

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

Eduardo Fernandes Henriques

# **Padrões hidroclimatológicos de bacias de mesoescala em São Paulo**

São Paulo

Novembro de 2019

# **Padrões hidroclimatológicos em bacias de mesoescala de São Paulo**

Dissertação apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Humberto Ribeiro da Rocha

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

São Paulo

2019



## Agradecimentos

A meu orientador professor Humberto Ribeiro da Rocha pelo reconhecimento, ensinamento, aprendizagem, conselhos e dicas na condução de projeto de pesquisa.

À minha irmã Danielle e seu marido Dalson pela continua busca de crescimento profissional, pelo apoio e por acreditar que vale a pena sonhar.

A minha família e em especial aos meus pais Laercio e Francisca e irmã Lídia.

Ao pessoal do LCB incluindo Leo, Thomas, Raianny, Emília, Duda, Evandro, Mariane, Carla, Rodolfo e outros pela ajuda, amizade e café aos longos dos últimos anos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela auxilio financeiro. Aos técnicos de informática Samuel, Tião e Djalma pelo suporte nos imprevistos tecnológicos.

Ao pessoal da Pós-Graduação como Laís, Camila, Decker, Andrea e outros com quem convivi nesses últimos anos.

À Virginia pela amizade e conversas ao longo de minha jornada no IAG em diferentes departamentos.

Aos inúmeros amigos da meteorologia que conheci desde 2010 como Edson, Lucas, Tiago, Leandro, Rafael Maia e outros. Aos professores de geofísica e meteorologia.

Ao meu amigo, colega da turma de geofísica e professor Carlos Chaves.

Aos meus colegas e amigos da turma de geofísica de 2004 como Roy, Higo, Pira, Catatau, Carlão, Leo, Lessa, Marquito, Davi, Vivi, Macho, Vanderlei, Edgard, Will, Andrezinho, Zé, Josimar e Juliano pelas inúmeras boas lembranças que me proporcionaram.

HENRIQUES, E.F. Padrões Hidroclimatológicos em bacias de mesoescala de São Paulo. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

## Resumo

Este trabalho abordou e buscou ampliar o entendimento de padrões hidroclimatológicos com base em séries de vazões e chuva de longo período, em cinco bacias de mesoescala do estado de São Paulo: rios PCJ, Mogi-Guaçu, Pardo, Paraíba do Sul e Sapucaí. Objetiva-se acompanhar a evolução temporal das variáveis hidrometeorológicas, reconhecer as mudanças e associar com as possíveis causas. Foram utilizadas séries diárias de vazão e de chuva do DAEE e da ANA de 1940 a 2017. Esse conjunto de informação possibilitou a construção de série temporais representativas do comportamento hídrico nas áreas de estudo, em 31 áreas de contribuições para os termos de precipitação, evapotranspiração e vazão. A análise procurou examinar e detectar a ocorrência de pontos de descontinuidade através de métodos como Rodionov (2004) no caso da chuva e teste de Pettitt (1979) para vazão e chuva. Esses pontos de ruptura aparecem associados à mudança climática, mudança no uso de solo, maior demanda de recursos hídricos e construção de barragem. O ciclo sazonal da precipitação e vazão mostrou um padrão semelhante entre todos os postos, com o pico de precipitação em Janeiro, e para a vazão geralmente com um mês de atraso em Fevereiro, havendo para a vazão entre Janeiro a Março geralmente um máximo suavizado. A chuva varia muito desde Janeiro (em torno de  $240 \text{ mm mês}^{-1}$ ) continuamente até Março (atingindo aproximadamente  $170 \text{ mm mês}^{-1}$ ), e neste trimestre chuvoso a vazão varia pouco e em torno de  $75 \text{ mm mês}^{-1}$ , sendo um pouco mais elevadas nas bacias do Sapucaí e Pardo, menores no PCJ e Paraíba do Sul, e com grande variabilidade entre os postos no Mogi-Guaçu. A precipitação mínima ocorre sempre em Agosto, em torno de  $25 \text{ mm mês}^{-1}$ , comparando-se todas as bacias, e as vazões mínimas geralmente em agosto e setembro de forma suavizada, em torno de  $20$  a  $30 \text{ mm mês}^{-1}$ , sendo um pouco menores nas bacias do Sapucaí, Pardo e Mogi-Guaçu, e levemente acima nas demais bacias PCJ e Paraíba do Sul. O escoamento básico máximo geralmente atinge o máximo marcadamente em Março, para todas as bacias em torno de  $50 \text{ mm mês}^{-1}$  para os rios Pardo e Sapucaí, e um pouco abaixo em torno de  $30 \text{ mm mês}^{-1}$ , mas com grande variabilidade entre os postos para as demais bacias. O mínimo do escoamento básico coincidiu com a vazão em Agosto-Setembro, com uma pequena redução de aproximadamente  $5 \text{ mm mês}^{-1}$  em relação à vazão. A aplicação do método de Rodionov para detecção de pontos de rupturas na precipitação revela em grande parte dos casos analisados a ocorrência de pontos de descontinuidade em meados de 1970 e no início de década de 1990, caracterizando a chuva em três intervalos. O primeiro com uma média mais baixa, seguido do segundo período com aumento e, por fim, o terceiro intervalo com nova queda. Por exemplo, para a bacia do Paraíba do Sul a precipitação média no primeiro período foi de  $1320 \text{ mm}$ , seguido do segundo intervalo com  $1439 \text{ mm}$  e, finalmente, no terceiro período com  $1313 \text{ mm}$ . O teste de Pettitt aplicado revelou a ocorrência de uma descontinuidade em 1968 para todas as séries de chuva com nível de significância baixa, indicando que a chuva separou-se em dois padrões estatísticos, em concordância com outras sugestões da literatura. A comparação entre elas ano a ano (Fig. 73) mostra que a ET simplificada superestima a ET corrigida entre 2% a 4% no caso dos postos investigados. Trata-se de uma ordem grandeza razoável, esperada em função da ordem de grandeza do termo de armazenamento. Comparando-se os postos representativos das bacias investigadas, a avaliação dos termos climatológicos de precipitação sugeriu chuva anual entre  $1300$  a  $1400 \text{ mm/a}$ , e um pouco menor de forma geral na bacia dos rios PCJ em torno de  $50 \text{ mm/a}$ .

em relação às demais. Com exceção de um posto que mostrou um valor muito afastado dos demais (4C001 no Rio Pardo), a estimativa da vazão variou aproximadamente entre 375 mm/a até 600 mm/a dentre os postos, geralmente maiores na bacia do Sapucaí, menores no PCJ, e no Mogi-Guaçu com grande variabilidade entre os postos. Analogamente, a evapotranspiração variou entre 750 mm/a até 950 mm/a dentre a maioria dos postos, com menores valores na bacia do Sapucaí, e comparáveis nas bacias do Paraíba do Sul, Mogi-Guaçu e PCJ, que internamente mostraram alta variabilidade entre os postos. A variabilidade espacial da estimativa do coeficiente de escoamento foi muito vinculada à variabilidade da vazão calculada, enquanto que a variabilidade do índice evaporativo foi por sua vez vinculada à variabilidade da ET calculada.

**Palavras-chave:** Balanço hídrico. Análise de tendência. Análise de frequência de vazão. Bacia de meso-escala Grace.

HENRIQUES, E.F. Hydroclimatological Patterns in São Paulo Mesoscale Basins. 143p. Master thesis – Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 2019.

## Abstract

**Keywords:** Water balance. Trend analysis. Flow frequency analysis. Meso-scale basin.

This work has focused on spread the understading of hydrometeorological patterns using long term discharge and rainfall timeseries, in five mesoscale basins in São Paulo state: PCJ, MogiGuaçú, Pardo, Paraíba do Sul and sapucaí rivers. It was used daily time series of discharge and rainfall from DAEE and ANA from 1940 to 2017. This couple of information has allowed the construction of representative time series of the water behavior in the study areas, in 31 contribution areas for the terms: rainfall, evapotranspiration and discharge. The analysis aimed to examine and detect the occurrence of discontinuity points through methods such as Rodionov (2014) in the case of rain, and Pettitt test (1979) for rain and discharge. These rupture points are due to climate shifts, land use shift, increased demand of water resources and dam construction. The seasonal cycle of rainfall has showed a similar pattern among all gauges, with a rainfall peak in January, e for discharge it is generally one month late in February, happening for discharge between January and March, generally, a smoothed maximum. The rain oscillates a lot since January (around 240 mm/month) continuously until March (reaching around 170 mm/month), and in this rainy trimester the discharge oscillates a little and around 75 mm/month, being a little more elevated in Sapucaí and Pardo basins, reduced in PCJ and Paraíba do Sul, and with great variability among the gauges of Mogi-Guaçú. Minimum precipitation occurs always in August, around 22 mm/month, when compared to the other basins, and the minimum discharges generally in August and September in a smooth way, around 20 to 30 mm/month, being a little reduced in the Sapucaí, Pardo and Mogi-Guaçú basins, and softly above in the remaining basins PCJ and Paraíba do Sul. The maximum base flow is generally maximum in March, for all basins around 50 mm/month for Pardo and Sapucaí rivers, a little below around 30 mm/month but with great variability among the gauges for the others. The minimum base flow coincided with the discharge in August-September, with a small reduction of around 5 mm/month in relation to discharge. The application of the method of Rodionov for detecting the rupture points in rainfall reveals a great part of the analyzed cases the occurrence of discontinuity points around 1970 and in the beginning of the 90s, characterizing the tain in three intervals. The first with a reduced average, followed by the second period with an increase and, at last, the third interval with a new fall.

## Lista de Figuras

FIGURA 1 ESQUEMA DO CICLO HIDROLÓGICO TERRESTRE. O CONTEÚDO DE ÁGUA ARMAZENADO É INDICADO NAS CAIXAS. O CICLO HIDROLÓGICO CONSISTE NUM SISTEMA DE TROCA E INTERAÇÃO ENTRE DIFERENTES COMPARTIMENTOS, FLECHAS REPRESENTAM O FLUXO ESTIMADO. FONTE: OKIO (2005). .....	3
FIGURA 2 - INFLUÊNCIA DO FORMATO DA BACIA HIDROGRÁFICA. FONTE: WILSON (1969). .....	9
FIGURA 3- LOCALIZAÇÃO DAS BACIAS INVESTIGADAS NO ESTADO DE SP, COM OS POSTOS DE MEDIDAS DE CHUVA E VAZÃO.....	15
FIGURA 4 – LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS DE CHUVA E VAZÃO.....	16
FIGURA 5– DISPONIBILIDADE DE DADOS DE VAZÃO EM TERMOS DE ANO HIDROLÓGICO DO DAEE NA BACIA DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. ....	17
FIGURA 6– DISPONIBILIDADE DE DADOS DE CHUVA EM TERMOS DE ANO HIDROLÓGICOS NA BACIA DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ.....	17
FIGURA 7 – MAPA COM DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS À MONTANTE DOS POSTOS NA BACIA DO RIO PARDO. ....	24
FIGURA 8 – MAPA COM DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS À MONTANTE DOS POSTOS NA BACIA DO RIO MOGI-GUAÇU.....	25
FIGURA 9 – MAPA COM DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS À MONTANTE DOS POSTOS NA BACIA DO PCJ. ....	26
FIGURA 10 – MAPA COM DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS À MONTANTE DOS POSTOS NA BACIA DO PARAÍBA DO SUL. ....	26
FIGURA 11– MAPA COM DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS À MONTANTE DOS POSTOS NA BACIA DO SAPUCAÍ. A LINHA MAIS GROSSA REPRESENTA O LIMITE ENTRE OS ESTADOS DE SÃO PAULO E MINAS GERAIS.....	27
FIGURA 12 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MEDIA EM (MM/A) PARA 4 DIFERENTES ESTAÇÕES DA BACIA DO PCJ SEM QUALQUER CORREÇÃO COMPARADA COM UMA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA NO CASO D3-018. A RETA 1 POR 1 ESTÁ REPRESENTADO PELA LINHA PRETA. ....	28
FIGURA 13 – PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MEDIA EM (MM/A) PARA 4 DIFERENTES ESTAÇÕES DA BACIA DO PCJ COM CORREÇÃO COMPARADA COM UMA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA NO CASO D3-018. ....	29
FIGURA 14 – PARA AS BACIAS DOS RIOS PCJ: VAZÃO ANUAL (MM/A) NOS POSTOS (LINHAS) E PRECIPITAÇÃO ANUAL (MM/A) COMO MÉDIA ESPACIAL À MONTANTE DOS POSTOS NA BACIA (BARRAS).....	31
FIGURA 15 - ID. FIG. 14 PARA A BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	31
FIGURA 16 – ID. FIG. 14 PARA A BACIA DO RIO MOGI-GUAÇU.....	31
FIGURA 17 – ID. PARA A BACIA DO RIO PARDO.....	32



FIGURA 18 - ID. PARA BACIA DO RIO SAPUCAÍ.....	32
FIGURA 19 – PARA A BACIA DO PCJ: A) HIDROGRAMA DA VAZÃO (LINHA CONTÍNUA) E ESCOAMENTO BÁSICO (LINHA TRACEJADA). B) HIDROGRAMA DA PRECIPITAÇÃO (LINHA CONTÍNUA) E VAZÃO (LINHA TRACEJADA), NO ANO HIDROLÓGICO.....	34
FIGURA 20 – PARA A BACIA DO R. PARAIBA DO SUL: A) HIDROGRAMA DA VAZÃO (LINHA CONTÍNUA) E ESCOAMENTO BÁSICO (LINHA TRACEJADA). B) HIDROGRAMA DA PRECIPITAÇÃO (LINHA CONTÍNUA) E VAZÃO (LINHA TRACEJADA), NO ANO HIDROLÓGICO. ....	34
FIGURA 21– PARA A BACIA DO R. MOGI-GUAÇÚ A) HIDROGRAMA DA VAZÃO (LINHA CONTÍNUA) E ESCOAMENTO BÁSICO (LINHA TRACEJADA). B) HIDROGRAMA DA PRECIPITAÇÃO (LINHA CONTÍNUA) E VAZÃO (LINHA TRACEJADA), NO ANO HIDROLÓGICO. ....	34
FIGURA 22 – PARA A BACIA DO R. PARDO: A) HIDROGRAMA DA VAZÃO (LINHA CONTÍNUA) E ESCOAMENTO BÁSICO (LINHA TRACEJADA). B) HIDROGRAMA DA PRECIPITAÇÃO (LINHA CONTÍNUA) E VAZÃO (LINHA TRACEJADA), NO ANO HIDROLÓGICO.....	35
FIGURA 23 – PARA A BACIA DO PCJ: A) HIDROGRAMA DA VAZÃO (LINHA CONTÍNUA) E ESCOAMENTO BÁSICO (LINHA TRACEJADA). B) HIDROGRAMA DA PRECIPITAÇÃO (LINHA CONTÍNUA) E VAZÃO (LINHA TRACEJADA), NO ANO HIDROLÓGICO.....	35
FIGURA 24 – SÉRIES TEMPORAIS PARA O POSTO 3D-001 NO RIO CAMANDUCAIA DA BACIA DOS RIOS PCJ: A) VAZÃO MÉDIA ANUAL (LINHA PRETA) E CHUVA ACUMULADA ANUAL (BARRA CINZA) E ESCOAMENTO BÁSICO MÉDIO ANUAL (LINHA VERMELHA); B) COEFICIENTE DE ESCOAMENTO (LINHA PRETA), ÍNDICE EVAPORATIVO (LINHA AZUL) E ÍNDICE DE ESCOAMENTO BÁSICO (LINHA VERMELHA); C) VAZÃO MÉDIA MENSAL (LINHA PRETA), ESCOAMENTO BÁSICO MÉDIO MENSAL (LINHA VERMELHA) E CHUVA MENSAL (LINHA CINZA). AS LINHAS VERTICAIS SÓLIDAS EM (A,C) SÃO LIMITES DE REGIMES DISTINTOS DE CHUVA ESTIMADOS CF RODIONOV (2004). .....	36
FIGURA 25– ID. FIG. 23 PARA O POSTO 3D-002. ....	37
FIGURA 26 – ID. FIG. 23 PARA O POSTO 3D-003. ....	38
FIGURA 27 – ID. FIG. 24 PARA O POSTO 3D-006 DO RIO ATIBAIA DOS RIOS PCJ. ....	39
FIGURA 28 – ID. FIG. 24 PARA O POSTO 4D-009 DO RIO ATIBAIA DOS RIOS PCJ. ....	40
FIGURA 29– ID. FIG. 24 PARA POSTO 62670000 DO RIO ATIBAIA DOS RIOS PCJ.....	41
FIGURA 30 – ID. FIG. 24 PARA POSTO 62600000 NO RIO JAGUARI DOS RIOS PCJ.....	42
FIGURA 31– ID. FIG. 24 PARA POSTO 3D-009 NO RIO JAGUARI DOS RIOS PCJ.....	43
FIGURA 32– ID. FIG. 24 PARA POSTO 4D-001 NO RIO JAGUARI DOS RIOS PCJ.....	44
FIGURA 33 – ID. FIG. 24 PARA POSTO 62665000 NO RIO JAGUARI DOS RIOS PCJ.....	45
FIGURA 34 – ID. FIG. 24 PARA POSTO 62395000 NO RIO JUNDIAÍ DOS RIOS PCJ. ....	46

FIGURA 35 – ID. FIG. 24 PARA POSTO 4D-010 NO RIO PIRACICABA. ....	47
FIGURA 36 - ID. FIG. 24 PARA POSTO 58183000 NO RIO PARAÍBA DO SUL. ....	48
FIGURA 37 - ID. FIG. 24 PARA POSTO 58040000 NO RIO PARAÍBA DO SUL. ....	49
FIGURA 38- ID. FIG. 24 PARA POSTO 58099000 NO RIO PARAÍBA DO SUL. ....	50
FIGURA 39 - ID. FIG. 24 PARA POSTO 58220000 NO RIO BOCAINA DA BACIA DO PARAIBA DO SUL. ....	51
FIGURA 40 - ID. FIG. 24 PARA POSTO 58030000 NO RIO PARAITINGA DA BACIA DO R. PARAIBA DO SUL. ....	52
FIGURA 41 - ID. FIG. 24 PARA POSTO 58235100 DA BACIA DO PARAÍBA DO SUL. ....	53
FIGURA 42 - ID. FIG. 24 PARA POSTO 3D-004 NO RIO MOGI-GUAÇU. ....	54
FIGURA 43 - ID. FIG. 24 PARA POSTO 4C-007 NO RIO MOGI-GUAÇU. ....	55
FIGURA 44 – ID. FIG. 23 PARA POSTO 5C-025 NO RIO MOGI-GUAÇU. ....	56
FIGURA 45 – ID. FIG. 24 NO POSTO 61886000 DO RIO GRANDE NA BACIA DO R. MOGI-GUAÇU. ....	57
FIGURA 46 - ID. FIG. 24 NO POSTO 61912000 DO RIO GRANDE NA BACIA DO R. MOGI- GUAÇU. ....	58
FIGURA 47 – ID. FIG. 24 PARA POSTO 5C-017 NO RIBEIRÃO DA ONÇA DA BACIA DO RIO MOGI-GUAÇU. ....	59
FIGURA 48 – ID. FIG. 23 PARA POSTO 5B-011 NO RIO PARDO. ....	60
FIGURA 49 - ID. FIG. 24 PARA POSTO 4C-001 NO RIO PARDO. B) COEFICIENTE DE ESCOAMENTO E ÍNDICE EVAPORATIVO. C) SÉRIE DE VAZÃO DE E CHUVA MENSAL NO POSTO 4C-001. A BARRA CINZA E A LINHA PRETA REPRESENTAM, RESPECTIVAMENTE, AS SERIES DE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO. ....	61
FIGURA 50 - ID. FIG. 23 PARA O POSTO 61817000 NO RIO PARDO. ....	62
FIGURA 51 – ID. FIG. 24 PARA POSTO 61840000 NO RIO PARDO. ....	63
FIGURA 52 – ID. FIG. 24 PARA POSTO 4B-015 NO RIO SAPUCAIZINHO DA BACIA DO R. SAPUCAÍ. ....	64
FIGURA 53 - ID. FIG. 23 PARA POSTO 4C-002 NO RIO SAPUCAÍ. ....	65
FIGURA 54 – ID. FIG. 23 PARA POSTO 5B-007 NO R. SAPUCAÍ-MIRIM NA BACIA DO R. SAPUCAÍ. ....	66
FIGURA 55 – VAZÃO ESPECÍFICA ANUAL EM TRÊS POSTOS DO RIO JAGUARI NA BACIA DO PCJ. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO. ....	68
FIGURA 56 – VAZÃO ESPECÍFICA ANUAL EM QUATRO POSTOS DO RIO ATIBAIA BACIA DO PCJ. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO. ....	69
FIGURA 57 - VAZÃO ESPECÍFICA ANUAL EM DOIS POSTOS DO RIO CAMANDUCAIA NA BACIA DO PCJ. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO. ....	70

FIGURA 58 - VAZÃO ESPECÍFICA ANUAL PARA O POSTO 623950000 DO RIO JUNDIAÍ NA BACIA DO PCJ. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO.....	71
FIGURA 59- VAZÃO ESPECÍFICA ANUAL PARA O POSTO 62665000 DO RIO CACHOEIRA NA BACIA DO PCJ. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO.....	71
FIGURA 60 - VAZÃO ESPECÍFICA ANUAL EM QUATRO POSTOS DO RIO PARAÍBA DO SUL NA BACIA DO PARAÍBA DO SUL. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO.....	72
FIGURA 61- VAZÃO ESPECÍFICA ANUAL NO POSTO 58220000 DO RIO BOCAINA NA BACIA DO PARAÍBA DO SUL. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO.....	73
FIGURA 62 - VAZÃO ESPECÍFICA ANUAL NO POSTO 58030000 DO RIO PARAITINGA NA BACIA DO PARAÍBA DO SUL. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO.....	73
FIGURA 63 – VAZÃO ANUAL NOS POSTOS 3D-004, 4C-007 E 5C-025 SITUADOS NO RIO MOGI-GUAÇU. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO.....	74
FIGURA 64 – VAZÃO ANUAL NOS POSTOS 61886000 E 61912000 NO RIO GRANDE NA BACIA DO MOGI-GUAÇU. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO.....	75
FIGURA 65 – VAZÃO ANUAL NO POSTO 5C-017 NO RIBEIRÃO DA ONÇA NA BACIA DO MOGI-GUAÇU. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO.....	76
FIGURA 66 – VAZÃO ANUAL EM QUATRO POSTOS DA BACIA DO RIO PARDO. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO.....	77
FIGURA 67 – VAZÃO ANUAL EM TRÊS POSTOS DA BACIA DO RIO PARDO. AS RETAS PRETA OU AZUL INDICAM A MÉDIA DA VAZÃO CONFORME O PERÍODO.....	78
FIGURA 68 - COMPARAÇÃO ENTRE A RELAÇÃO ENTRE A ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO E VAZÃO CONFORME A VERTENTE LESTE PRUSKI (2004) E A VERTENTE OESTE.....	79
FIGURA 69– PRECIPITAÇÃO ANUAL MÉDIA (INTERPOLAÇÃO ESPACIAL) EM DOIS INTERVALOS DE TEMPO: (A) 1940-1969 E (B) 1970-2015 NAS BACIAS DO PCJ, PARDO, PARAÍBA DO SUL, MOGI-GUAÇU E SAPUCAÍ.....	80
FIGURA 70 – ANOMALIA DA ESPESSURA DE LWE (CM DE ÁGUA) ESTIMADA PELO GRACE NAS BACIAS DO PCJ, PARAÍBA DO SUL, PARDO, MOGI-GUAÇU E SAPUCAÍ. DEVIDO À RESOLUÇÃO AS BACIAS DO RIO PARDO, MOGI-GUAÇU E SAPUCAÍ POSSUEM OS MESMOS VALORES.....	81

FIGURA 71 – COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO MENSAL COMO VAZÃO, ET, ET CORRIGIDA E TERMO DO ARMAZENAMENTO EM CINCO DIFERENTES PONTOS.....	82
FIGURA 72 – AJUSTE LINEAR DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO CORRIGIDA EM RELAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CINCO DIFERENTES POSTOS. ....	83
FIGURA 73 – COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO ANUAL COMO VAZÃO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ET), EVAPOTRANSPIRAÇÃO CORRIGIDA E TERMO DO ARMAZENAMENTO EM CINCO DIFERENTES POSTOS.....	84
FIGURA 74 – (ORDENADA) ET MÉDIA ANUAL (MM/DIA) CALCULADA INCLUINDO-SE O TERMO DE ARMAZENAMENTO, VERSUS SEM A INCLUSÃO (ABSCISSA) PARA CINCO POSTOS DE MEDIÇÃO. ....	85
FIGURA 75- MÉDIAS ANUAIS DE LONGO PRAZO DE CADA ESTAÇÃO: PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL (MM), VAZÃO MÉDIA ANUAL (MM), EVAPOTRANSPIRAÇÃO (MM), COEFICIENTE DE ESCOAMENTO MÉDIO E ÍNDICE EVAPORATIVO. ....	87

## Lista de Tabelas

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DA CLIMATOLOGIA DE CHUVA NAS BACIAS DO PCJ, PARAÍBA DO SUL, MOGI-GUAÇU, PARDO E SAPUCAÍ COM BASE NOS TRABALHOS DE PRADO (2006 E 2010), DINIZ ET AL. (2018), NETO (2006), SANT'ANA NETO (2005) E MARTINELLI (2010).....	6
TABELA 2 - ÁREA DE DRENAGEM EM KM <sup>2</sup> E EM PORCENTAGEM DAS SUB-BACIAS DO RIO PIRACICABA ESTADOS DE ESTADOS DE SÃO PAULO, MINAS GERAIS E NO SISTEMA CANTAREIRA. FONTE: RELATÓRIO PCJ 2010-2020 (COMITÊS, P. C. J. ET AL, 2011).....	10
TABELA 3 - ÁREA DE DRENAGEM DAS BACIAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. PCJ 2010-2020. FONTE: RELATÓRIO PCJ 2010-2020 (COMITÊS, P. C. J. ET AL, 2011). ....	11
TABELA 4 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA NAS BACIAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. RELATÓRIO PCJ 2010-2020 (COMITÊS, P. C. J. ET AL, 2011). ....	11
TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS FISIOMORFOLÓGICAS DA BACIA DO RIO SAPUCAÍ. FONTE: PLANO DIRETOR DE RECURSOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ (2010). ....	13
TABELA 6 – QUANTIDADE DE POSTOS DE CHUVA E VAZÃO.....	18
TABELA 7– POSTOS FLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS COM A RESPECTIVA UGRHI, CURSO, CÓDIGO, LATITUDE, LONGITUDE, ÁREA (KM <sup>2</sup> ) OBTIDA DO DAE E OU ANA E ÁREA CALCULADA. ....	19
TABELA 8– NOME DA ESTAÇÃO, CURSO, ESTAÇÃO, ANO DO PRIMEIRO E SEGUNDO PONTO DE RUPTURA E, RESPECTIVOS, NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA (NS) PARA A VAZÃO RESULTANTE DO TESTE DE PETTITT. HACHURADO EM AMARELO INDICA NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA SIGNIFICATIVO ABAIXO DE 10%.....	67
TABELA 9 - MÉDIAS DE LONGO PRAZO DE CADA ESTAÇÃO: UGRHI (UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DE SÃO PAULO), RIO, CÓDIGO ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA, PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL (MM), VAZÃO MÉDIA ANUAL (MM), ESCOAMENTO BÁSICO MÉDIO ANUAL (MM) (MM), COEFICIENTE DE ESCOAMENTO MÉDIO, E RAZÃO DO ESCOAMENTO BÁSICO SOBRE VAZÃO. ....	86

## Lista de abreviaturas e siglas

ANA	Agência Nacional de Águas
CMK	Contextual Mann-Kendall
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRU	Climat Research Unit
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DPC	Duração do Período Chuvoso
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
HEC-SSP	Hydrologic Engineering Center's Statistical Software Package
IDW	Inverse Distance Weight
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRI	International Research Institute for Climate
LWE	Liquid Water Equivalent
MG	Minas Gerais
NS	Nível de Significância
PCJ	Piracicaba, Capivari e Jundiá
RSI	Regime Shift Index
SP	São Paulo
TST	Temperatura da Superfície do Mar
UGRHI	Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recurso Hídrico

## Sumário

1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos e metas específicas .....	1
2. Fundamentação teórica.....	2
2.1 Ciclo hidrológico .....	2
2.11 Balanço hidrológico na superfície terrestre .....	3
2.2 Sistemas meteorológicos atuantes na área de estudo .....	5
2.3 Climatologia na área de estudo.....	6
3.0 Materiais e Métodos .....	8
3.1 Bacia Hidrográfica.....	8
3.2 Identificação das áreas e características básicas.....	9
3.21 Descrição da área de estudo.....	9
3.22 Bacia do Rio Piracicaba, Jundiá e Capivari.....	10
3.23 Bacia dos Rios Mogi-Guaçu.....	12
3.24 Bacia do Rio Pardo .....	12
3.25 Bacia do Rio Sapucaí.....	12
3.26 Bacia do Rio Paraíba do Sul .....	13
3.3 Fonte de dados .....	14
3.4 Análise de tendência temporal de séries.....	19
3.5 Teste de Pettitt .....	22
3.6 Outros procedimentos.....	22
4.0 Resultados.....	28
4.1 Análise de consistência.....	28
4.2 Variabilidade interanual de chuva e vazão nas bacias.....	29
4.4 Balanço hídrico e mudanças de regime hidrológico.....	36
4.5 Detecção de Rupturas .....	67
4.6 Balanço médio em escala regional .....	79
4.7 Inclusão do termo do armazenamento na estimativa de ET .....	81
4.8 Médias regionais.....	86
5.0 Conclusão .....	89
5.1 Sugestões para futuros trabalhos .....	90

6.0 Bibliografia..... 91  
Anexo A..... 96  
Anexo B..... 124



## 1. Introdução

A água é considerada um recurso renovável e a disponibilidade hídrica foi considerada por muito tempo como ilimitada. Porém a água como material básico do ciclo hidrológico é continuamente reciclada em diferentes escalas de tempo (horas a milhares de anos) entre diversos compartimentos do sistema terrestre, e cuja disponibilidade depende atualmente de diferentes controles como os padrões climáticos, características geológicas locais, uso da terra e padrões de consumo locais/regionais. Na história humana o controle da disponibilidade dos recursos hídricos possibilitou o desenvolvimento de civilizações, como os egípcios, cujo apogeu deu-se entre os séculos XVI e X A.C., e que controlou as cheias do rio Nilo para o desenvolvimento da agricultura. Na Mesopotâmia, entre os rios Eufrates e Tigre, os assírios, sírios e babilônios prosperaram devido a estes rios.

A disponibilidade e o armazenamento de água representam as bases essenciais das atividades econômicas como produção de matéria prima na agricultura, indústria, energia hidroelétrica e consumo de animais e humanos. A escassez de água no Brasil é causada principalmente por criticidade devido à queda de oferta por precipitação, geralmente por redução de água superficial nos rios, mas também pelo aumento crescente da demanda nas regiões mais populosas. Nestas condições gera-se maior custo financeiro devido à elevação de preços de produtos, serviços e geração de energia.

Essa condição pode tornar-se ainda mais crítica na conjuntura das mudanças climáticas atuais. Segundo o IPCC (2014) desde a década de 1950 tem havido diminuição nos extremos de temperatura mínima, aumento de temperaturas altas, e variações na ocorrência de eventos de precipitação severa em muitas regiões. Esse cenário de incerteza acaba por alertar a necessidade de conhecer melhor e detectar alterações nos padrões hidroclimatológicos de modo a aperfeiçoar o entendimento e a previsibilidade dos sistemas regionais, necessário para a interpretação de estudos de modelagem hidrológica e da melhoria da previsão hidroclimática, de forma a auxiliar a tomada de decisões dos atores sociais na governança do uso da terra e atividades socioeconômicas.

### 1.1 Objetivos e metas específicas

O objetivo dessa dissertação é investigar a variabilidade interanual do regime de precipitação, evapotranspiração e vazão em bacias de mesoescala do estado de São Paulo, priorizando aquelas com áreas em cabeceiras nas regiões montanhosas (rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), rio Mogi-Guaçu, rio Pardo, rio Sapucaí e rio Paraíba do Sul).

Dentre as principais etapas necessárias do trabalho mencionam-se:

- I. Calcular o balanço hídrico mensal e anual a partir de sub-bacias por área de contribuição, utilizando dados diários de chuva, vazão, e cálculo da evapotranspiração.
- II. Quantificar o ciclo sazonal da chuva, vazão e escoamento básico.
- III. Investigar mudanças nos padrões estatísticos das séries de vazão e chuva por meio de detecção de pontos de ruptura.
- IV. Análise de frequência da vazão diária para estimar vazões em períodos de retorno mais curto ou longo.

- V. Estimar o termo do armazenamento do balanço hídrico com dados de satélite e o desdobramento no cálculo da evapotranspiração anual.

## 2. Fundamentação teórica

### 2.1 Ciclo hidrológico

A água está distribuída em diferentes compartimentos do sistema terrestre (Fig. 1) (Hartmann, 2015). A maior parte é salgada com 96,4% nos oceanos, e a água doce corresponde a 3,6% dos quais 99,7% está congelada ou é água subterrânea e apenas 0,3% disponíveis nos lagos, rios e na biosfera (nesta última a menor fração armazenada). Define-se fluxo da água como o volume ou a massa por unidade de tempo. Há contínua interação entre os diferentes componentes do ciclo hidrológico em diferentes escalas de tempo. Desse modo, é útil definir o tempo de residência médio em um compartimento terrestre (bacia, aquífero, reservatório, por exemplo, que situa-se entre dias até milhares de ano):

$$T_{\text{médio}} = \frac{\text{Volume Total Armazenado}}{\text{Taxa do Fluxo Médio}} \quad (1),$$

definido como a razão do volume total armazenado pela taxa do fluxo médio no compartimento, um conceito importante a ser considerado em situações que envolvem armazenamento e recuperação da água. Embora a água de superfície apresente um alto grau de risco e contaminação, a recuperação desse recurso ocorre num menor intervalo de tempo do que no caso dos aquíferos.

A evapotranspiração é um fenômeno de combinação de dois processos: a evaporação da água proveniente do solo/água líquida na superfície e da transpiração nos estômatos das plantas, influenciada por fatores como radiação, temperatura, umidade relativa, vento e tipo de vegetação. A umidade do solo representa a quantidade de água armazenada nos poros do solo e influencia na evapotranspiração, na infiltração da chuva e nos escoamentos hidrológicos. A vegetação é responsável pelo transporte de água das camadas do solo em direção à superfície e para a atmosfera, e pela interceptação da precipitação. A água subterrânea é fortemente influenciada pelo componente climático de longa duração e em tempos de seca garante um fornecimento contínuo de água aos rios e lagos.

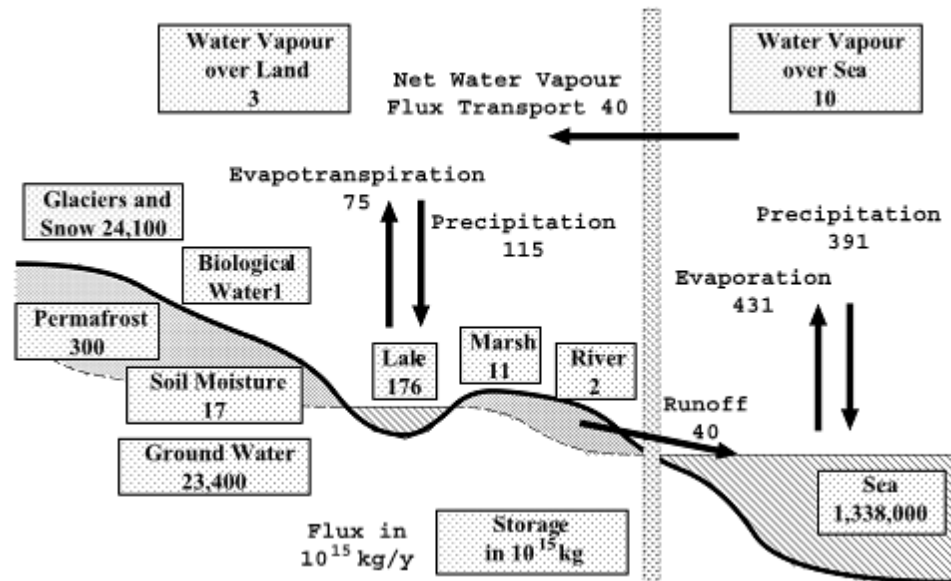


Figura 1 Esquema do ciclo hidrológico terrestre. O conteúdo de água armazenado é indicado nas caixas. O ciclo hidrológico consiste num sistema de troca e interação entre diferentes compartimentos, flechas representam o fluxo estimado. Fonte: Okio (2005).

O ciclo hidrológico consiste num sistema fechado, pois a quantidade de massa permanece constante. Costuma-se atribuir como ponto de partida aos oceanos em razão da grande quantidade presente tendo, então, o aquecimento solar como principal mecanismo responsável por desencadear o ciclo. Nos continentes a precipitação pode ser escoada pela superfície conforme a topografia, geologia ou rede de drenagem alimentando diferentes corpos de água. Outra possibilidade é infiltração pelas camadas do solo ou de rochas sendo armazenada em aquíferos onde é lentamente escoada, podendo retornar à superfície. Com isso, a infiltração é capaz de regular a vazão em rios retardando ou diminuindo os picos de cheia. A água infiltrada no solo pode atingir duas regiões: a zona não saturada e a zona saturada geralmente mais profunda. Enquanto a zona não saturada ou zona vadosa (aerada) corresponde à parte do substrato em que o meio não está totalmente preenchido nos poros e fraturas, a zona saturada ou zona freática apresenta-se saturada. O limite entre essas duas zonas é conhecido como nível do aquífero ou lençol freático. Na zona vadosa geralmente estão situadas as raízes da vegetação através do qual a água retorna à atmosfera pela transpiração.

### 2.11 Balanço hidrológico na superfície terrestre

No campo hidrológico um dos principais alvos de estudo corresponde às bacias fluviais no qual o balanço de água é estimado como (PEIXOTO e OORT, 1992)

$$\frac{\Delta S}{\Delta T} = P - E - R_0 - R_u \quad (2)$$

Na equação acima  $\Delta S$  é a taxa de variação temporal do armazenamento de água em uma área como volume armazenado, e os fluxos temporais de água  $P$  a precipitação,  $E$  a evapotranspiração,  $R_0$  o escoamento direto (dito rápido, na forma superficial ou subsuperficial) e  $R_u$  o escoamento básico de água subterrânea (dito lento). O termo de variação do armazenamento pode englobar a

acumulação de neve, da umidade do solo, da água subterrânea e da água retida acima da superfície como lago considerando-se a área de contribuição para a vazão na foz da bacia. A precipitação representa o retorno da água contida na atmosfera para a superfície. Na equação 2 a evapotranspiração corresponde ao retorno na forma de vapor da água presente na superfície através da evaporação e da transpiração. O escoamento superficial pode ser entendido como resultado da ação da ação da precipitação na vegetação e outros obstáculos o qual flui diretamente para corpos superficiais como rios e lagos. O escoamento básico é resultado da água armazenada em aquíferos.

Considerando  $Q$  o fluxo de saída resultante ou vazão (descarga) hidrológica no exutório da bacia, onde:

$$\frac{\Delta S}{\Delta T} = P - E - Q \quad (3)$$

Essa aproximação permite estabelecer o balanço hídrico em uma represa a partir de medidas de vazão do canal, precipitação e evapotranspiração, como média temporal espacial sobre uma região, tal que o termo de armazenamento  $S$  nos tempos  $t$  e  $t-1$  é:

$$S_t = S_{t-1} + (P - Q - E)\Delta t \quad (4)$$

Em escala climatológica de longo prazo pode-se supor a variação da taxa de armazenamento igual a zero, ou seja, não existe ganho e nem perda na quantidade de água armazenada. É importante destacar que existem limitações no conhecimento do termo do armazenamento por ser extremamente custoso para ser medido rotineiramente. A equação do balanço simplificado passa a ser :

$$E \simeq (P - Q) \quad (5)$$

## 2.2 Sistemas meteorológicos atuantes na área de estudo

A topografia e o tipo de relevo presente assim com sua orientação constituem fatores importantes para o entendimento da variabilidade climática da área estudada. Nesse caso, há a formação de precipitação orográfica. A presença de uma barreira topográfica pode resultar em diferentes situações de acordo com a posição e tamanho do relevo, e vários mecanismos pelos quais a configuração topográfica afeta a dinâmica da chuva (BARREY e CHORLEY, 2013). Inicialmente por meio do forçamento da ascensão de uma massa de ar sobre uma encosta suave resultando em resfriamento adiabático, condensação e conseqüentemente precipitação. Outra possibilidade é a presença de instabilidade condicional ou convectiva capaz de impedir o fluxo de ar ascendente a montante. Outra situação possível ocorre quando há o aquecimento de encosta e atuação de ventos ascendentes durante o dia gerando convecção. O quarto cenário ocorre na presença de nuvens altas as quais pela sementeira de cristais de gelo e gotículas induz a formação de precipitação em nuvens baixas. Por fim, há maior precipitação devido aos sistemas frontais de grande escala. Johansson e Chen (2003) investigaram por meio de relações estatística a interação entre vento e chuva em regiões montanhosas tendo, então observado que a barlavento quando maior o vento maior a ocorrência de chuva. Na parte à sotavento da montanha a influência do vento foi significativamente menor.

