/978-65-89270-45-4.pdf>.
- GAUTHIER, T. D. Detecting Trends Using Spearman's Rank Correlation Coefficient. **Environmental Forensics**, v. 2, n. 4, p. 359–362, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1006/enfo.2001.0061>.
- GONZATTO, M. Enchente em Alegrete é a maior em 60 anos. **GZH**. 21 jan. 2019. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2019/01/enchente-em-alegrete-e-a-maior-em-60-anos-cjr6vqkxf00dc01nxcaocy16e.html>
- GUEDES, H. A. S.; PRIEBE, P. DOS S.; MANKE, E. B. Tendências em séries temporais de precipitação no norte do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 283–291, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863340238>.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2007. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>.

_____. **Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.** 2018. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 24 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>.

_____. **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate.** 2023. IPCC, Geneva, Switzerland, 34 p. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.

MANLY, B.F.J. **Statistics for Environmental Science and Management.** 2. ed. Wyoming: Chapman & Hall/CRC, 2009.

MENEZES, D. J.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. de S.; AIMON, J. G. S. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Ibirapuitã – RS. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA*, 17., 2017, Campinas. **Anais** [...]. Campinas: UNICAMP, 2017.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia estatística.** 1. ed. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 59, n.3, p. 22-27, 2007. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252007000300012&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 21 jun. 2023.

NOTARO, V.; LIUZZO, L.; FRENI, G.; LA LOGGIA, G. Uncertainty analysis in the evaluation of extreme rainfall trends and its implications on urban drainage system design. **Water**. v. 7, n. 12, p. 6931-6945, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/w7126667>. Acesso em: 21 jun. 2023.

PETRY, I.; JARDIM, P.; FAN, F. M. 2021. **Manual de aplicação plugin ANA Data Acquisition V1.0.** Manual Técnico, HGE, IPH, UFRGS.

QGIS Development Team. **QGIS.** Versão 3.28.8. [S. l.], 2023. Online. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/. Acesso em: 11 jun. 2023.

SANCHES, F. de O. **Os areais do sudoeste do Rio Grande do Sul: estudo sobre as chuvas no Século XX e um possível cenário para o Século XXI**. 2013. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, 2013.

SANCHES, F. D. O.; VERDUM, R.; FISCH, G. Estudo das tendências de chuvas de longo prazo. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 8, n. 3, p. 214-228, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1168>. Acesso em: 22 jun. 2023.

SANTOS, A. S. **Vulnerabilidades socioambientais diante das mudanças climáticas projetadas para o Semi-árido da Bahia**. 2008. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília (UnB), Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável, Brasília-DF, 2008.

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-778620150003>.

SILVA, M. M.; FERREIRA, V. de O.; ÁVILA, D. M. de. Análise de tendências e extremos pluviométricos na região hidrográfica do rio São Francisco. **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**. v. 19, n. 3, p. 127–149, 22 nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5016/estgeo.v19i3.16194>. Acesso em: 08 jul. 2023.

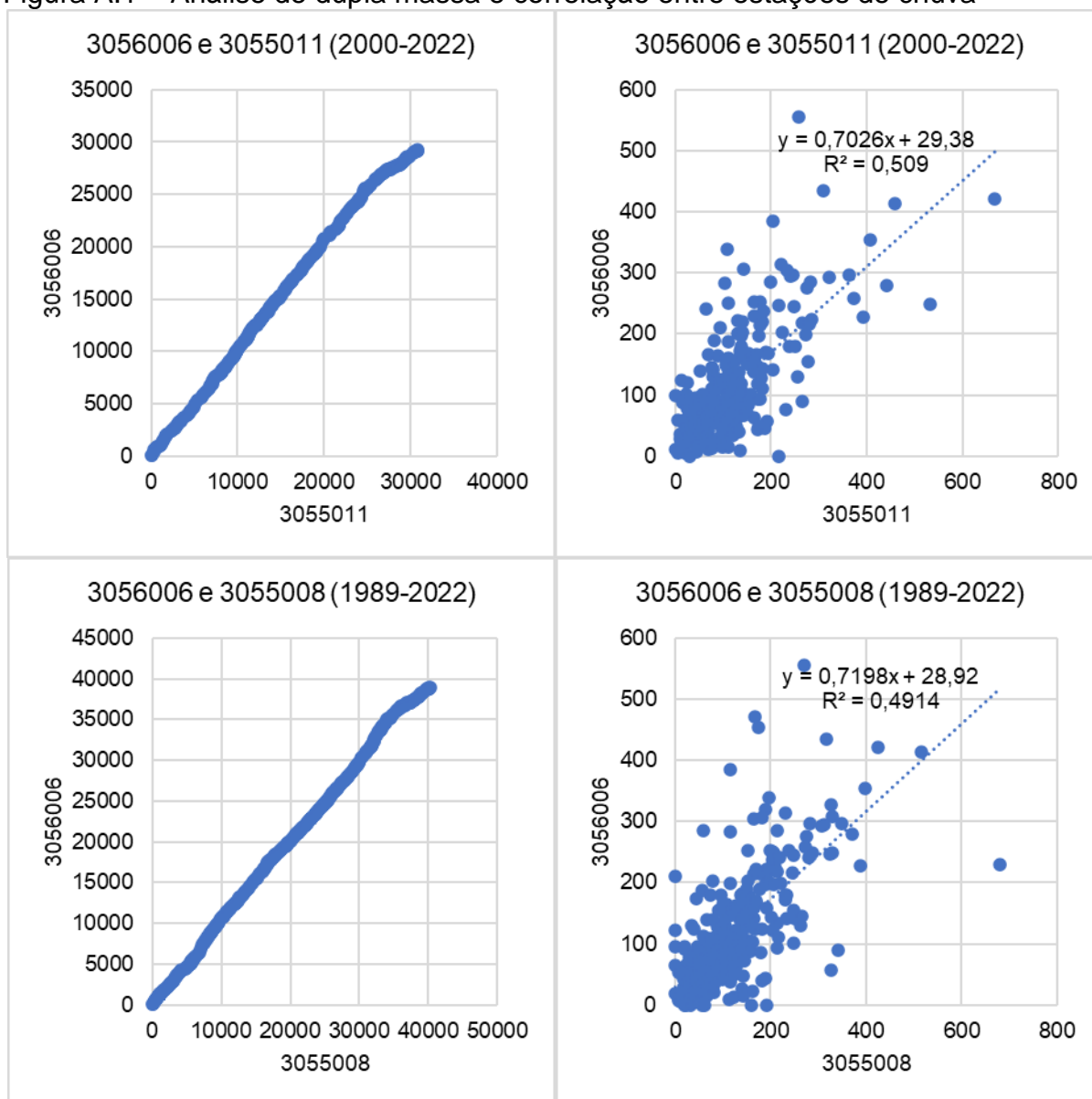
TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 2020.

ZAIONTZ, C. Real statistics resource pack. **Real statistics**. 2023. Disponível em: <https://real-statistics.com/free-download/real-statistics-resource-pack/>. Acesso em: 01 nov. 2023.

APÊNDICE A – Análise de consistência de dupla massa e correlação entre as estações pluviométricas e pluviográficas selecionadas

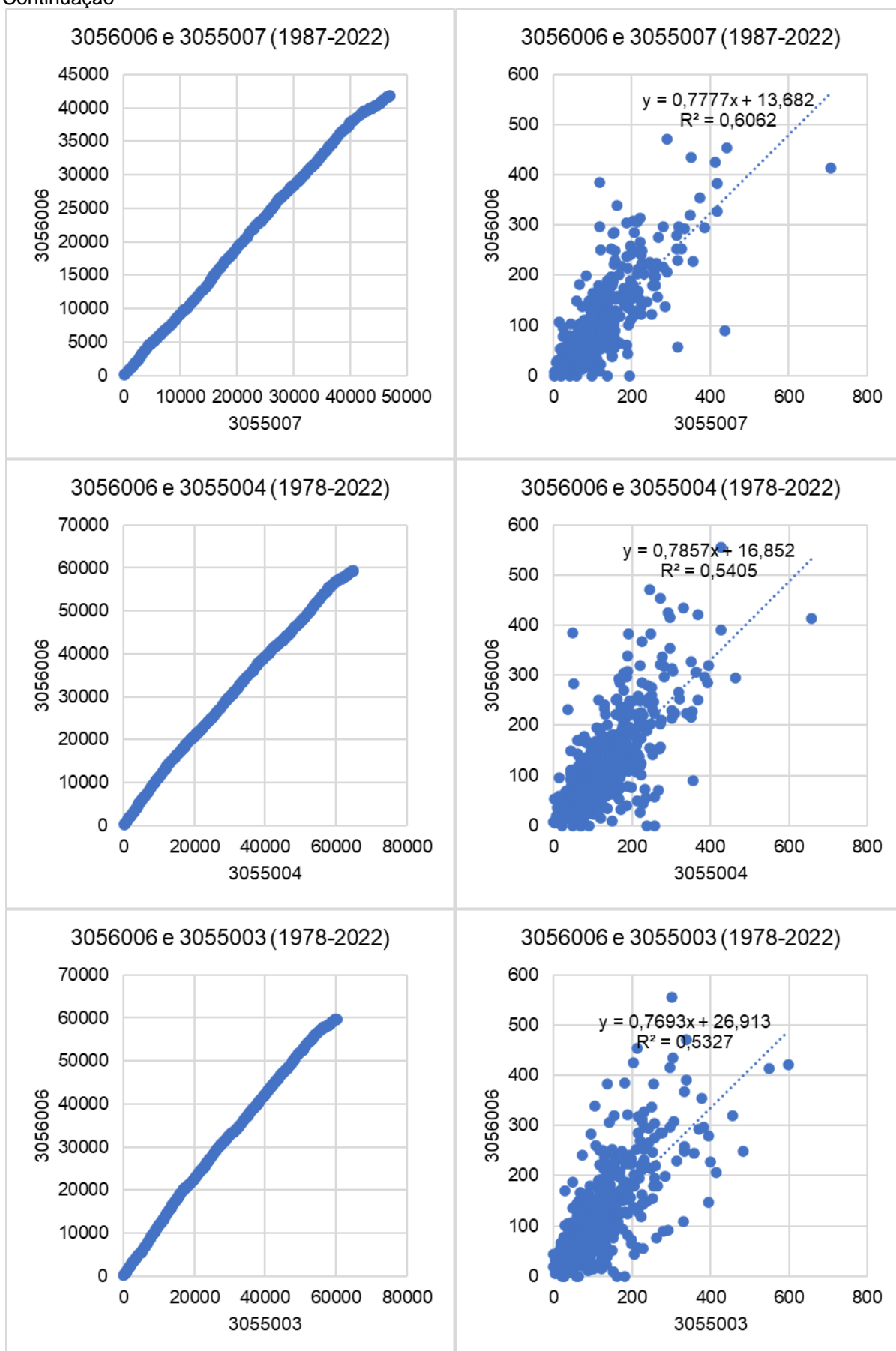
As análises de consistência de dupla massa foram conduzidas como exemplificado em Tucci (2020) e o coeficiente de determinação foi calculado utilizando o Excel.