A região sudeste do Brasil mostra valores médios de chuva próximos de 1500 mm/ano úmida no verão devido à atuação de sistemas de monção e com períodos secos no inverno (REBOITA et al. 2010, VERA et al. 2006) , com atuação da ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul) responsável por inibir a formação de chuva, e principalmente no verão a permanência de sistemas frontais ocasionando chuvas intensas e em muitas situações por dias seguidos. Além desses sistemas mencionados, as perturbações de oeste podem contribuir para ocorrência de chuva. Uma característica importante da distribuição temporal da chuva refere-se à variabilidade interanual, ou seja, a oscilação em torno da média anual, que impõe incertezas no planejamento de previsões para agricultura, fornecimento hídrico e de energia. A variabilidade sazonal é bem definida na região de estudo com a presença dois regimes de chuva: a estação chuvosa nos meses de verão e estação seca no inverno, onde o início da estação chuvosa há grande variabilidade espacial e interanual.

Segundo Nunes et al (2009) há varias zonas climáticas no Sudeste, a primeira que abrange as bacias do Alto-Tietê e Paraíba do Sul e caracterizadas por chuvas médias anuais de mais de 2000 mm, devido à presença do Oceano Atlântico e evaporação que produz umidade transportada pela brisa marítima. Em Bertioga, por exemplo, o índice pluviométrico chega a ultrapassar 4500 mm. A ocorrência de chuva convectiva é responsável por grande parte do volume precipitado, presente o ano todo, mas a maior frequência é entre a primavera e verão. A presença de precipitação frontal é verificada constantemente e em alguns pontos a interação com o relevo, uma vez que o sistema frontal é oposto ao relevo e contribui para a intensificação da chuva. A segunda zona fica orientada na direção SE-NW entre as bacias do PCJ até a bacia do Sapucaí Mirim-Grande, onde ocorre de 1500 a 1700 mm/a de precipitação, e a influência do relevo se faz presente na Serra da Canastra e Serra da Mantiqueira.

Alves et al. (2005) estudou o início da estação chuvosa no Sudeste do Brasil no período de 1968 a 1997 mostrando o seu início em média no começo de outubro, e que a estação chuvosa começa mais cedo quando o Oceano Pacífico Equatorial está mais quente, e mais tarde quando Oceano Pacífico Central está frio. O autor também aponta para a influencia de fatores locais ou de mesoescala ao seu início. Minuzzi et al. (2007) estudou o padrão climatológico da estação chuvosa no sudeste do Brasil mostrando que o período chuvoso na região litorânea de

São Paulo tem início em meados de setembro e com duração variando entre 210 a 229 dias. A duração da estação chuvosa tende a diminuir conforme se distancia da costa. A bacia PCJ e bacia Mogi-Guaçu tem o início da estação chuvosa entre o fim de setembro e o início de outubro. Já as bacias na parte mais ao norte do estado tem o início no começo de outubro. Os autores defendem que desde meados da década de 1970 o período chuvoso tem começado antes e prolongando-se por mais tempo.

### 2.3 Climatologia na área de estudo

A região investigada (Fig. 3) apresenta altitudes desde o nível do mar até próximo de 2000 metros influenciando os padrões de temperatura e de chuva. Nessa região, a leste está presente a Serra do Mar, na porção mais central a Serra da Mantiqueira e mais ao norte a Serra da Canastra.

Conforme Nunes e et al. (2009) e na climatologia entre 1965 a 2005, a região de estudo pode ser caracterizada em três zonas de temperaturas. A região mais a leste na bacia do Paraíba do Sul possui temperaturas médias anuais acima de 22 °C. Há uma grande região compreendendo as cabeceiras das bacias do Mogi-Guaçu, do PCJ e do Paraíba do Sul com temperatura média anual entre 14 a 18 °C e corresponde às áreas mais montanhosas do estado de São Paulo. Desse modo, o efeito do relevo resulta em um verão mais ameno e num inverno mais rigoroso. As demais áreas apresentam uma temperatura média anual entre 19 e 21 °C, com mínimas entre junho a agosto (Camargo et al. 1993). Segundo Nunes e et al. (2009), a influência orográfica se faz presente em vários setores da região, não de forma marcante, definindo localmente algumas diferenças, se não no ritmo, mas nos montantes pluviais e nas temperaturas. Consequentemente, é esperado algum grau de variabilidade inter e intra-anual por controles de mesoescala, exposição de vertentes e uso da terra. As características climáticas da área de estudo estão associadas à situação do escoamento médio da atmosfera, estado oceânico nas proximidades e atuação dos centros de ação e perturbações gerais os quais são capazes de controlar a entrada dos sistemas atmosféricos. A área de estudo acaba sendo afetado pela entrada de sistemas frontais, sistemas convectivos e ZCAS. Essa área é também potencialmente afetada por fenômenos de grande escala como El Niño e La Niña. Além da condição topográfica, outros fatores físicos controladores do clima estão presentes como a maritimidade-continentalidade e atuação destas massas de ar. A distância entre o oceano e continente influencia nas condições de temperatura e de umidade do ar desde a costa em direção ao continente devido à incursão da brisa marítima durante o dia e ao longo da noite.

Autor  Bacia	Período	PCJ	Paraíba do Sul	Mogi-Guaçu	Pardo	Sapucaí
<b>Prado</b>	1947-1997	1500	1450 - 1500	1350-1500	1350-1500	1350-1500
<b>Diniz</b>	1980-2010	1450-1650	1650- 1850	1450-1650	1450-1650	1450-1650
<b>Sant'ana Neto</b>	1961-2010	1400-1600	1700-1900	1400-1600	1400-1600	1400-1600
<b>Martinelli</b>	1941-1970	1200-1500	1200-2000	1300-1500	1300-1500	1300-1500

Tabela 1 - Comparação da climatologia de chuva nas bacias do PCJ, Paraíba do Sul, Mogi-Guaçu, Pardo e Sapucaí com base nos trabalhos de Prado (2006 e 2010), Diniz et al. (2018), Neto (2006), Sant'ana Neto (2005) e Martinelli (2010).

Trabalhos anteriores de Prado (2006 e 2010), Diniz et al. (2018), Neto (2006) e Martinelli, (2010) elaboraram climatologias da precipitação selecionando diferentes intervalos de tempo conforme a Tabela 1. Em comum esses trabalhos mostram a influência da continentalidade e do relevo nos padrões de distribuição de chuva. Na região de estudo a variação de chuva situou-se entre 1200 a 2000 mm. Volumes anuais de precipitação de 1200 mm ocorrem sobretudo nas bacias de PCJ e Paraíba do Sul conforme Martinelli (2010). O mesmo autor anterior obteve valores de 2000 mm na bacia do Paraíba do Sul. Pellegrino et al. (2001) observou que na direção nordeste da bacia do PCJ a variação de chuva é mais acentuada e o máximo de intensidade de chuva de 1850 mm ocorre na serra do Mantiqueira sendo que a parte central e oeste extremamente baixo.

De acordo com Martinelli (2010), a parte sudoeste da bacia Mogi é marcada por precipitação ao redor de 1500 mm, o centro por valores mais baixos (1200 mm) e por acumulados de chuva de 1400 mm na porção noroeste. O acumulado calculado revela um padrão semelhante com maior quantidade de chuva na parte sudeste, um mínimo na região central e maior volume de chuva a noroeste da bacia.

A parte litorânea da bacia do Paraíba do Sul é marcada por valores mais intensos de chuva associado com forte gradiente de chuva situado ao redor de 2000 mm (MARTINELLI, 2010). Esse mesmo padrão se repete porção norte da bacia, porém com menor intensidade do gradiente de chuva. A parte central da bacia destaca-se por valores de chuva com menor volume de precipitação alcançando a marca de 1200 mm na parte sudoeste da bacia. Os acumulados de chuva calculados apresentaram grande coerência com o proposto por Martinelli (2010). Nesse caso, o acumulado de chuva de 1966 mm no posto 02345067 e o acumulado de 1672 mm no posto D2-020 apresentaram compatíveis com a climatologia elaborada por Martinelli (2010).

Conforme Martinelli (2010) observa-se que os máximos anuais de chuva na bacia do PCJ estão localizados na parte leste registrando valores de 1600 mm. A região situada na borda com a bacia Mogi caracteriza por valores com mais elevados para leste seguido por uma diminuição da precipitação com valores abaixo de 1200 mm e, finalmente, retomando acumulados de até 1600 mm na parte oeste. Na área no entorno do Rio Piracicaba caracteriza-se por precipitação entre 1200 a 1300 mm. Os acumulados de chuva calculados estão coerentes com o proposto por Martinelli (2010) principalmente na região próxima à bacia Mogi.

Conforme Martinelli. (2010), na bacia do Pardo os maiores volumes de chuva encontra-se porção leste próximo à fronteira com Minas Gerais com valores ao redor de 1800 mm. O resto da bacia caracteriza-se por valores de precipitação entre 1300 a 1500 mm. O acumulado calculado em termos quantitativos apresenta grande similaridade com o que foi elaborado por Martinelli.

De acordo com Martinelli (2010), a parte leste próximo à fronteira com Minas Gerais apresenta as maiores quantidades de chuva de entre 1500 e 1700 mm enquanto a parte mais a leste mostra chuva entre 1300 e 1400 mm. A área ao redor da borda com a bacia do Pardo possui chuva próxima de 1500 mm. O acumulado de chuva calculado possui grande semelhança com a climatologia de Martinelli (2010). Por exemplo, vários postos mostram um maior acumulado no setor leste da bacia.

De acordo com Sant'ana Neto (2005), nota-se que os maiores de volumes de chuva situados ao redor de 1900 mm concentram-se próximo ao litoral diminuindo na direção SE-NO. Observa-se que as partes próximas às regiões montanhosas possuem precipitação ao redor de 1500 mm. As áreas próximas ao interior do estado de São Paulo possuem precipitações próximas a 1400 mm. Comparando-se os a chuva calculada com Sant'ana Neto (2005)

evidencia-se que os padrões de continentalidade e de maior volume de chuva nas regiões montanhosas estão presentes.

Conforme Diniz et al. (2018), a normal climatológica para o período de 1981-2010 mostra a presença do efeito da continentalidade com presença de uma chuva média de 1850 mm sobre a região da bacia do Paraíba do Sul e uma diminuição da magnitude em relação ao interior do estado de São Paulo. Nota-se também a influência das regiões montanhosas na total de chuva esperado em relação às áreas adjacentes.

Conforme Prado (2006), a precipitação média no período de 1947 a 1997 mostra valores mais altos entre 1800 a 2000 na bacia do rio Paraíba do Sul. A oeste situa-se menores quantidade de chuva ao redor de 1300 a 1350 mm. O padrão de precipitação mostrado por Prado (2006) mostra grande semelhança com o calculado no presente trabalho. As regiões montanhosas possuem valores mais elevados de precipitação (1500 a 1600 mm). Já as de mais regiões baixo relevo próximo ao interior do estado de São Paulo apresentam menores valores de precipitação alcançando a marca de 1400 a 1450 mm nas bacias de Sapucaí, Pardo e Mogi-Guaçu. Em Prado (2010), a precipitação acumulada climatológica para o estado de São Paulo mostra a influência da continentalidade e da brisa-marítima com maiores acumulados situados próximos à costa de São Paulo com quantidade de chuva entre 1500 a 1550 mm na bacia do Paraíba do Sul. Também nota-se a influência do relevo no total precipitado com valores entre 1450 e 1450 nas porções mais altas e com uma diminuição em direção ao interior nas áreas mais baixas das bacias com valores entre 1350 a 1400 mm.

### **3.0 Materiais e Métodos**

#### **3.1 Bacia Hidrográfica**

Define-se bacia hidrográfica ou bacia de drenagem conforme Viessman, Harbaugh e Knapp (1972) como sendo uma área definida em termos topográficos, drenada por um curso d'água ou por vários cursos d'água interligados entre si e com uma única saída onde toda a vazão efluente é conduzida, no ponto denominado exutório. Uma bacia pode ser dividida em sub-bacias e, essas por sua vez, em micro-bacias.

Os limites que separam uma bacia das bacias vizinhas são conhecidos por divisores. Há três critérios a serem usados: geológico, freático e topográfico. Os dois primeiros são de difícil aplicação devido à complexidade entre a formação geológica e água escoada e, além disso, ocorre variação sazonal nos níveis freáticos. Na prática, recorre-se ao traçado das curvas de níveis para delimitar uma bacia. Nesse caso, é preciso conhecer a topografia para delimitar as curvas de níveis.

Os cursos d'água são classificados em termos da disponibilidade temporal do escoamento:

a) Perenes nos quais a água flui o tempo todo. Mesmo em períodos de seca severa, o nível d'água jamais se situa a baixo do leito do curso d'água.

b) Intermitentes são os que apresentam escoamento em períodos de chuva e secam nos períodos de estiagem.

c) Efêmeros são os que se caracterizam por escoamento superficial apenas durante ou após os períodos de chuva.



No presente trabalho os cursos d'água se classificam como perenes. Além do aspecto temporal do escoamento, uma bacia hidrográfica pode ser classificada conforme o modo pelo qual a água flui. Há quatro tipos: na exorróica, o fluxo d'água é drenado direta ou indiretamente para o mar. A endorréica caracteriza-se quando a água é lançada para um lago ou mar fechado. A criptorreica, a água flui para rochas calcárias formando lagos subterrâneos e lençóis freáticos. Por fim, na arreica ocorre o secamento do rio a partir de determinado ponto.

As características físicas de uma bacia representam um conjunto de elementos que regulam o escoamento superficial. Dentre esses incluem a área de drenagem e a forma. A área de drenagem representa a área plana delimitada pelos divisores topográficos sendo formada por um rio principal e seus afluentes ou tributários. Usualmente é mensurada com o uso de um planímetro. A forma de uma bacia determina a velocidade com que ocorre o escoamento ao longo de sua área de drenagem. Esse conceito pode ser mais bem explicado considerando a figura 2. As três bacias apresentadas possuem a mesma área sobre qual ocorre um mesmo volume de precipitação. Em A, em virtude de uma maior relação entre comprimento e largura da área, a água levará 10 unidades de tempo para que seja lançado ao rio principal. Na bacia B será preciso 5 unidades enquanto na C irá ser necessário 9. Com isso, o escoamento se dá mais rapidamente B, seguido por C e em último em A. Portanto, a forma da bacia é um elemento influenciador na ocorrência de cheias.

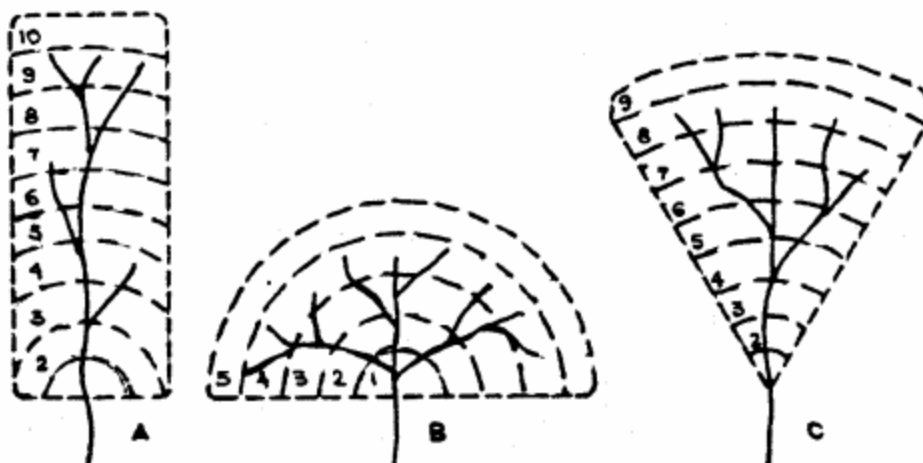


Figura 2 - Influência do formato da bacia hidrográfica. Fonte: Wilson (1969).

## 3.2 Identificação das áreas e características básicas

### 3.2.1 Descrição da área de estudo

A seguir serão descritas as bacias hidrográficas consideradas nesse estudo tendo em comum áreas adjacentes às regiões montanhosas como a Serra da Canastra e a Serra da Mantiqueira. Essas bacias estão inserida dentro de duas divisões hidrográfica estabelecida pelo IBGE e pela ANA correspondendo a região hidrográfica da Bacia do Paraná e a região hidrográfica da Bacia do Atlântico-Sudeste.

É importante destacar a definição de Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recurso Hídricos (UGRHIs) definido pela Lei 9034 de 27 de dezembro de 1994 no qual o foi

feita divisão do Estado de São Paulo em 22 unidades. Essa lei estabelece a UGRHI como a porção territorial no qual existam elementos econômicos, sociais, políticos e físicos em comum para fins de gerenciamento hídrico. Uma mesma UGRHI pode contemplar várias bacias hidrográficas ou mesmo parte de uma bacia.

### 3.22 Bacia do Rio Piracicaba, Jundiá e Capivari

A UGRHI 5 corresponde a bacia do Rio Piracicaba, Rio Jundiá e Rio Capivari possuindo uma área de 15.303,67 km<sup>2</sup> abrangendo os estados de São Paulo e Minas Gerais, respectivamente, em 92,6 % e 7,4 %. Está situada entre os meridianos de 46 e 49 ° O com latitudes entre 22 e 23,5 ° S. Com isso, definindo uma dimensão de 300 km de leste a oeste e 100 km de sul a norte. No estado de São Paulo, a bacia PCJ ocupa uma área de 14.137,79 Km<sup>2</sup> do qual 11.402,84 km<sup>2</sup> corresponde à bacia do Rio Piracicaba, 11.402,84 km<sup>2</sup> à do rio Capivari e 11.402,03 km<sup>2</sup> à bacia do Jundiá. No estado de Minas Gerais a área ocupada é de 1125,90 km<sup>2</sup> associada apenas a bacia do rio Jaguari. Há no total 44 municípios inseridos dentro da bacia do PCJ e outros 30 municípios parcialmente inserido na bacia. Na tabela 2 é mostrada a área de drenagem das sub-bacias do rio Piracicaba e na tabela 2 é mostrada a área da bacia do PCJ. A população dessa bacia em 2008 correspondia a 5.152.248. A parte paulista da bacia PCJ é ao norte limitada pela bacia Mogi-Guaçu, a sudeste com bacia do Paraíba do Sul, a leste com Minas Gerais, a sul com bacia do Alto Tietê, a oeste e sudoeste com a bacia do Sorocaba e Médio Tietê e a noroeste com a bacia do Tietê e Jacaré. Em termos de desnível topográfico, a bacia do rio Piracicaba possui aproximadamente 1400 m ao longo de uma extensão de 370 km, com nascente na Serra da Mantiqueira (MG) até a foz no rio Tietê. A bacia do PCJ é formada por 7 sub-bacias principais sendo que cinco fazem parte do Piracicaba. Tendo-se, então, as bacias Piracicaba, Corumbataí, Jaguari, Camanducaia e Atibaia. As duas restantes correspondem as bacias Capivari e Jundiá. Essa bacia tem importância vital para o abastecimento hídrico da região metropolitana de São Paulo através do Sistema Cantareira. Há a presença de várias barragens em domínio. A presença de barragem resulta na diminuição da vazão natural. Nos casos estudados no presente trabalho foram constatados uma diminuição de até 36 % após a operação de uma barragem. Conforme Frederice e Brandão (2016), a construção das barragens Cachoeira e Atibainha ocorreu, respectivamente, em 1974 e 1975. A construção da barragem dos rios Jaguari e Jacaré foi estabelecida em 1982. Na tabela 2, é apresentada a área de drenagem das sub-bacia do Piracicaba e na tabela 3 é mostrada a área das bacias do PCJ.

Sub-Bacia	Área – SP (km <sup>2</sup> )	Área – MG (km <sup>2</sup> )	Área total (km <sup>2</sup> )	Área total (%)	Área no Sistema Cantareira	
					Km <sup>2</sup>	(%)
<b>Camanducaia</b>	870,68	159,32	1.030,00	8,2	-	
<b>Jaguari</b>	2.323,42	966,58	3.290,00	26,2	1.252,00	9,9
<b>Atibaia</b>	2.828,76	39,98	2.868,74	22,8	715,00	5,7
<b>Corumbataí</b>	1.679,19	-	1.679,19	13,4	-	-
<b>Piracicaba</b>	3.700,79	-	3.700,79	29,4	-	-
<b>Total Piracicaba</b>	<b>11.402,84</b>	<b>1.165,88</b>	<b>12.568,72</b>	<b>100</b>	<b>1.967,00</b>	<b>15,6</b>

Tabela 2 - Área de drenagem em km<sup>2</sup> e em porcentagem das sub-bacias do rio Piracicaba estados de estados de São Paulo, Minas Gerais e no Sistema Cantareira. Fonte: relatório PCJ 2010-2020 (COMITÊS, P. C. J. et al, 2011).

Bacia	Área – SP (km <sup>2</sup> )	Área – MG (km <sup>2</sup> )	Área total (km <sup>2</sup> )	Área total (%)
<b>Piracicaba</b>	11.402,84	1.165,88	12.568,72	82,1
<b>Capivari</b>	1.620,92	-	1.620,92	10,6
<b>Jundiaí</b>	1.114,03	-	1.114,03	7,3
<b>Total PCJ</b>	14.137,79	1.165,88	15.303,67	100,0

Tabela 3 - Área de drenagem das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. PCJ 2010-2020. Fonte: relatório PCJ 2010-2020 (COMITÊS, P. C. J. et al, 2011).

A geologia das bacias PCJ é caracterizada por estar localizada na borda Bacia Sedimentar do Paraná e sendo representada por quatro estruturas geológicas: embasamento cristalino, rochas sedimentares, rochas ígneas básicas com rochas efusivas e intrusivas e formações sedimentares do Cenozoico.

As bacias PCJ são formadas principalmente por três áreas morfológicas no estado de São Paulo. A leste verifica-se o Planalto Atlântico definido pelo embasamento cristalino. Apresenta relevo montanhoso e de morro com a altitude superior a 1200 m e com a presença de vales situados entre 750 e 850 m abrangendo as sub-bacias dos rios Atibaia, Jaguari, Camanducaia e Jundiaí. A segunda formação corresponde Depressão Periférica de natureza sedimentar representada por uma zona de 50 km de largura estabelecida entre as Cuestas e o Planalto Atlântico. A última das formações corresponde à Cuesta Basálticas na parte oeste das bacias PCJ representado por relevo escarpado no contato com a Depressão Periférica e por relevo suavizado. A parte da bacia do PCJ de Minas Gerais um cenário marcado por vales profundos e estreitos com a presença de rios encachoeirados.

Segundo relatório das bacias PCJ 2010-2020, a área das bacias PCJ é composta por 33,61 % de cana-de-açúcar e 39,06 % de campos antropizados, isto é, pastagem. O reflorestamento é uma atividade significativa, por exemplo, na bacia do rio Jundiaí para obtenção de papel e celulose. A cobertura de vegetação original está localizada apenas em áreas como margens de cursos d'água e em áreas de preservação permanente correspondendo a 7,93 % das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí conforme tabela 4.

Uso e cobertura da terra	Área (ha)	Área (%)
<b>Água</b>	22.098,90	1,47
<b>Área urbana</b>	90.378,46	6,00
<b>Cana-de-açúcar</b>	506.488,21	33,61
<b>Cultura anual</b>	88.962,77	5,90
<b>Cultura perene</b>	14.313,07	0,95
<b>Outros</b>	4.747,10	0,31
<b>Campos antropizados (pastagem)</b>	588.625,73	39,06
<b>Reflorestamento</b>	60.397,68	4,01
<b>Solo exposto</b>	11.538,98	0,77
<b>Vegetação nativa</b>	111.528,67	7,93
<b>Total</b>	<b>1.507.079,55</b>	<b>100</b>

Tabela 4 - Distribuição das classes de uso e ocupação da terra nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Relatório PCJ 2010-2020 (COMITÊS, P. C. J. et al, 2011).

### 3.23 Bacia dos Rios Mogi-Guaçu

No estado de São Paulo, a bacia do rio Mogi-Guaçu está localizada entre os paralelos 21°45' e 22°45' e também entre os meridianos 46°15' e 47°45'. A bacia do Rio Mogi-Guaçu (UGRHI 9) faz parte da bacia do Rio Grande no estado de São Paulo. Possui uma área 13.031,79 km<sup>2</sup> orientada no sentido sudoeste e limitada por 6 UGRHIs tais como Piracicaba-Capivari-Jundiá, Tietê-Jacaré, Tietê-Batalha, Turvo-Grande, Pardo-Grande e Pardo. Essa bacia compreende 59 municípios dos quais 27 estão totalmente na área de drenagem da bacia. Em termos geomorfológicos quatro domínios: Planalto Atlântico, Depressão Periférica, Cuestas Basálticas e Planalto Ocidental.

O rio Mogi-Guaçu nasce na cidade de Bom Repouso (MG) situado no planalto cristalino em altitude de 1650 m. A seguir percorre 95,5 km no estado de Minas Gerais, atravessando a Serra da Mantiqueira e percorre 377,5 km no estado de São Paulo. Finalmente deságua no Rio Pardo numa cota de 490 m no Bico do Pontal situado no município de Pontal. Outros que também se destacam são o rio do Peixe e rio Jaguari-Mirim.

O cultivo de cana-de-açúcar representa a principal ocupação da bacia com 43,34%. O segundo uso do solo com 7,78% está associado com áreas de pastagem especialmente em porções do Rio Peixe e no Alto Mogi. A fruticultura está presente em 7,78. A vegetação nativa engloba áreas de floresta estacional, floresta secundária e vegetação ripária, representando, então, 12,46% da bacia. (CBH- MOGI, 2008).

### 3.24 Bacia do Rio Pardo

A bacia do rio Pardo (UGRHI 4) possui uma área de drenagem de 8993 km<sup>2</sup> tendo o rio Pardo como o principal curso d'água. Esse rio nasce no município de Ipuúna (MG) na serra do Cervo a uma altitude de 1380 m, entra no estado de São Paulo pelo município de Caconde e deságua após um percurso total de 573 km no Rio Grande. A bacia do Rio Pardo está limitada ao norte pela bacia do Rio Sapucaí e do Rio Grande (UGRHI 8), a nordeste pelas bacias do Rio Pardo e Rio Grande (UGRHI 12), a sudeste pela bacia do Rio Mogi-Guaçu (UGRHI 9) e na parte leste e sudeste pela estado de Minas Gerais. É importante lembrar que o rio Pardo é afluente do rio Grande sendo esse um dos formadores do rio Paraná. Há 27 municípios drenados total ou parcialmente pela bacia do rio Pardo sendo 15 totalmente drenados pela bacia. Essa bacia pode ser dividida em 6 sub-bacias. Essas sub-bacias correspondem a Ribeirão São Pedro/Ribeirão da Floresta, Ribeirão da Prata/Ribeirão Tamanduá, Médio Pardo, Rio Canoas, Rio Tambaú/Rio Verde e Alto Pardo. Os principais cursos d'água correspondem ao Rio Pardo e seus afluentes. Com isso, tem-se pela margem direita os rios Canoas e Araraquara, e ademais, os ribeirões São Predo, da Floresta e da Prata. Na margem esquerda, há os rios Tambaú, Verde e Fartura e o ribeirão Tamanduá. A ocupação territorial dá-se principalmente pelo setor agropecuário com destaque para a cana-de-açúcar. Segundo Junior (2013) a agropecuária representa 75 % da área na bacia. A área nativa corresponde a 13% do total dessa UGRHI (CBP, 2016). Essa bacia caracteriza-se por apresentar várias hidrelétricas.

### 3.25 Bacia do Rio Sapucaí

Conforme o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (2010), a bacia do Rio Sapucaí é definida pela UPGH (Unidade de Planejamento e Gestão de

Recursos Hídricos) GD5 do Estado de Minas Gerais fazendo parte da bacia do rio Grande. A bacia do rio Sapucaí está situada nos estados de São Paulo e Minas Gerais. A nascente do rio Sapucaí localiza-se Serra da Mantiqueira no município de Campos do Jordão (SP) numa altitude 1620 metros após percorrer 248 km termina por desaguar no Lago de Furnas a 780 metros de altitude. Na tabela 5 constam-se alguns parâmetros fisiográficos associados a essa bacia. A bacia do rio Sapucaí na região mineira engloba 48 municípios ocupando uma área de drenagem de 8824 km<sup>2</sup> onde há áreas de agricultura, pastagens e remanescente de matas de galeria e araucária. Em São Paulo, essa bacia engloba três municípios: Campos do Jordão, São Bento do Sapucaí e Santo Antônio do Pinhal. Representando, então, uma área de 632 km<sup>2</sup>. Em termos de uso do solo, áreas de pastagem correspondem a 36,9 %, agricultura representam 45,9 % e 13 % são ocupados por áreas florestais (ALBERTIN e MAUUD, 2006). Os autores realizaram um estudo por meio de simulações e elaboração de cenários para a bacia do Sapucaí e observaram um comprometimento para a geração de energia elétrica e um esgotamento na quantidade de água.

<b>Características Gerais da Bacia do Rio Sapucaí</b>		<b>Unidade</b>
Área da bacia	9465,16	km <sup>2</sup>
Extensão do Curso Principal	248	km
Perímetro da Bacia	627,42	km
Cota da Nascente	1650	m
Cota da Foz	780	m
Principais Tributários	Rio Sapucaí- Mirim, Rio Lourenço Velho, Rio Itaim, Ribeirão do Mandu, Rio do Cervo, Rio Turvo e Rio Dourado	-

Tabela 5 – Características Fisiográficas da Bacia do Rio Sapucaí. Fonte: Plano Diretor de Recursos da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (2010).

### **3.26 Bacia do Rio Paraíba do Sul**

Com uma área de drenagem de aproximadamente 66594 km<sup>2</sup>, a bacia do rio Paraíba do Sul está localizada entre os paralelos 20°26' e 23°00' S e os meridianos 41°00' e 46°30' W. Essa bacia abrange áreas nos Estados de São Paulo (13944 km<sup>2</sup> ou 21%), Rio de Janeiro (26926 km<sup>2</sup> ou 40 %) e Minas Gerais (20732 km<sup>2</sup> ou 31 %) sendo limitada na região norte pelas bacias dos rios Grande e Doce e pelas serras da Mantiqueira, Caparaó e Santo Eduardo. Limita-se na porção nordeste com a bacia do rio Itabapoana, ao Sul limita-se pela Serra dos Órgãos e pela Serra do Mar e, finalmente, a oeste pela bacia do rio Tietê (COPPETEC, 2006). O rio Paraíba do Sul recebe o nome de rio Paraitinga ao nascer na serra da Bocaina no

município de Areais (SP) numa altitude 1800 m. A partir da junção do rio Paraibuna e Paraitinga passa a ser denominado de rio Paraíba do Sul tendo sua foz no município de São João da Barra (RJ) após percorrer uma extensão de 1137 km. Os principais afluentes pela margem esquerda são os rios Paraibuna, Pomba e Muriaé e pela margem direita são os rios Pirai, Piabanha e Dois Rios. Essa bacia abrange um total de 184 municípios sendo 39 situados em São Paulo, 57 no Rio de Janeiro e 88 em Minas Gerais. Os principais reservatórios dessa bacia são o Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil. Segundo (ANA, 2016), o volume total desses reservatórios (Reservatório Equivalente) é de 7294.7 milhões de m<sup>3</sup>, sendo que 4.391,9 milhões de m<sup>3</sup> estão em condições normais de operação (volume útil total). É também importante destacar a importância da bacia do rio Paraíba no cenário federal por estar situada em uma das regiões mais desenvolvidas do país, onde se localiza os maiores polos industriais e populacionais (GONÇALVES, 2016). Esse cenário acaba por provocar conflitos no uso da água para fins de geração de eletricidade e abastecimento. Em termos de uso e ocupação do solo, a bacia do rio Paraíba do Sul destina-se primordialmente como campo/pastagem (ANA, 2001). A vegetação original correspondia ao bioma da Mata Atlântica dividida em áreas de floresta estacional, floresta ombrófila e formações pioneiras como manguezal, restinga e várzea (COPPETEC, 2006). Estima-se que aproximadamente 10% da área incluía a Mata Atlântica com boa parte dessa vegetação em unidades de conservação.

### **3.3 Fonte de dados**

No presente trabalho foram usados dados diários de vazão e chuva pertencentes ANA e DAEE. A série de dados da ANA está disponível no site <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf> e o conjunto de dados do DAEE localiza-se em <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>. A área de estudo compreende cinco bacias de mesoescala localizada no Estado de São Paulo. Essas bacias incluem a bacia do rio Piracicaba, Capivari e Jundiá, a bacia do rio Paraíba do Sul, a bacia do Mogi-Guaçu, bacia do rio Pardo e a bacia do rio Sapucaí. O período de dados situa-se de 1940 a 2017.

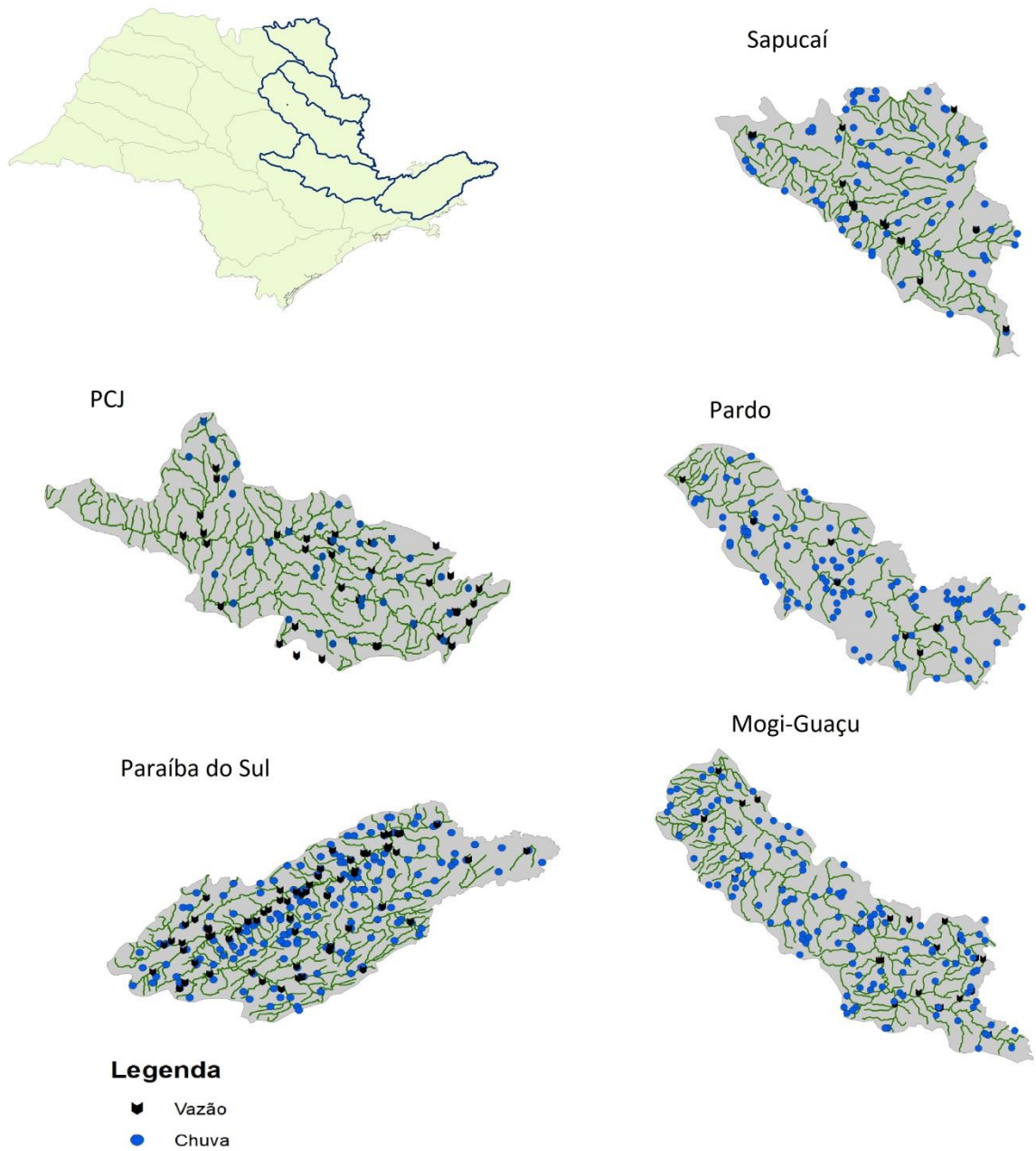


Figura 3- Localização das bacias investigadas no estado de SP, com os postos de medidas de chuva e vazão.

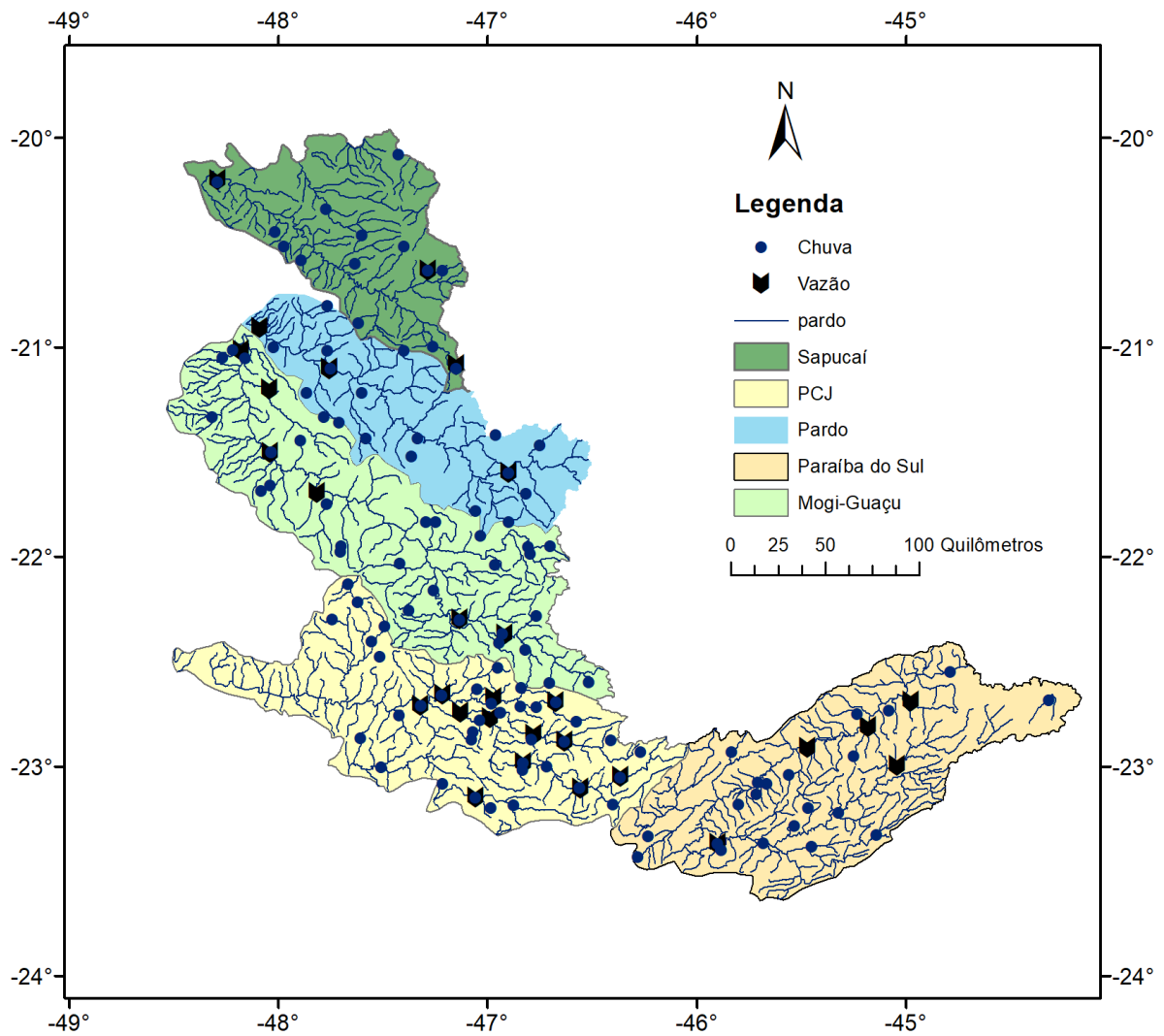


Figura 4 – Localização dos postos de chuva e vazão.

A figura 3 mostra a distribuição de todos os postos de chuva e vazão da ANA e DAEE nas diferentes bacias em estudo. Com o fim de auxiliar na escolha dos postos mais favoráveis em termos de disponibilidade de dados foram feitos gráficos para visualização do nível de informação disponível como ilustrado nas figuras 5 e 6. Na figura 4 é mostrada a localização dos postos de vazão e chuva selecionados para o presente estudo.