Figura A.1 – Análise de dupla massa e correlação entre estações de chuva



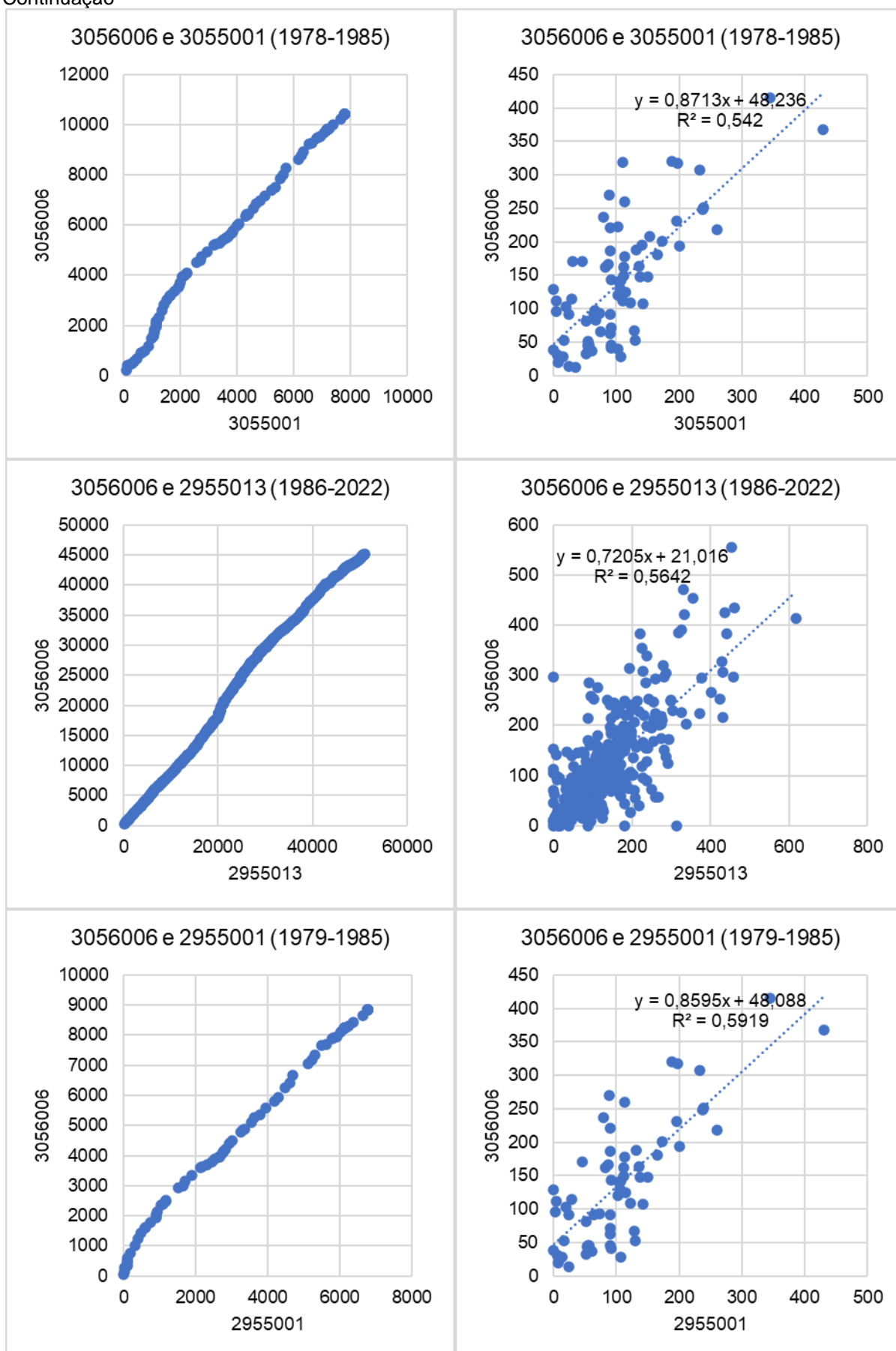
Continua

Continuação



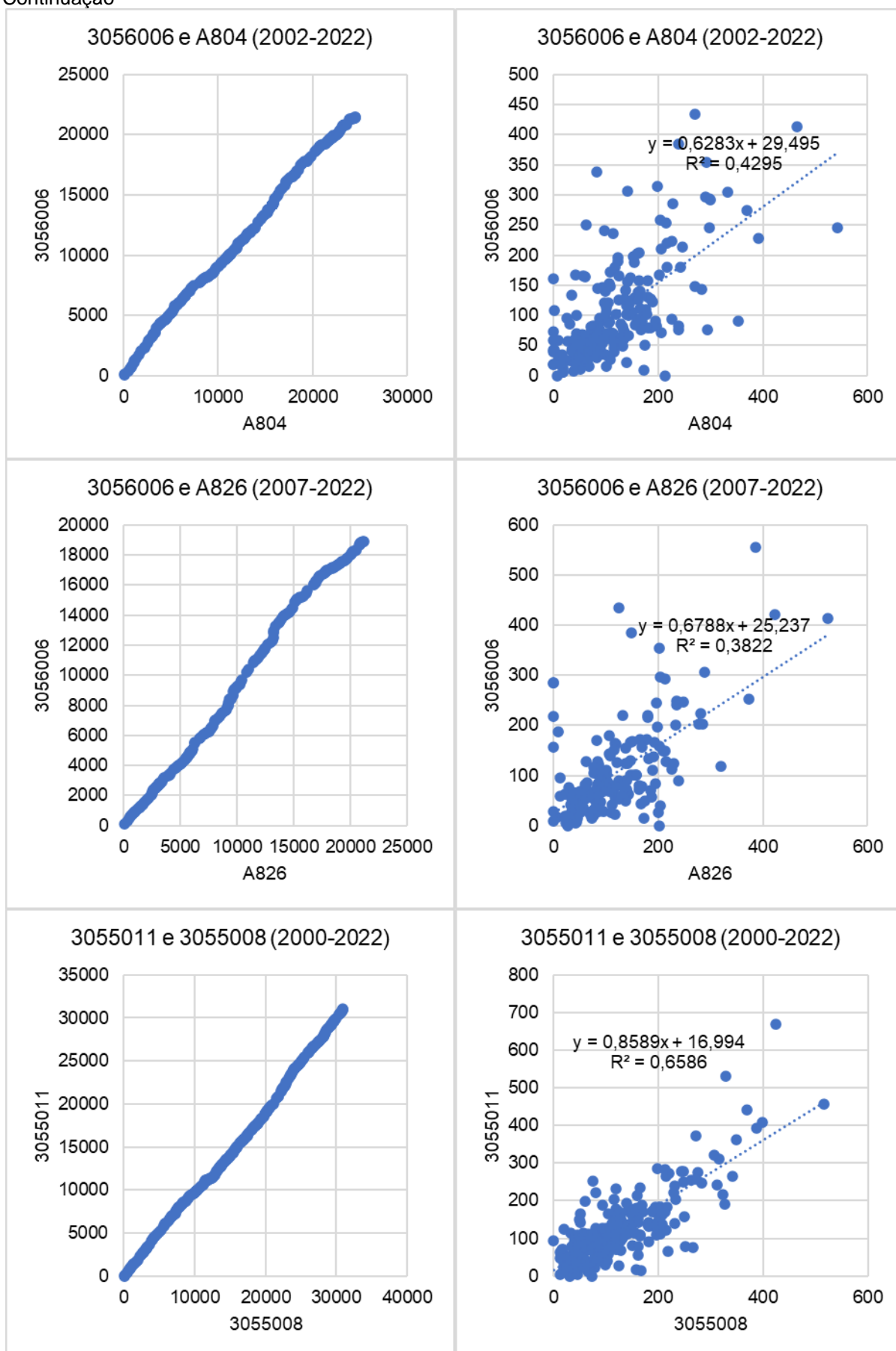
Continua

Continuação



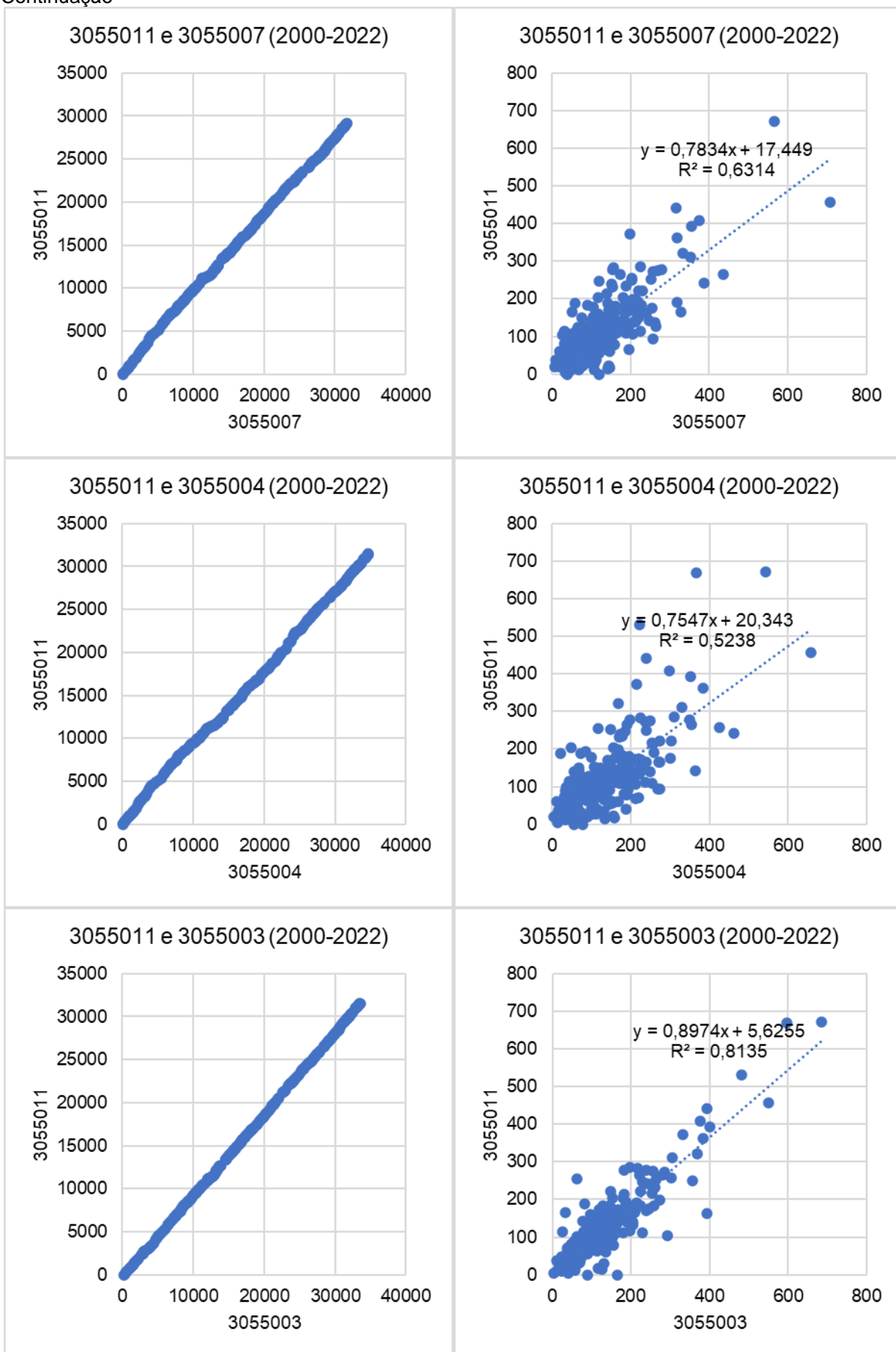
Continua

Continuação



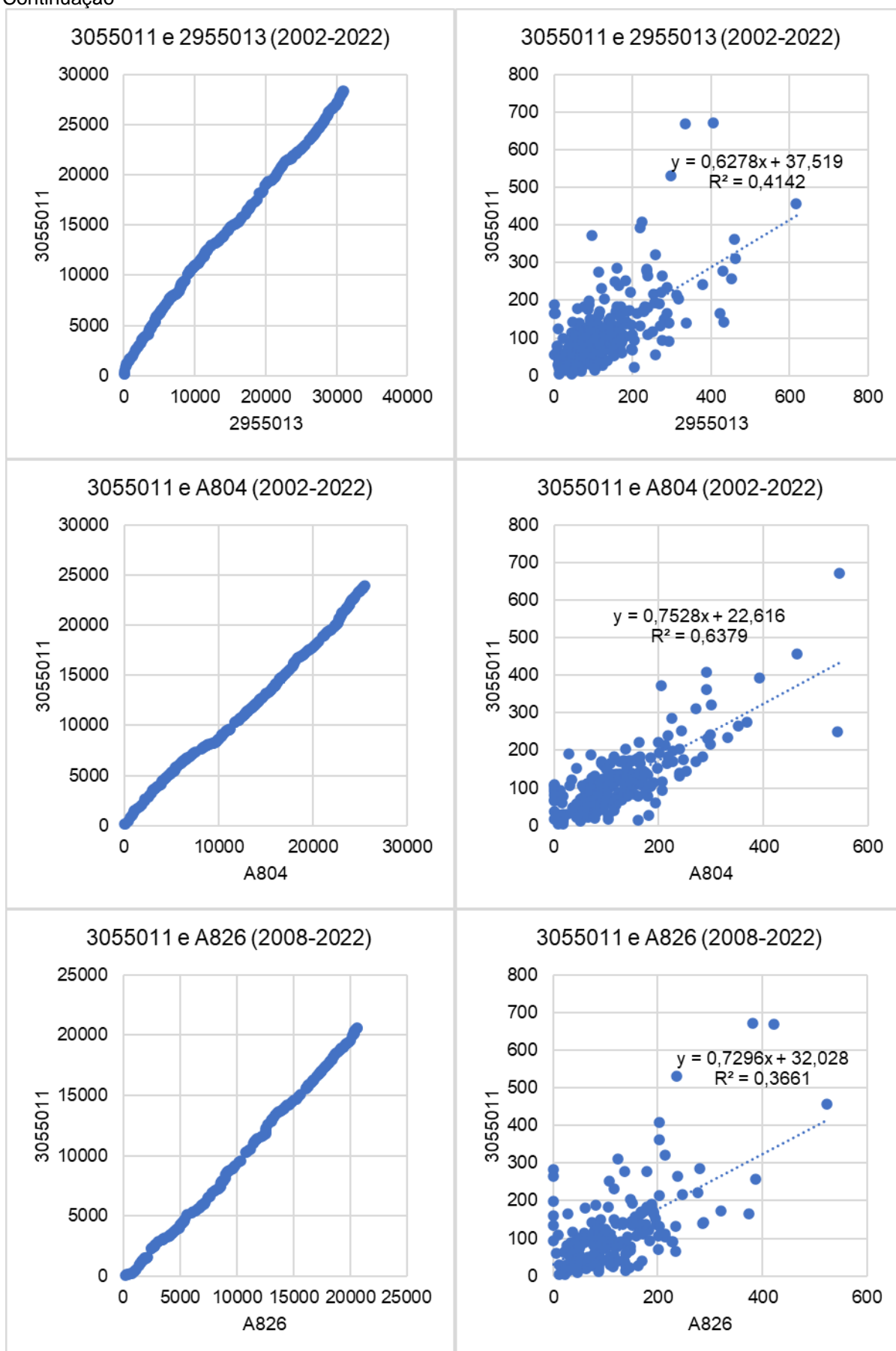
Continua

Continuação



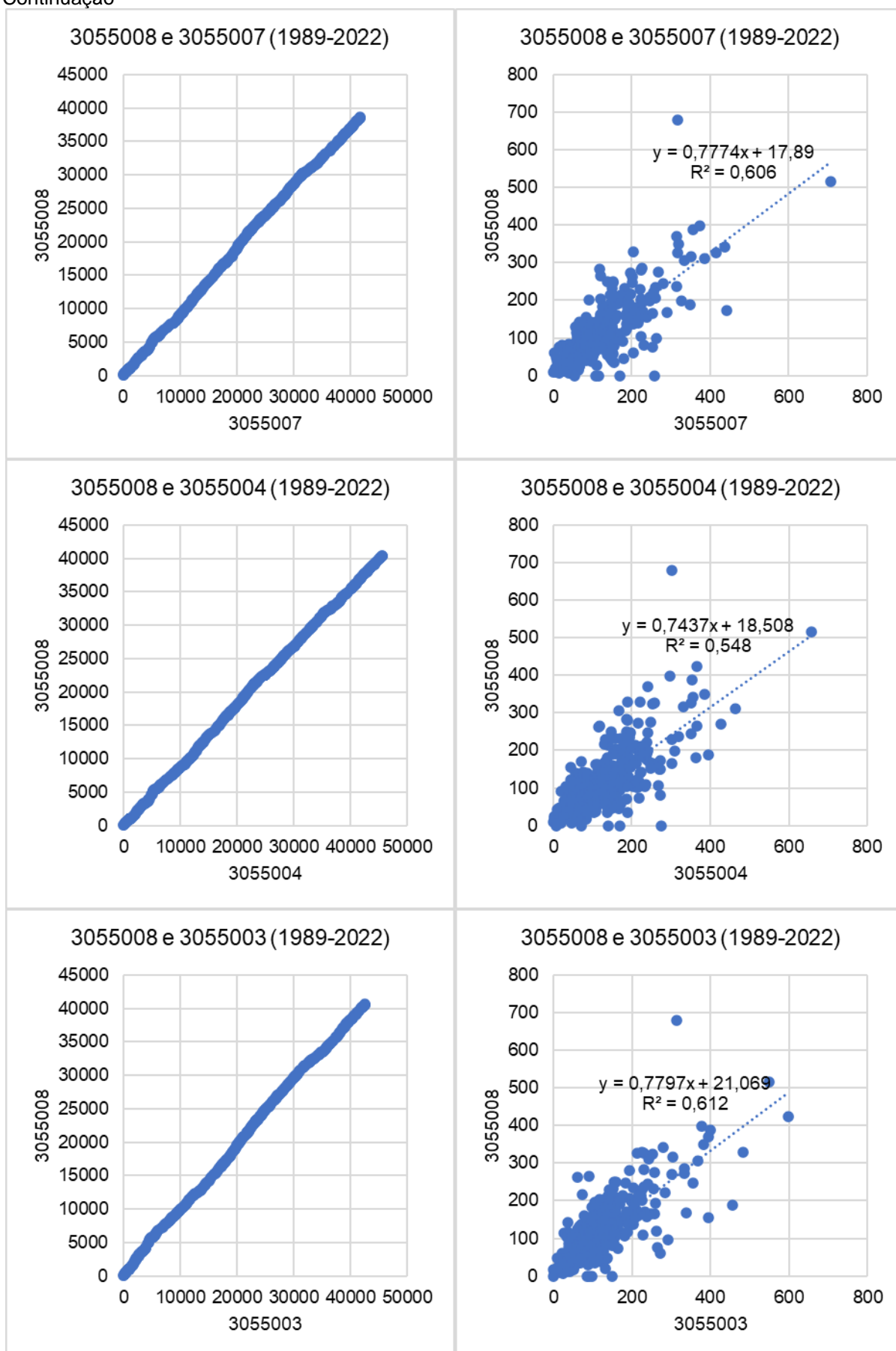
Continua

Continuação



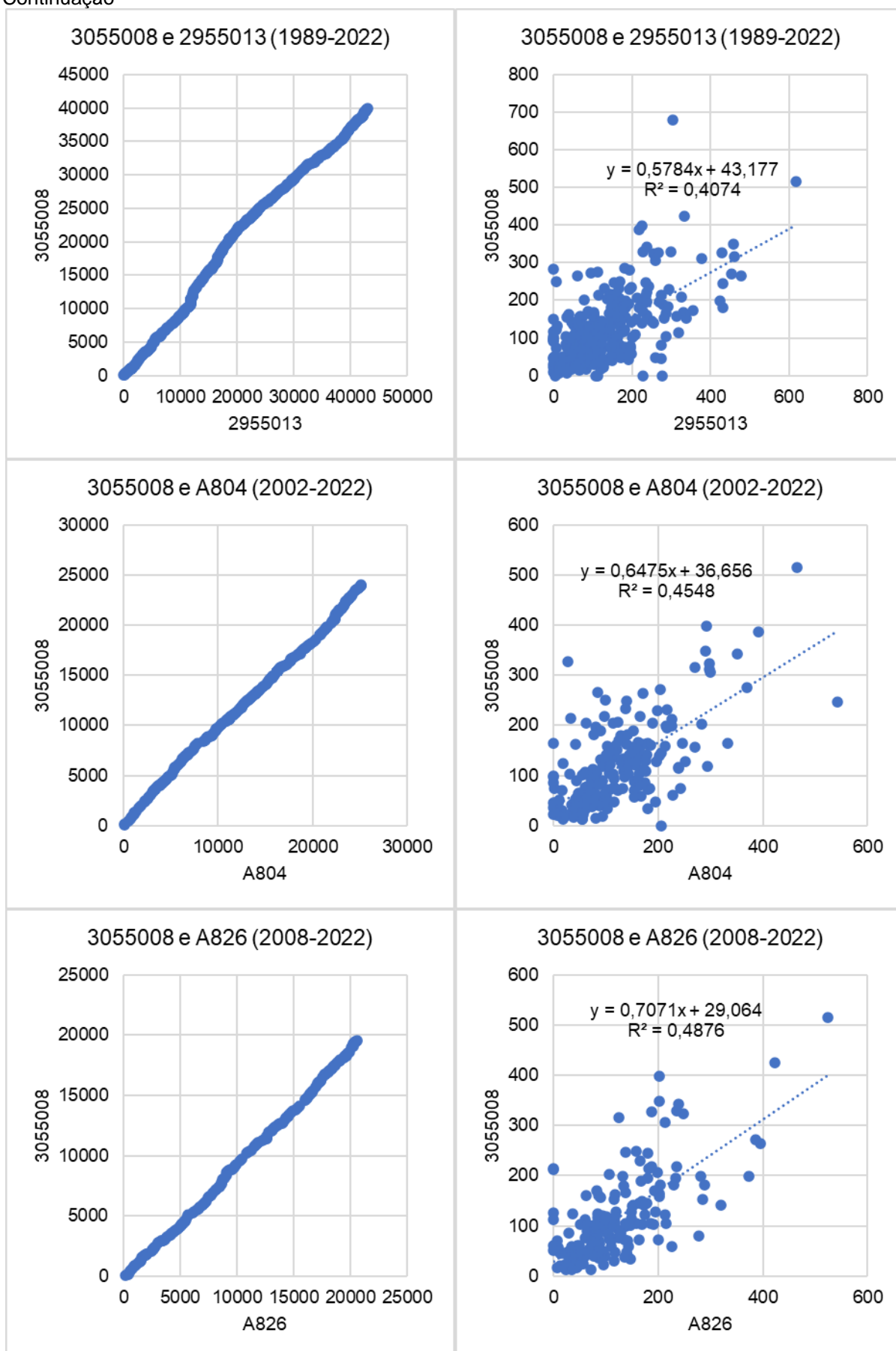
Continua

Continuação



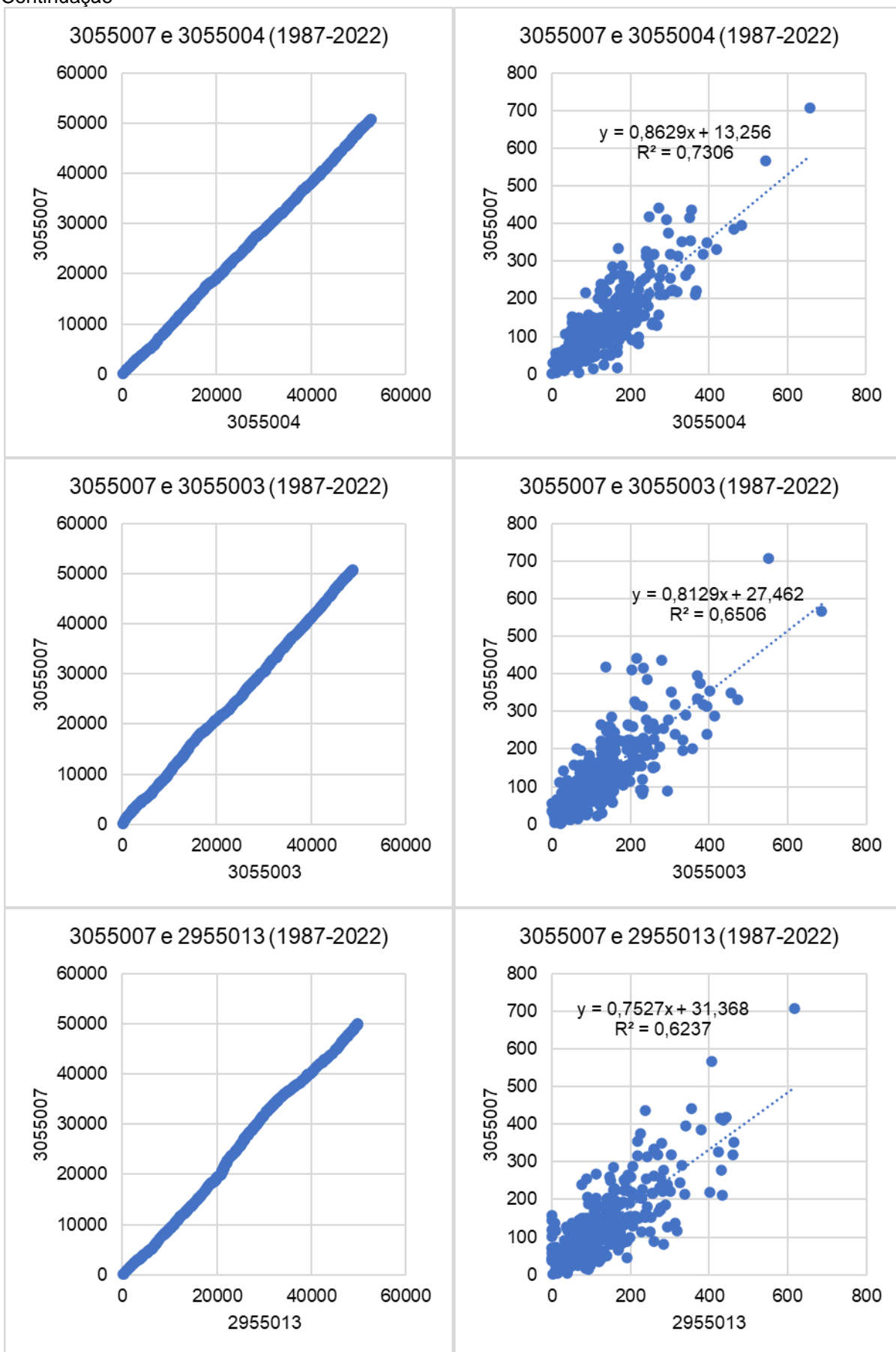
Continua

Continuação



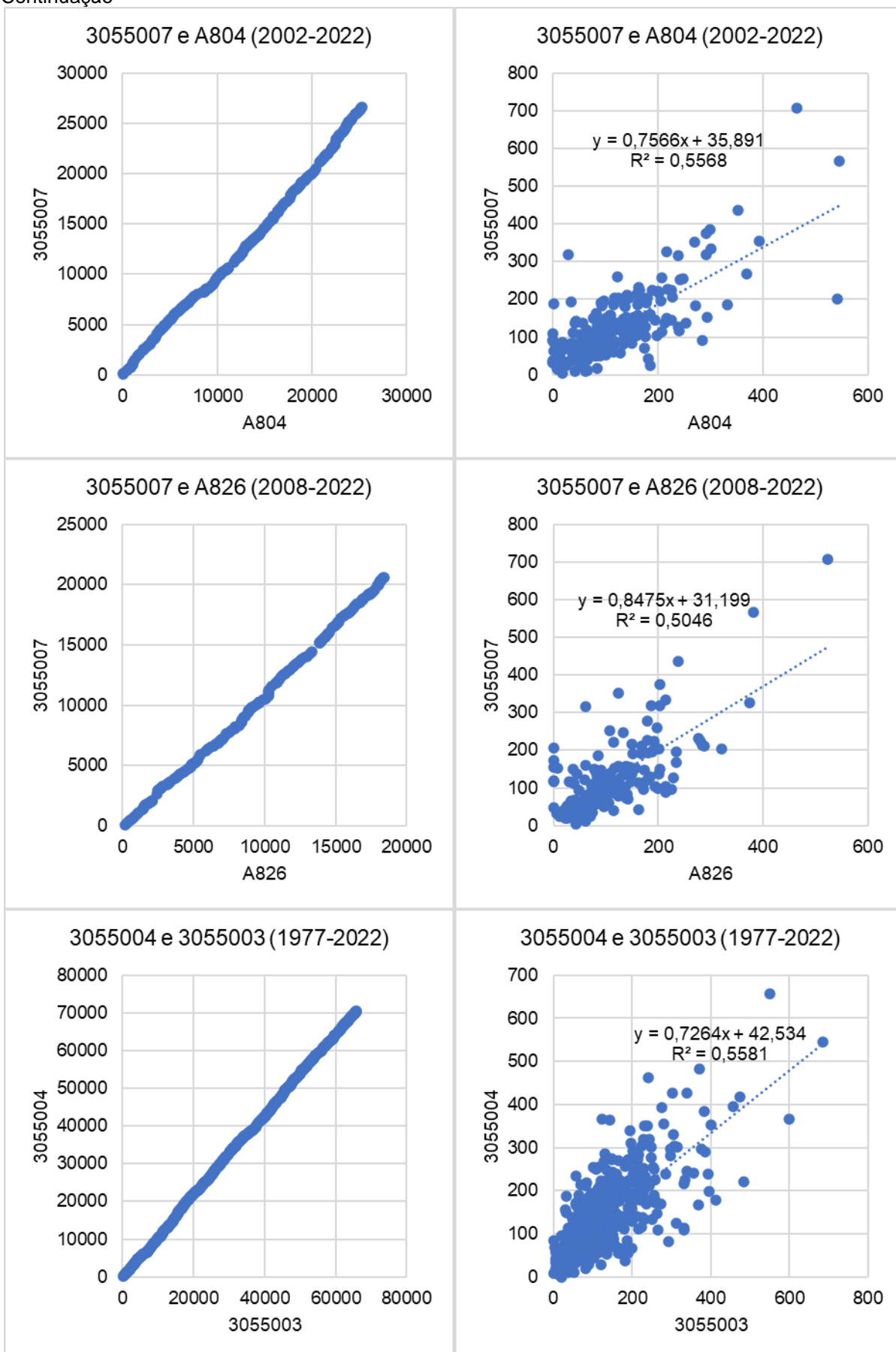
Continua

Continuação



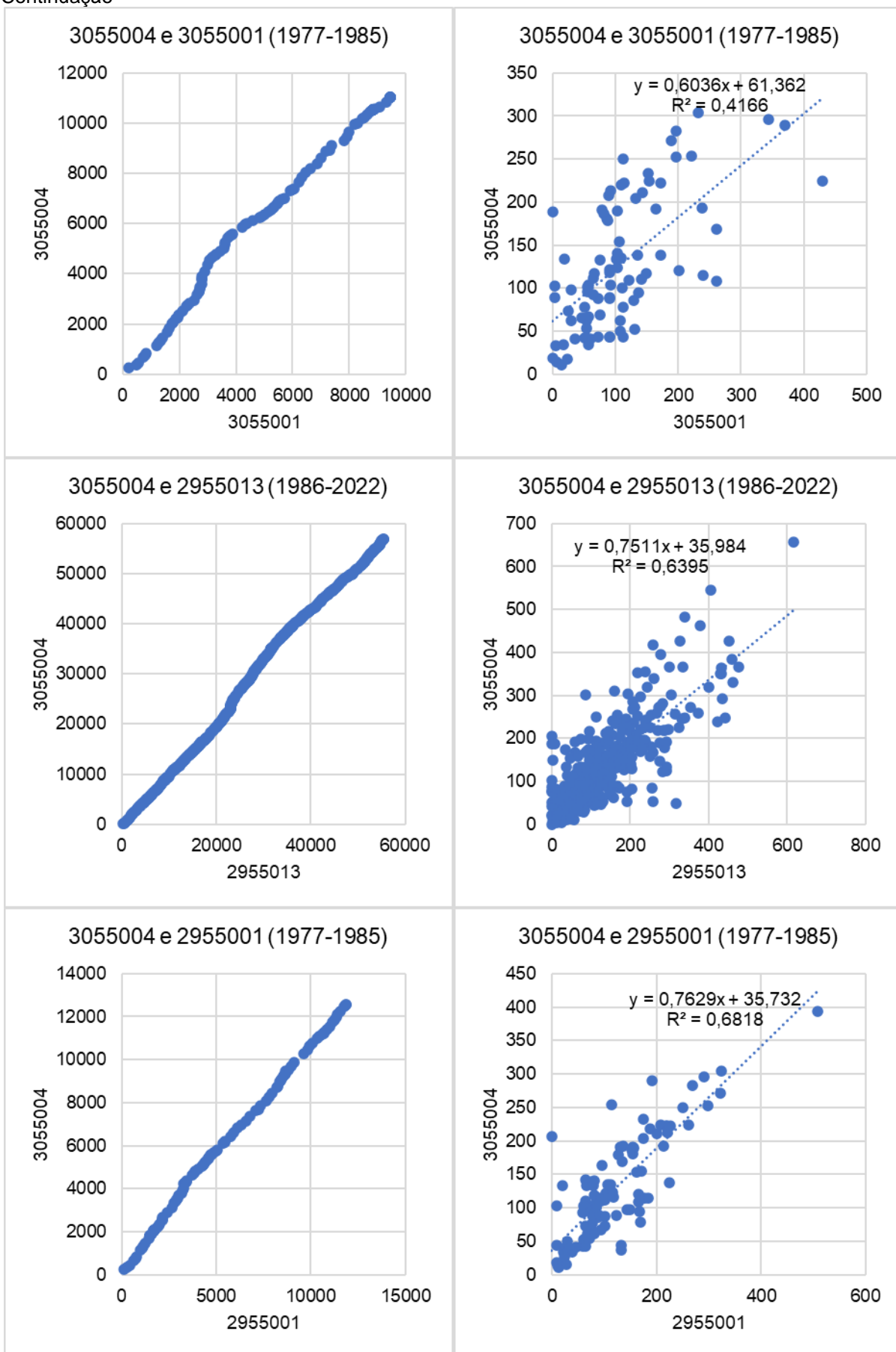
Continua

Continuação



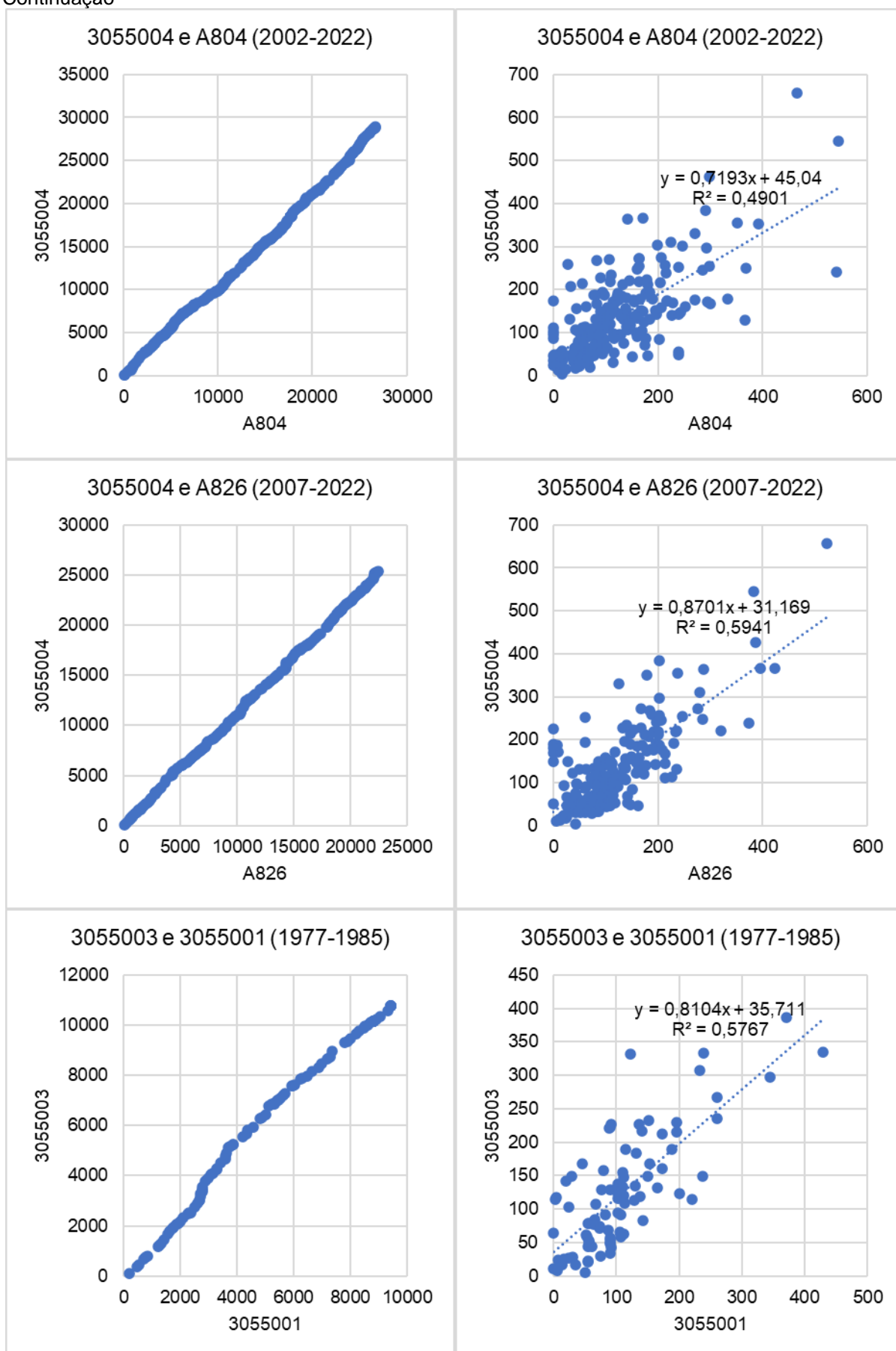
Continua

Continuação



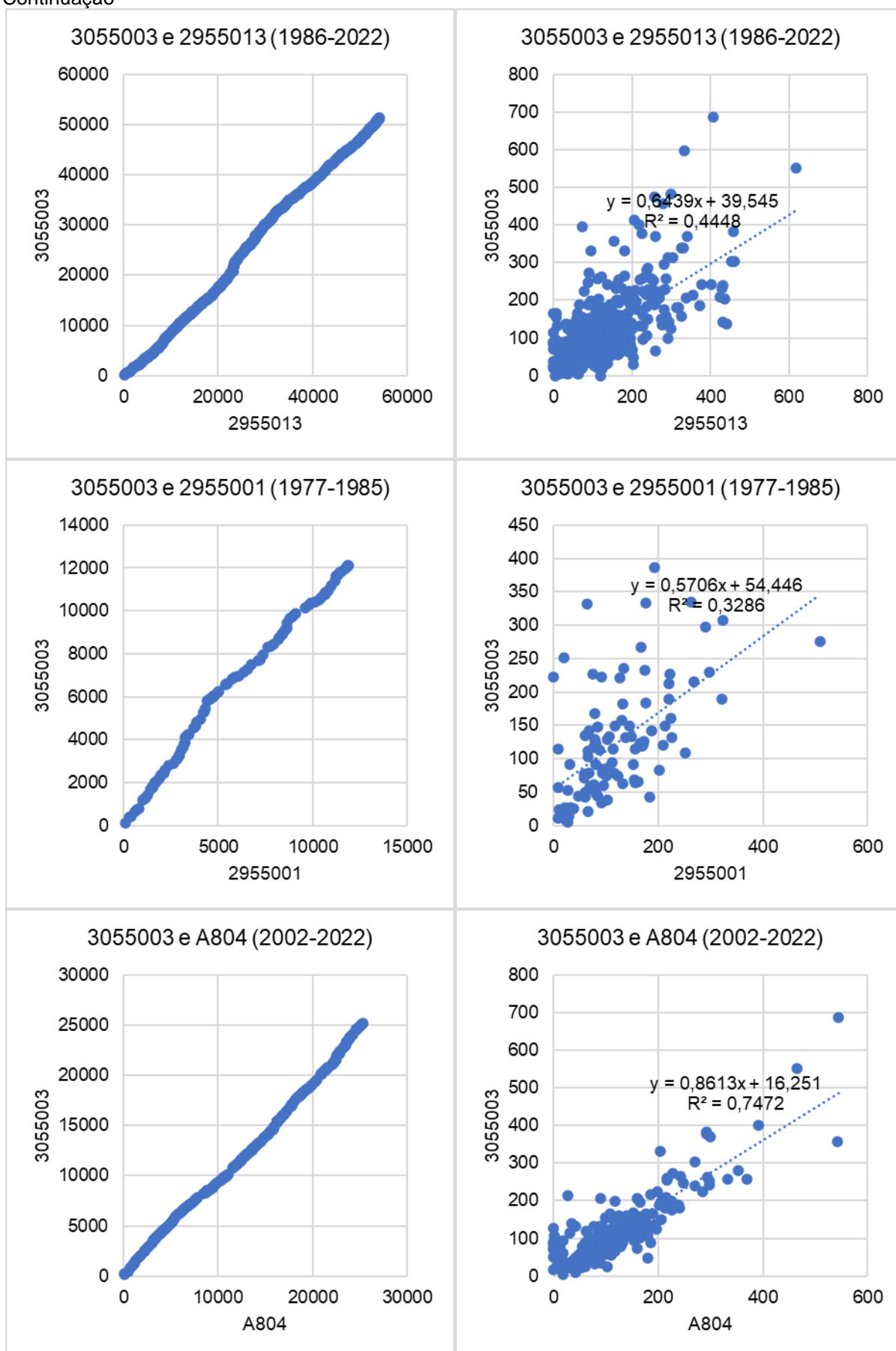
Continua

Continuação



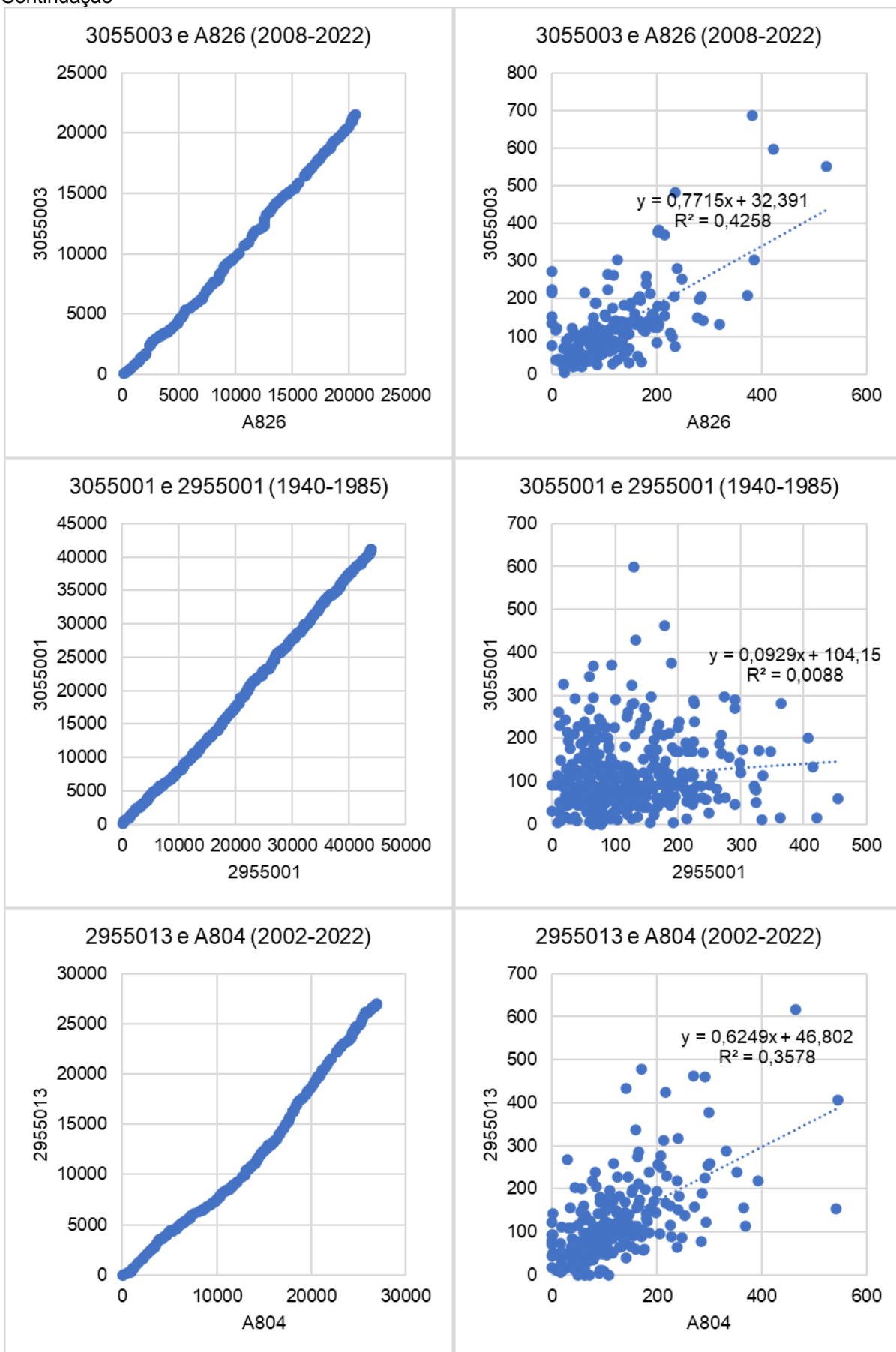
Continua

Continuação



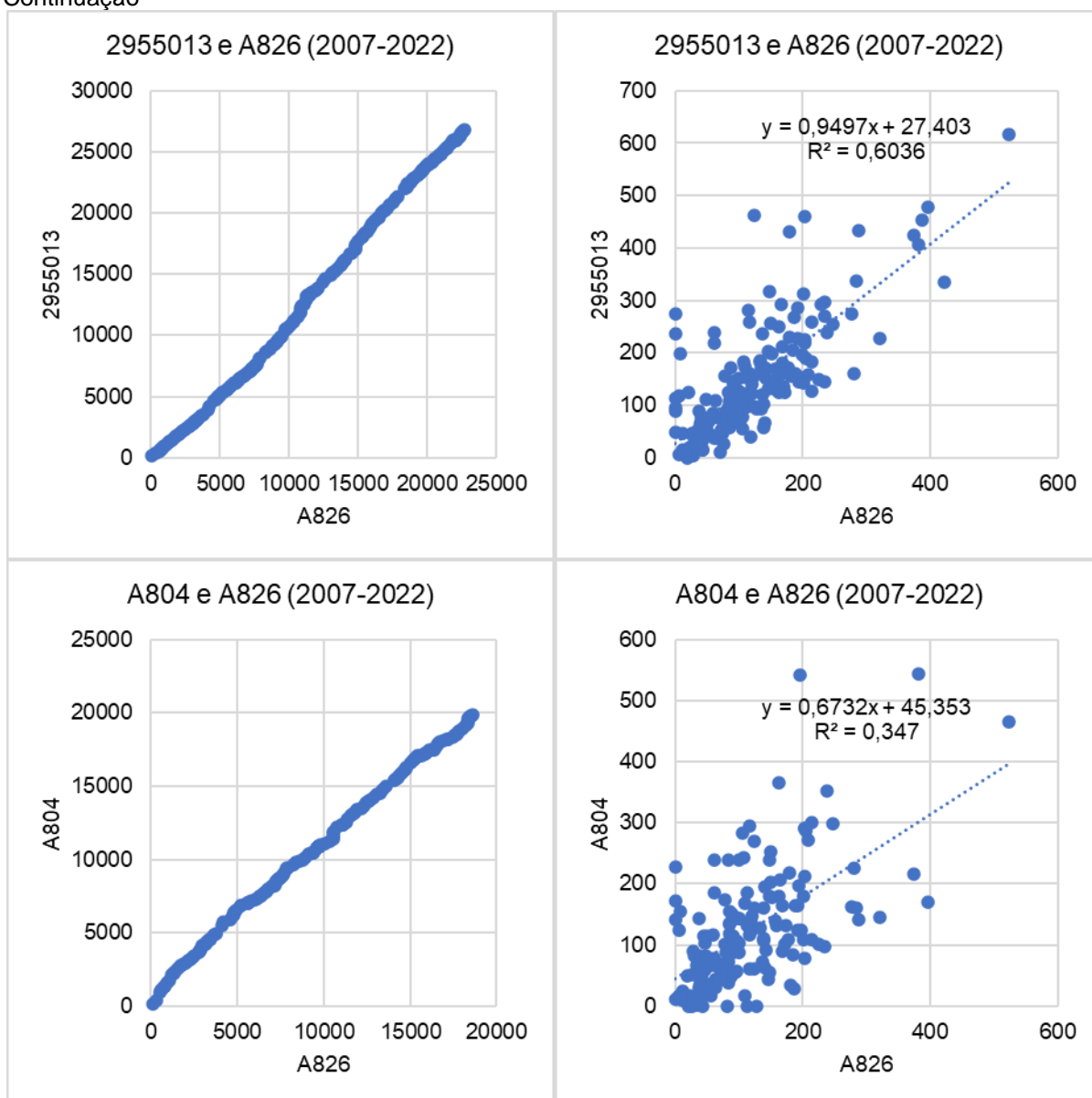
Continua

Continuação



Continua

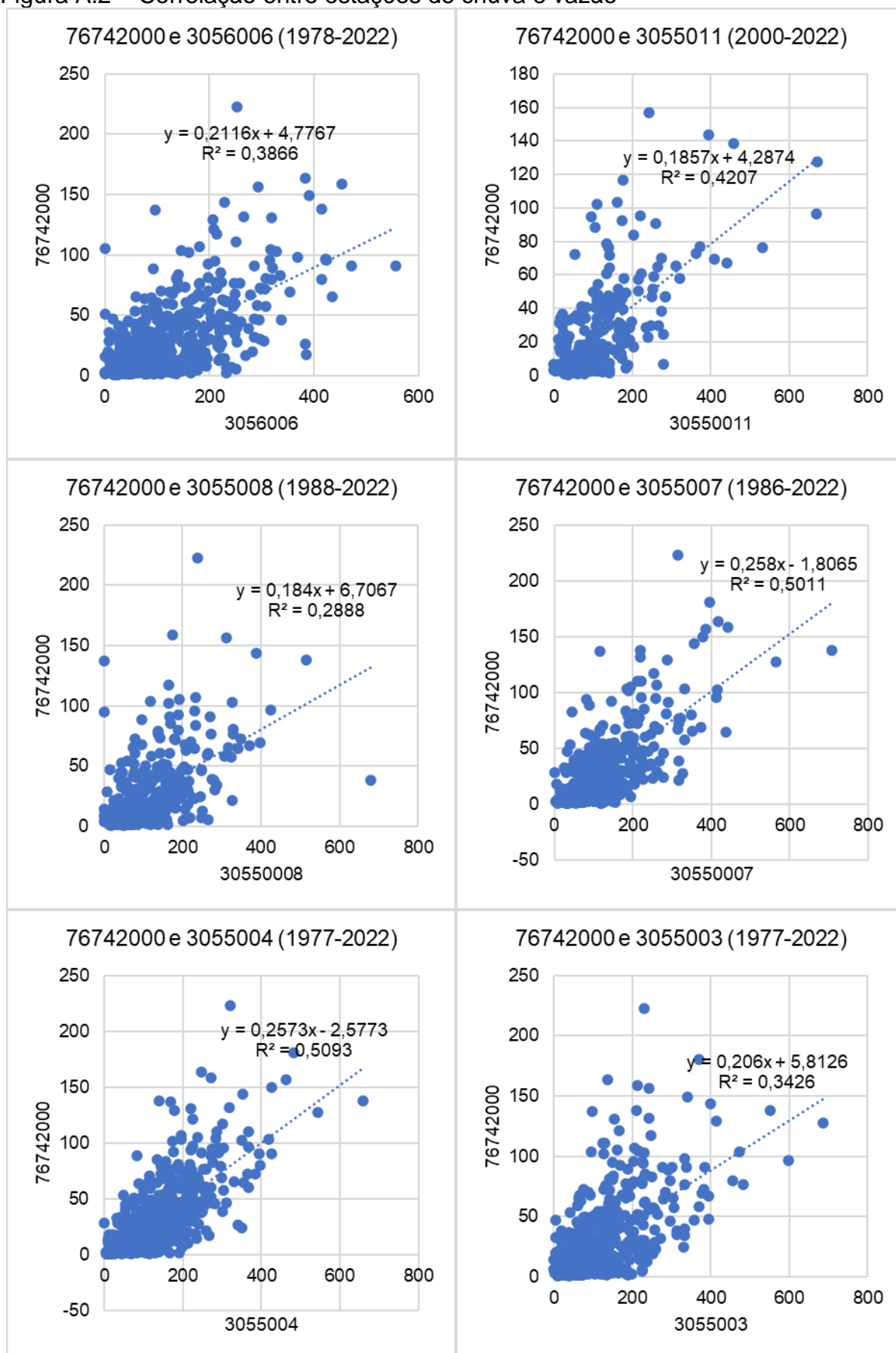
Continuação



Conclusão

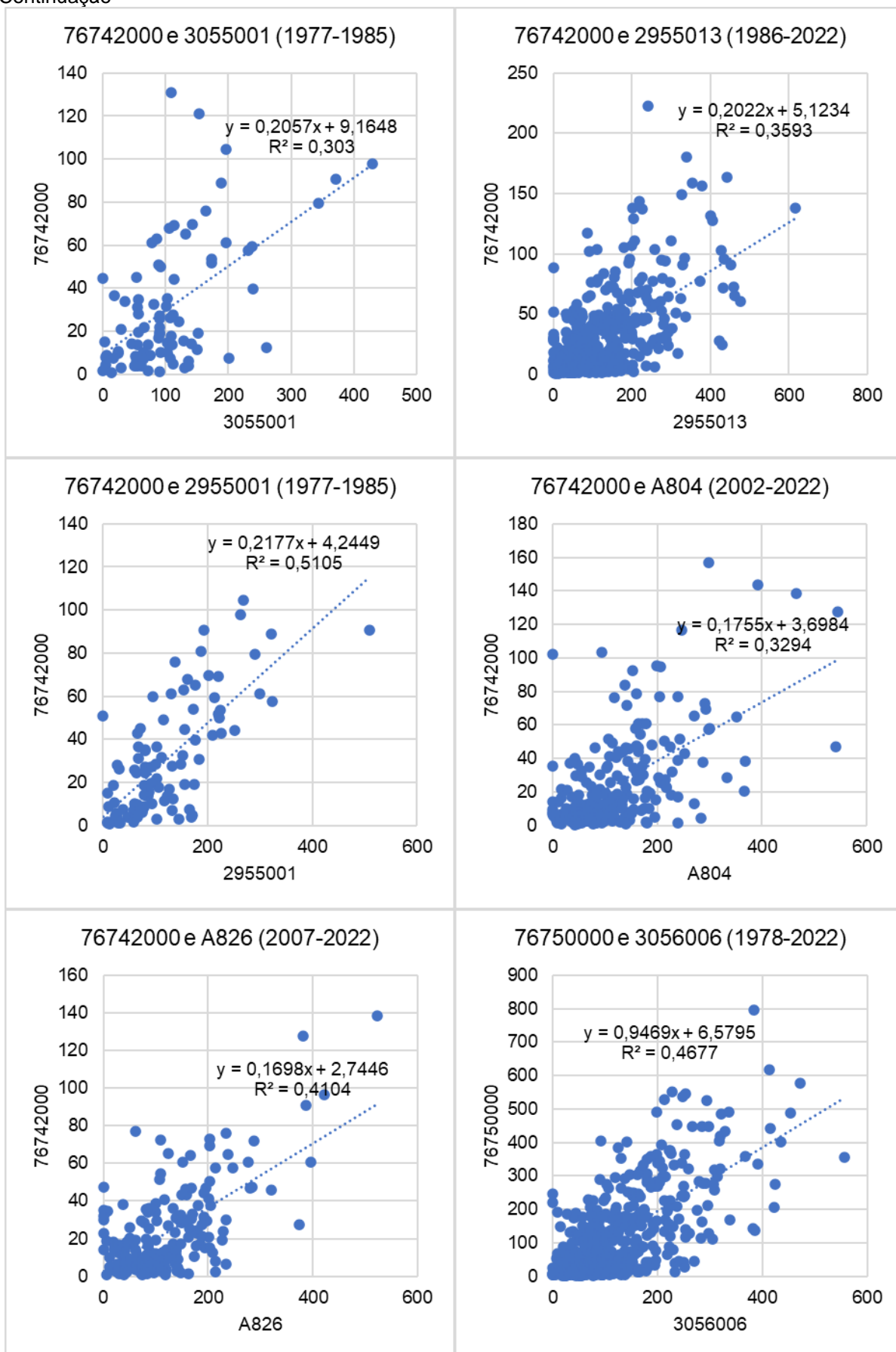
Fonte: Elaboração própria

Figura A.2 – Correlação entre estações de chuva e vazão



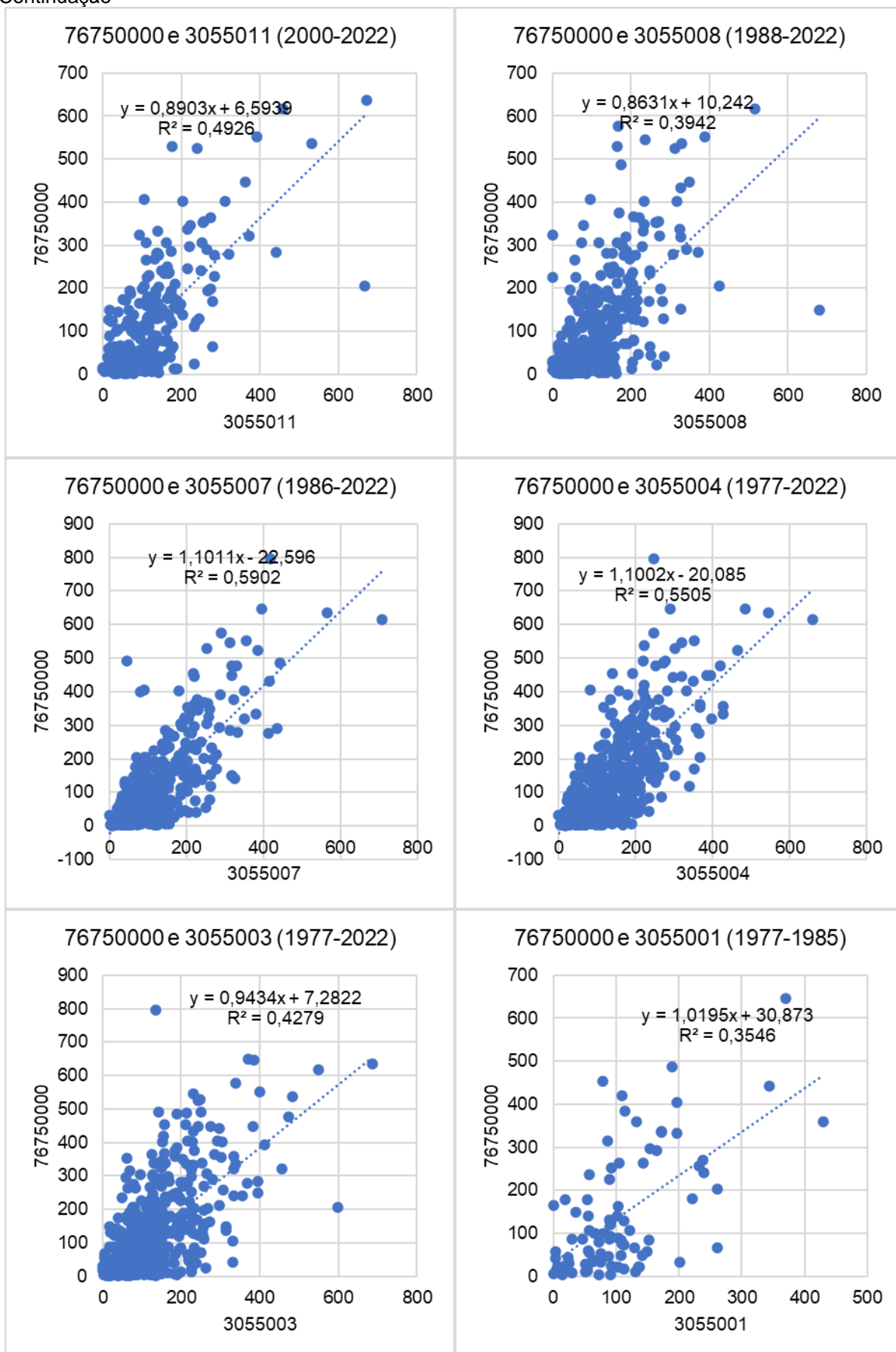
Continua

Continuação