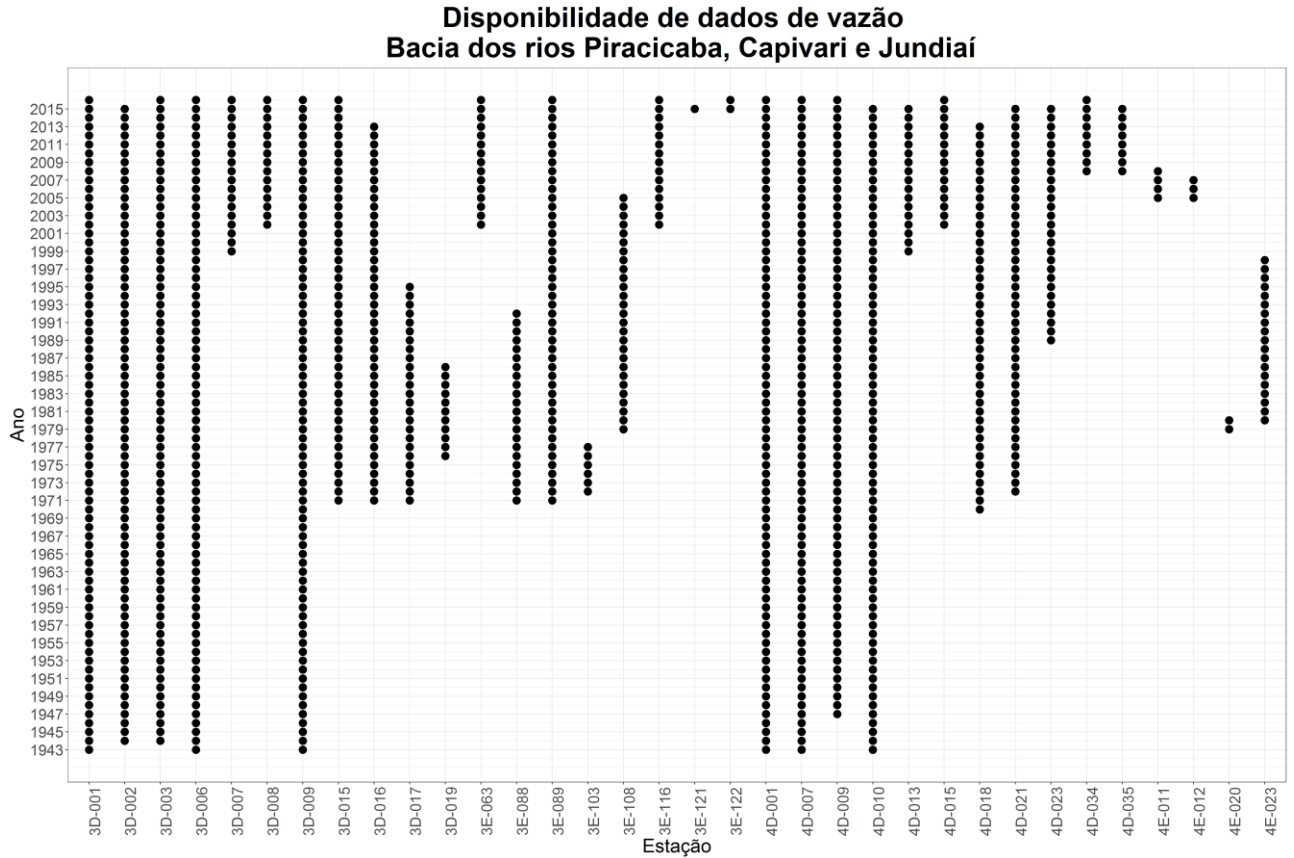


Figura 5– Disponibilidade de dados de vazão em termos de ano hidrológico do DAEE na bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.

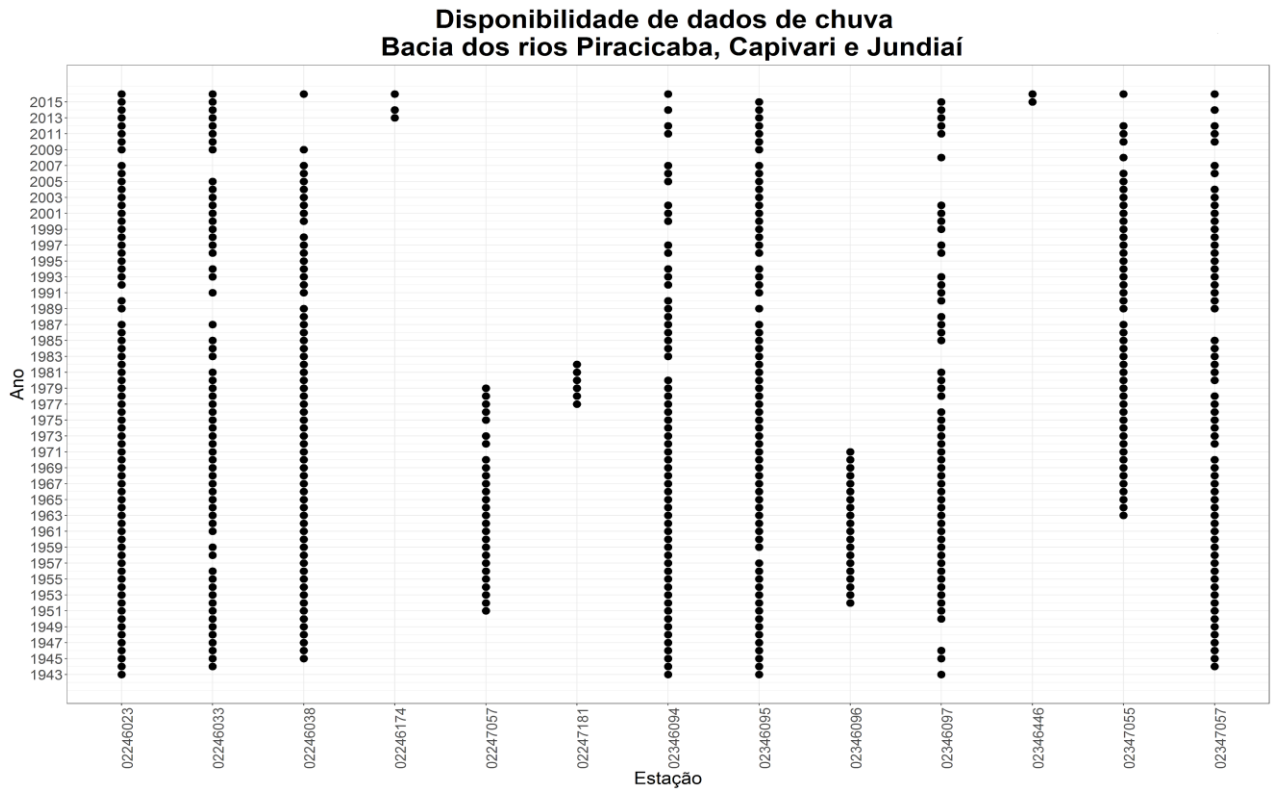


Figura 6– Disponibilidade de dados de chuva em termos de ano hidrológicos na bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.

As figuras 5 e 6 mostram a disponibilidade de dados, respectivamente, de vazão no caso do DAEE e de chuva da ANA para a bacia do PCJ. As informações plotadas referem-se ao ano hidrológico considerando-se como início em setembro e término em agosto do ano seguinte. Foram considerados válidos apenas se durante a estação chuvosa (de setembro a maio) mais ou igual 95 % estivessem disponíveis. De um total 139 postos de chuva e 47 postos de chuva distribuídos na bacia do PCJ consta-se que grande parte das estações não possui uma boa abrangência temporal limitando as possibilidades do acompanhamento das tendências hidroclimatológicas ao longo de décadas. Com isso, apenas 37 e 12 pontos, respectivamente, de chuva e vazão foram selecionados.

<b>Bacia</b>	<b>Chuva</b>	<b>Vazão</b>
<b>PCJ</b>	37	12
<b>Paraíba do Sul</b>	21	5
<b>Pardo</b>	16	3
<b>Mogi-Guaçu</b>	30	6
<b>Sapucaí</b>	15	3

Tabela 6 – Quantidade de postos de chuva e vazão.

A tabela 6 mostra a quantidade de postos de chuva e vazão usados. Nos anexos B são mostrados todos os postos de vazão e chuva do DAEE e ANA disponíveis e quais postos foram selecionados para análise do presente estudo.

UGRHI	Período	Curso	Estação	Latitude	Longitude	Área (km <sup>2</sup> )	Área calculada (km <sup>2</sup> )
Paraíba do Sul	1935-2014	RIO BOCAINA	58220000	-22,69	-44,98	240	235
Paraíba do Sul	1934-2014	RIO PARAITINGA	58030000	-23	-45,04	796	797
Paraíba do Sul	1952-2014	RIO PARAÍBA DO SUL	58099000	-23,37	-45,9	4940	4934
Paraíba do Sul	1926-2014	RIO PARAÍBA DO SUL	58183000	-22,91	-45,47	9600	9576
Paraíba do Sul	1922-2014	RIO PARAÍBA DO SUL	58204000	-22,81	-45,18	10800	10750
Paraíba do Sul	1934-2018	RIO PARAÍBA DO SUL	58235100	-22,54	-44,77	12800	12761
PCJ	1944-2016	Rio CAMANDUCAIA	3D-002	-22,7	-46,97	387	387
PCJ	1935-2007	RIO CACHOEIRA	62665000	-23,05	-46,37	431	416
PCJ	62395000	RIO JUNDIAÍ	62395000	-23,15	-47,06	632	636
PCJ	1943-2017	Rio CAMANDUCAIA	3D-001	-22,68	-46,97	928	927
PCJ	1936-2007	RIO ATIBAIA	62670000	-23,11	-46,56	1140	1135
PCJ	1935-2007	Rio JAGUARI	62600000	-22,88	-46,63	1690	1337
PCJ	1930-2017	Rio JAGUARI	3D-009	-22,85	-46,78	1950	1578
PCJ	1929-2017	RIO ATIBAIA	3D-006	-22,98	-46,83	1920	1922
PCJ	1944-2017	RIO ATIBAIA	3D-003	-22,77	-46,99	2490	2488
PCJ	1947-2017	RIO ATIBAIA	4D-009	-22,74	-47,13	2738	2724
PCJ	1943-2017	Rio JAGUARI	4D-001	-22,66	-47,21	3394	3048
PCJ	1929-2016	Rio PIRACICABA	4D-010	-22,71	-47,32	7205	6852
Mogi-Guaçu	1969-2016	Ribeirão da ONÇA	5C-017	-21,2	-48,04	918	908
Mogi-Guaçu	1944-2016	Rio MOGI-GUAÇU	3D-004	-22,37	-46,92	3834	3652
Mogi-Guaçu	1937-2014	RIO GRANDE	61886000	-22,3	-47,13	4670	4519
Mogi-Guaçu	1970-2016	Rio MOGI-GUAÇU	4C-007	-21,7	-47,82	12291	12167
Mogi-Guaçu	1937-2014	RIO GRANDE	61912000	-21,5	-48,04	13900	12955
Mogi-Guaçu	1980-2016	Rio MOGI-GUAÇU	5C-025	-21,02	-48,18	16650	17176
Pardo	1938-1979	RIO PARDO	61817000	-21,6	-46,9	4090	3103
Pardo	1930-1965	RIO PARDO	4C-001	-21,1	-47,76	10679	9512
Pardo	1941-2016	RIO PARDO	61840000	-21,1	-47,76	10700	9512
Pardo	1973-2016	RIO PARDO	5B-011	-20,91	-48,09	12455	11239
Sapucaí	1959-2016	Rio SAPUCAI	4C-002	-21,09	-47,15	449	223
Sapucaí	1980-2016	Rio SAPUCAIZINHO	4B-015	-20,63	-47,28	275	275
Sapucaí	1969-2015	Rio SAPUCAI-MIRIM	5B-007	-20,2	-48,29	6281	6027

Tabela 7– Postos fluviométricos selecionados com a respectiva UGRHI, curso, código, latitude, longitude, área (km<sup>2</sup>) obtida do DAEE ou ANA e área calculada.

No total, 31 postos fluviométricos (tabela 7) situados em cinco diferentes bacias foram selecionados para o estudo do balanço hídrico através do cálculo da vazão específica, chuva à montante, escoamento básico, coeficiente do escoamento e índice evaporativo.

### 3.4 Análise de tendência temporal de séries

Define-se uma série temporal como sendo uma coleção de observações realizadas sequencialmente ao longo do tempo (EHERLS, 2009). O ponto principal nesse tipo de dados baseia-se no fato de que observações vizinhas possuem dependência entre si. Moretti (2006) descreve quatro objetivos da análise de série temporais. O primeiro consiste no entendimento do mecanismo gerador da série temporal. O segundo corresponde à capacidade de fazer previsões seja de curto prazo ou de longo prazo. O terceiro consiste na descrição do comportamento da série. Nesse caso, por meio de verificação da existência de tendência, ciclos e variações sazonais. O último objetivo é a busca de periodicidades significativas, principalmente por meio de análise espectral.

Eherls (2009) menciona que uma série temporal pode ser decomposta em três termos. Nessa situação, uma série temporal  $X_t$  (observação  $X$  no tempo  $t$ ) é definida como:

$$X_t = T_t + C_t + R_t \quad (6)$$

onde  $T_t$  é a componente de tendência,  $C_t$  é uma componente cíclica ou sazonal e  $R_t$  é componente aleatória.

Supondo que a parte sazonal  $C_t$  não esteja presente. Supondo que a parte sazonal  $C_t$  não esteja presente com objetivo de investigar a componente de tendência  $T_t$ , a série temporal pode ser então descrita como  $Z_t = T_t + \alpha_t$  onde  $\alpha_t$  corresponde ao ruído branco com variância  $\sigma_\alpha^2$ . Moretti (2006) menciona vários métodos para estimar a componente  $T_t$ . O mais simples consiste no ajuste de uma função do tempo como polinômio, uma exponencial ou qualquer outra função suave de  $t$ . O segundo método é suavizar os valores da série ao redor de um ponto com fim de conhecer a tendência nesse ponto. A terceira abordagem consiste em suavizar os dados da série com uso de sucessivos ajustes de retas de mínimos quadrados ponderados.

A literatura descreve vários métodos para análise de tendência com fim reconhecer pontos associados à mudança de regime. A abordagem mais simples é a inspeção visual da série temporal. Pinheiro et al. (2013) investigaram a presença de tendências nas séries temporais em 18 estações pluviométricas da ANA no sul do Brasil com o teste de tendência de Mann-Kendall. Essa metodologia busca a identificação de mudanças bruscas e/ou tendências na média de longo prazo, descrito como teste não-paramétrico e baseado na magnitude relativa dos valores da série. Pinheiro et al. (2013) constataram mudanças significativas em ao menos 16 das 18 estações com um nível de significância de 95 %.

Groppo et al. (2005) avaliaram séries de precipitação e vazão em algumas bacias do Estado de São Paulo entre 1947 a 1997 com o teste sequencial de Mann-Kendall e teste de mudanças bruscas nas médias de Pettit. O teste de Pettit é também um teste não-paramétrico baseado no teste de Mann-Whitney para localizar pontos de ruptura em uma série temporal.

Salviano et al. (2016) analisaram a tendência em séries de temperatura e precipitação com dados do CRU (Climat Research Unit) no intervalo entre 1961 a 2011 com testes de Mann-Kendall e CMK. O teste de CMK (Contextual Mann-Kendall) representa uma regionalização do teste de Man-Kendall e se baseia em princípios segundo a qual regiões próximas tendem a possuir características semelhantes.

Neto (1999) utilizou 396 postos pluviométricos no período de 1971 a 1993 e investigou a tendência de chuvas no Estado de São Paulo. Em 25 desses postos havia registros de chuva desde 1888. Com médias móveis de 5 e 10 anos reportou um aumento no total pluviométrico de cerca de 10 a 12%.

Este trabalho usou um algoritmo de detecção de mudança de regime proposto por Rodionov (2004), segundo uma técnica sequencial tendo por base o teste paramétrico t-Student. Para cada observação um teste é conduzido a fim de determinar se a hipótese nula  $H_0$  é válida. A hipótese representa a ocorrência de mudança de regime sob três situações possíveis: aceitar  $H_0$ , rejeitar  $H_0$  ou continuar a rotina de teste, nesta sequência:

Passo 1: Estabelecer um comprimento de corte  $l$  dos regimes a serem detectados para uma determinada variável  $X$ .

Passo 2: Obter a diferença *diff* entre duas médias de dois intervalos sucessivos que poderiam ter uma significância estatística conforme o teste t-Student tal que

$$diff = t \sqrt{2\sigma_l^2/l} \quad (7)$$

Onde  $t$  corresponde ao valor da distribuição  $t$  com  $(2l - 2)$  graus de liberdade para um nível  $p$  de probabilidade. Considera-se que a variância nos dois regimes são iguais sendo então a mesma que a variância média ( $\sigma_l^2$ ) durante um intervalo do comprimento de corte.

Passo 3: Obter a média ( $\bar{x}_{R1}$ ) dos  $l$  valores iniciais da variável  $X$  como uma estimativa para o regime  $R_1$  e os níveis  $l$  que devem ser alcançado nos próximos  $l$  anos a fim de obter uma qualificação para a mudança do regime  $R_2$ . Nessa situação, a média do regime  $R_2$  é

$$\bar{x}'_{R2} = \bar{x}_{R1} \pm diff.$$

Passo 4: Para cada novo valor começando no ano  $i = l + 1$  verificar se esse é maior  $\bar{x}_{R1} + diff$  ou menor do que  $\bar{x}_{R1} - diff$ . No caso de pertencer ao intervalo  $\bar{x}_{R1} \pm diff$ , considera-se que não ocorreu mudança no atual regime, quando deve-se recalculer a média  $\bar{x}_{R1}$  para incluir o novo valor  $x_i$  e os  $(l - 1)$  valores anteriores da variável  $X$ . Se esse novo valor  $x_i$  ultrapassar o intervalo  $\bar{x}_{R1} \pm diff$ , então esse ano pode ser considerado com um ponto de início  $j$  do novo regime  $R_2$ .

Passo 5: Após definido o ponto de mudança, cada novo valor de  $x_i$ , sendo  $i > j$ , dever ser usado para confirmar ou rejeitar a hipótese nula  $H_0$  de alteração do regime no ano  $j$ . No caso da anomalia  $x_i - \bar{x}'_{R2}$  for do mesmo sinal que o calculado no ponto de mudança de regime, isso pode ser interpretado como um aumento na confiança de que essa mudança ocorreu. O inverso é verdadeiro ao se constatar que as anomalias possuem sinais opostos. Essa alteração no grau de confiança da mudança do regime em um ponto  $i = j$  é também mostrada nos valores do índice de mudança de regime (RSI – regime shif index) o qual é definido como uma soma das anomalias normalizadas. Com isso, define-se:

$$RSI_{i,j} = \sum_{l=i}^{j-m} \frac{x_l^*}{l\sigma_l}, m = 0,1, \dots, l - 1 \quad (8)$$

Sendo  $x_i^* = x_i - \bar{x}'_{R2}$  se a mudança é positiva ou  $x_i^* = \bar{x}'_{R2} - x_i$  se a mudança é negativa. Se em qualquer ponto do tempo de  $i = j+1$  até  $i = l-1$  o RSI passa a ser negativo deve ser adotado o passo 6. Na situação oposta, deve ser seguido o passo 7.

Passo 6: Valores negativos de RSI indica que o teste para mudança de regime para um específico ano  $j$  falhou. Nese caso atribui-se zero ao RSI. Recalcula-se a média  $\bar{x}_{R1}$  para incluir o valor  $x_j$  e mantém-se o teste dos valores de  $x_i$  começando com  $i = j+1$  nos intervalos em que  $\bar{x}_{R1} + diff$  estiver fora como descrito no passo 4.

Passo 7: Valores positivos de RSI indicam que a mudança de regime em um específico ano  $j$  é significativo ao um nível de probabilidade  $p$ . Define-se o valor médio para o novo regime  $\bar{x}_{R2}$ . A partir desse ponto, esse novo valor representa a parte central para o andamento do teste. A busca pelo próximo ponto de ruptura de regime começa no ano  $i = j+1$ . Essa etapa é necessária para ter certeza que a marcação do próximo regime está sendo feita corretamente mesmo se a duração do segundo regime  $R_2$  for menor do que  $l$  anos. A rotina de cálculos prossegue em um loop desde do passo 4 ao 7 até que todos os dados da variável  $X$  sejam processados.

### 3.5 Teste de Pettitt

O teste de Pettitt (PETTITT, 1979) consiste num método amplamente usado para detecção de pontos de ruptura em séries temporais. Esse teste é não paramétrico sendo baseado no teste de Mann-Whitney. Objetivo é checar se duas amostras  $X_1, \dots, X_t$  e  $X_{t+1}, \dots, X_T$  pertencem a mesma população. Segundo o autor, o teste não necessita que a série temporal siga uma específica distribuição de probabilidade e indica a possível posição no qual ocorreu uma ruptura.

A estatística  $U_{t,T}$  definido na fórmula abaixo indica o número de vezes em um membro da primeira amostra é maior do que o da segunda amostra.  $U_{t,T}$  é, então, definido como:

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T D_{ij} \quad (9)$$

onde  $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$ , isto é, a função sinal definida como  $\text{sgn}(x) = 1$  se  $x > 0$ ,  $\text{sgn}(x) = 0$  se  $x = 0$  e  $\text{sgn}(x) = -1$  se  $x < 0$ .

Realiza-se o cálculo de  $U_{t,T}$  no intervalo de 1 a T para cada t. A estatística  $k(t)$  do teste de Pettitt corresponde ao valor máximo de  $U_{t,T}$ . A esse valor máximo está associado um nível de significância alfa sendo, então, calculado aproximadamente pela relação:

$$p \cong 2 \exp \left\{ \frac{-6k(t)^2}{(T^3 + T^2)} \right\} \quad (10)$$

### 3.6 Outros procedimentos

#### Estimativa de chuva à montante do posto de vazão

Os valores de precipitação foram interpolados mensalmente desde 1940 a 2017 usando uma grade de  $0.1^\circ$  no domínio de  $-23.8$  a  $-19.7$  em termos de latitude e de  $-48.7$  a  $-44$  longitudinalmente. Os dados da chuva foram interpolados foi feito usando a média ponderada da distância em um raio de 111 km ou  $1^\circ$ , calculando-se a chuva na área de contribuição à montante do posto de vazão pelo método de interpolação do inverso da distância, denominado IDW (Inverse Distance Weight), que estima em grade regular a partir de amostras pontuais e aleatórias. O valor do ponto calculado  $Z(x)$  pode ser feito como descrito em Marcuzzo et al. (2011):

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (11)$$

onde n é número de pontos próximos de x,  $Z(x_i)$  é o valor da variável em  $x_i$  e  $w_i$  corresponde ao peso no ponto  $x_i$  definido em termos da distância euclidiana entre x e  $x_i$  no qual p é 2. Com isso, tem-se:

$$\omega_i = \frac{1}{h(x, x_i)^p} \quad (12)$$

A etapa seguinte consistiu na delimitação da chuva da área à montante de cada posto fluviométrico, utilizando-se o ArcGis 10.1 para delimitação da direção do fluxo e rede de drenagem, que utilizou o contorno da bacia pelo shapefile, localização geográfica dos pontos de vazão e SRTM obtido no site <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>. Nas figuras 6 a 10 são mostrados os resultados da delimitação da área à montante de cada posto nas diferentes

bacias.

### **Termo de armazenamento de água**

O termo do armazenamento  $\Delta S$  foi calculado usando dados do satélite Grace (WIESE et al, 2008). Os dados foram baixados do site [https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS\\_GRACE\\_MASCON\\_CRI\\_GRID\\_RL06\\_V1](https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS_GRACE_MASCON_CRI_GRID_RL06_V1). A variável usada corresponde a espessura de LWE (Liquid Water Equivalent), ou seja, Água Líquida Equivalente. O princípio físico corresponde a medida da gravidade associado com a coluna de massa de água líquida. O intervalo adotado vai de maio de 2002 a junho de 2017 no qual o satélite esteve em operação. Esse produto caracteriza-se pela anomalia da espessura de água equivalente em uma grade 0,5°. A resolução temporal é mensal e dados faltantes foram interpolados. Usando a equação 4, a ETP corrigida passa a ser igual  $P - Q - \Delta S$ . O termo do armazenamento foi calculado a partir da diferença entre duas medidas LWE em dois tempos próximos.

### **Escoamento básico**

O cálculo do escoamento básico foi realizado pelo pacote EcoHydRology (FUKA, 2014). Foi definido o passo igual a 3. Com isso foi possível calcular o escoamento básico a partir de vazão nas escalas anual e mensal.

### **Homogeneidade das series**

Para avaliar o grau de homogeneidade da chuva foi utilizado o método de dupla massa (Tucci, 2012). A consistência dos dados de precipitação pode ser afetada por diversos erros como erro humano ao anotar os valores de chuva, erros instrumentos causados por falha de manutenção, alteração do tipo de pluviômetro, mudança nos arredores da estação de medida ou mudança do local do pluviômetro. Esse método foi desenvolvido U.S. Geological Survey e consiste na plotagem da soma do acumulado diário ou mensal da precipitação de um determinado ponto em comparação com a soma do acumulado diário ou mensal de uma estação considerada como referência. Nesse trabalho, a soma do acumulado foi dividido pelo intervalo da série de modo que o valor final representasse a chuva climatológica no posto em questão. O posto de referência adotado foi 02345067 para a bacia do Paraíba do Sul, D3-018 para a bacia do PCJ, C4-043 para a bacia do Pardo, D4-030 para bacia do Mogi-Guaçu e B4-021 para a bacia do Sapucaí. A escolha desses pontos justifica-se em termos de melhor representatividade. Nos anexos A são mostrados os resultados da aplicação do método de dupla massa.

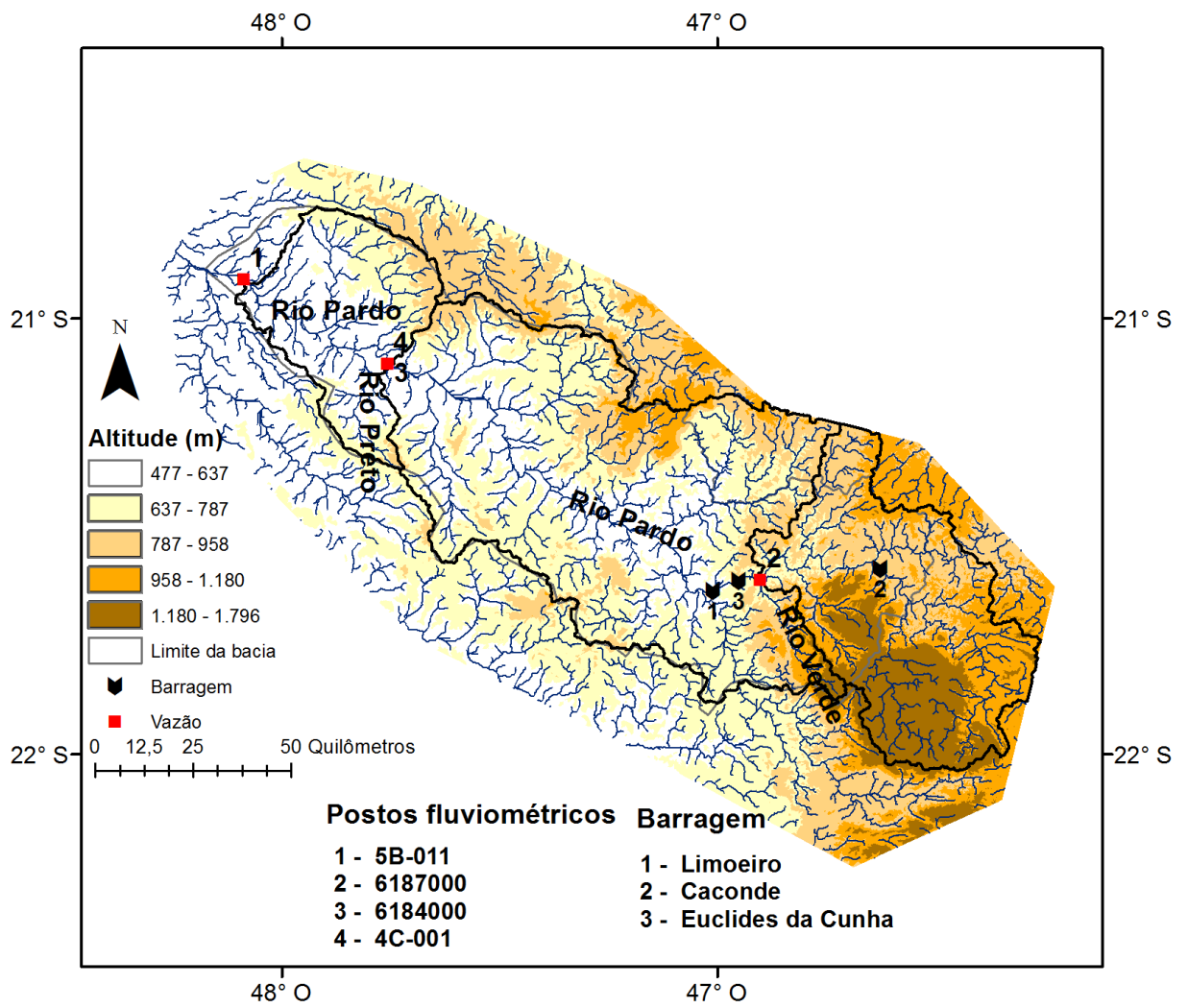


Figura 7 – Mapa com delimitação das áreas à montante dos postos na bacia do rio Pardo.



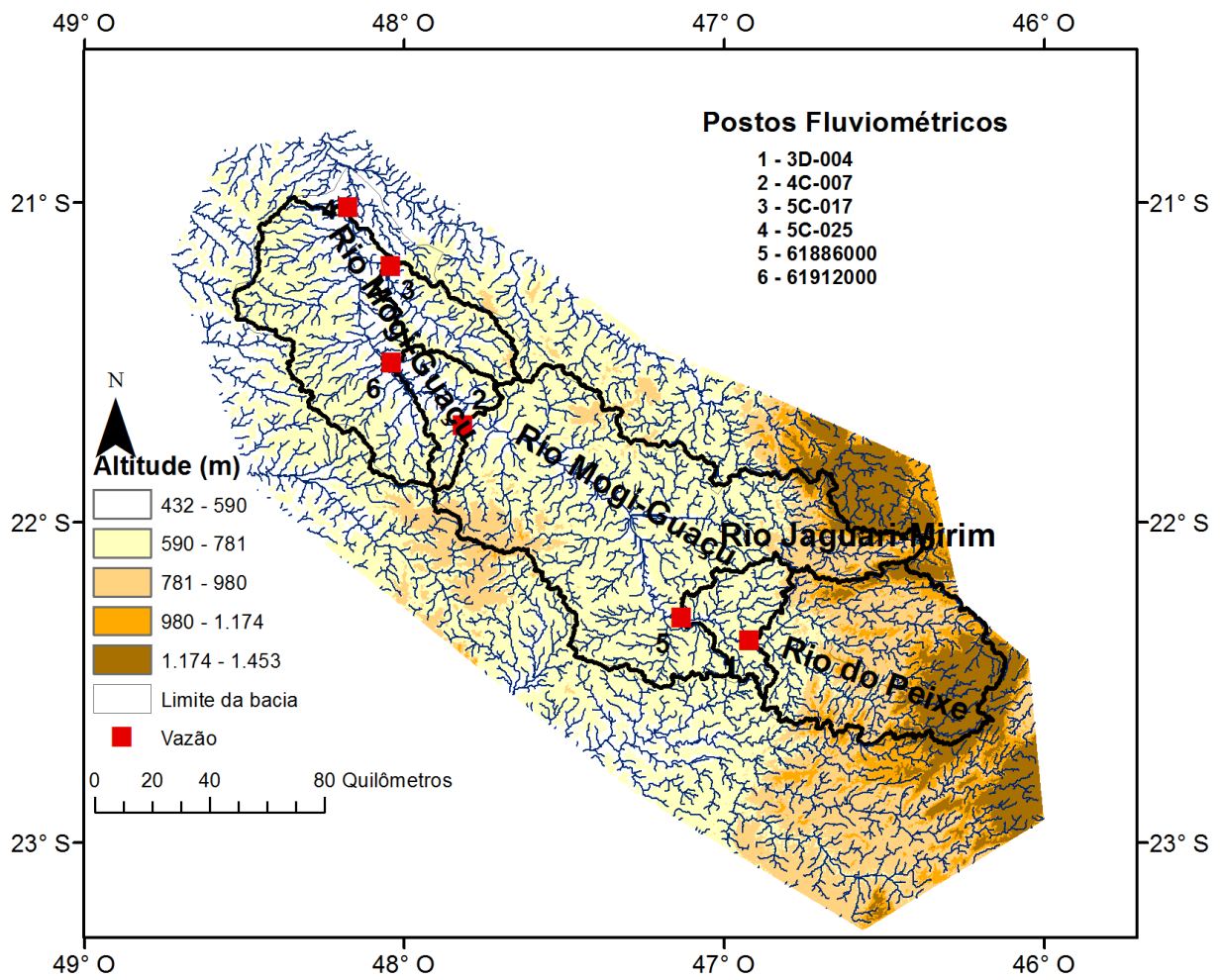


Figura 8 – Mapa com delimitação das áreas à montante dos postos na bacia do rio Mogi-Guaçu.

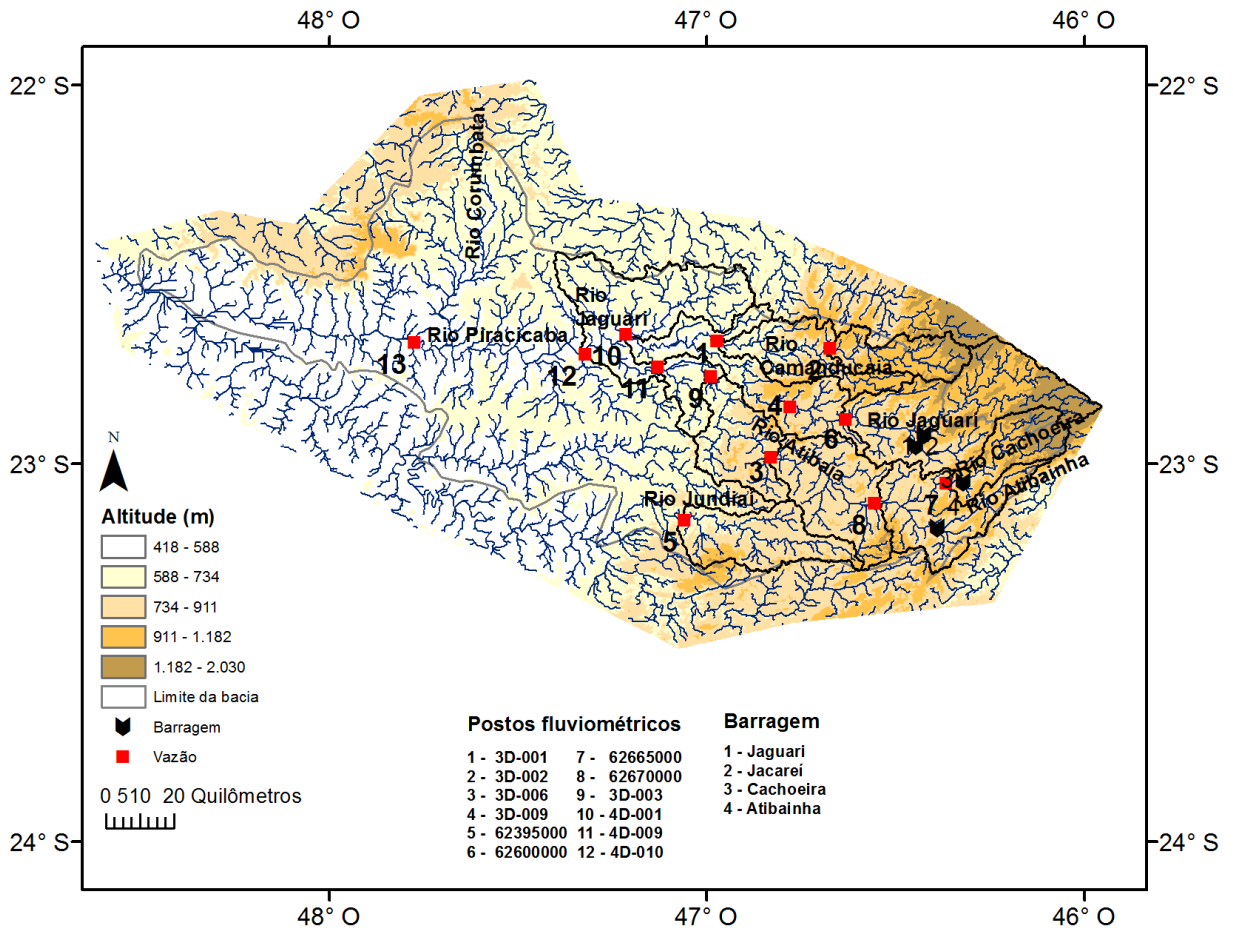


Figura 9 – Mapa com delimitação das áreas à montante dos postos na bacia do PCJ.

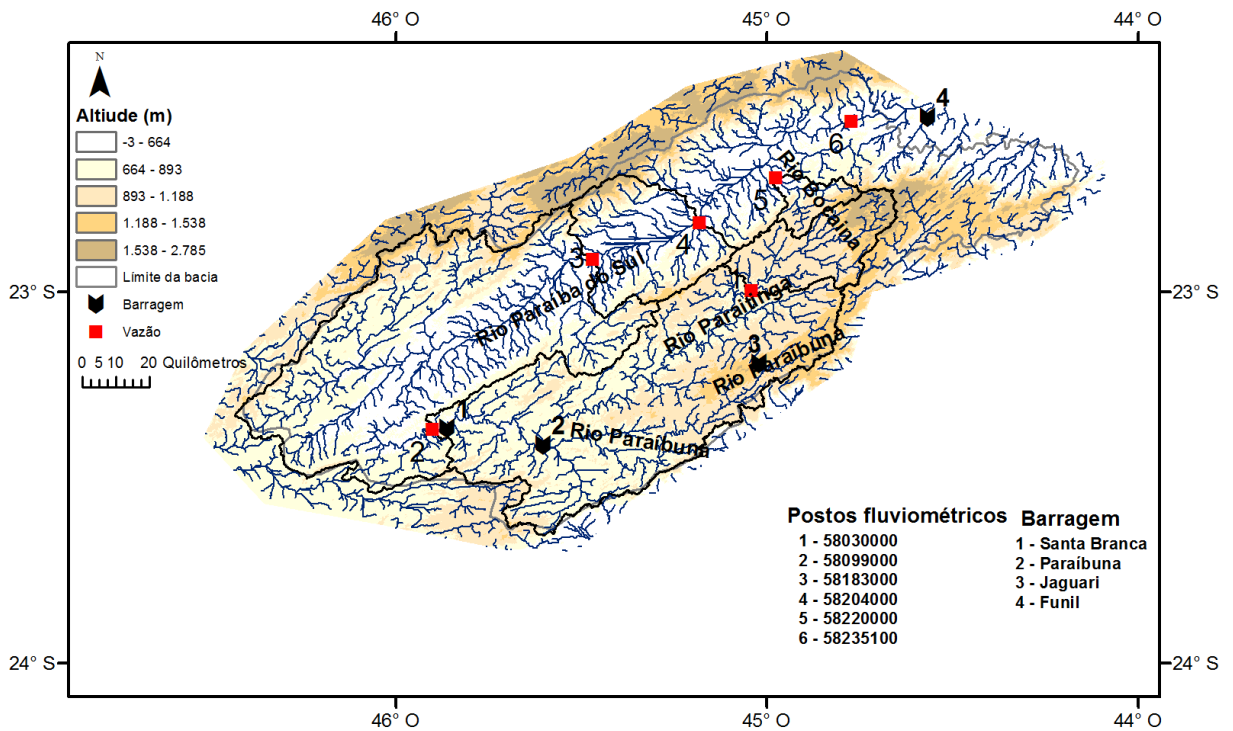


Figura 10 – Mapa com delimitação das áreas à montante dos postos na bacia do Paraíba do Sul.

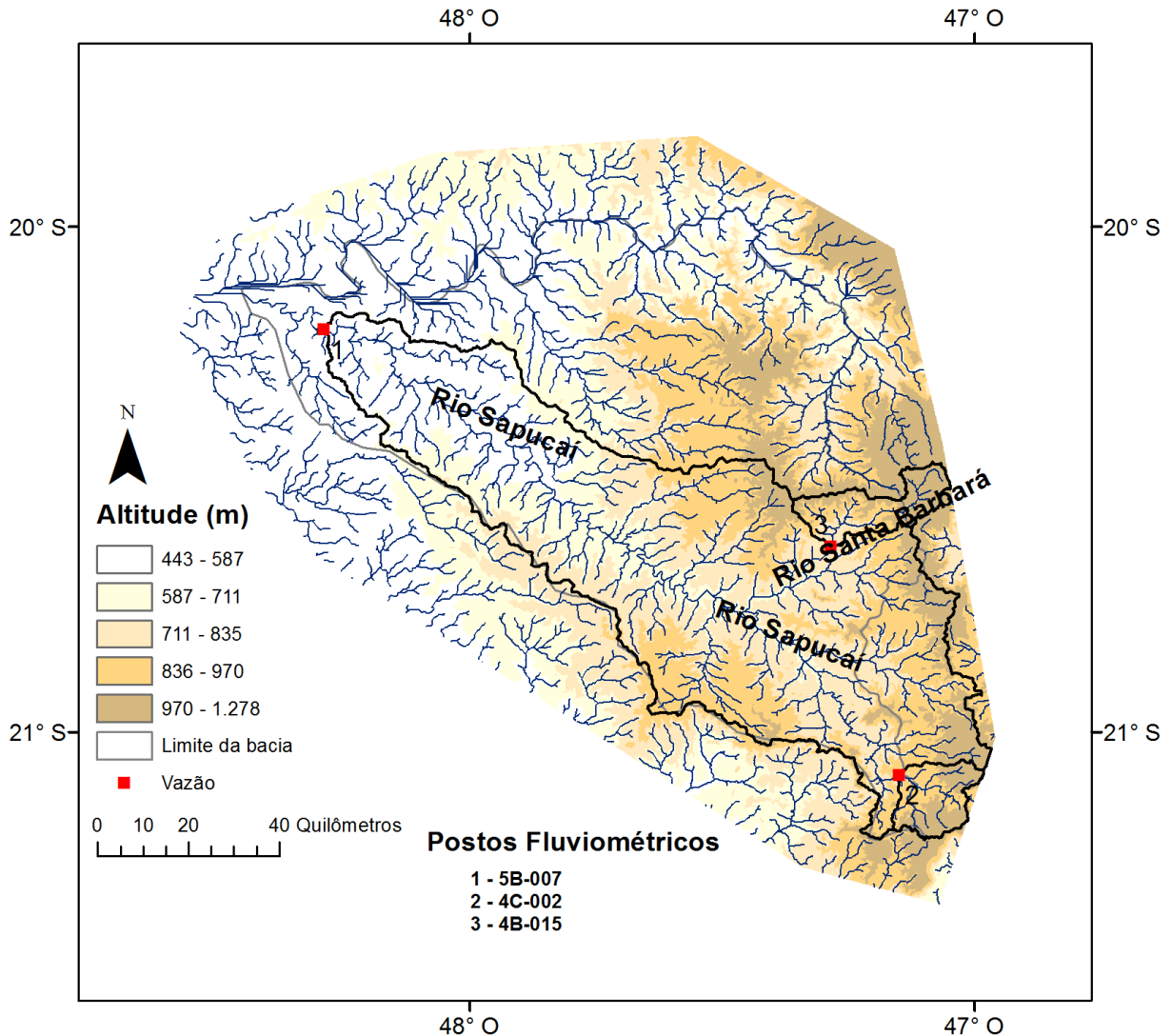


Figura 11– Mapa com delimitação das áreas à montante dos postos na bacia do Sapucaí. A linha mais grossa representa o limite entre os estados de São Paulo e Minas Gerais.