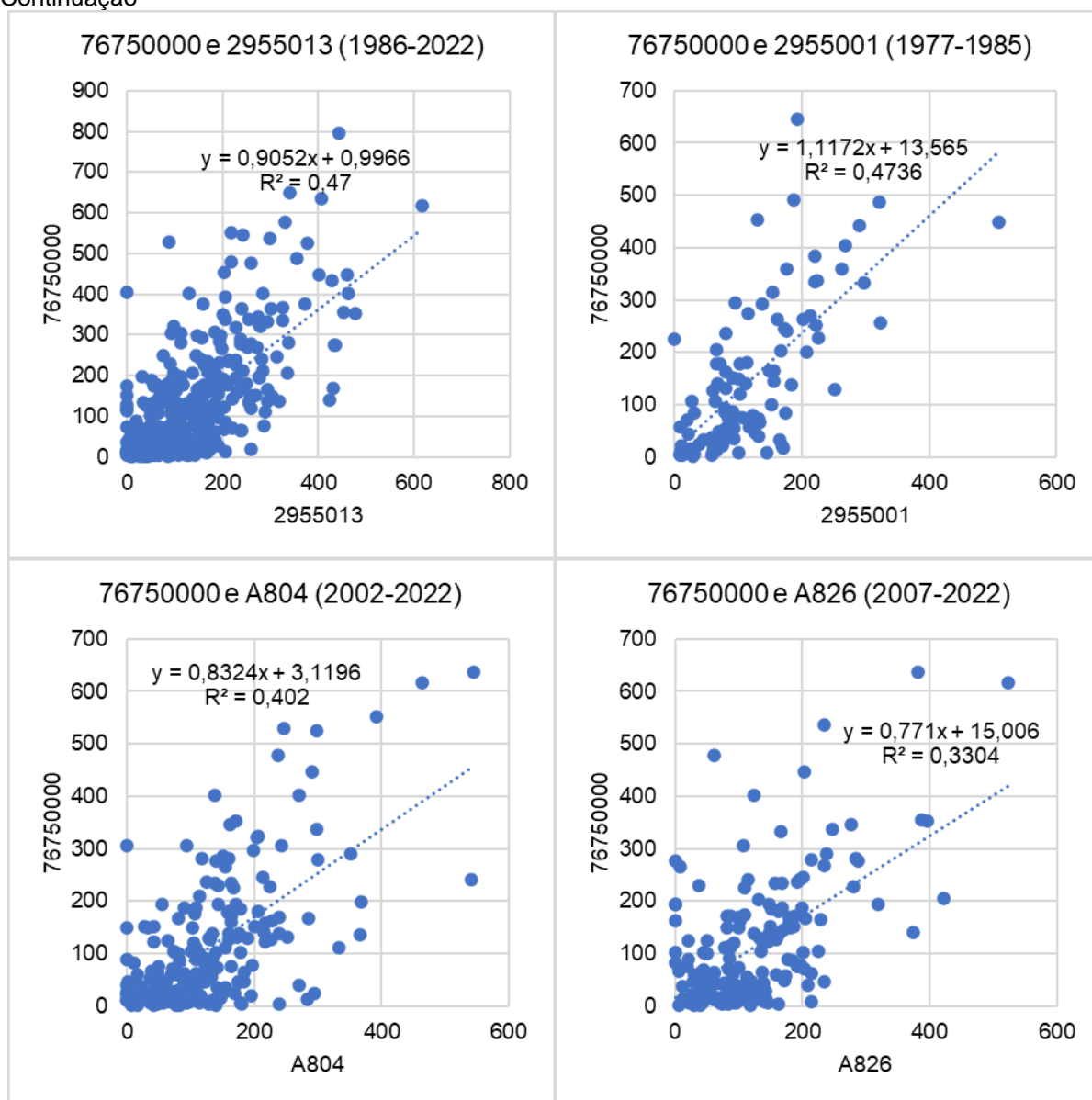
Continua

Continuação



Continua

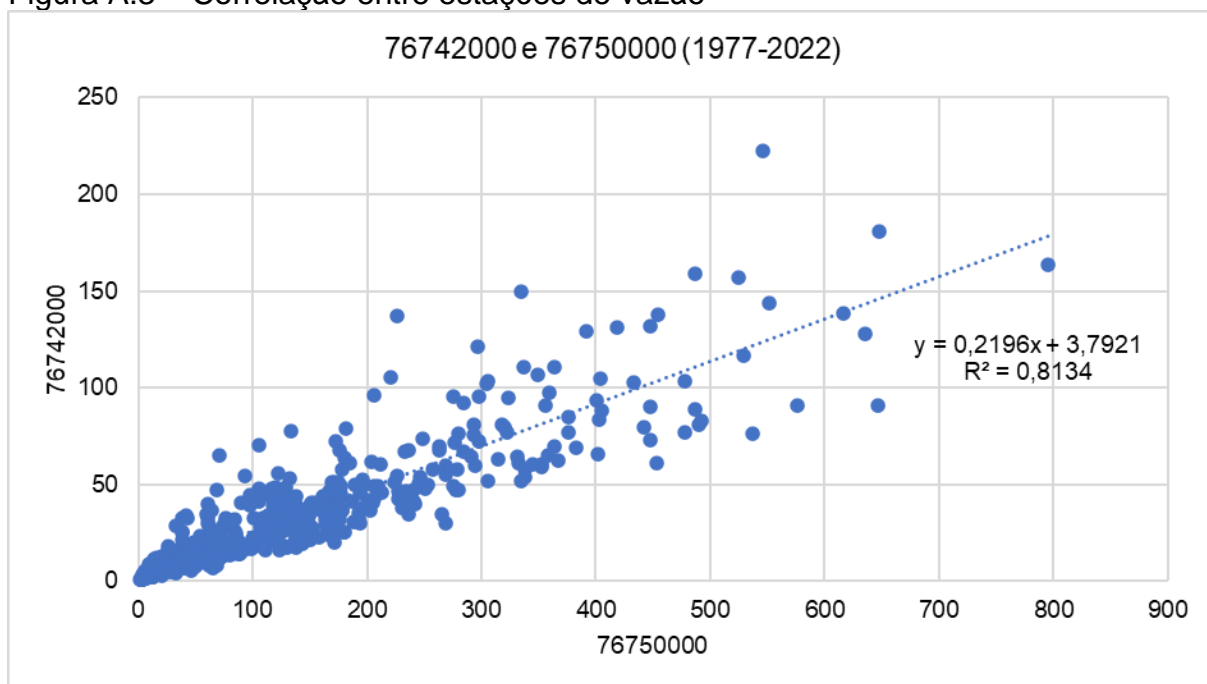
Continuação



Conclusão

Fonte: Elaboração própria

Figura A.3 – Correlação entre estações de vazão



Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE B – Resumo das séries históricas

Tabela B.1 – Resumo das séries históricas

Estação	Série	Nº de dados	Média	Desvio Padrão	Ano de Início	Ano de Fim
3056006	P1D	37	109,8	33,1	1978	2022
	P2D	37	141,6	49,5		
	P3D	37	156,9	51,4		
	PTA	37	1459,6	453,5		
	PTM	444	121,6	94,2		
	DSCA	37	297,0	18,2		
	DSCM	444	25,1	3,2		
3055011	P1D	19	121,7	47,4	2000	2022
	P2D	19	161,2	72,2		
	P3D	19	182,8	84,2		
	PTA	19	1481,6	393,3		
	PTM	216	125,1	95,5		
	DSCA	19	293,7	15,4		
	DSCM	228	24,6	3,8		
3055008	P1D	28	123,3	63,4	1989	2022
	P2D	28	146,7	65,7		
	P3D	28	162,4	70,2		
	PTA	28	1389,1	339,0		
	PTM	336	115,8	89,8		
	DSCA	28	294,6	18,4		
	DSCM	336	24,9	3,7		
3055007	P1D	31	110,8	35,9	1987	2022
	P2D	31	145,5	60,4		
	P3D	31	166,5	71,2		
	PTA	31	1542,4	365,1		
	PTM	372	128,5	93,7		
	DSCA	31	286,9	17,8		
	DSCM	372	24,2	3,1		

Continua

Continuação

Estação	Série	Nº de dados	Média	Desvio Padrão	Ano de Início	Ano de Fim
3055004	P1D	45	126,6	49,9	1977	2022
	P2D	45	148,6	55,5		
	P3D	45	164,3	58,6		
	PTA	45	1579,3	351,2		
	PTM	540	131,6	88,1		
	DSCA	45	298,5	16,6		
	DSCM	540	25,1	2,7		
3055003	P1D	43	123,8	45,2	1977	2022
	P2D	43	149,4	53,0		
	P3D	43	165,8	60,4		
	PTA	43	1477,5	353,3		
	PTM	516	123,1	89,3		
	DSCA	43	302,9	22,0		
	DSCM	516	25,3	2,6		
3055001	P1D	32	99,1	29,6	1940	1983
	P2D	32	128,0	39,6		
	P3D	32	141,4	43,5		
	PTA	32	1389,0	290,7		
	PTM	384	115,7	82,9		
	DSCA	32	277,1	22,9		
	DSCM	384	23,4	3,4		
2955013	P1D	33	119,7	33,8	1986	2022
	P2D	33	154,0	58,7		
	P3D	33	174,7	67,3		
	PTA	33	1606,9	408,0		
	PTM	396	133,9	99,7		
	DSCA	33	284,5	18,8		
	DSCM	396	24,0	3,4		