Para a detecção de mudança de regime na série de acumulado anual de chuva foi utilizado uma implementação em R conforme Rodionov (2004). Esse algoritmo busca e delimita pontos indicativos de mudanças nos padrões estatísticos das variáveis como a média por meio da determinação do RSI (Regime Shift Index). Quando maior o valor de RSI mais representativo é a ocorrência de um ponto de ruptura associado a esse ano específico com um nível de probabilidade  $p$  igual 0.05. Valores negativos representam uma situação no qual o algoritmo falhou na detecção de mudança. Além do algoritmo de Rodionov (2004) foi usado o teste de Pettitt (1979) para detecção de pontos de ruptura nas séries de chuva e vazão.

A análise de frequência (ou permanência) da vazão máxima foi realizada usando através de ajuste paramétrico usando a função de distribuição de probabilidade Log Pearson Type III por meio do Método dos Momentos. A ferramenta usada para esse fim foi o HEC-SSP (Brunner, 2010) possibilitando o cálculo da frequência de vazão, o intervalo de confiança entre 5 e 95 % e detecção de outliers. Foram usadas as configurações padrões do programa em termos de Skew, detecção de outliers, posição de plotagem e limites de confiança.

## 4.0 Resultados

### 4.1 Análise de consistência

A figura 12 mostra um exemplo da aplicação do método de dupla massa onde, por exemplo, nota-se mudanças nos padrões de precipitação na década de 40 e 50 e na década de 90 para estação 02346097. Alterações nos padrões de linearidades podem ser observadas também nos postos D3-009 e 02347057.

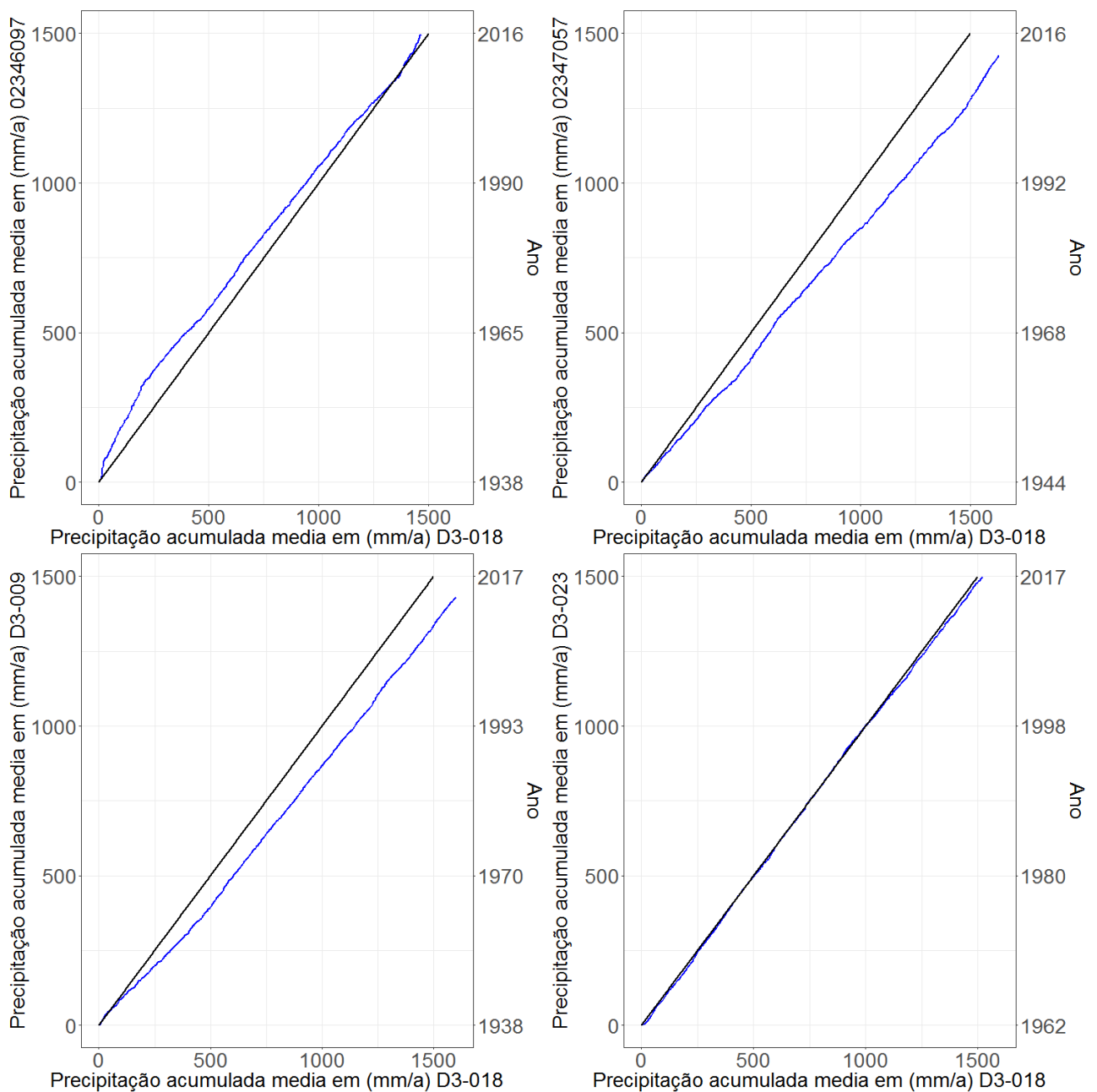


Figura 12 - Precipitação acumulada média em (mm/a) para 4 diferentes estações da bacia do PCJ sem qualquer correção comparada com uma estação de referência no caso D3-018. A reta 1 por 1 está representado pela linha preta.

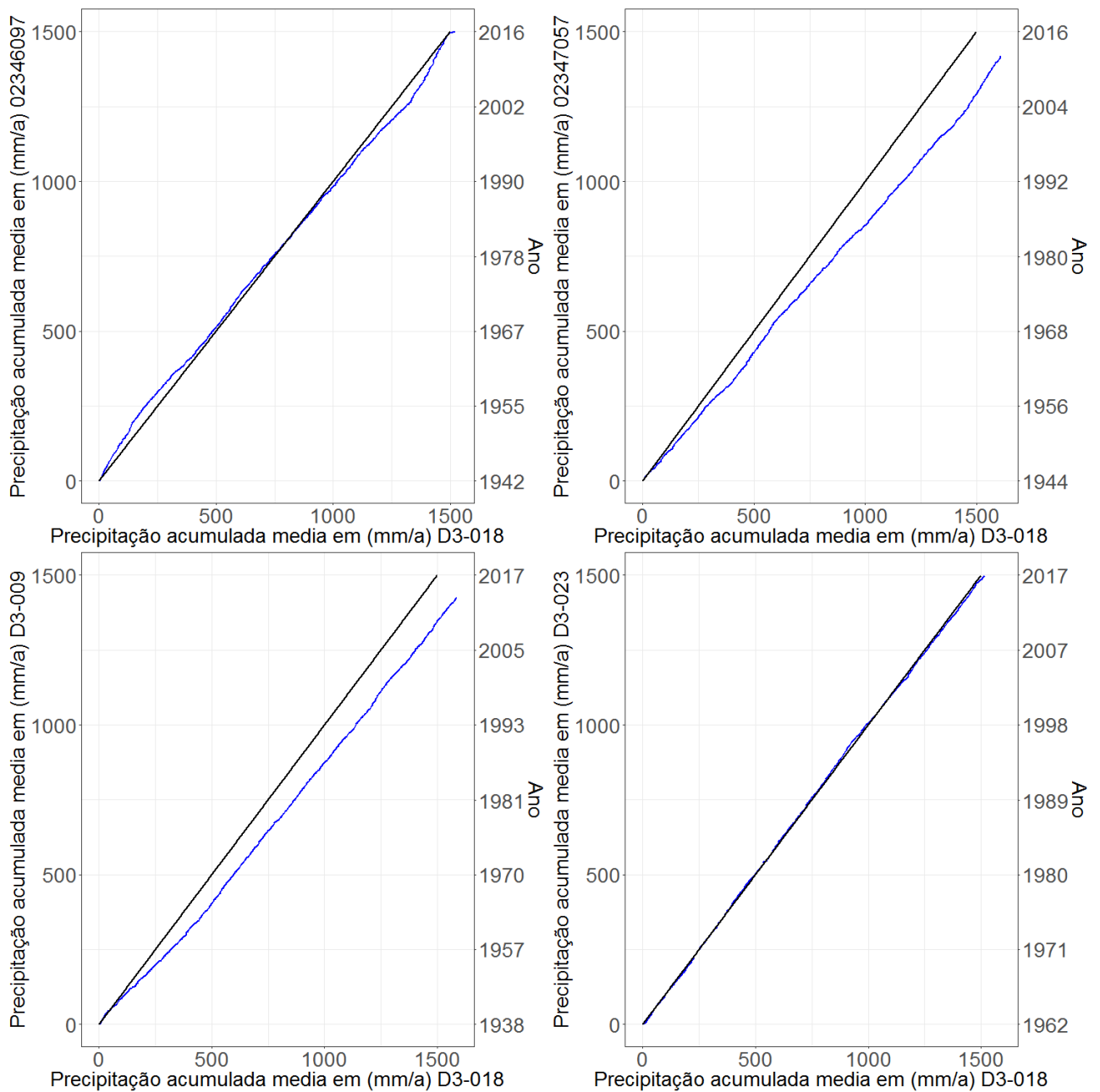


Figura 13 – Precipitação acumulada média em (mm/a) para 4 diferentes estações da bacia do PCJ com correção comparada com uma estação de referência no caso D3-018.

Na figura 13 mostra-se o resultado da aplicação do método de dupla após a eliminação ou correção de valores inconsistente na série de precipitação. A atenuação da inconsistência da chuva deu-se especialmente nas estações 02346097 e 02347057.

#### 4.2. Variabilidade interanual de chuva e vazão nas bacias

As médias anuais de longo prazo de vazão, vazão específica e precipitação para todas as bacias estão descritas na tabela 9, com as séries temporais nas Figs. 14 a 16, discutidas a

seguir. A vazão específica (em mm) será por simplicidade denominada de vazão nas discussões a seguir, exceto quando for vazão absoluta (em  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ).

De forma geral, para cada bacia nota-se que todos os postos oscilam na escala de variabilidade interanual aproximadamente em pulsos síncronos, o que sugere haver razoável correlação entre eles, que deve ser a princípio devido à uma variabilidade interanual de precipitação comum à montante de todos os postos em cada uma das bacias.

Um padrão notado de forma geral para todas as bacias por inspeção visual é o senso de aumento da precipitação ao longo do tempo, desde 1940 até aproximadamente 1985, a partir do que então a média mostrou-se estacionária aparentemente. Esta mesma percepção de variabilidade de longo prazo é notada para as séries de vazão, mas com menor nitidez. Ou seja, também um aumento progressivo aumento da vazão até meados da década de 1980, e daí em diante em regime estacionário. A marcante diferença deste padrão de variabilidade da vazão ocorreu nos rios PCJ (Fig. 14), onde a maioria dos postos mostraram uma queda expressiva de vazão a partir da década de 1980, exceto os postos de código 3D-001, 3D-002, 4D-009, 62395000, estes últimos por sua vez tendo em comum não haver barramento à montante (o posto 4D-009 na sub-bacia do Rio Atibaia na verdade tem um barramento de aproximadamente 100 km à montante na represa do rio Atibainha, que é uma das formadoras do Sistema Cantareira). Pode-se assim associar esta redução de vazão de vários postos dos rios PCJ devido à transposição de águas para o Sistema Cantareira à montante, que desviou água do curso natural aproximadamente a partir de 1982 quando houve o enchimento das represas.

Na bacia do PCJ notam-se alguns episódios de variabilidade entre os postos. Em anos chuvosos como, por exemplo, 1958 há grande variabilidade de vazão entre os postos, e o contrário ocorre em anos secos como, por exemplo, 1969. Também interessante notar a semelhança entre a precipitação nos anos de 1964 e 2014, mas vazão em 2014 foi em torno de 100 mm menor na maioria dos postos.

Na bacia do Mogi-Guaçu uma alta proximidade entre si em todo o intervalo, exceto no posto 5C-017. Nota-se que anos mais chuvosos como 1976 e 1983 resultaram em valores maiores de vazão enquanto anos mais secos como 1969 e 2014 analogamente uma menor vazão. A seca de 2014 resultou em níveis de vazão semelhantes a 1969, porém não deve a mesma magnitude de queda conforme notado na bacia do PCJ (figura 14).

Algumas características particulares foram notadas para os rios Mogi-Guaçu e Rio Pardo (Figs. 17 e 18): a variabilidade interanual de vazão é mais forte até aproximadamente 1975, a partir do que as médias anuais são mais regulares, ou de menor variação ano a ano. Para o Rio Pardo Santos et al (2015) observou que a vazão máxima anual no posto 4C-001 entre 1941 a 2013 mostrou nítida tendência de aumento, mas que por inspeção visual aparentemente não se manifesto no intervalo até 2017 mostrado na Fig. 17. Ainda no R. Pardo chama a atenção os anos de alta pluviometria entre 1965 a 1967 e que mostraram alta vazão, comparado com o ano de 1970 que teve precipitação tão alta quanto naqueles três anos mas que mostrou vazão relativamente muito baixa, e que sucedeu dois anos anteriores (1968 e 1969) com baixa chuva e vazão. Este episódio de 1970 sugere a ocorrência de direcionamento da chuva para recarga do solo e aquífero, em detrimento da geração de vazão superficial.

Dentre os anos mais secos de precipitação, em comum para os rio Sapucaí, Pardo e Mogi-Guaçu, destacando-se 1969 e 2014, notou-se que a vazão indicaram valores semelhantes nos dois anos para todas estas bacias.

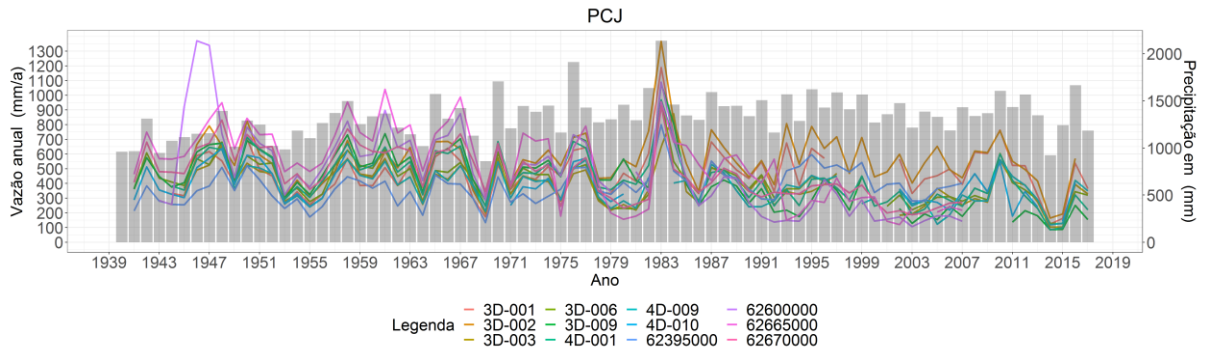


Figura 14 – Para as bacias dos rios PCJ: Vazão anual (mm/a) nos postos (linhas) e precipitação anual (mm/a) como média espacial à montante dos postos na bacia (barras).

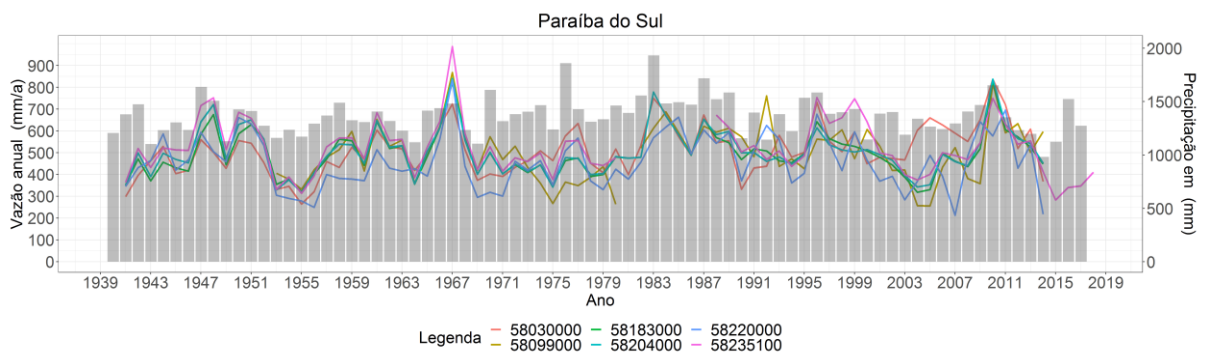


Figura 15 - id. Fig. 14 para a bacia do Rio Paraíba do Sul

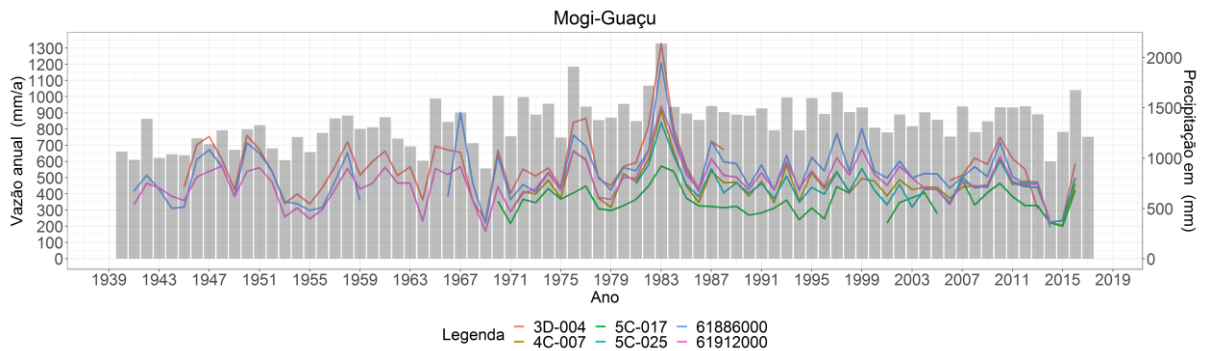


Figura 16 – id. Fig. 14 para a bacia do Rio Mogi-Guaçu

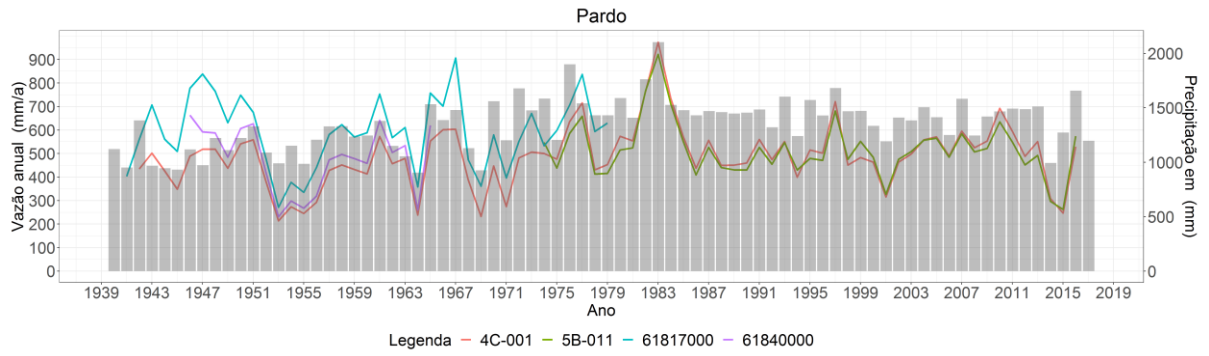


Figura 17 – id. Para a bacia do Rio Pardo

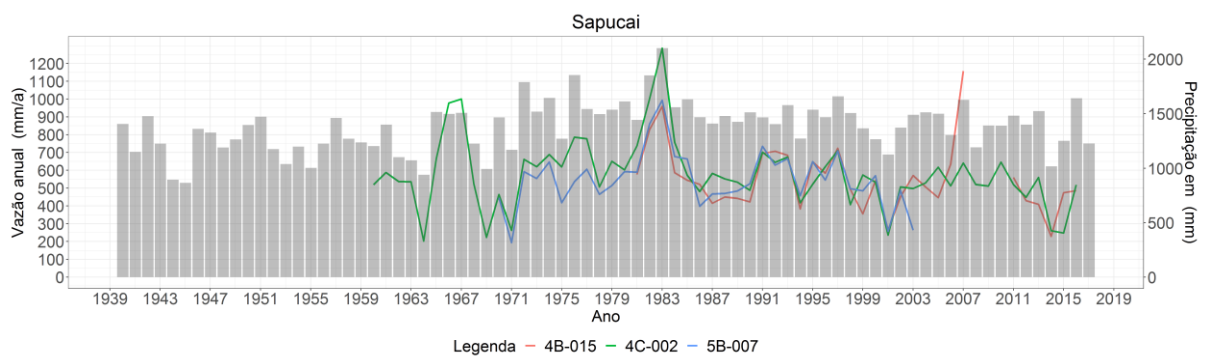


Figura 18 - id. para bacia do Rio Sapucaí



### 4.3 Hidrograma e pluviograma médios mensais

As médias mensais de longo prazo de vazão, escoamento básico e precipitação para todas as bacias têm as séries temporais ilustradas nos hidrogramas e pluviogramas das Figs. 19 a 23, discutidas a seguir.

Comparando-se chuva e vazão (lado-b das Figs. 19 a 23), de forma geral para todas as bacias nota-se que o pico de precipitação ocorre em Janeiro, enquanto para a vazão se dá geralmente com um mês de atraso em Fevereiro. Mais detalhadamente, a vazão entre Janeiro a Março geralmente varia pouco, como se ocorresse um máximo suavizado, ao lado da grande diferença de precipitação no decorrer deste trimestre. Nos postos do PCJ há uma pequena exceção a este padrão, onde o máximo tende a centrar-se em Janeiro. Mas de forma geral é marcante a queda de chuva desde Janeiro (em torno de 240 mm mês<sup>-1</sup>) continuamente até Março (atingindo aproximadamente 170 mm mês<sup>-1</sup>) nas bacias com variações entre elas. Neste trimestre chuvoso a média de vazão gira em torno de 75 mm mês<sup>-1</sup>, sendo um pouco mais elevadas nas bacias do Sapucaí e Pardo, menores no PCJ e Paraíba do Sul, e com grande variabilidade entre os postos no Mogi-Guaçu.

A precipitação mínima ocorre sempre em Agosto, em torno de 25 mm mês<sup>-1</sup>, comparando-se todas as bacias. As vazões mínimas ocorrem geralmente em agosto e setembro de forma suavizada, coincidentemente em torno de valores também próximos da chuva, 20 a 30 mm mês<sup>-1</sup>, sendo um pouco menores nas bacias do Sapucaí, Pardo e Mogi-Guaçu, e levemente acima nas demais bacias PCJ e Paraíba do Sul.

Comparando-se vazão e escoamento básico (lado-a das Figs. 19 a 23), de forma geral enquanto o pico de vazão é mais bem distribuído de Janeiro a Março, o escoamento máximo atinge o máximo marcadamente em Março, para todas as bacias. Isso parece razoável uma vez que o aquífero passaria por um período predominantemente de carga até Março, a partir do qual dominaria um regime de descarga. Na verdade ocorrem geralmente carga e descarga simultaneamente do aquífero a todo tempo, mas um dos modos tende a dominar o outro ao longo da sazonalidade. Os picos do escoamento básico deram-se em torno de 50 mm mês<sup>-1</sup> para os rios Pardo e Sapucaí, e um pouco abaixo em torno de 30 mm mês<sup>-1</sup> mas com grande variabilidade entre os postos para as demais bacias. O mínimo do escoamento básico coincide com a vazão em Agosto-Setembro, com um pequena diferença abaixo da vazão que foi de aproximadamente 5 mm mês<sup>-1</sup>,

O posto 58099000 no rio Paraíba do Sul (Figura 20b) caracteriza-se por vazões com pouca variação sazonal, o que pode ser explicado pelo controle à montante do represamento das águas na barragem de Paraibuna.

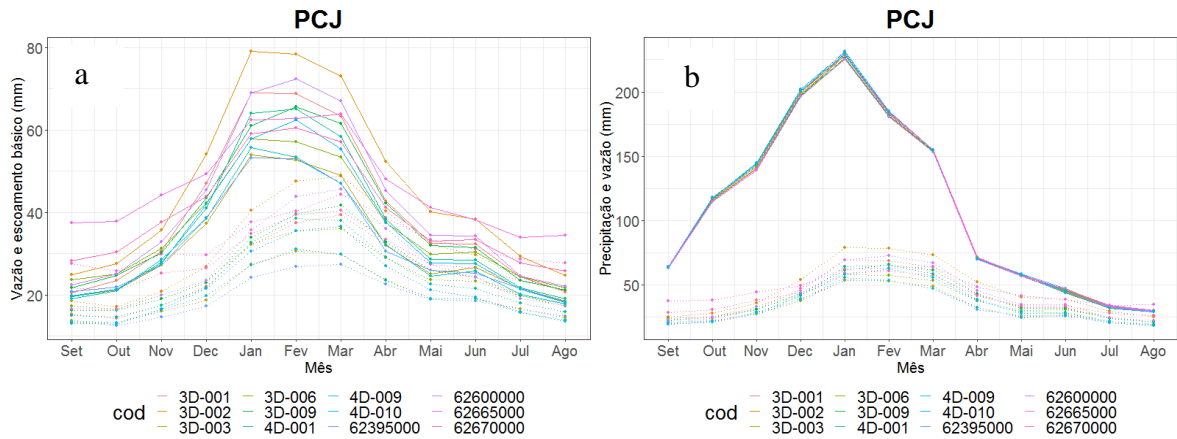


Figura 19 – Para a bacia do PCJ: a) Hidrograma da vazão (linha contínua) e escoamento básico (linha tracejada). b) Hidrograma da precipitação (linha contínua) e vazão (linha tracejada), no ano hidrológico.

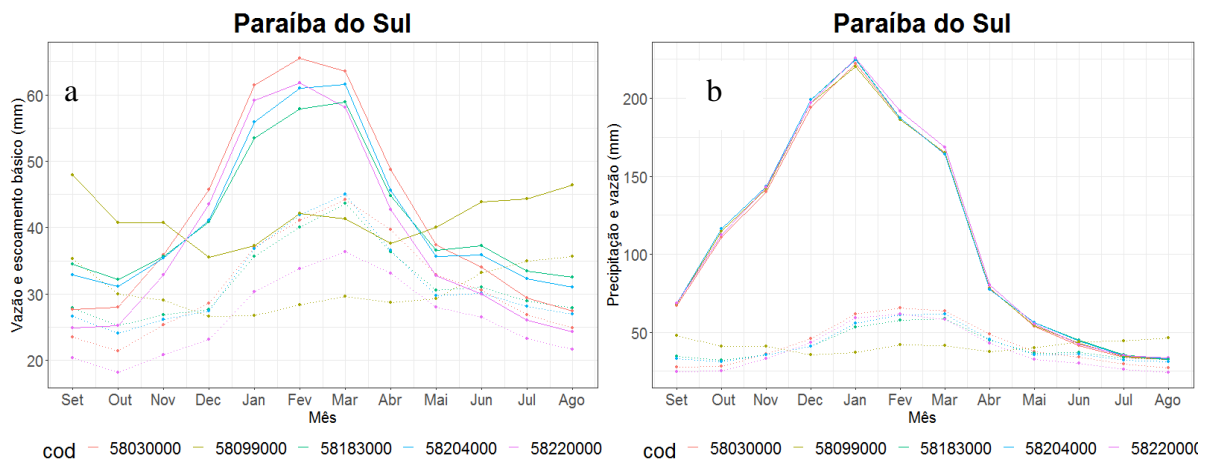


Figura 20 – Para a bacia do R. Paraíba do Sul: a) Hidrograma da vazão (linha contínua) e escoamento básico (linha tracejada). b) Hidrograma da precipitação (linha contínua) e vazão (linha tracejada), no ano hidrológico.

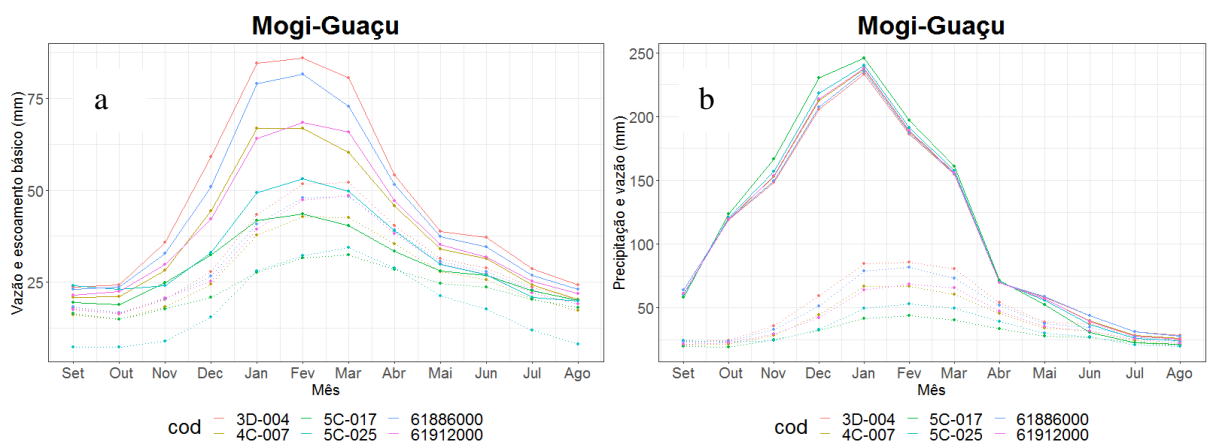


Figura 21– Para a bacia do R. Mogi-Guaçu a) Hidrograma da vazão (linha contínua) e escoamento básico (linha tracejada). b) Hidrograma da precipitação (linha contínua) e vazão (linha tracejada), no ano hidrológico.

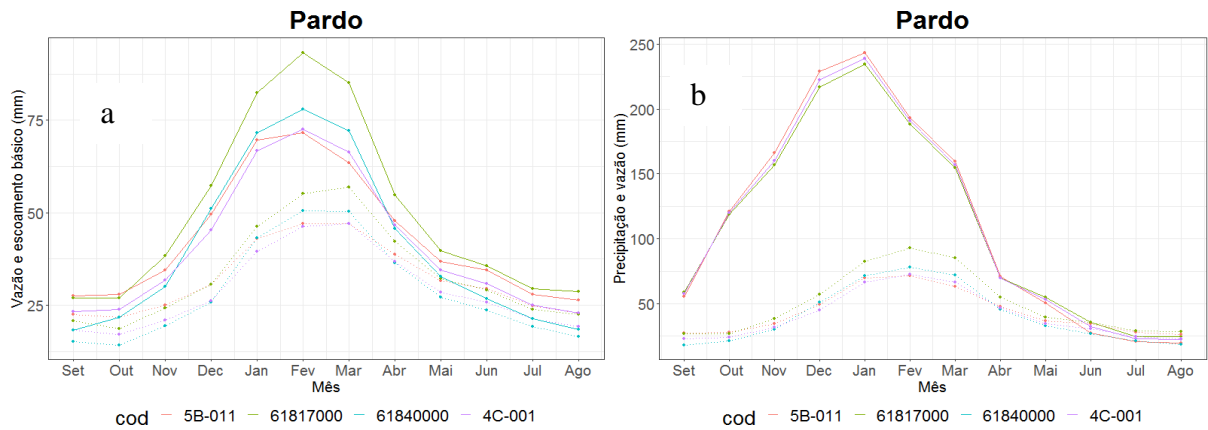


Figura 22 – Para a bacia do R. Pardo: a) Hidrograma da vazão (linha contínua) e escoamento básico (linha tracejada). b) Hidrograma da precipitação (linha contínua) e vazão (linha tracejada), no ano hidrológico.

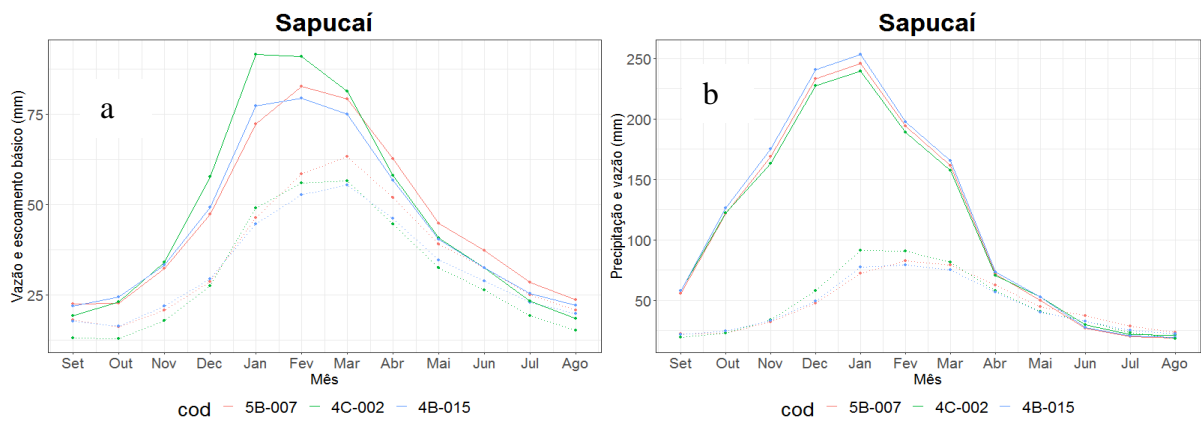


Figura 23 – Para a bacia do PCJ: a) Hidrograma da vazão (linha contínua) e escoamento básico (linha tracejada). b) Hidrograma da precipitação (linha contínua) e vazão (linha tracejada), no ano hidrológico.

#### 4.4 Balanço hídrico e mudanças de regime hidrológico

##### Bacia dos rios PCJ

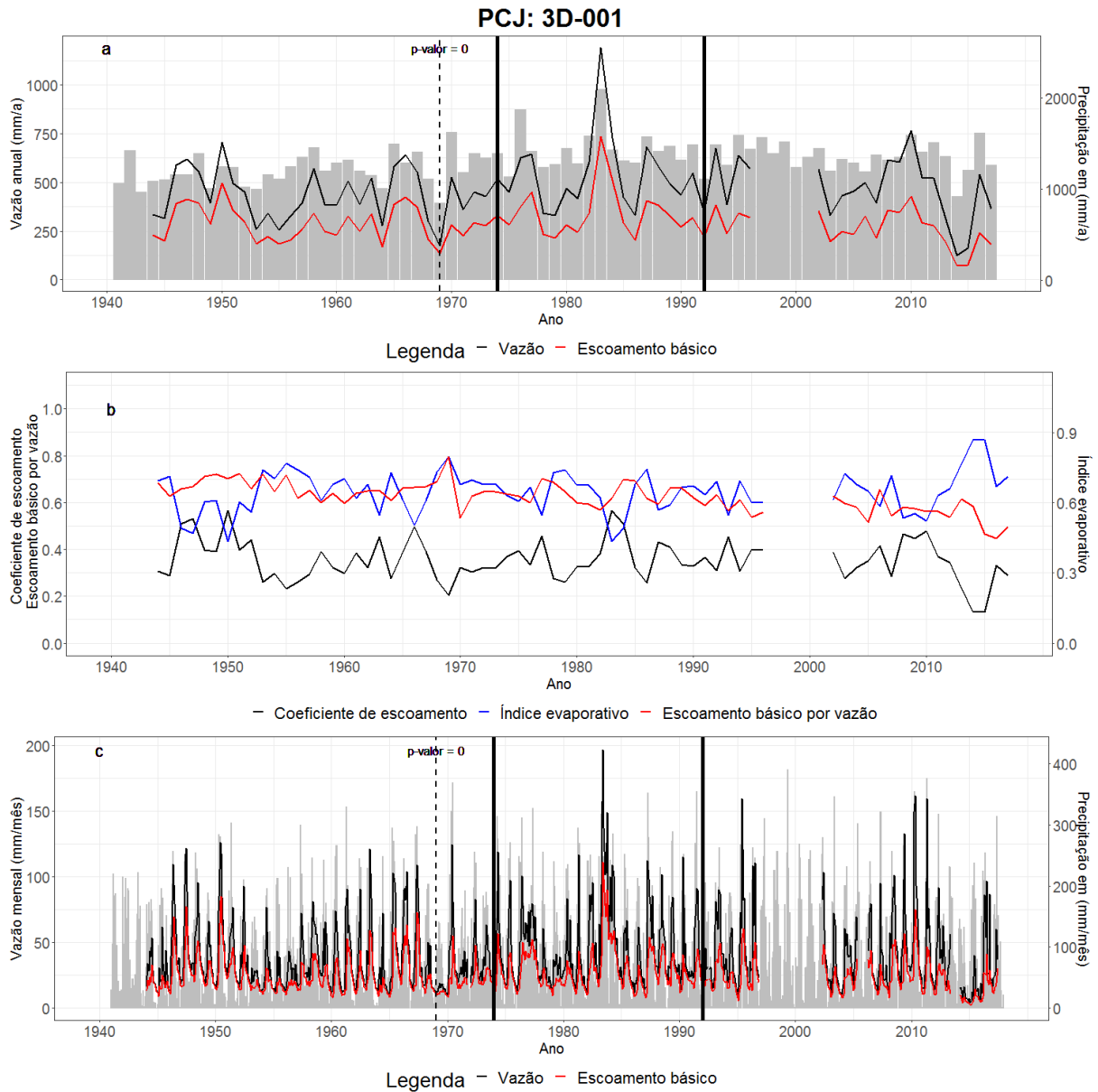


Figura 24 – Séries temporais para o posto 3D-001 no Rio Camanducaia da bacia dos rios PCJ: a) vazão média anual (linha preta) e chuva acumulada anual (barra cinza) e escoamento básico médio anual (linha vermelha); b) Coeficiente de escoamento (linha preta), índice evaporativo (linha azul) e índice de escoamento básico (linha vermelha); c) vazão média mensal (linha preta), escoamento básico médio mensal (linha vermelha) e chuva mensal (linha cinza). As linhas verticais sólidas em (a,c) são limites de regimes distintos de chuva estimados cf Rodionov (2004).

As Figuras 24 a 54 mostram as séries de médias mensais e anuais de vazão e precipitação para os postos investigados, e as séries de médias anuais da estimativa de partição dos componentes (coeficiente de escoamento, índice evaporativo e índice do escoamento básico). Nestas figuras também são indicados as detecções de mudanças de regime segundo o teste de Rodionov (2004).

A figura 24 no posto 3D-001 do rio Camanducaia nas bacias PCJ mostra que detecção de ponto de ruptura em três períodos no regime de chuva. O primeiro no período antes de 1974 no qual a precipitação situou-se na média de 1214 mm, seguido de um período entre 1974 e 1992 com precipitação média de 1481 mm, e finalmente o terceiro período posterior a 1992 com chuva média de 1362 mm. A vazão nos três períodos, respectivamente, apresentaram valores de 436 mm, 534 mm e 468 mm. O coeficiente de escoamento, o índice de escoamento básico e o índice evaporativo não apresentaram rupturas significativas.