2955001	P1D	32	104,8	26,6	1940	1985
	P2D	32	135,0	37,6		

Continua

Continuação

Estação	Série	Nº de dados	Média	Desvio Padrão	Ano de Início	Ano de Fim
2955001	P3D	32	151,6	39,9	1940	1985
	PTA	32	1495,2	378,9		
	PTM	384	124,6	87,1		
	DSCA	32	260,5	20,0		
	DSCM	384	21,9	3,9		
A804	P1H	18	43,6	15,4	2002	2023
	P3H	18	68,6	22,7		
	P6H	18	88,9	24,4		
	P12H	18	104,9	31,9		
	P18H	18	111,1	34,6		
	P1D	18	115,5	35,9		
	P2D	18	133,1	44,4		
	P3D	18	150,0	49,5		
	PTA	18	1479,7	449,8		
	PTM	212	125,6	93,3		
	DSCA	18	306,8	32,2		
	DSCM	212	25,6	4,9		
A826	P1H	16	37,1	8,1	2007	2023
	P3H	16	58,1	15,7		
	P6H	16	82,7	19,0		
	P12H	16	113,2	31,4		
	P18H	16	121,1	36,5		
	P1D	16	133,9	47,4		
	P2D	16	149,4	59,4		
	P3D	16	161,0	61,7		
	PTA	16	1440,8	239,8		
	PTM	187	123,3	87,2		
DSCA	16	319,7	23,2			
DSCM	187	26,9	3,9			
76742000	VMAX	46	358,73	207,17	1977	2022

Continua

Continuação

Estação	Série	Nº de dados	Média	Desvio Padrão	Ano de Início	Ano de Fim
76742000	VMIN	46	1,29	0,78	1977	2022
	VMDA	46	31,17	16,51		
	VMDM	46	31,50	32,45		
	VMM7	46	1,48	0,92		
76750000	VMAX	82	900,43	290,89	1941	2022
	VMIN	82	2,89	2,20		
	VMDA	82	114,74	54,98		
	VMDM	82	114,83	127,12		
	VMM7	82	3,49	2,58		

Conclusão

Fonte: Elaboração própria