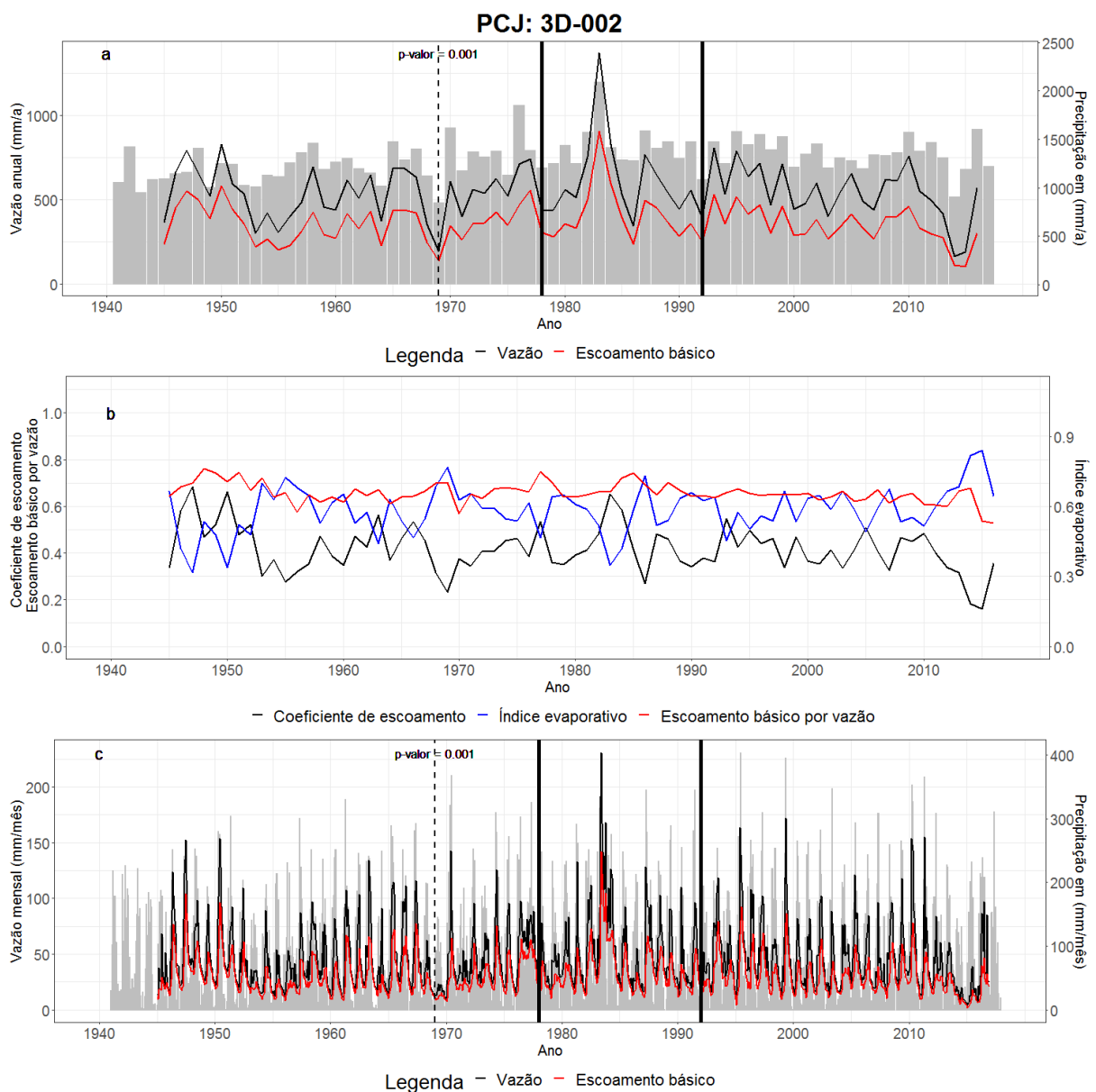


Figura 25– Id. Fig. 23 para o posto 3D-002.

A figura 25 no posto 3D-002 do rio Camanducaia nas bacias PCJ mostra que detecção de ponto de ruptura em três períodos no regime de chuva, similar ao posto 3D-001 (Fig. 23). O primeiro abrange o período antes de 1978 no qual a precipitação situou-se na média de 1234 mm, seguido de um período entre 1978 e 1992 com precipitação média de 1401 mm e, finalmente, o terceiro período posterior a 1992 com chuva média de 1347 mm. A vazão específica nos três períodos, respectivamente, apresentaram valores de 542 mm, 608 mm e 540 mm. O coeficiente de escoamento, o índice de escoamento básico e o índice evaporativo não apresentaram rupturas significativas.

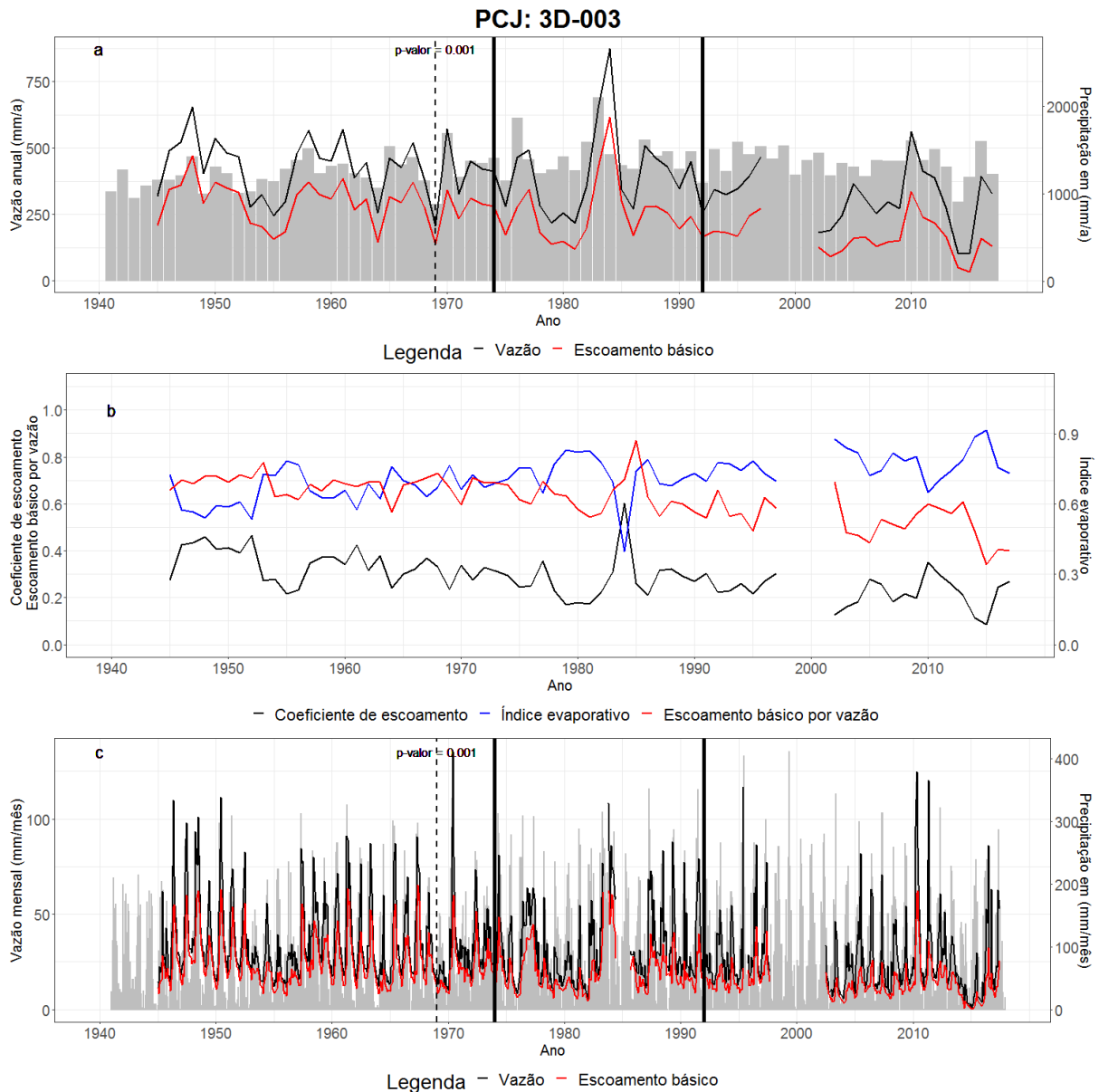


Figura 26 – Id. Fig. 23 para o posto 3D-003.

A figura 26 no posto 3D-003 do rio Atibaia nas bacias PCJ mostra que detecção de ponto de ruptura em três períodos no regime de chuva, similar ao posto 3D-001 (Fig. 24). No período anterior a 1974, a precipitação média foi de 1231 mm e vazão específica de 429 mm. Entre 1974 e 1992, a precipitação média situou-se em 1430 mm e vazão específica foi de 399 mm. E, por fim, a partir de 1992 a precipitação média foi de 1362 mm e a vazão específica foi

de 310 mm. Nota-se uma forte tendência temporal de queda no coeficiente de escoamento e um aumento no índice evaporativo, que provavelmente decorreu da divergência da água superficial à montante do posto para o Sistema Cantareira.

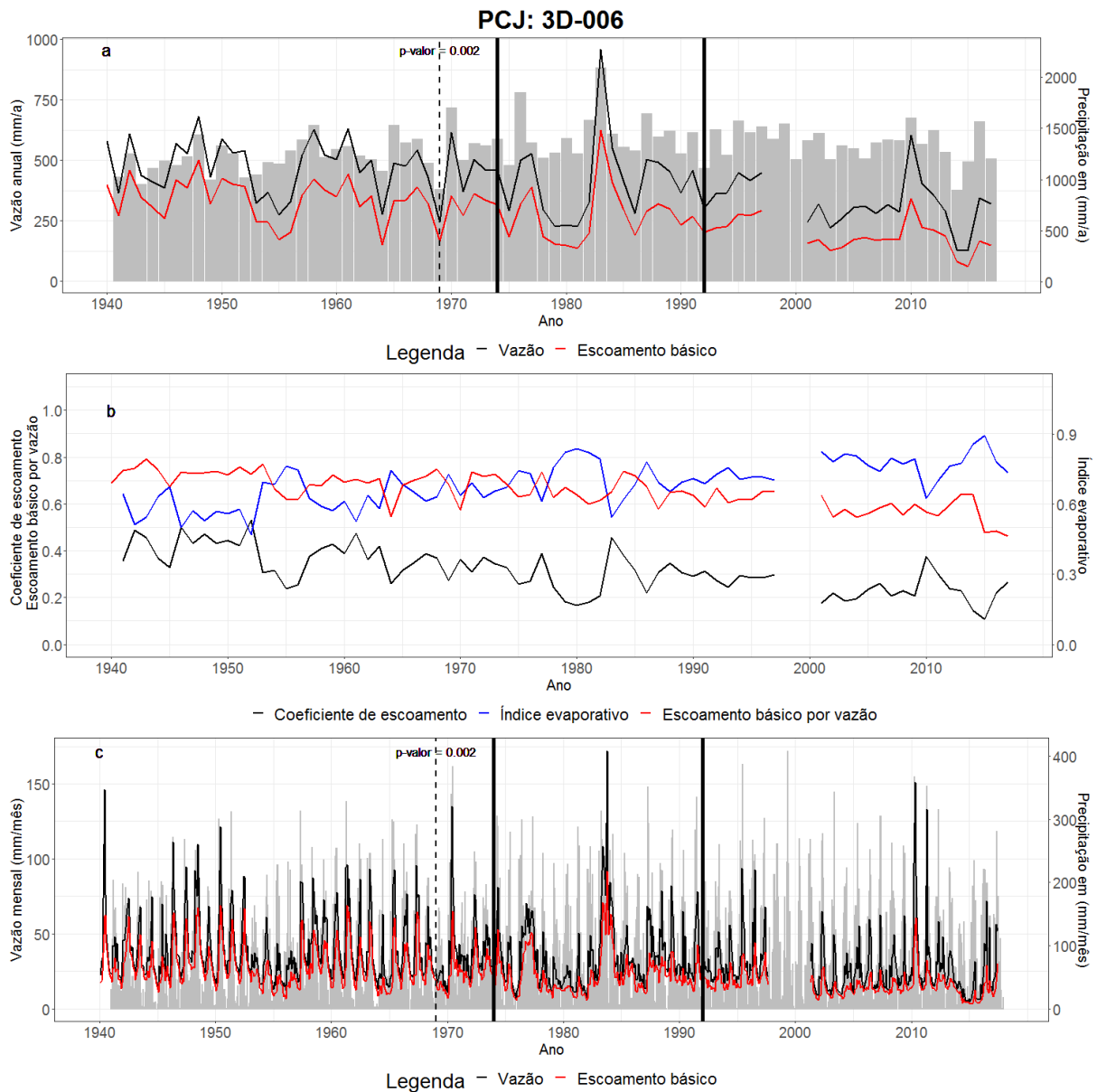


Figura 27 – Id. Fig. 24 para o posto 3D-006 do rio Atibaia dos rios PCJ.

De forma semelhante ao da Fig. 26, notou-se um padrão semelhante nos seguintes postos dos rios PCJ:

- 3D-006 do rio Atibaia (Fig. 26),
- 4D-009 do rio Atibaia (Fig. 27),
- 62670000 do rio Atibaia (Fig. 28),
- 6260000 no rio Jaguari (Fig. 29),
- 3D-009 no rio Jaguari (Fig. 30),
- 4D-001 no rio Jaguari (Fig. 31),
- 62665000 no rio Jaguari (Fig. 32).
- 4D-010 no rio Piracicaba (Fig. 34).

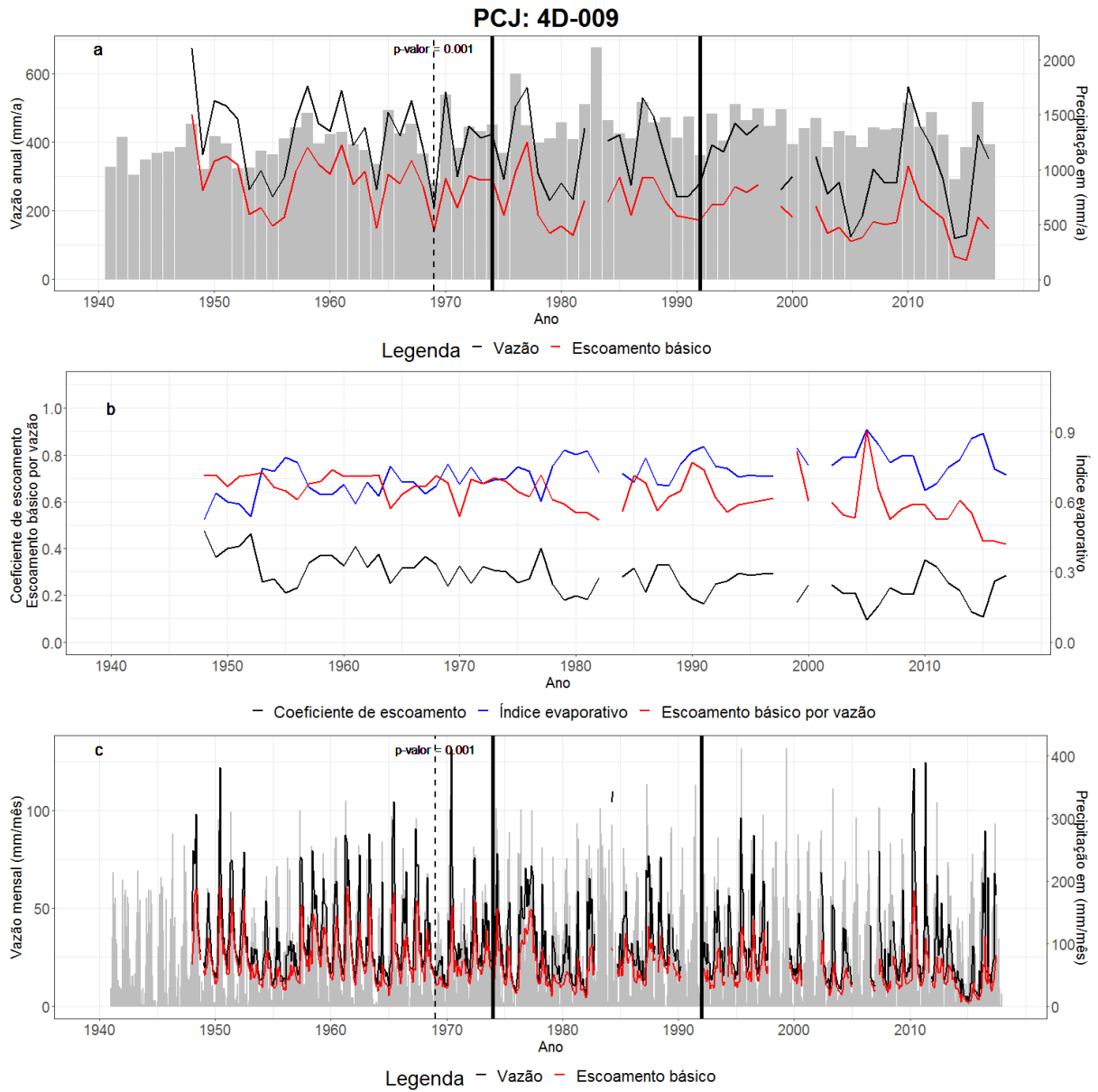


Figura 28 – Id. Fig. 24 para o posto 4D-009 do rio Atibaia dos rios PCJ.



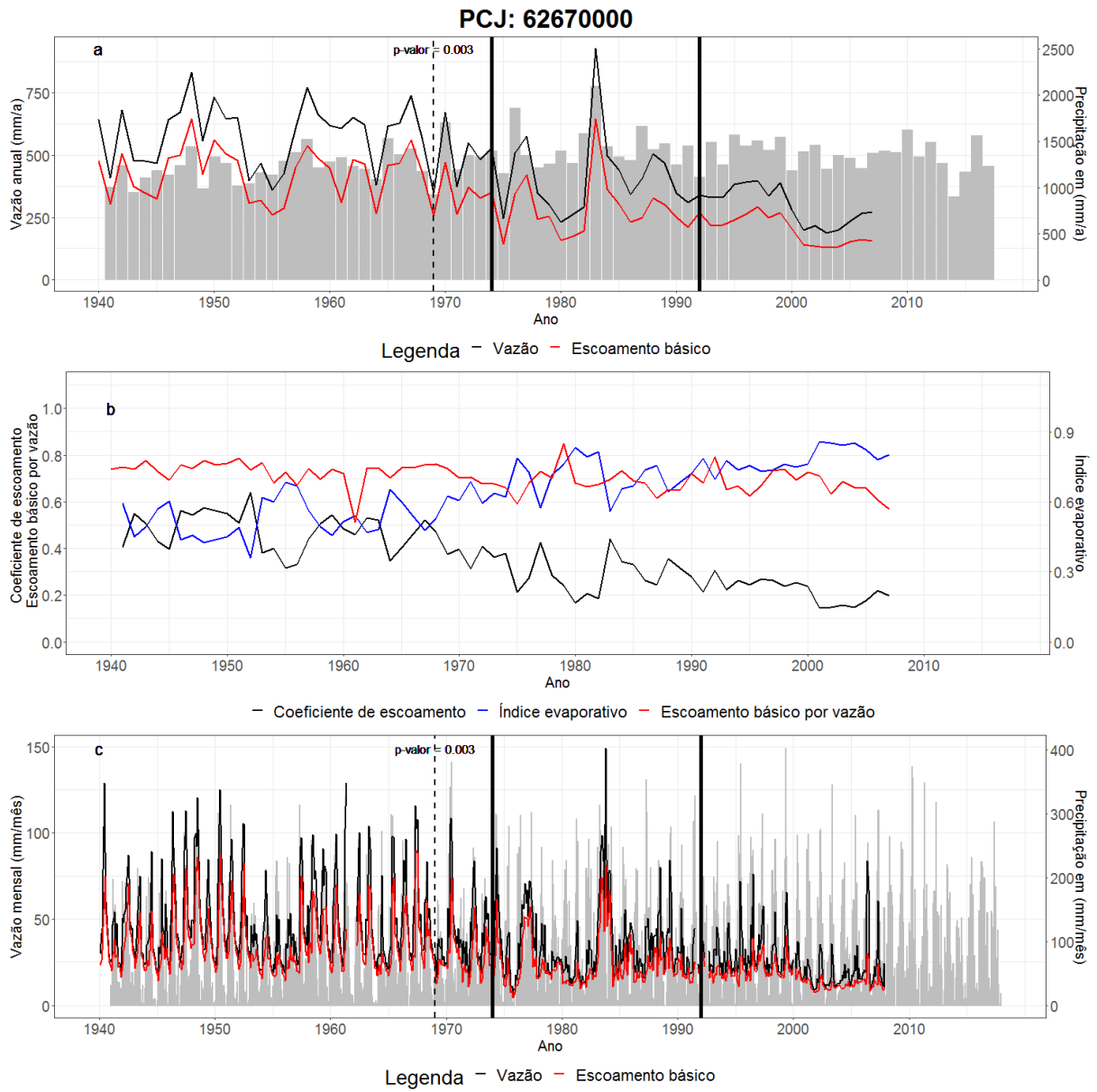


Figura 29– Id. Fig. 24 para posto 62670000 do rio Atibaia dos rios PCJ.

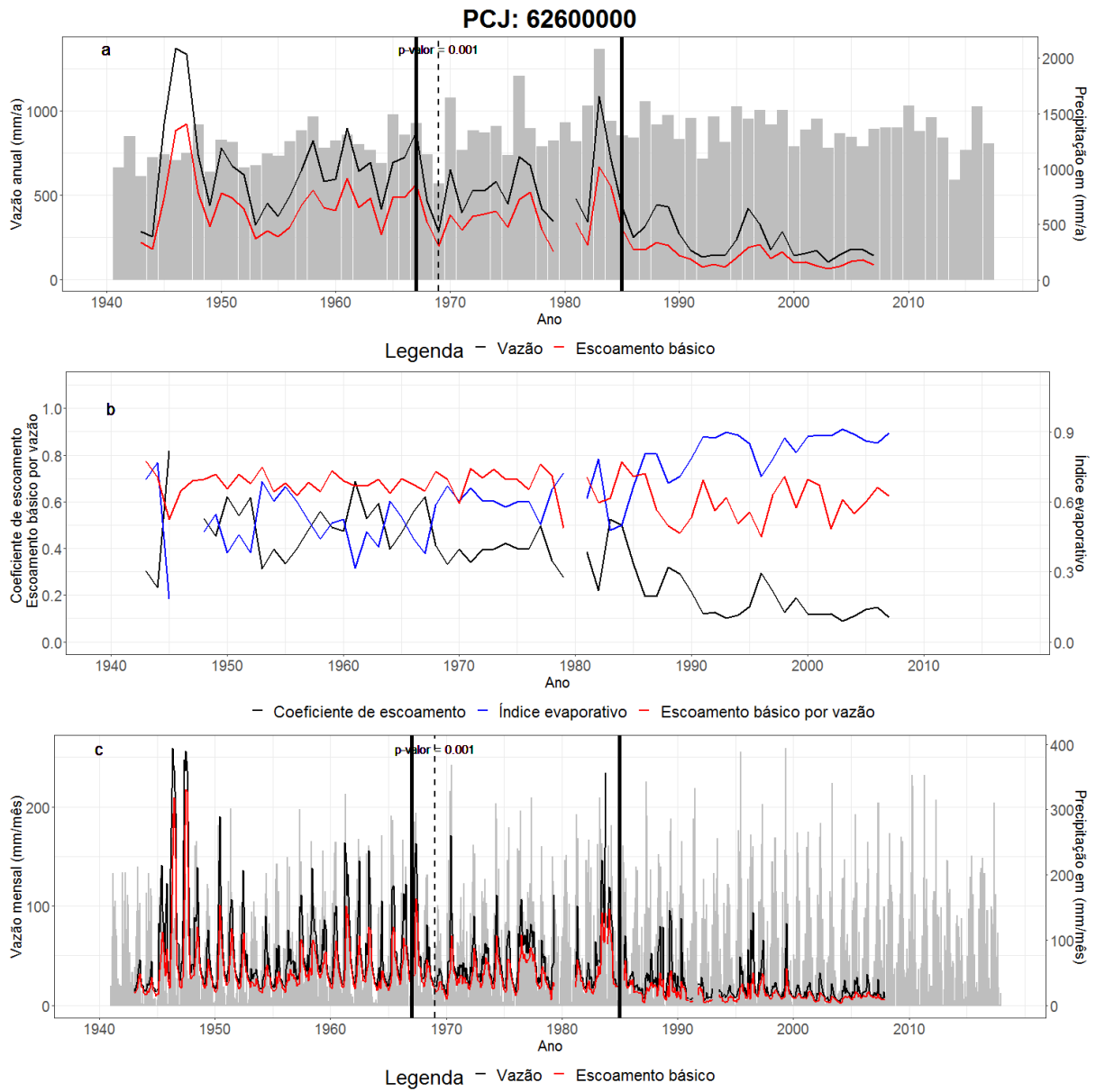


Figura 30 – Id. Fig. 24 para posto 62600000 no rio Jaguari dos rios PCJ.

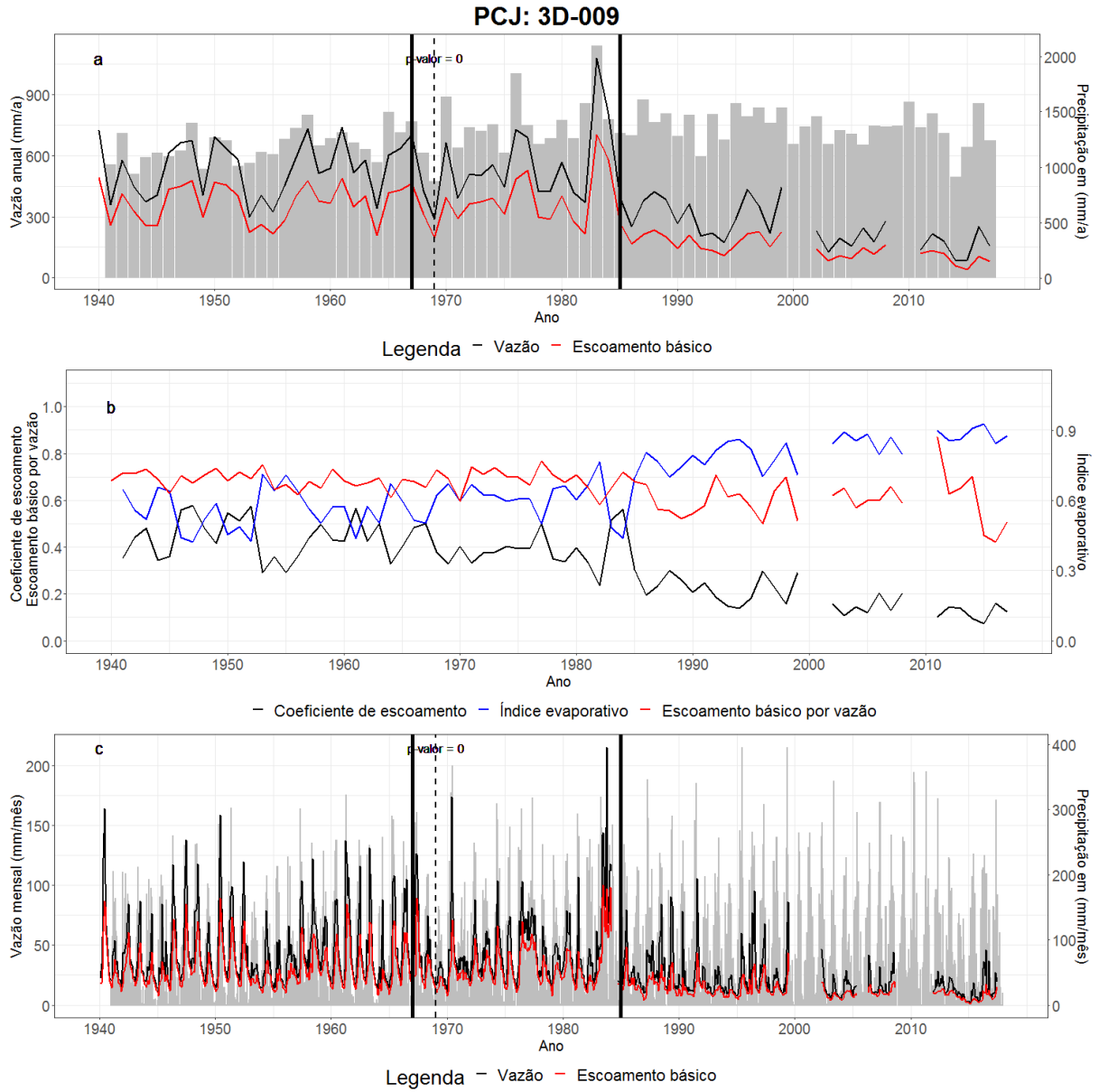


Figura 31– Id. Fig. 24 para posto 3D-009 no rio Jaguari dos rios PCJ.

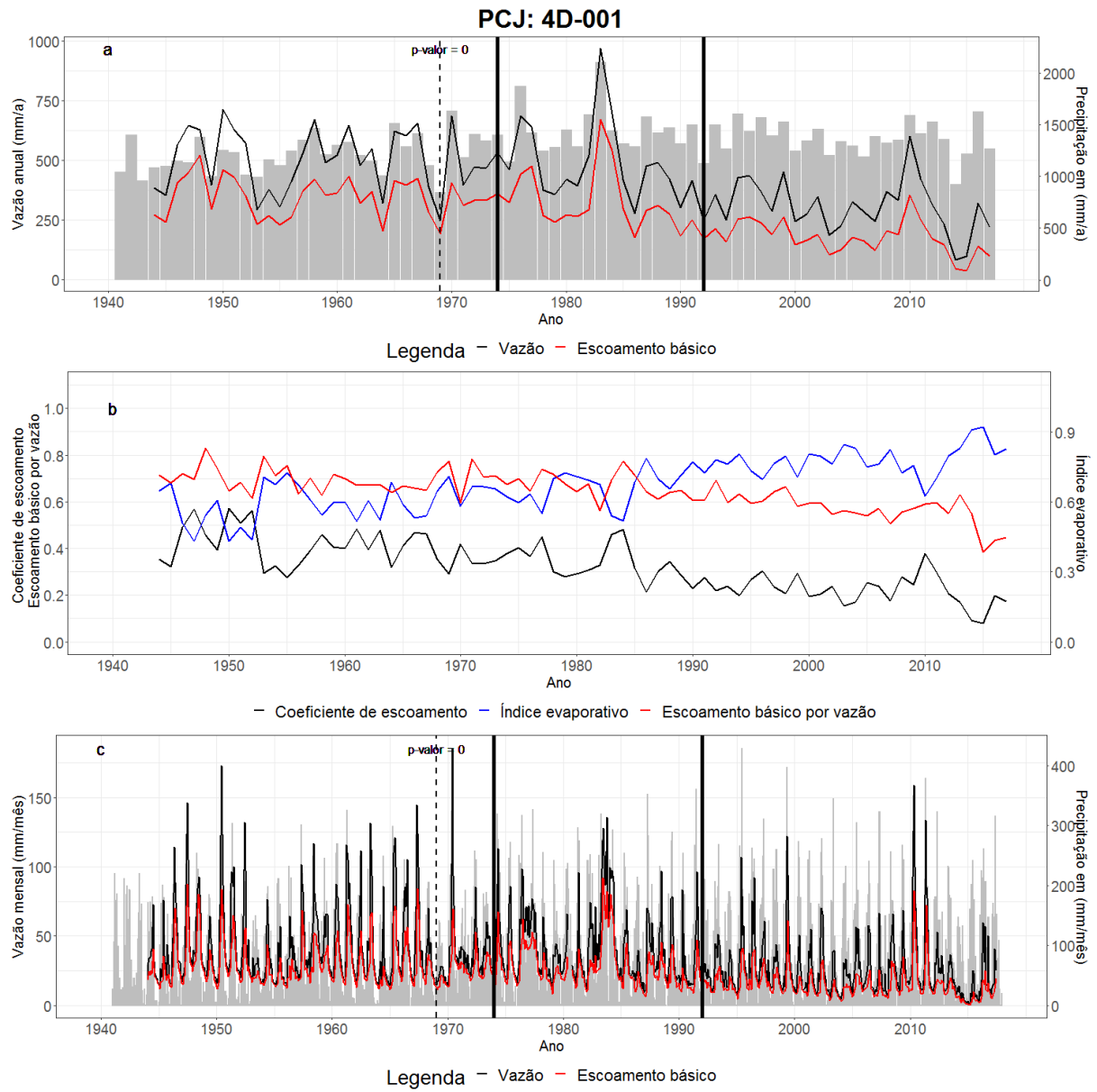


Figura 32– Id. Fig. 24 para posto 4D-001 no rio Jaguari dos rios PCJ.

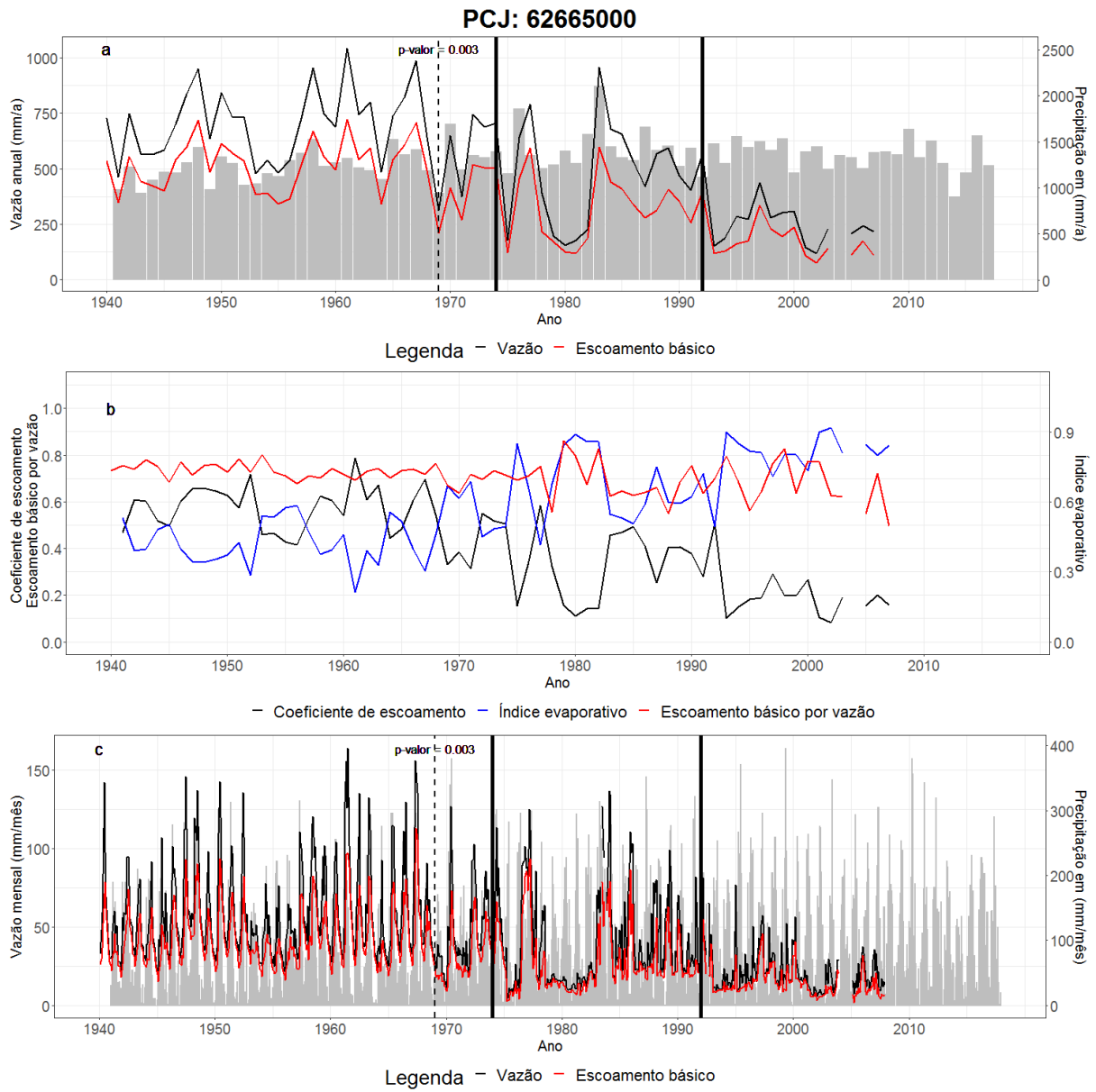


Figura 33 – Id. Fig. 24 para posto 62665000 no rio Jaguari dos rios PCJ.

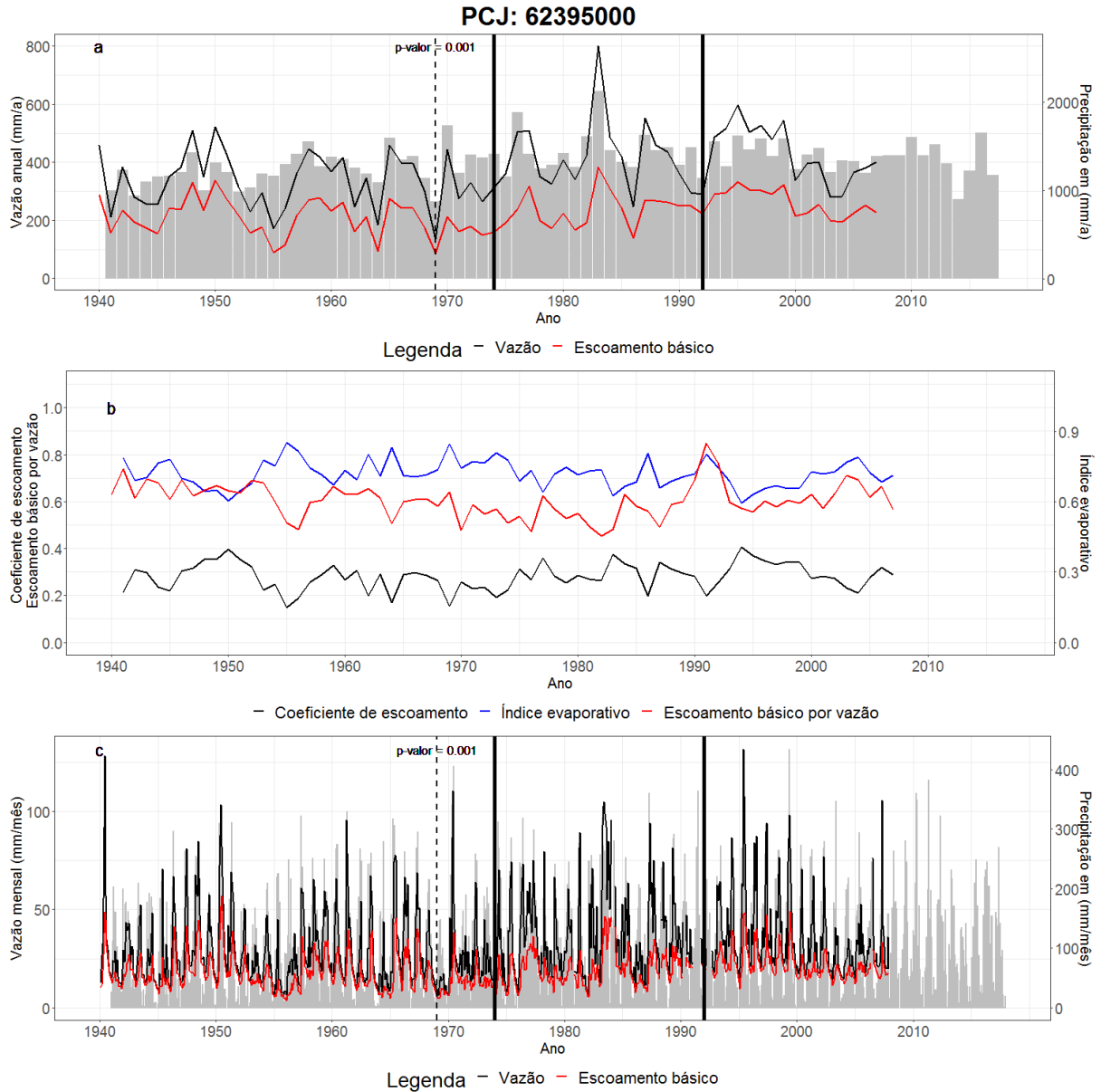


Figura 34 – Id. Fig. 24 para posto 62395000 no Rio Jundiáí dos rios PCJ.

A figura 34 no posto 62395000 do rio Jundiáí nas bacias PCJ mostra pontos de ruptura em três períodos no regime de chuva semelhante ao da Fig. 24, mas sob um padrão atípico de variabilidade, em que a vazão apresentou uma leve tendência de alta no intervalo final após 1992, o que se pode notar mostrou-se na vazão mínima mensal (Fig. 34-c).

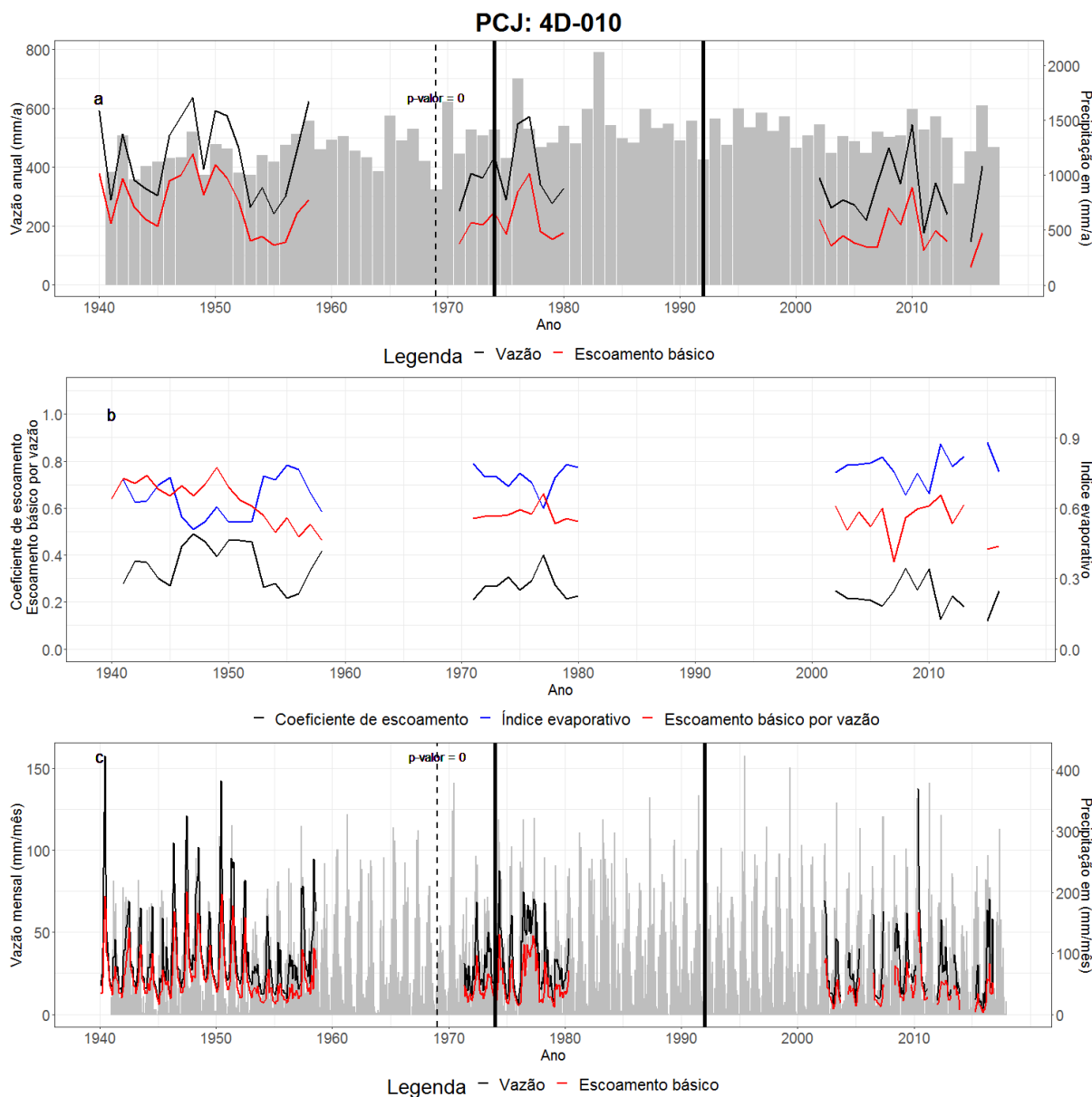


Figura 35 – Id. Fig. 24 para posto 4D-010 no rio Piracicaba.

Nas bacias dos rios PCJ o regime de precipitação foi caracterizado por três intervalos de tempo semelhantes em todos os postos, em que chuva no primeiro período foi menor, logo a seguir houve um aumento no segundo e, posteriormente, no terceiro período ocorreu novamente uma queda (antes de 1974, durante 1974 a 1992 e após 1992). A aplicação do teste de Pettitt em todos os cenários de chuva resultou em um ponto de descontinuidade em 1968 com significância estatística. Esse mesmo padrão foi também notado em Moraes et al (1997) ao analisar a precipitação nos rios Piracicaba, Atibaia e Jaguari. Moraes et al. (1998) constatou que de 1947 a 1991 a chuva anual nos rios PCJ apresentou uma tendência de alta e um ponto de ruptura em 1967, e que a tendência de alta ocorreu em outras sub-bacias. No posto 3D-002 (rio Camanducaia), os pontos de descontinuidade foram em 1978 e 1992.

Os posto 3D-002 e 3D-001 (ambos no rio Camanducaia) apresentaram pouca mudança na vazão média no decorrer do tempo. Conforme Pellegrino (1995) e Pellegrino et al. (2001) por meio do teste do Mann-Kendall, o ano de 1976 representa um ponto início de tendência

para bacia do PCJ o que é similar aos resultados descritos. Esse mesmo padrão também se repete no conjunto de dados precipitação do presente trabalho. Groppo et al. (2001) analisaram treze postos de chuva da bacia do PCJ por meio do teste de Mann-Kendal e constaram uma tendência positiva e que mudanças nos padrões das médias começaram a ocorrer a partir de 1970. Com isso, pode-se definir o período anterior a 1974 na bacia do PCJ como caracterizado por uma tendência positiva no acumulado de chuva. Essa mesma tendência é confirmada pelo estudo de Groppo et al. (2005) no qual 12 dos 14 postos na bacia do PCJ apresentaram uma tendência positiva conforme o teste de Mann-Kendall no período de 1947 a 1997.

### Rio Paraíba do Sul

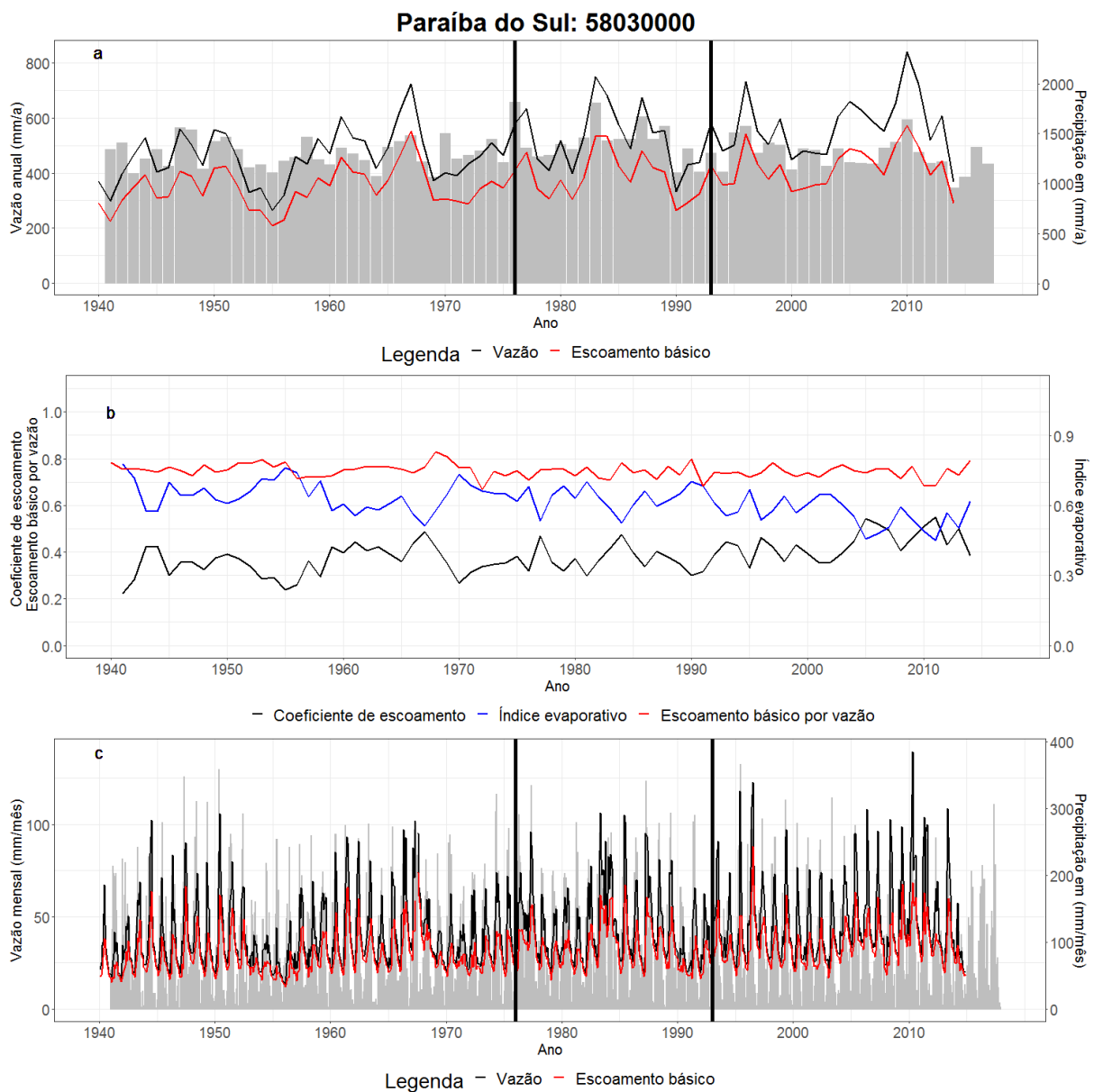


Figura 36 - Id. Fig. 24 para posto 58183000 no Rio Paraíba do Sul.

Na figura 36 para o posto 58183000 no rio Paraíba do Sul os índices apresentam uma tendência estacionária, sem constatação de tendência. O algoritmo de detecção de mudança de



regime marcou a presença de três períodos diferentes nos padrões de chuva. O escoamento básico foi de 382 representando 77 % da vazão. O primeiro período anterior a 1979 com precipitação anual de 1324 mm e vazão de 483 mm. O segundo período ocorreu entre 1979 a 1993 com precipitação média de 1452 mm e vazão de 539 mm. Por fim, no período posterior a 1993, a chuva média correspondeu 1332 mm com vazão de 502 mm. Nota-se uma mudança significativa nos padrões sazonais de vazão. Antes de 1965, a diferença entre de vazão na estação chuvosa e seca era significativa maior embora não tenham ocorrido grandes mudanças na vazão anual.

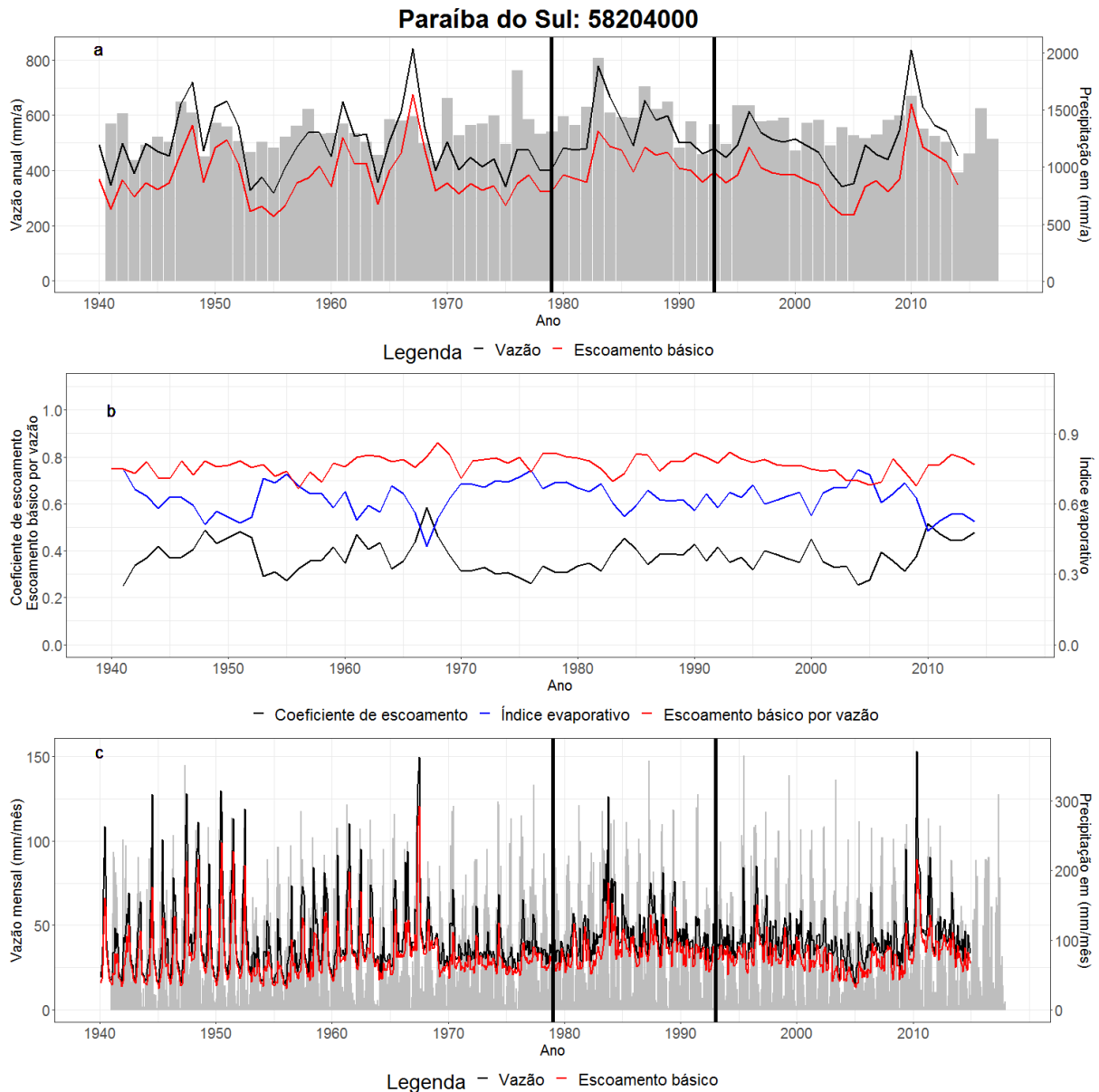


Figura 37 - Id. Fig. 24 para posto 58040000 no Rio Paraíba do Sul.

A figura 37 mostra o posto 58204000 no rio Paraíba do Sul. O escoamento básico médio anual foi de 379 mm sendo, então, 76 % da vazão. O primeiro período anterior a 1979 possui uma chuva média de 1323 mm com vazão de 485 mm. Seguido do intervalo entre 1979 a 1993 com chuva média 1452 mm e vazão média de 542 mm. Após 1993 a precipitação média correspondeu a 1331 mm com uma vazão média de 505 mm. Notou-se entre 2002 e 2005 uma

queda expressiva de vazão, que não foi acompanhada de redução da chuva. Esta variabilidade não apareceu no outro posto 58183000 (Fig. 26), o que não é explicado até então.

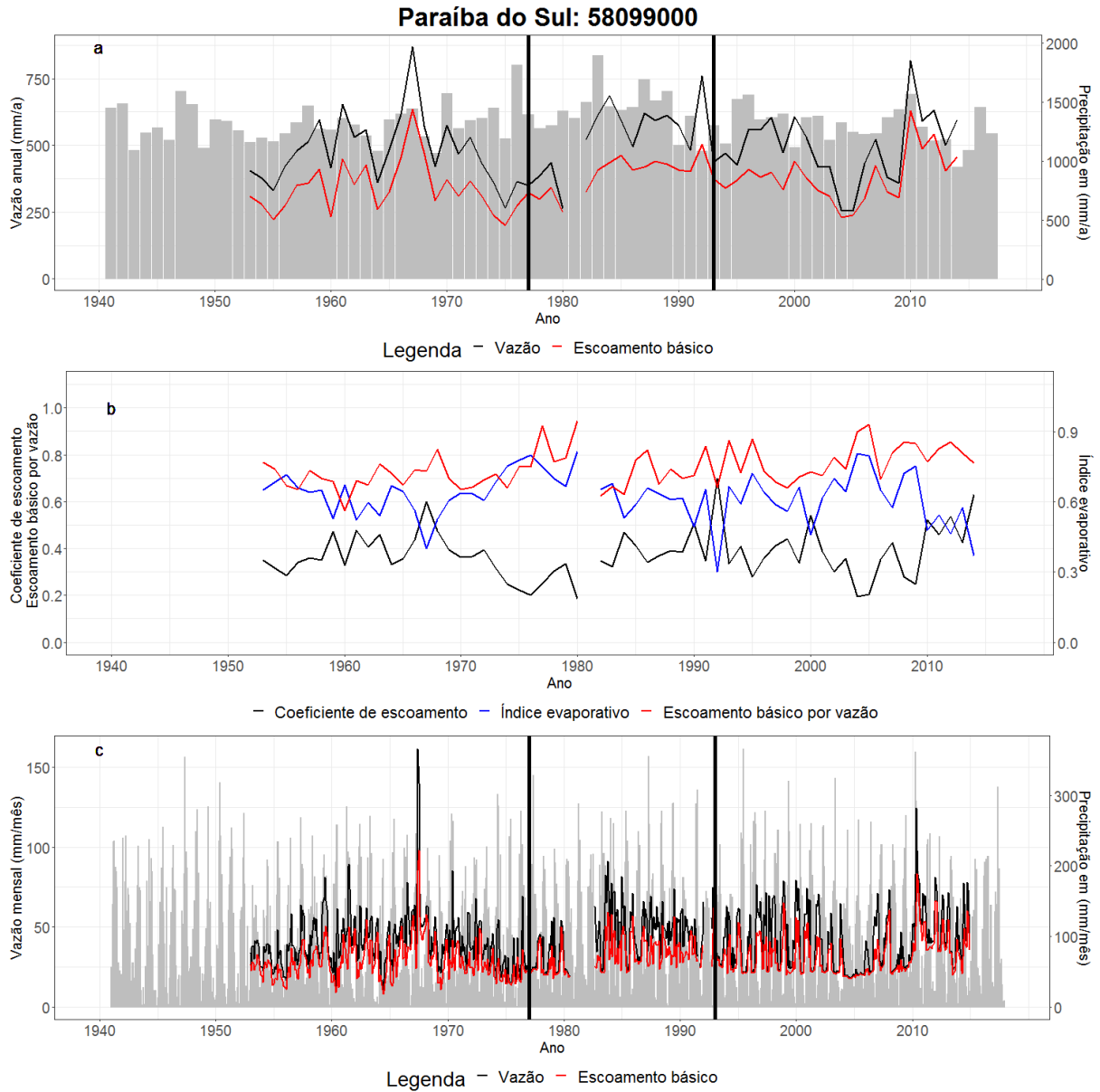


Figura 38- Id. Fig. 24 para posto 58099000 no Rio Paraíba do Sul.

Na figura 38 para o posto 58099000 no rio Paraíba do Sul obteve-se médias de 368 mm no escoamento básico o qual constitui em 74% da vazão. A chuva pode ser descrito em termos de três diferentes períodos no regime. Antes de 1977 com chuva média de 1318 mm e vazão 483 mm. O intervalo entre 1977 a 1993 com precipitação média 1425 mm e vazão de 527 mm. Após 1993, a chuva média situou-se em 1301 mm e a vazão correspondeu a 494. Da mesma forma que no posto 58204000 (Fig. 27) notou-se entre 2002 e 2005 uma queda expressiva de vazão, que não foi acompanhada de redução da chuva, até mesmo sem pico na estação chuvosa, o que ainda não foi avaliado.

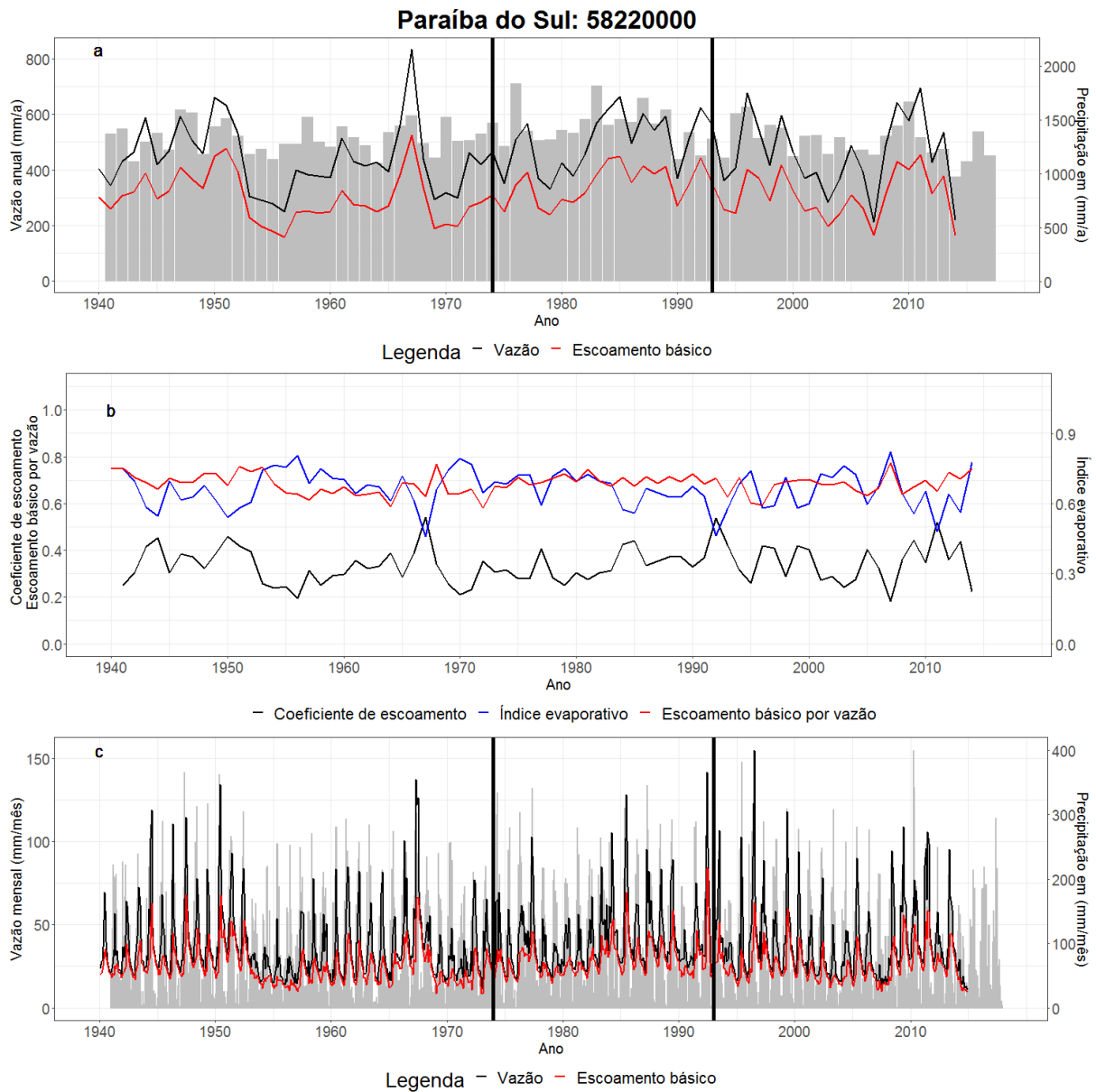


Figura 39 - Id. Fig. 24 para posto 58220000 no Rio Bocaina da bacia do Paraíba do Sul.

Para o posto 58220000 no rio Bocaina da bacia do Paraíba do Sul. (figura 39), antes de 1974, a precipitação foi 1334 mm com média 445 mm na vazão. Entre 1974 a 1993, a precipitação correspondeu a 1444 mm e a vazão ficou em 500 mm. Após 1993, a precipitação e a vazão média ficaram, respectivamente, em 1308 mm e 460 mm. O escoamento básico, índice evaporativo e o coeficiente do escoamento não indicam tendências de diminuição ou de aumento.

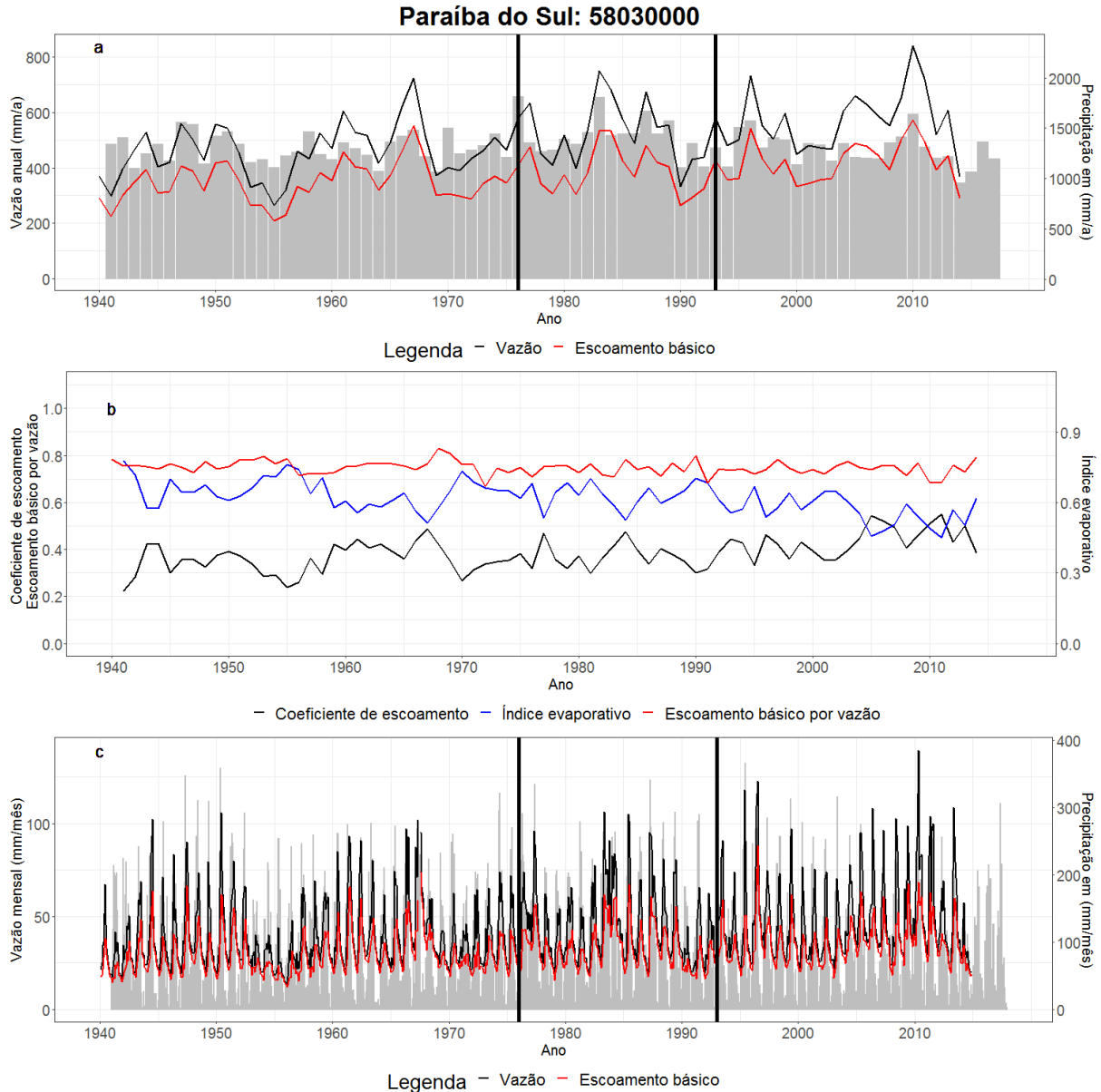


Figura 40 - Id. Fig. 24 para posto 58030000 no Rio Paraitinga da bacia do R. Paraíba do Sul.

Para o posto 58030000 no rio Paraitinga da bacia do R. Paraíba do Sul (figura 40), o período antes de 1976 foi marcado por chuva média de 1299 mm e vazão média de 458 mm. A seguir entre 1976 e 1993 a média de chuva manteve-se em 1423 mm com vazão média de 532 mm. Por fim, após 1993 a chuva e vazão mantiveram, respectivamente, em valores médios de 1291 mm e 571 mm. Observa-se que ocorreu um aumento na vazão em termos médios no decorrer do tempo. O coeficiente de escoamento em todo o período analisado apresentou uma tendência de aumento. Desse modo, indicando que houve um aumento da vazão em relação à precipitação. No caso do índice evaporativo há uma diminuição no decorrer do tempo associado com uma diminuição da evapotranspiração.

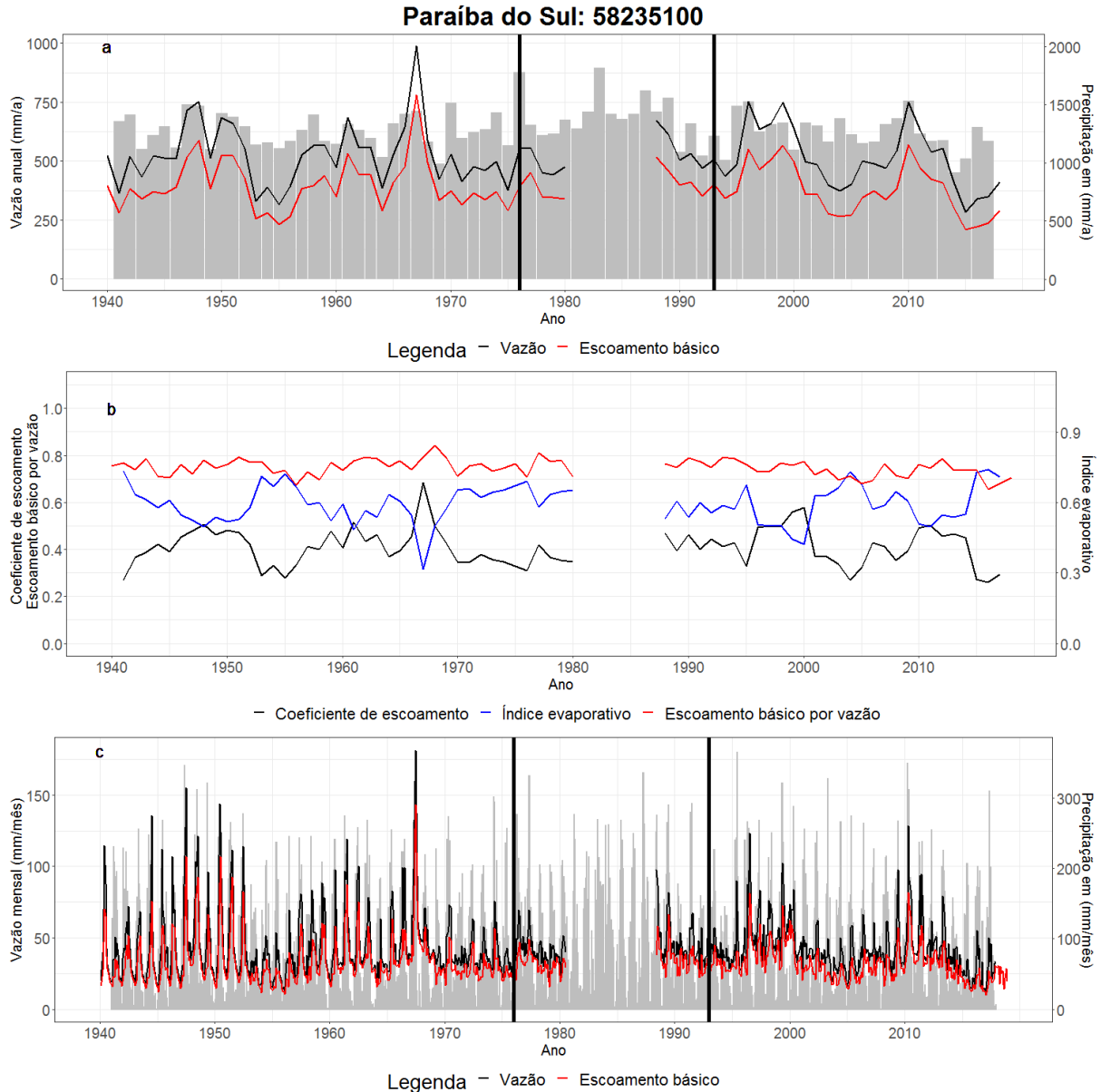


Figura 41 - Id. Fig. 24 para posto 58235100 da bacia do Paraíba do Sul.

Para o posto 58235100 da bacia do Paraíba do Sul situado no rio Paraíba do Sul (figura 41), antes de 1976 a precipitação média foi de 1273 mm com vazão média de 526 mm, seguido do período de 1976 a 1993 com precipitação média de 1400 mm e vazão média de 527 mm e, finalmente, após 1993 no qual a precipitação e vazão foram, respectivamente, iguais a 1256 e 511 mm. O coeficiente de escoamento e o índice evaporativo não aparentam ter tendência. A razão do escoamento básico pela vazão possui uma leve tendência de queda. A partir de aproximadamente 1969 nota-se nas medias mensais (Fig 41c) um padrão de regularização da vazão, em que as máximas ficam muito próximas das mínimas, o que denota controle à montante.

Nas figuras 36 a 41, constata-se que na bacia do rio Paraíba do Sul o regime de precipitação é caracterizado pela ocorrência de três diferentes cenários em termos dos padrões de chuva. Em todos os seis casos considerados o segundo ponto de ruptura ocorreu a partir de 1993 enquanto que o primeiro ponto ocorreu em 1976, 1977 ou 1979 conforme o posto. A chuva no período anterior à primeira ruptura possui uma média de 1320 mm, no segundo

intervalo, há aumento no volume de chuva alcançando uma média de 1439 mm e, finalmente, no terceiro período há queda na chuva situando-se numa média de 1313 mm. Em cinco dos seis postos a vazão apresentou uma média mais baixa no primeiro período, seguido de um aumento no segundo período e após 1993 uma queda na média da vazão. Marengo (2005) usando dados pluviométricos do DAEE e ANA do acumulado de chuva de dezembro a fevereiro e, com base, no teste de Mann-Kendall não encontrou qualquer evidência de tendências na chuva em nove postos da bacia do Paraíba do Sul nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

## Rio Mogi-Guaçu

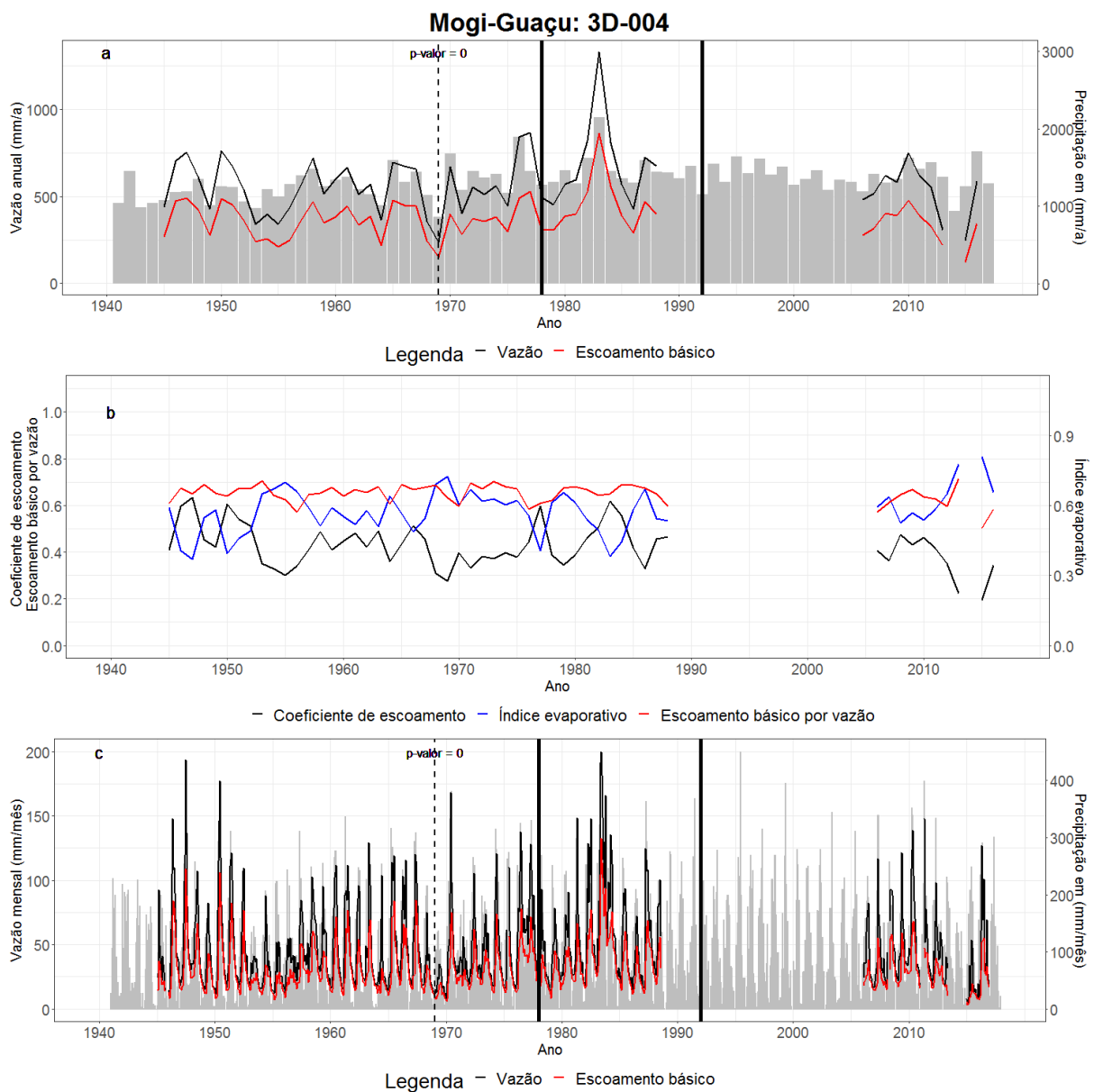


Figura 42 - Id. Fig. 24 para posto 3D-004 no Rio Mogi-Guaçu.

Para o posto 3D-004 no Rio Mogi-Guaçu (figura 42) não se notou nenhuma tendência temporal na evolução desses índices. O escoamento básico médio foi de 373 representando 65 % da vazão. O algoritmo de detecção de mudança de regime estabeleceu a ocorrência de três períodos. O primeiro anterior a 1978 no qual a precipitação média foi de 1262 mm e a vazão foi 557 mm. O período definido entre 1978 e 1992 apresentou, respectivamente, valores de 1446 mm e 678 mm. E, por fim, após 1992 a precipitação média foi de 1386 mm com vazão de 526 mm. Devido à ausência de dados vazão no período do final da década de 80 até 2005 inviabiliza-se descrever o comportamento do coeficiente de escoamento. Nos três intervalos de tempo considerado a vazão apresentou uma grande correlação com a chuva e alternância entre estação seca e chuvosa correspondeu a uma diferença da ordem de 100 mm. Vilanova (2014) examinou a tendência da série pelo teste de Mann-Kendall em dois postos de chuva (2246052 e 224056) a montante do posto 4D-004 durante o período de 1973 a 2006 que mostraram uma tendência negativa na chuva.

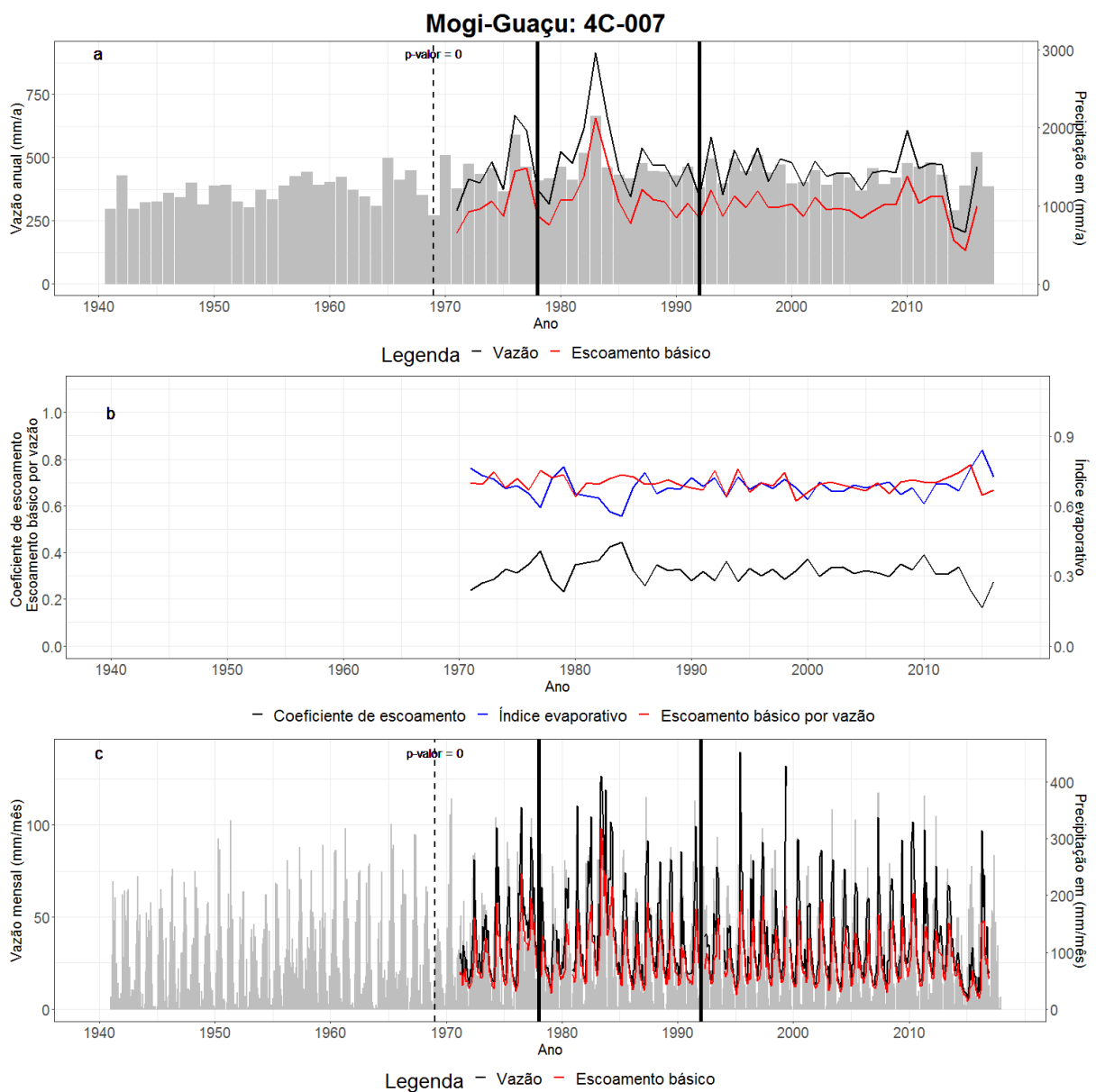


Figura 43 - Id. Fig. 24 para posto 4C-007 no Rio Mogi-Guaçu.

A figura 43 para o posto 4C-007 no rio Mogi-Guaçu mostra resultado de escoamento básico de 351 mm representando 70 % da vazão. Verifica-se a presença de três períodos nos padrões de precipitação. No primeiro, antes de 1978 a precipitação média ficou em 1257 mm com vazão média de 462 mm. O segundo período entre 1978 e 1992 registrou uma precipitação média de 1477 mm com vazão média de 491 mm e, posteriormente, após 1992 a precipitação e vazão médias ficaram, respectivamente, em 1397 mm e 438 mm. Não se observa uma mudança de padrão da vazão no qual a média dessa variável situou-se em 464 mm. O coeficiente de escoamento ao longo de mais 40 anos os oscilou num patamar de 0.32.

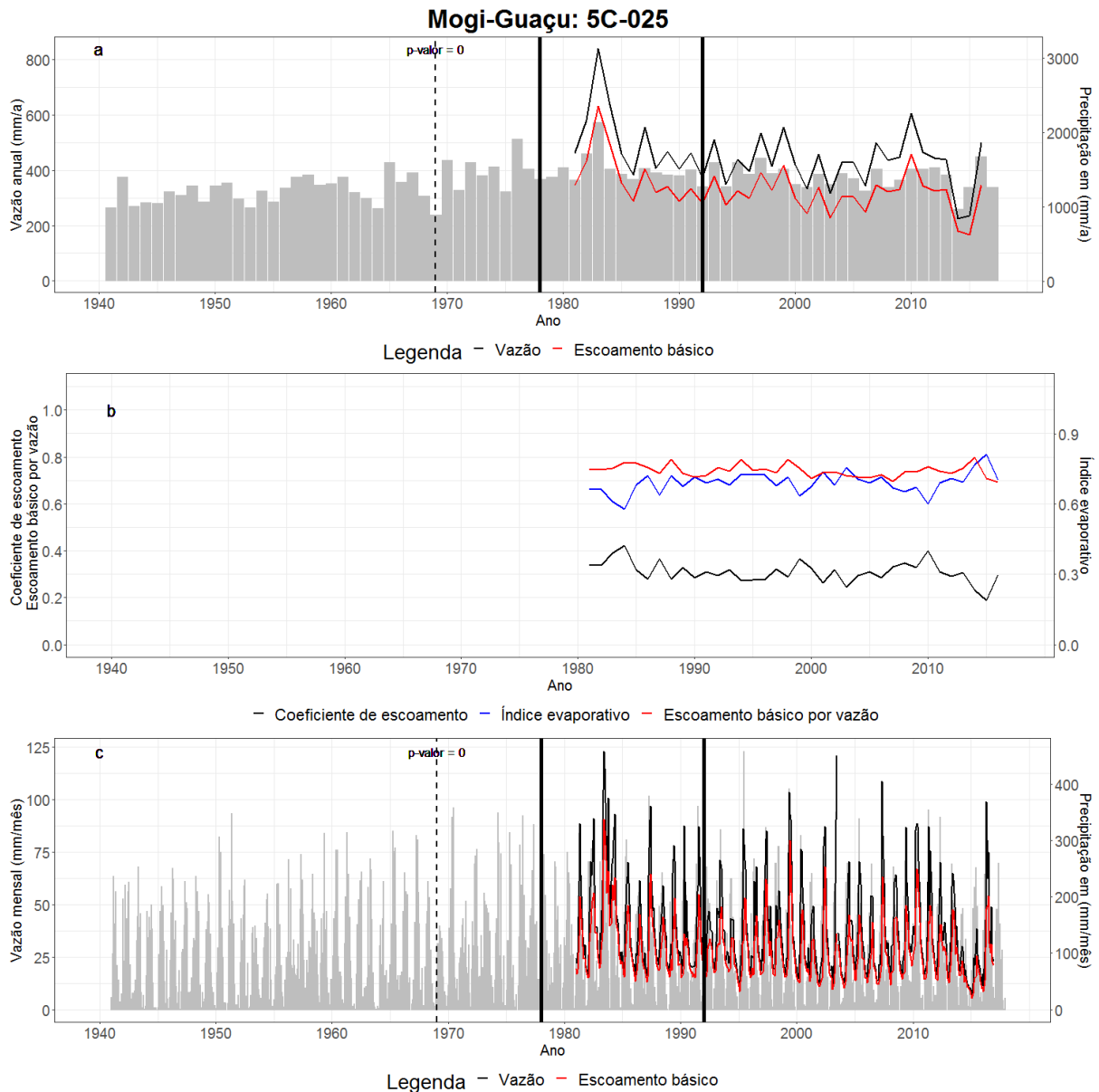


Figura 44 – Id. Fig. 23 para posto 5C-025 no Rio Mogi-Guaçu.

Para o posto 5C-025 do rio Mogi-Guaçu (figura 44) a média do escoamento básico foi 335 mm correspondendo a 74 % da vazão. Antes de 1978, a precipitação média foi de 1271 mm. No intervalo entre 1978 a 1992, a média da precipitação correspondeu a 1495 mm com vazão de 408 mm. Após 1992, as médias da precipitação e vazão corresponderam, respectivamente, a 1400 mm e 377 mm. Não se nota uma tendência temporal no coeficiente do escoamento permanecendo em média com 0.27.



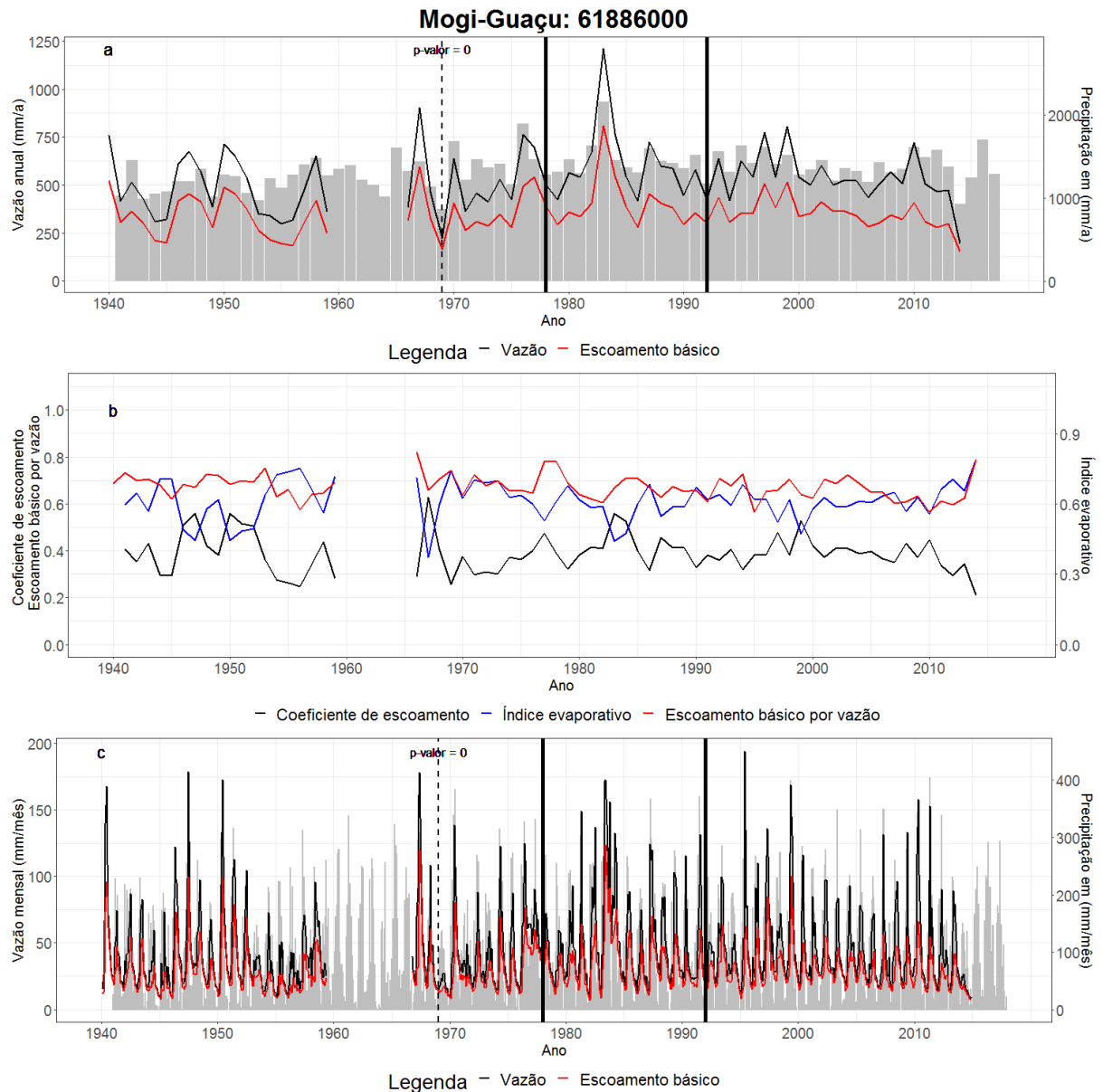


Figura 45 – Id. Fig. 24 no posto 61886000 do Rio Grande na bacia do R. Mogi-Guaçu.

Para o posto 61886000 do Rio Grande na bacia do R. Mogi-Guaçu (figura 45) o período anterior a 1978 foi marcado por uma precipitação média de 1271 mm e vazão específica de 499 mm, o período entre 1978 e 1992 apresentou uma precipitação média de 1456 mm e vazão de 601 e após 1992 a chuva média foi de 1392 mm e vazão de 536 mm. O coeficiente de escoamento e o índice evaporativo em todo período considerado apresentou pouca variabilidade e sem ocorrência de uma tendência de baixa ou alta com valores médios respectivamente de 0,40 e 0,60. O escoamento básico médio foi 357 mm representando 67%.

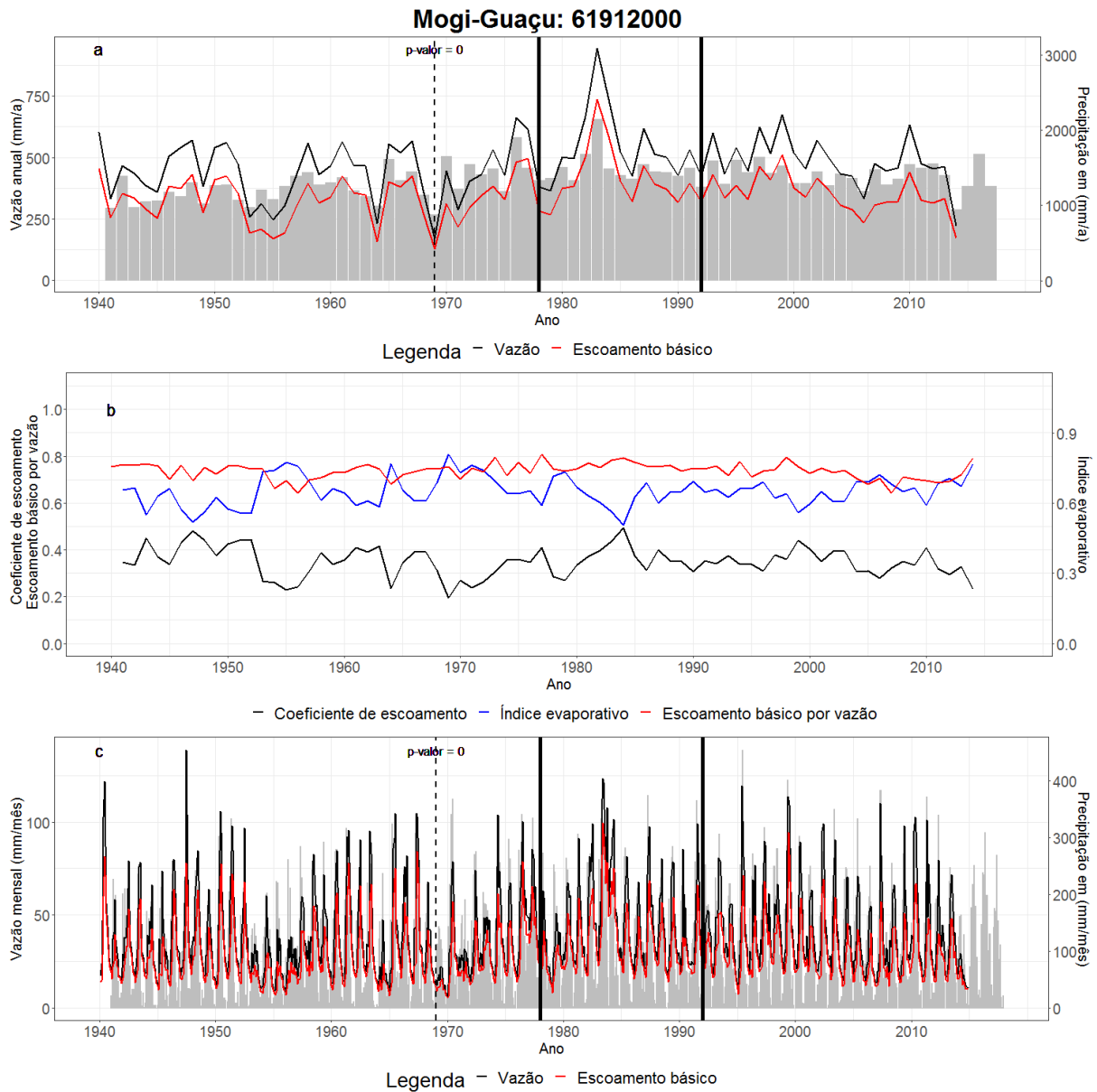


Figura 46 - Id. Fig. 24 no posto 61912000 do Rio Grande na bacia do R. Mogi-Guaçu.

Para o posto 61912000 do Rio Grande na bacia do R. Mogi-Guaçu (figura 46), antes de 1978 a precipitação média foi 1259 mm e vazão foi de 446 mm. No intervalo entre 1978 a 1992, a chuva média correspondeu a 1478 mm com vazão de 537 mm. Após 1992, a precipitação média permaneceu em 1396 mm com vazão de 483 mm. O coeficiente de escoamento e o índice evaporativo não apresentaram tendência de aumento ou diminuição durante todo o intervalo analisado. Nesse caso, os valores médios foram, respectivamente, de 0,35 e 0,65. O mesmo é observado na razão do escoamento básico pela vazão a qual foi de 74%.

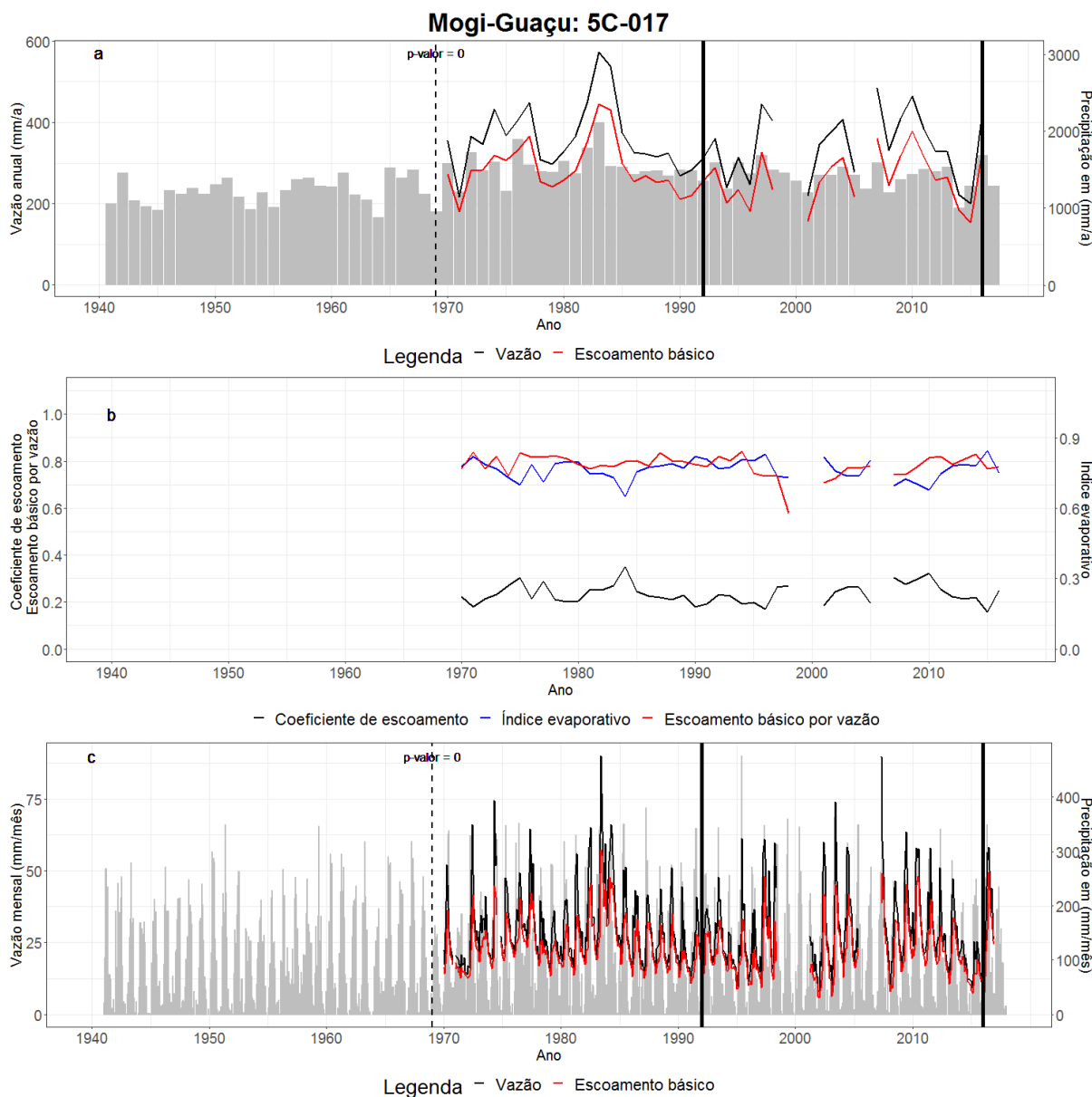


Figura 47 – Id. Fig. 24 para posto 5C-017 no Ribeirão da Onça da bacia do Rio Mogi-Guaçu.

Para posto 5C-017 no Ribeirão da Onça da bacia do Rio Mogi-Guaçu (figura 47), o escoamento básico médio foi 276 mm sendo, portanto, 78 % da vazão. O algoritmo de detecção de mudança de regime estabeleceu os anos de 1992 e 2016, porém esse último não tem significado estatístico por estar no extremo da série. Com isso, há apenas o período antes a 1992 no qual a chuva média situou-se em 1358 mm e vazão média de 364 mm. Após 1992 a precipitação média correspondeu 1423 mm com vazão média de 342 mm. Não se nota significativa mudança no padrão do coeficiente do escoamento e do índice evaporativo os quais foram, respectivamente, em termos médios iguais a 0,24 e 0,76. O mesmo comportamento é descrito na razão do escoamento básico pela vazão.

Para a bacia Mogi-Guaçu (figuras 42 a 47), em cinco dos seis casos considerados os pontos de ruptura ocorreram em 1978 e 1992. No período anterior a 1978 a precipitação média ficou em 1264 mm, no intervalo entre 1978 a 1992 a média da precipitação estabeleceu-se em 1470 mm e, por fim, após houve uma queda na média da precipitação a qual se situou em 1394 mm. Nos postos analisados a vazão não apresentou uma tendência significativa de

mudança nos valores médios. O coeficiente de escoamento e o índice evaporativo tenderam a situar-se em patamares constantes com pouca variabilidade no decorrer do tempo. O mesmo padrão pode ser descrito para a razão do escoamento básico pela vazão.

## Rio Pardo

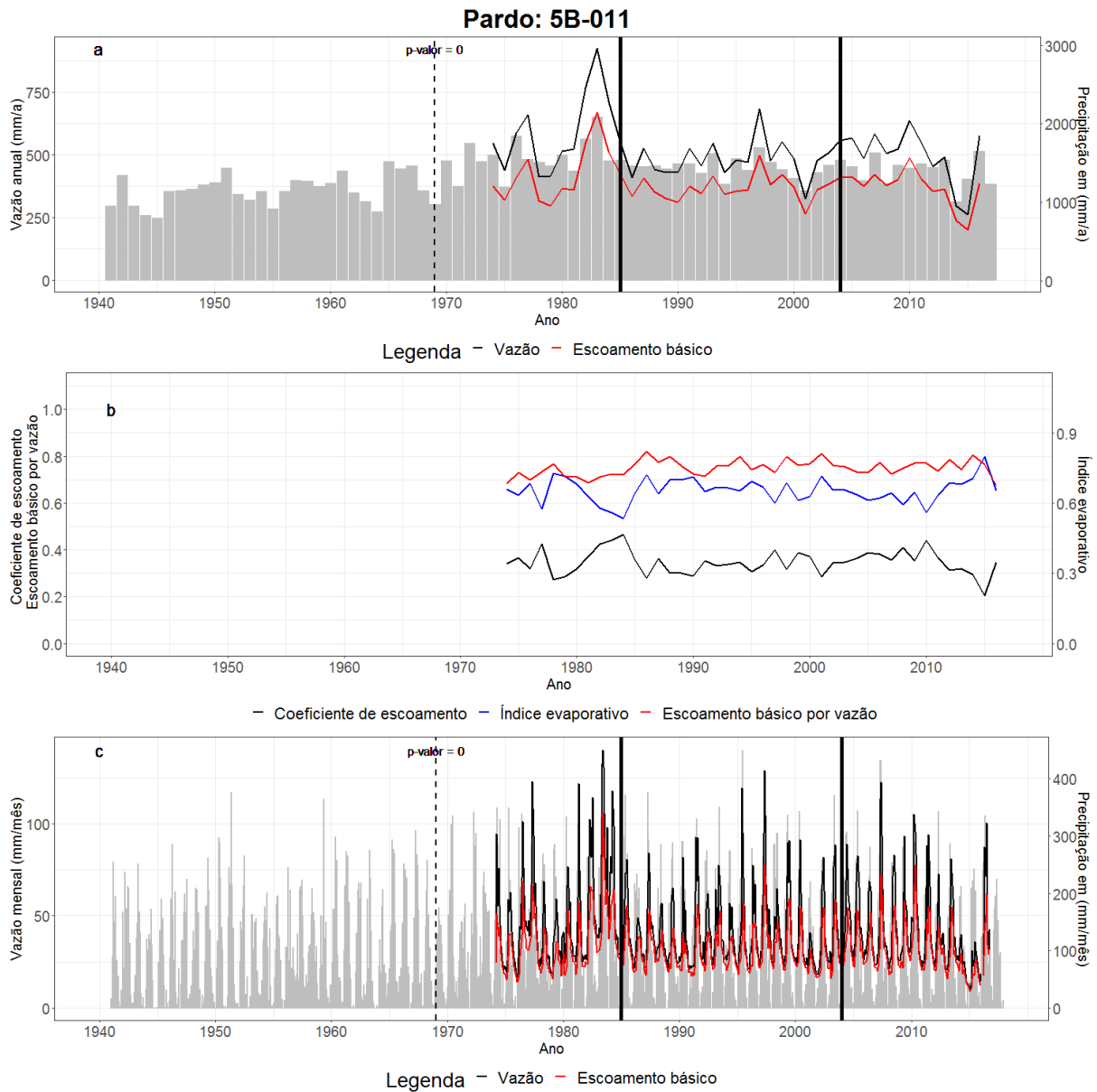


Figura 48 – Id. Fig. 23 para posto 5B-011 no Rio Pardo.

Para o posto 5B-011 no Rio Pardo (figura 48) os pontos de ruptura ocorreram em 1985 e 2004. Antes de 1985, a chuva média situou-se em 1298 mm com vazão 457 mm. No intervalo entre 1985 e 2004, a precipitação média correspondeu a 1451 mm e a vazão foi 374 mm. Após 2004, a chuva média estabeleceu-se em 1408 mm com vazão média de 406. No primeiro intervalo nota-se um viés significativo de aumento na precipitação desde a década de 1940. O coeficiente do escoamento caracterizou-se por uma baixa variabilidade temporal com valores médios de 0,73 ao longo de todo o período indicando pouca mudança na razão entre vazão e precipitação. Do mesmo modo, a razão do escoamento básico pela vazão não apresentou grandes variações situando em média 0,74.

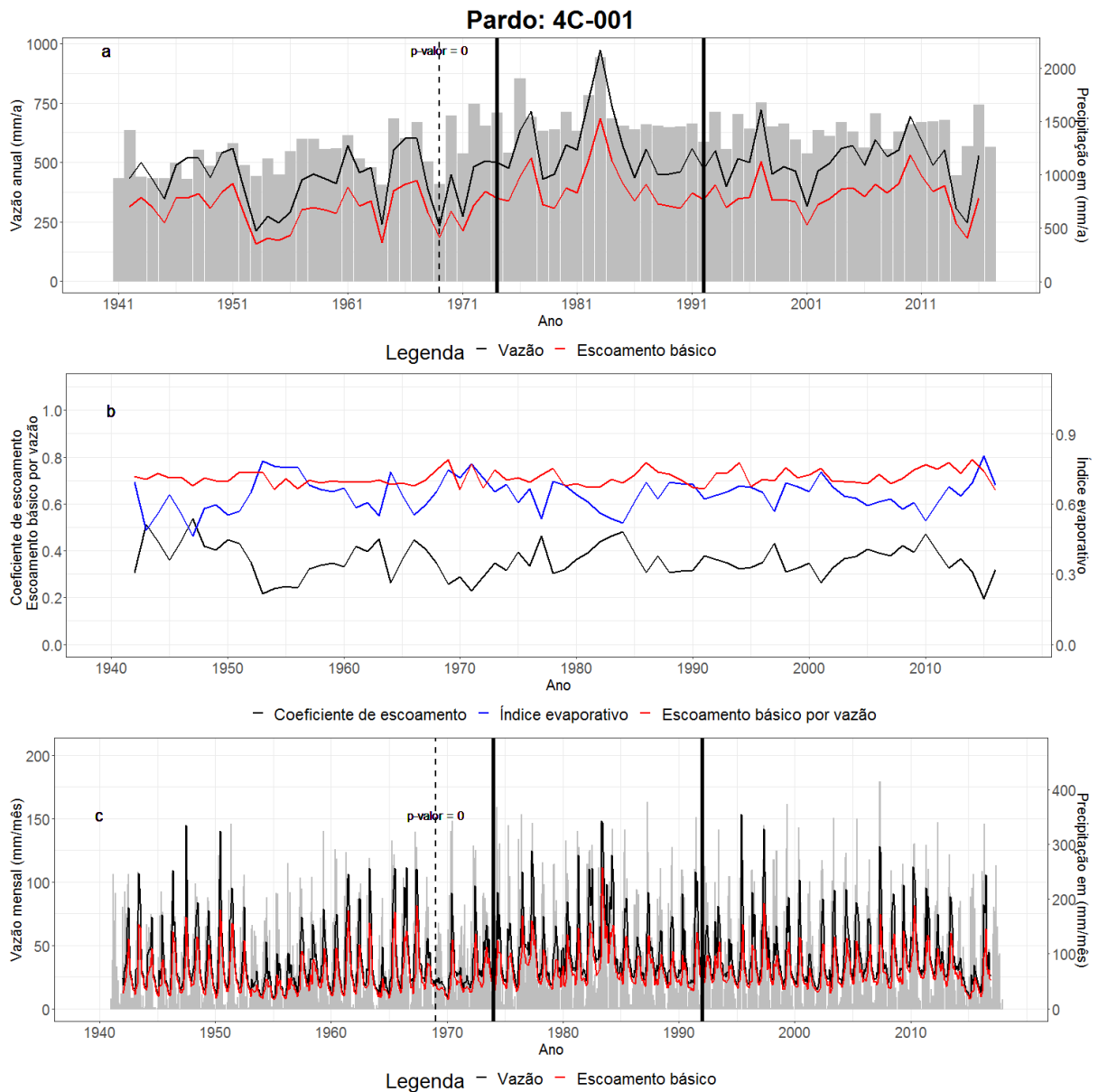


Figura 49 - Id. Fig. 24 para posto 4C-001 no Rio Pardo. b) Coeficiente de escoamento e índice evaporativo. c) Série de vazão de e chuva mensal no posto 4C-001. A barra cinza e a linha preta representam, respectivamente, as series de precipitação e vazão.

Para o posto 4C-001 no Rio Pardo (figura 49) antes de 1974, a precipitação média situou-se em 1199 mm com vazão média de 755 mm. No período entre 1974 e 1992, a chuva média correspondeu a 1523 mm com vazão média de 646 e, por fim, após 1992 a precipitação e vazão médias foram, respectivamente, 1406 e 645 mm. O coeficiente do escoamento e o índice evaporativo podem ser caracterizados em termos de duas fases. Antes de 1971, ambas componentes do balanço hídrico apresentaram grande variabilidade causada pela alta razão entre vazão e precipitação. Após 1992, essa variabilidade reduziu-se drasticamente de modo que em termos médios o coeficiente do escoamento e índice evaporativo foram, respectivamente, de 0,45 e 0,55.

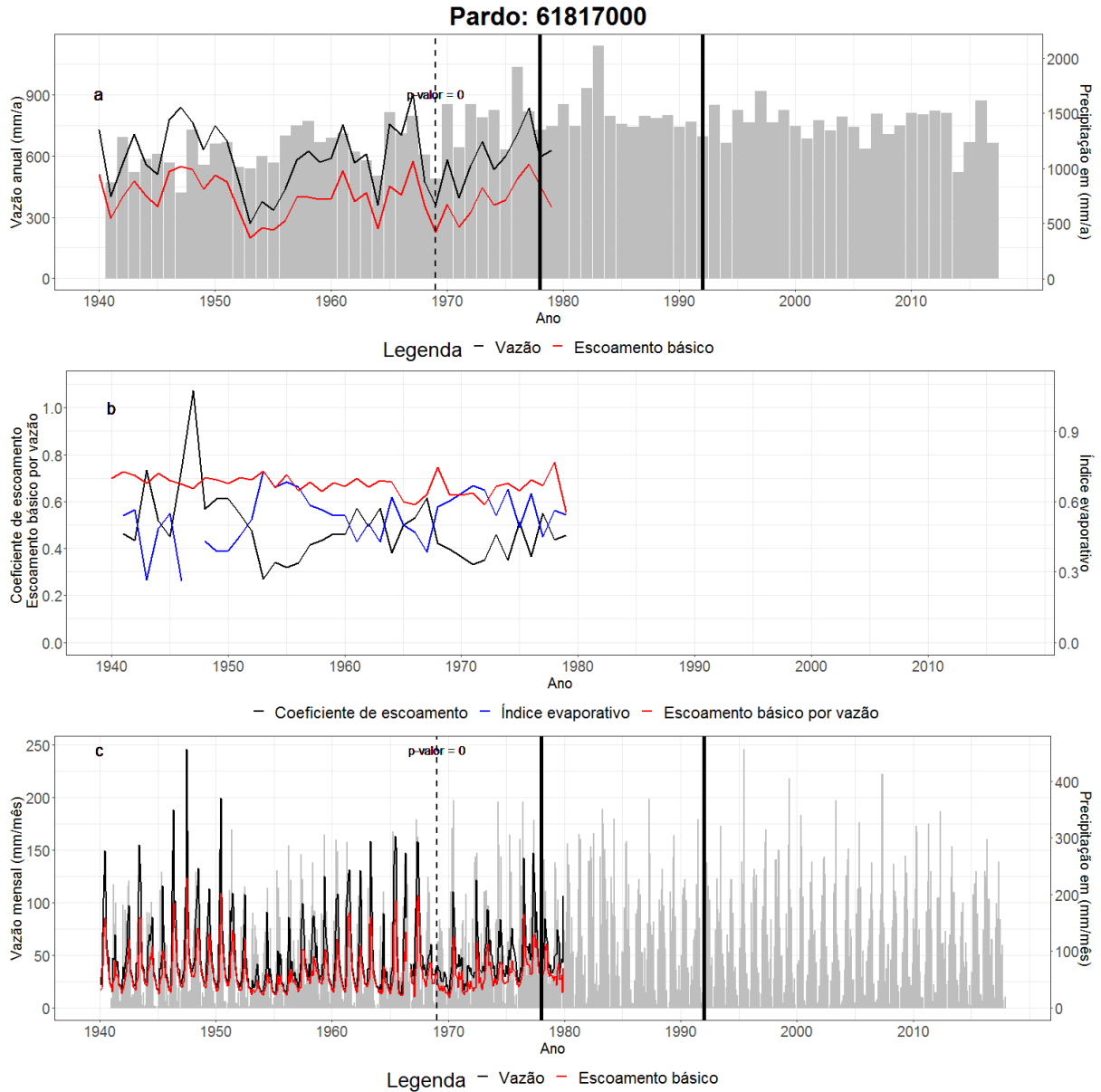


Figura 50 - Id. Fig. 23 para o posto 61817000 no Rio Pardo.

Para o posto 61817000 no Rio Pardo (figura 50) a precipitação média foi de 1232 mm, 1486 mm e 1400, respectivamente, antes de 1978, no intervalo entre 1978 a 1992 e após 1992. Nota-se que período anterior a 1978 houve tendência no aumento no volume de precipitação. Devido à ausência de dados de vazão apenas o período antes de 1978 foi calculado. Nesse caso a média foi de 597 mm. O coeficiente do escoamento e o índice evaporativo apresentaram pouca variabilidade exceto em 1947 com médias, respectivamente, de 0,49 e 0,51. O escoamento básico representou uma média de 401 mm sendo 67 % da vazão.

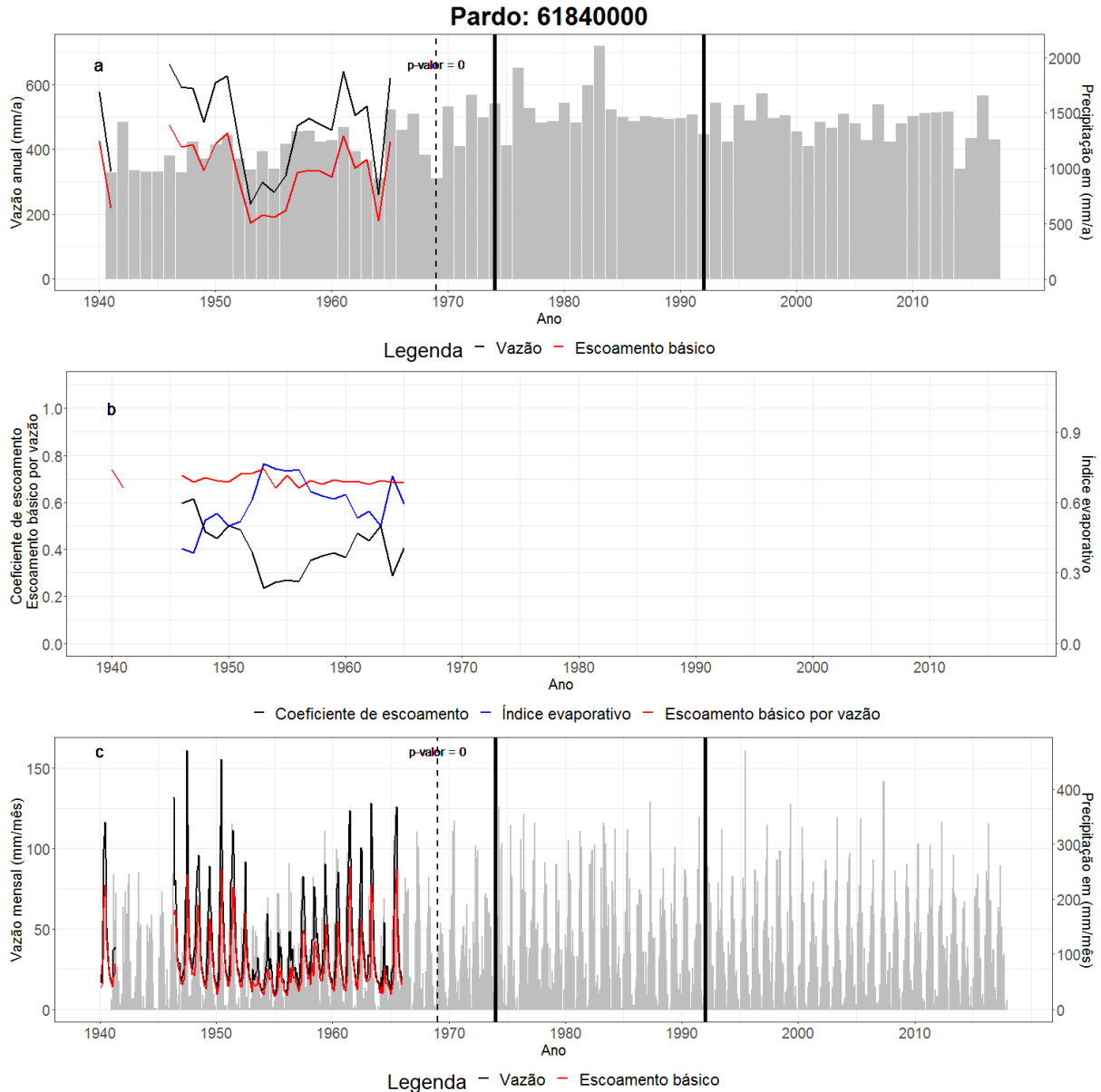


Figura 51 – Id. Fig. 24 para posto 61840000 no Rio Pardo.

Para o posto 61840000 no Rio Pardo (figura 51) foram identificados três períodos diferentes nos regimes de chuva. O primeiro antes de 1974 no qual a precipitação média foi 1199 mm com tendência de alta no acumulado anual e vazão média de 490 mm. No intervalo entre 1974 a 1992 a precipitação foi de 1523 mm e após 1992 a média correspondeu a 1406 mm. O coeficiente do escoamento entre 1946 a 1965 caracterizou-se por uma alta irregularidade entre 0,23 a 0,6 quando comparado com os outros três postos situados no mesmo rio. O mesmo pode ser constatado para o índice evaporativo entre 0,4 e 0,75. Contudo a razão do escoamento básico pela vazão apresentou uma menor variabilidade com média de 342 mm.

Em pelos três dos quatro postos do Rio Pardo (figuras 48 a 51) o segundo ponto de ruptura ocorreu em 1992 e o primeiro ponto deu-se 1974 ou em 1978. O acumulado anual de chuva calculado seguiu o mesmo padrão observado nas outras quatro bacias no qual a precipitação média foi 1232 mm para o primeiro intervalo, seguido de aumento no acumulado correspondendo a 1496 mm e, finalmente, no terceiro intervalo uma diminuição com o

acumulado médio situando em 1427 mm. Observando o conjunto das precipitações nota-se que a partir da década de 40 há uma tendência de aumento de chuva até meados da década de 70 e a seguir ocorre uma queda.

## Rio Sapucaí

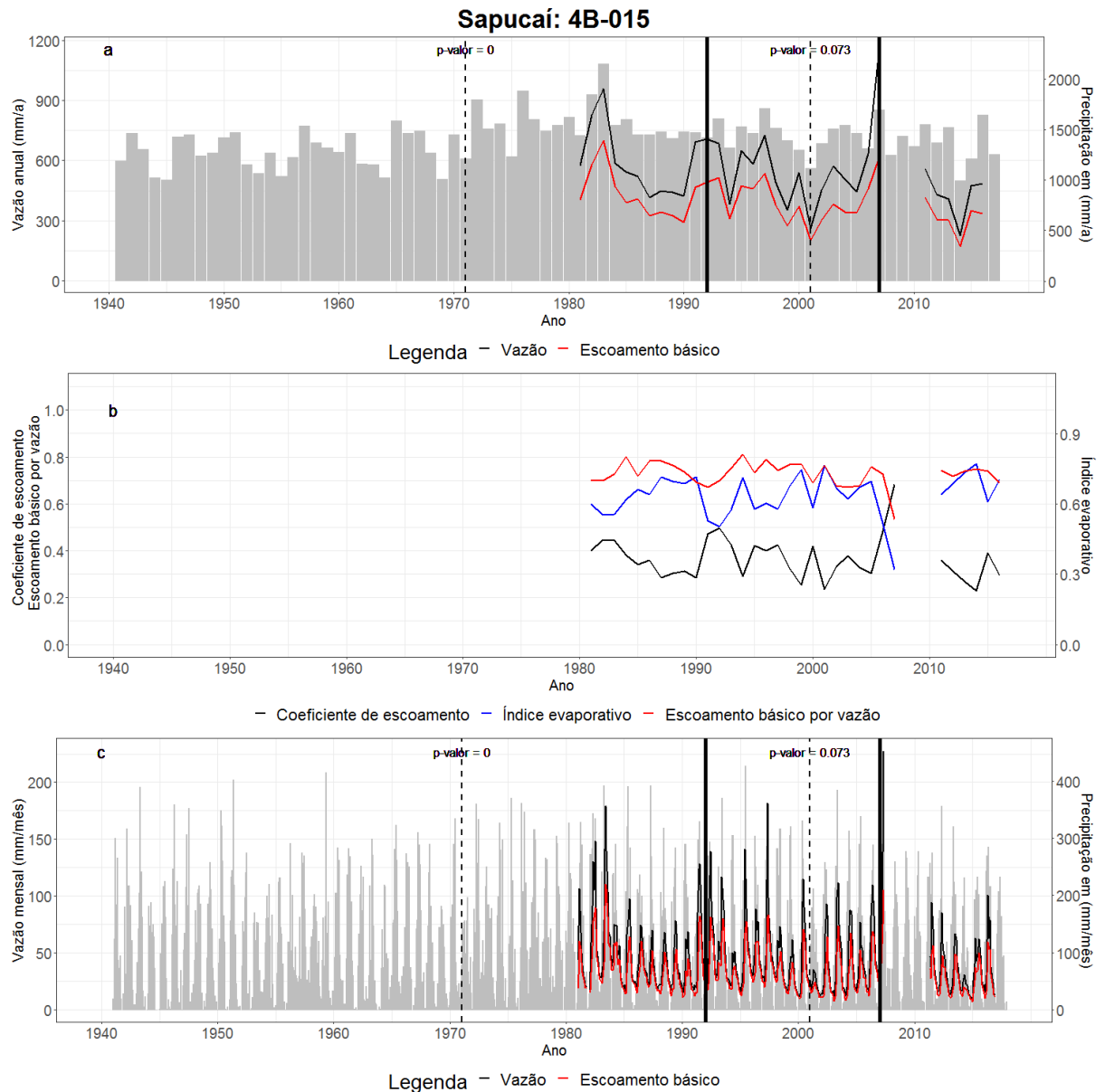


Figura 52 – Id. Fig. 24 para posto 4B-015 no Rio Sapucaizinho da bacia do R. Sapucaí.

Para o posto 4B-015 no Rio Sapucaizinho da bacia do R. Sapucaí (figura 52), antes de 1992 a precipitação foi caracterizada por uma média de 1400 mm com vazão média de 585 mm, entre 1992 a 2007 a precipitação média ficou em 1454 mm com vazão média de 572 mm e após 2007 a chuva média situou-se em 1389 mm e a vazão média foi de 535 mm. Em quase todo o período o coeficiente de escoamento foi menor que índice evaporativo. Em média o coeficiente do escoamento e índice evaporativo foi, respectivamente, 0,39 e 0,61.



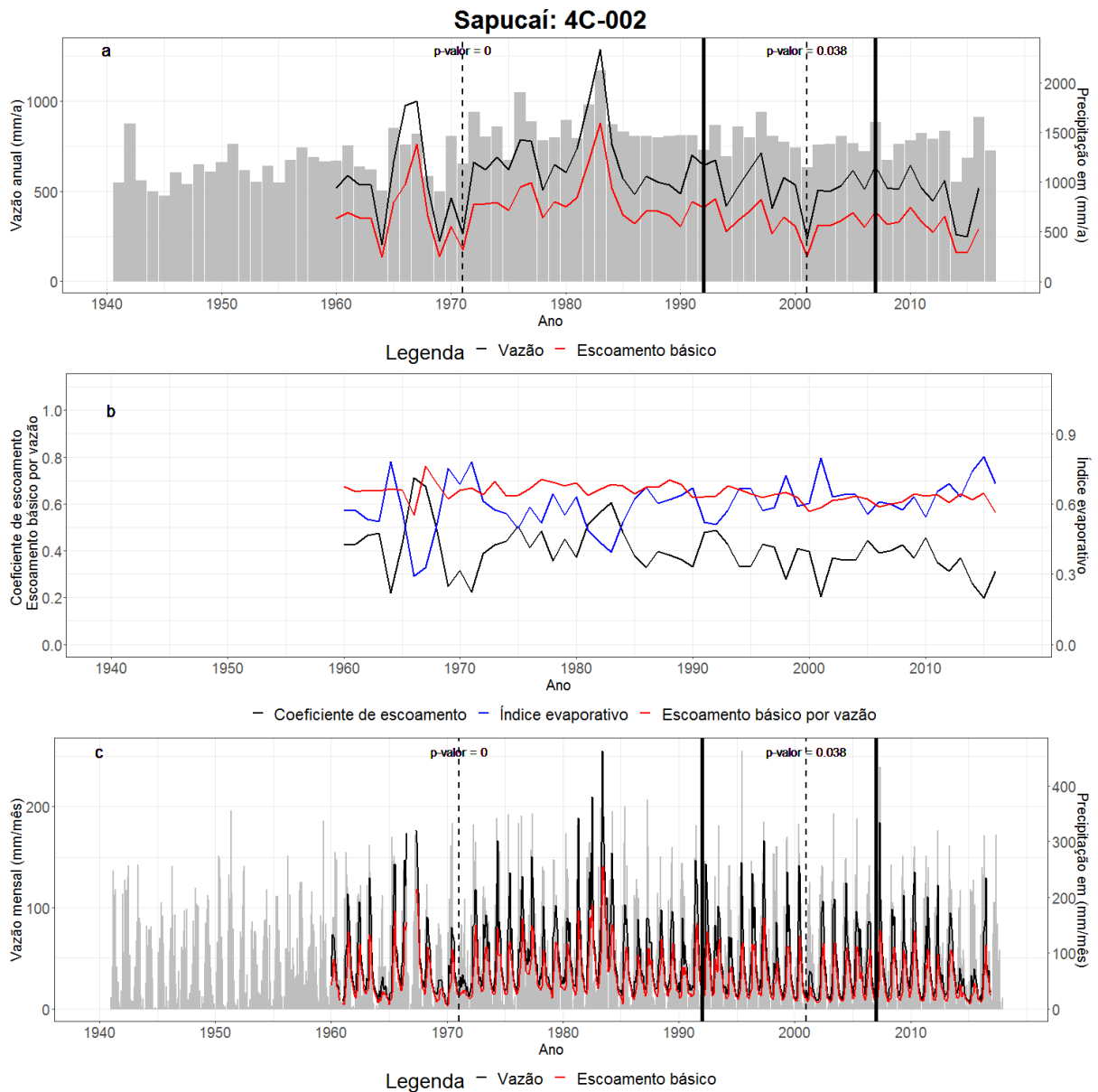


Figura 53 - Id. Fig. 23 para posto 4C-002 no Rio Sapucaí.

Para o posto 4C-002 no Rio Sapucaí (figura 53), antes de 1992, a precipitação média foi 1325 mm com vazão de 628 mm, no intervalo entre 1992 e 2007 a chuva média correspondeu a 1423 mm e vazão de 540 mm e após 2007 a precipitação foi de 1390 mm e vazão de 487 mm.

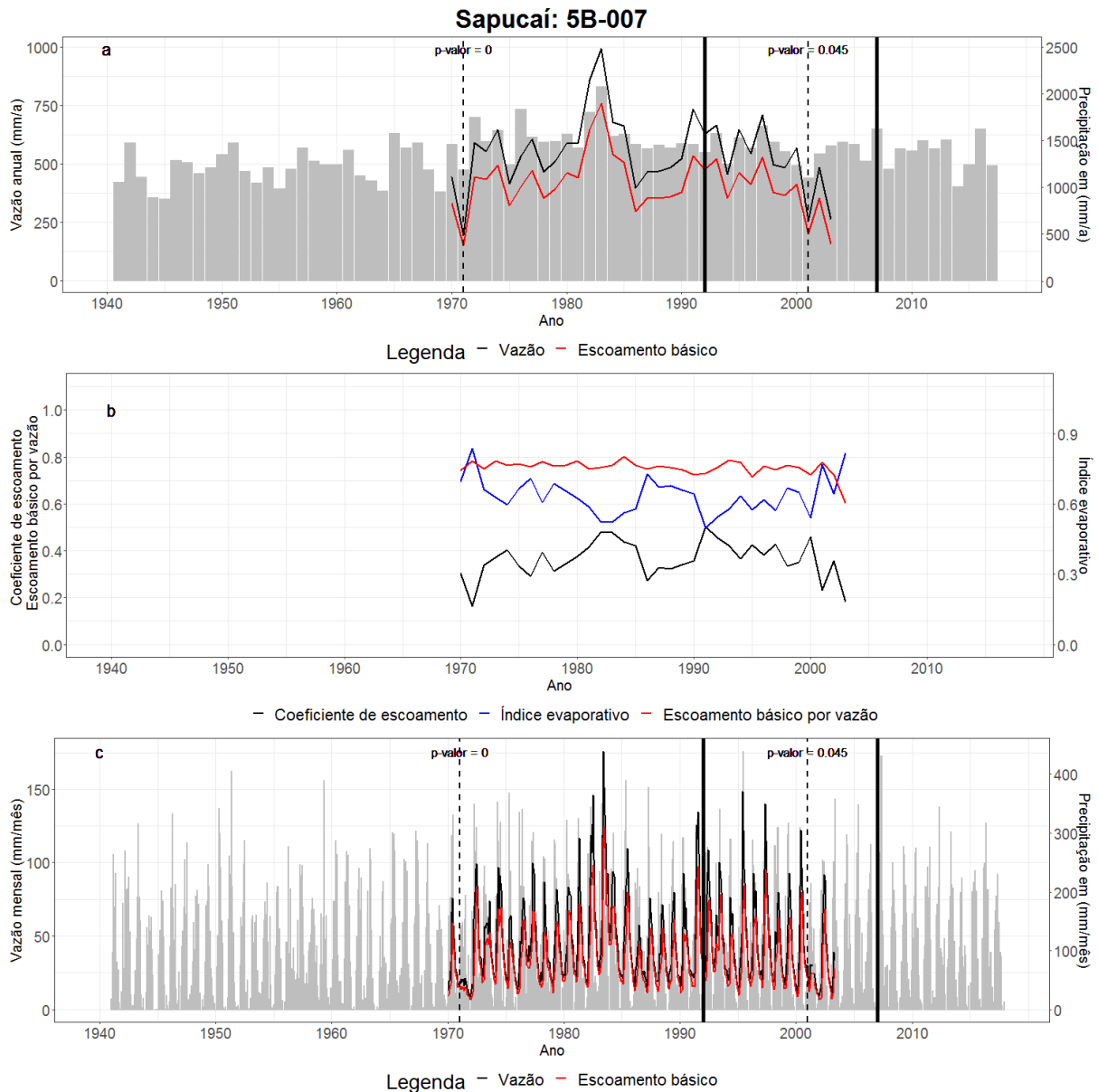


Figura 54 – Id. Fig. 23 para posto 5B-007 no R. Sapucaí-Mirim na bacia do R. Sapucaí.

Para o posto 5B-007 no R. Sapucaí-Mirim na bacia do R. Sapucaí (figura 54) antes de 1992 a chuva média correspondia 1353 mm com vazão média de 565 mm, entre o período de 1992 a 2007 a precipitação e a vazão foram, respectivamente, 1419 mm e 518 mm e após 2007 a média da precipitação correspondeu a 1380 mm. O coeficiente do escoamento apresentou valores entre 0,2 a 0,5 com uma média de 0,37 enquanto o índice evaporativo se situou entre 0,5 a 0,8 com uma média de 0,64.

Todos os postos da bacia do Sapucaí (figuras 52 a 54) foram caracterizados pela ocorrência de pontos de ruptura em 1992 e 2007. Com isso, antes de 1992 a chuva média na bacia foi de 1359 mm, passando pelo período entre 1992 a 2007 no qual a precipitação foi 1433 mm e após 2007 com uma queda na média da precipitação com valores de 1386 mm. A série de precipitação mostra que a partir da década de 1940 há um aumento contínuo no acumulado anual e, então, a partir da década de 1980 ocorre uma tendência de leve queda. No geral, o coeficiente de escoamento foi caracterizado por valores mais baixos em relação ao índice evaporativo. A vazão na bacia apresenta uma tendência de queda no decorrer do tempo.

#### 4.5 Detecção de Rupturas

O resultado do teste de Pettitt aplicado em cada um dos postos de vazão indicando a detecção de pontos de ruptura e p-valor do nível de significância são descritos na tabela 8. Dos 31 postos analisados, 15 apresentaram indícios de descontinuidade. Além disso, 10 dos 12 postos apresentaram o primeiro ponto de ruptura com nível de significância abaixo de 10%.

Estação	Curso	Código estação	1º Ponto de Ruptura (ano)	NS	2º Ponto de Ruptura (ano)	NS
Fazenda Santa Clara	RIO BOCAINA	58220000	1981	0,27	1999	0,23
Estrada do Cunha	RIO PARAITINGA	58030000	1981	0	1992	0,32
Santa Branca	RIO PARAÍBA DO SUL	58099000	1980	0,16	1992	0,13
Pindamonhangaba	RIO PARAÍBA DO SUL	58183000	1982	0,25	1989	0,18
Guaratinguetá	RIO PARAÍBA DO SUL	58204000	1982	0,36	1989	0,36
Queluz	RIO PARAÍBA DO SUL	58235100	2000	0,46	2013	0,17
Monte Alegre do Sul	Rio CAMANDUCAIA	3D-002	1999	1,01	2012	0,53
Piracaia	RIO CACHOEIRA	62665000	1977	0	1992	0,05
Itupeva	RIO JUNDIAÍ	62395000	1975	0,01	1999	0,23
Fazenda barra	Rio CAMANDUCAIA	3D-001	1973	0,49	2012	0,46
Atibaia	RIO ATIBAIA	62670000	1974	0	1999	0,01
Rio Abaixo (faz. Cachoeira)	Rio JAGUARI	62600000	1984	0	1990	0,06
Buenopolis	Rio JAGUARI	3D-009	1984	0	2002	0
Bairro da Ponte	RIO ATIBAIA	3D-006	1977	0	1997	0,1
Desembargador Furtado	RIO ATIBAIA	3D-003	1977	0,02	1997	0,37
Acima de Paulínia	RIO ATIBAIA	4D-009	1977	0,01	1997	0,69
Usina Ester	Rio JAGUARI	4D-001	1989	0	1999	0,26
Carioba	Rio PIRACICABA	4D-010	1977	0,09	2010	1,26
Fazenda Santa Terezinha	Ribeirão da ONÇA	5C-017	1985	0,46	1996	0,17
Mogi-Guaçu	Rio MOGI-GUAÇU	3D-004	1975	0,59	1984	0,41
Pádua Sales	RIO GRANDE	61886000	1975	0,04	1999	0,19
Porto Cunha Bueno	Rio MOGI-GUAÇU	4C-007	2000	0,99	2013	1,09
Ponte Guatapar	RIO GRANDE	61912000	1973	0,08	2003	0,25
Passagem	Rio MOGI-GUAÇU	5C-025	1987	0,34	2006	1,42
São José do rio Pardo	RIO PARDO	61817000	1951	0,66	1956	0,17
Clube de Regatas	RIO PARDO	4C-001	1972	0	1985	0,29
Parque do Ribeirão Preto	RIO PARDO	61840000	1951	0,29	1956	0,12
Fazenda Bela Vista	RIO PARDO	5B-011	1985	0,53	1996	0,41
Santo Antnio da Alegria	Rio SAPUCAI	4C-002	1997	0,04	2011	0,95
Patrocínio Paulista	Rio SAPUCAIZINHO	4B-015	1997	0,26	2011	0,53
Fazenda São Domingues	Rio SAPUCAI-MIRIM	5B-007	1997	0,74	2000	0,62

Tabela 8– Nome da estcao, curso, estcao, ano do primeiro e segundo ponto de ruptura e, respectivos, níveis de significância (NS) para a vazão resultante do teste de Pettitt. Hachurado em

amarelo indica níveis de significância significativo abaixo de 10%.

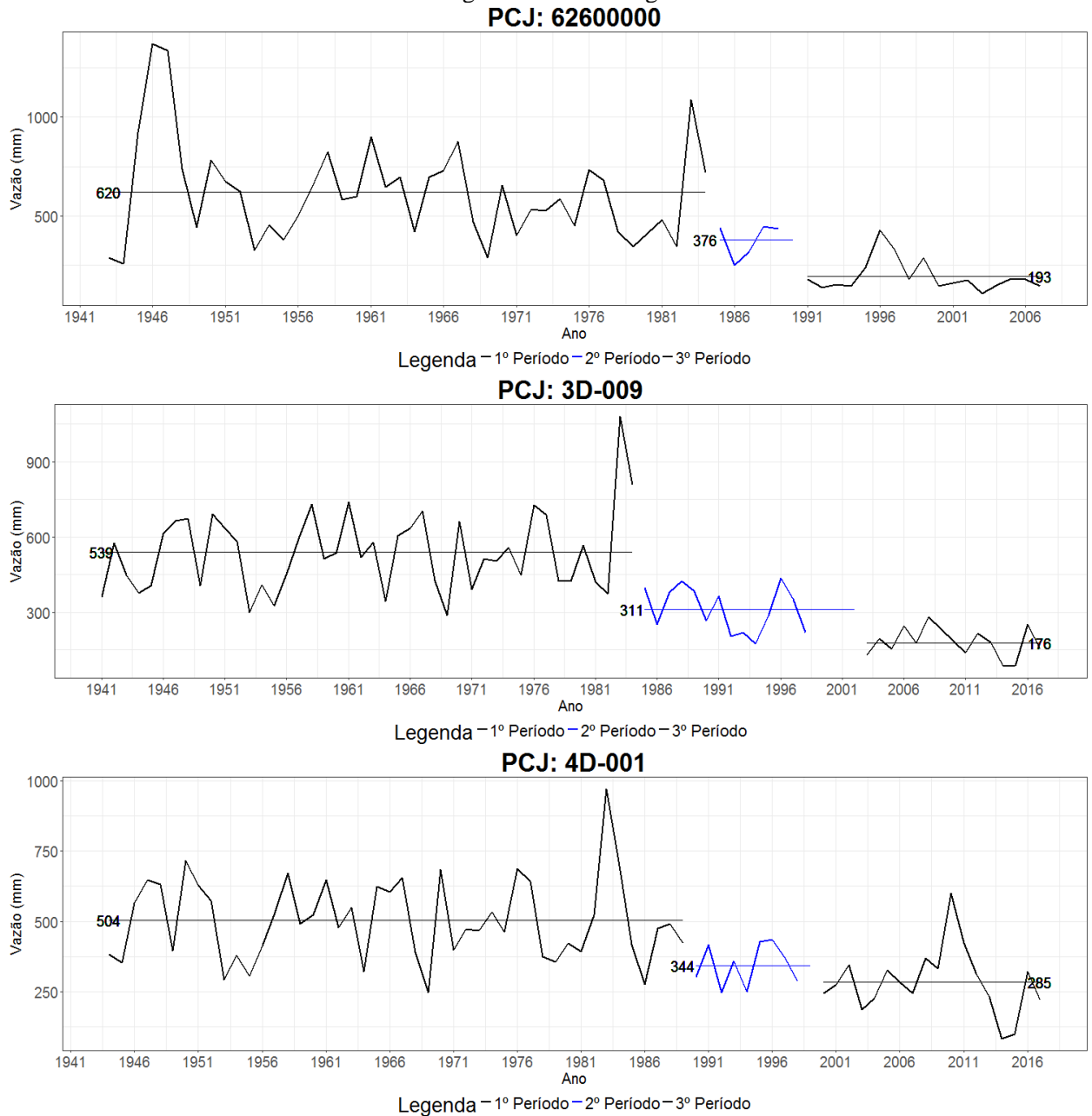


Figura 55 – Vazão específica anual em três postos do rio Jaguari na bacia do PCJ. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

Na figura 55 é mostrado o resultado da aplicação do teste de Pettitt nos postos 62600000, 3D-009 e 4D-001 pertencentes ao rio Jaguari na bacia do PCJ. O teste de Pettitt permite a detecção de pontos de rupturas na série. Desse modo, separando em duas amostras estaticamente diferentes antes e depois no ponto de ruptura definido. Nos três casos analisados evidencia-se uma diminuição significativa na média da vazão. Em todos os casos o nível de significância do teste de Pettitt para o primeiro ponto de quebra foi extremamente baixo indicando pela não rejeição da hipótese nula de que há mudança no comportamento estatístico da série. No posto 62600000 a vazão média caiu de 620 mm de 1941 a 1984 para 193 mm de 1996 até 2007, representando uma vazão média três vezes menor ao que foi registrado inicialmente. O primeiro ponto de ruptura ocorreu em 1984 ou em 1989 e o segundo ponto de

ruptura deu-se em 1990 ou em 1999 conforme o posto considerado. Esse primeiro ponto de quebra está associado com a operação da represa do Jaguari inaugurada em 1981.

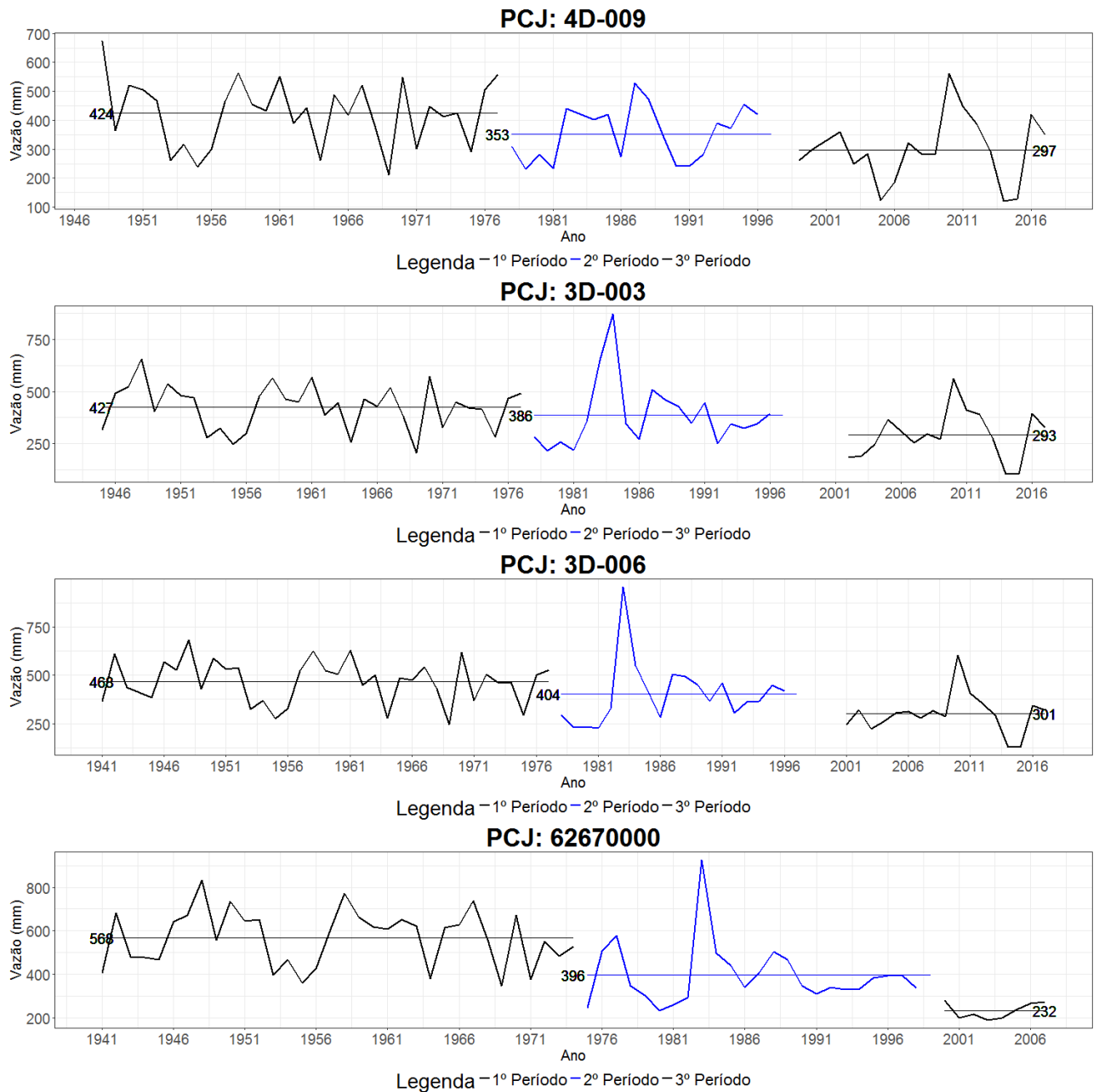


Figura 56 – Vazão específica anual em quatro postos do rio Atibaia bacia do PCJ. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

A figura 56 mostra o resultado da aplicação do teste de Pettitt em quatro postos do rio Atibaia localizados na bacia do PCJ. Em todos os postos considerados verifica-se uma tendência de queda na vazão. Além disso, o primeiro ponto de ruptura ocorreu em 1977 exceto para o posto 62670000 onde esse ponto foi calculado em 1974. Esse primeiro ponto deve estar associado com a operação da represa de Atibainha em 1975. O segundo ponto de ruptura foi marcado em 1997, exceto para o posto 67670000 onde esse ponto ocorreu 1999.

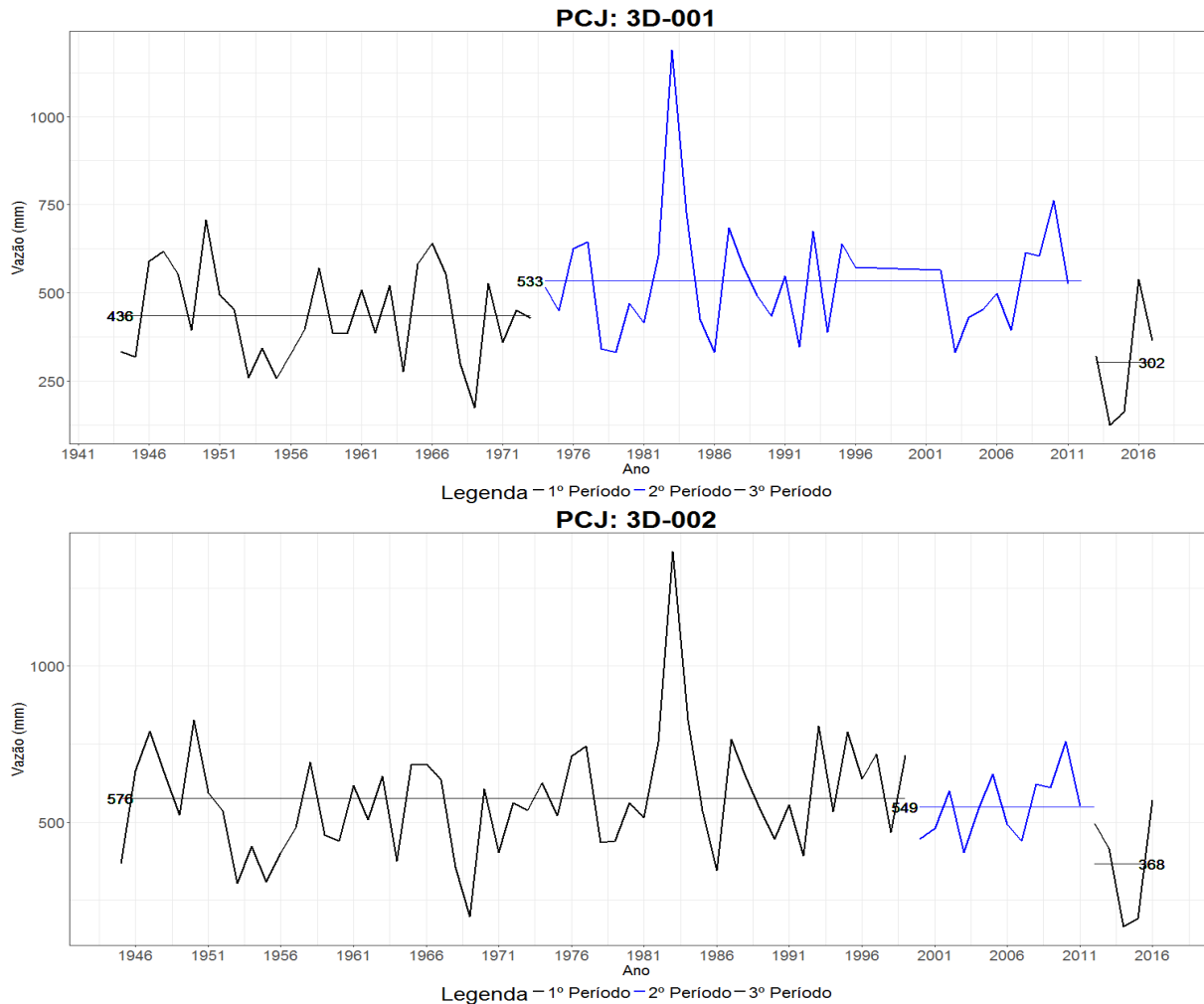


Figura 57 - Vazão específica anual em dois postos do rio Camanducaia na bacia do PCJ. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

A figura 57 mostra o resultado da aplicação do teste de Pettitt em duas séries localizadas no rio Camanducaia na bacia do PCJ. Nesse caso, o primeiro ponto de ruptura deu-se respectivamente, em 1973 e 1999, respectivamente para os postos 3D-001 e 3D-002. O segundo ponto de ruptura em ambos os postos ocorreu em 2012. Como o nível de significância nas duas séries foram alto, isso indica a não existência de alteração nos padrões estatísticos dessas séries. Pellegrino (1995) observou que o posto 3D-001 não apresentou nem tendência ou um ponto de ruptura significativo. Groppo et al. (2001) e Groppo et al. (2005) também constaram a não existência de tendência e de ponto de ruptura nesses dois postos do rio Camanducaia. Frederice e Brandão (2016) verificam que no posto 3D-001 ocorreu um ponto de ruptura em 1975 com ocorrência de um aumento da vazão de 12,86 para 15,61 m<sup>3</sup>/s embora esses mesmos autores não mencionam o nível de significância.

Na figura 58 é mostrada a aplicação do teste de Pettitt para o posto 623950000 localizado rio Jundiá na bacia do PCJ. Nota-se a ocorrência de um padrão diferente na primeira quebra em relação ao observado nas séries do Jaguari e Atibaia (figuras 55 e 56). Nesse caso, o segundo período foi marcado por um aumento na vazão média a qual inicialmente era de 333 mm passou a ser de 449 mm. No terceiro período verificou-se uma diminuição na vazão situando-se em 356 mm.

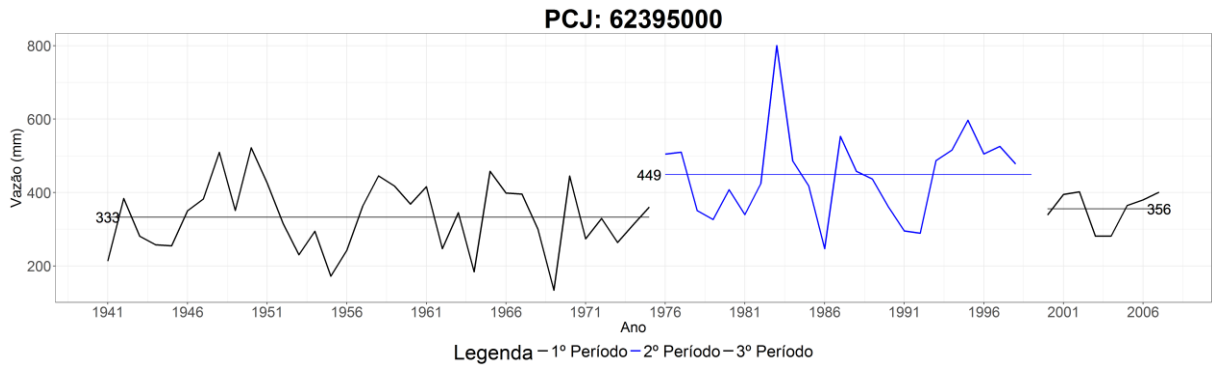


Figura 58 - Vazão específica anual para o posto 623950000 do rio Jundiá na bacia do PCJ. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

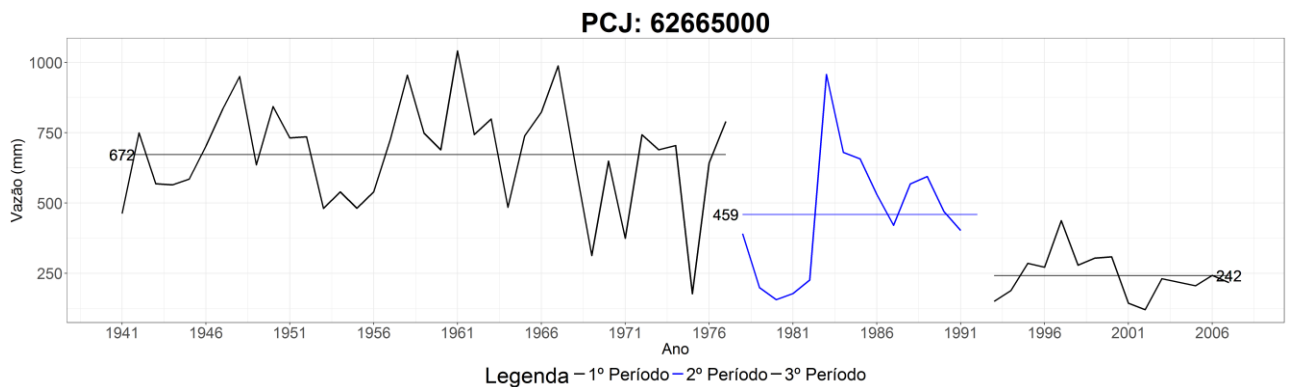


Figura 59- Vazão específica anual para o posto 62665000 do rio Cachoeira na bacia do PCJ. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

O resultado da aplicação do teste de Pettitt para o posto 62665000 localizado no rio Cachoeira na bacia do PCJ é mostrado na figura 58. Constata-se uma queda significativa na vazão no decorrer do tempo. A vazão média inicialmente em 672 mm caiu drasticamente para 242 mm, representando uma queda de 36 % em termos médios. Os pontos de ruptura ocorreram em 1977 e em 1992. Esse primeiro ponto está associado com a operação do reservatório do Cachoeira em 1974.

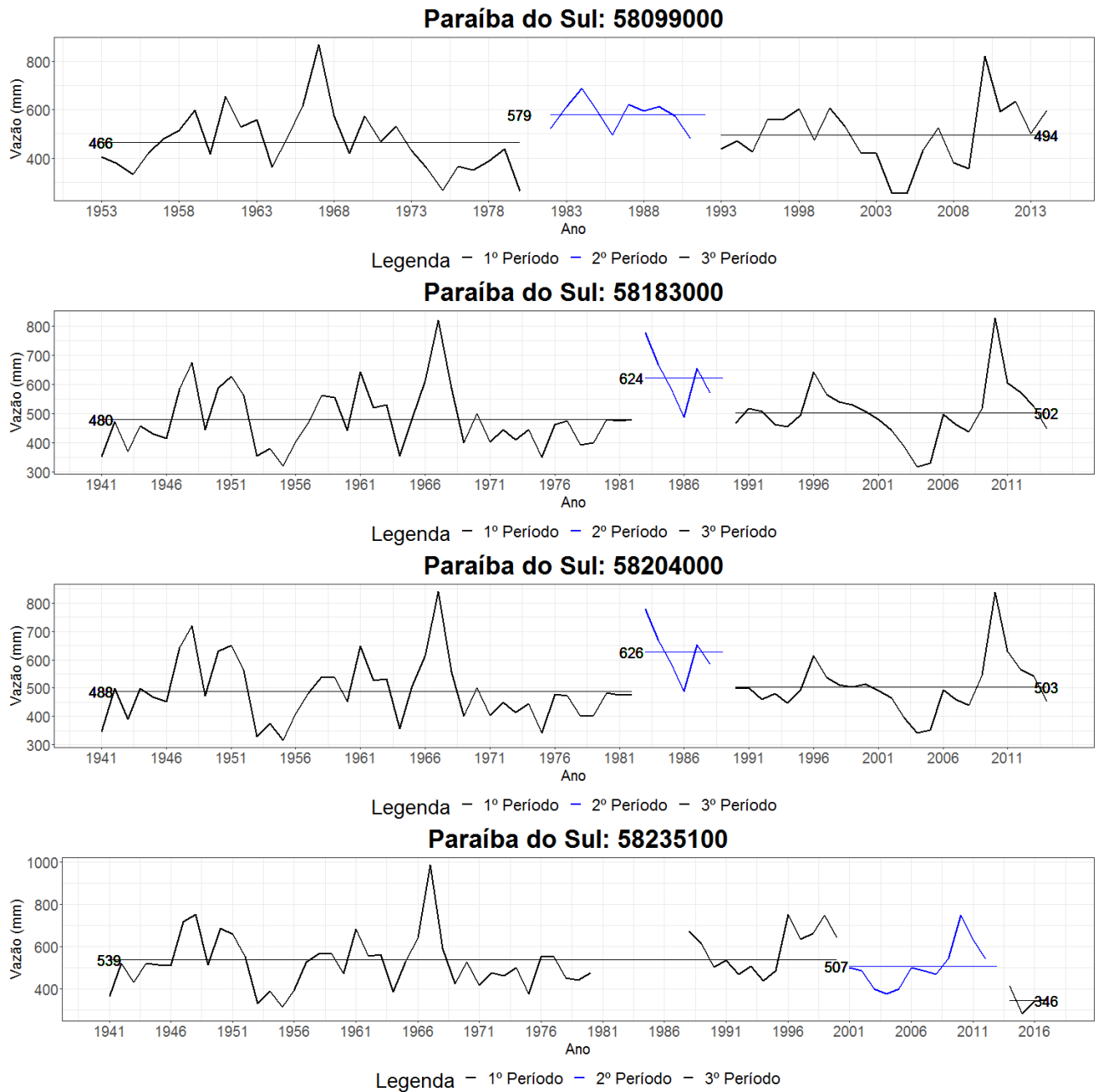


Figura 60 - Vazão específica anual em quatro postos do rio Paraíba do Sul na bacia do Paraíba do Sul. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

Na figura 60 é mostrado o resultado do teste de Pettitt para quatro postos situados no rio Paraíba do Sul. Como o valor do nível de significância no primeiro ponto de ruptura nos quatro casos foi acima de 10 % não se pode afirmar a ocorrência de alterações nos padrões estatísticos das séries consideradas.



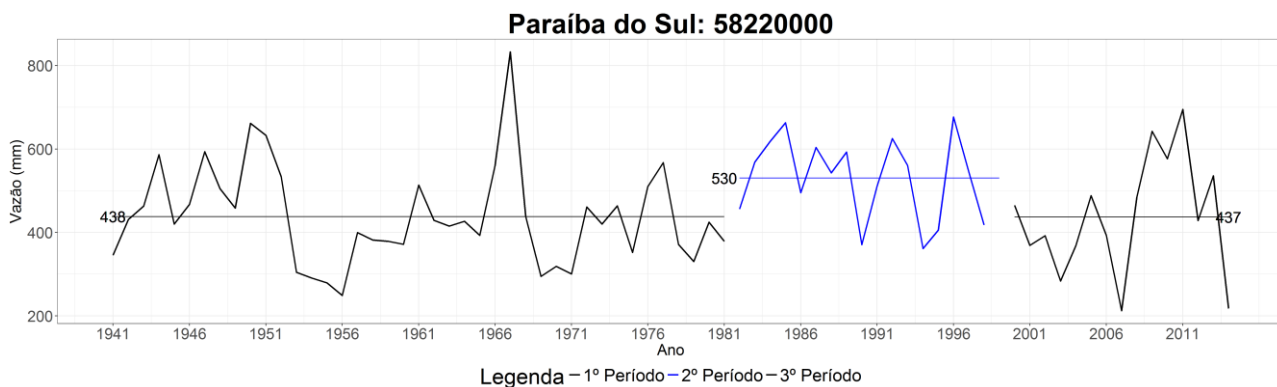


Figura 61- Vazão específica anual no posto 58220000 do rio Bocaina na bacia do Paraíba do Sul. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

A figura 61 mostra o resultado do teste de Pettitt para um posto localizado no rio Bocaina na bacia do Paraíba do Sul. Como o nível de significância é maior que 10% há poucas evidências da ocorrência de mudanças nos padrões estatísticos.

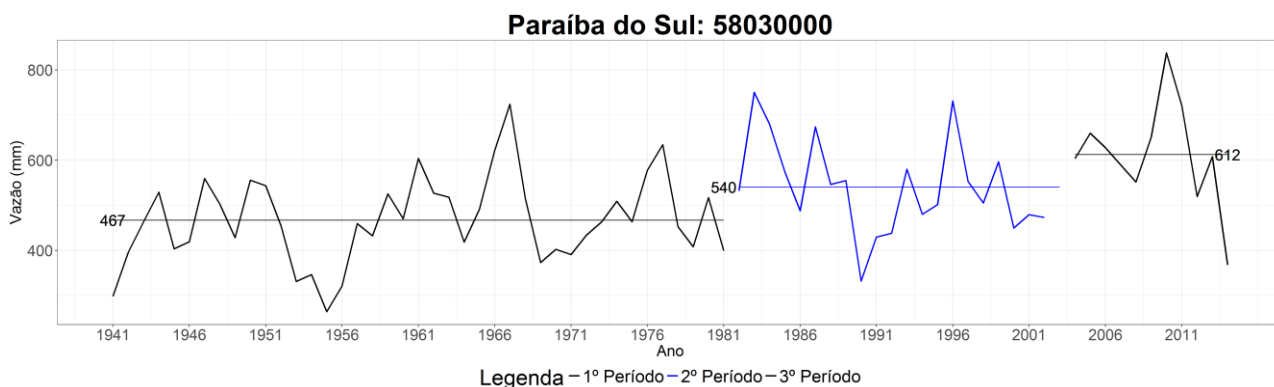


Figura 62 - Vazão específica anual no posto 58030000 do rio Paraitinga na bacia do Paraíba do Sul. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

O resultado do teste de Pettitt em um posto do rio Paraitinga na bacia do Paraíba do Sul (figura 62) evidencia três de ruptura associados a um aumento contínuo de 33 % na vazão. O primeiro período entre 1941 a 1981 deve uma vazão média de 467 mm, seguido do intervalo entre 1981 a 2003 com uma média de 540 mm e depois de 2003 a média correspondeu a 612 mm. O ponto de ruptura em 1981 devido ao baixo p-valor apresenta um nível estatístico significativo de indicação de mudança nos parâmetros da vazão. No estudo de Marengo (2005) constatou-se a existência de uma tendência de queda na vazão em vários postos da bacia do Paraíba do Sul por meio do teste de Mann-Kendall. O mesmo autor atribui a regularização do uso de água para abastecimento, geração de energia elétrica e desvio de rios para uso em agricultura. Com isso, fatores antrópicos foram responsáveis pela queda da vazão.

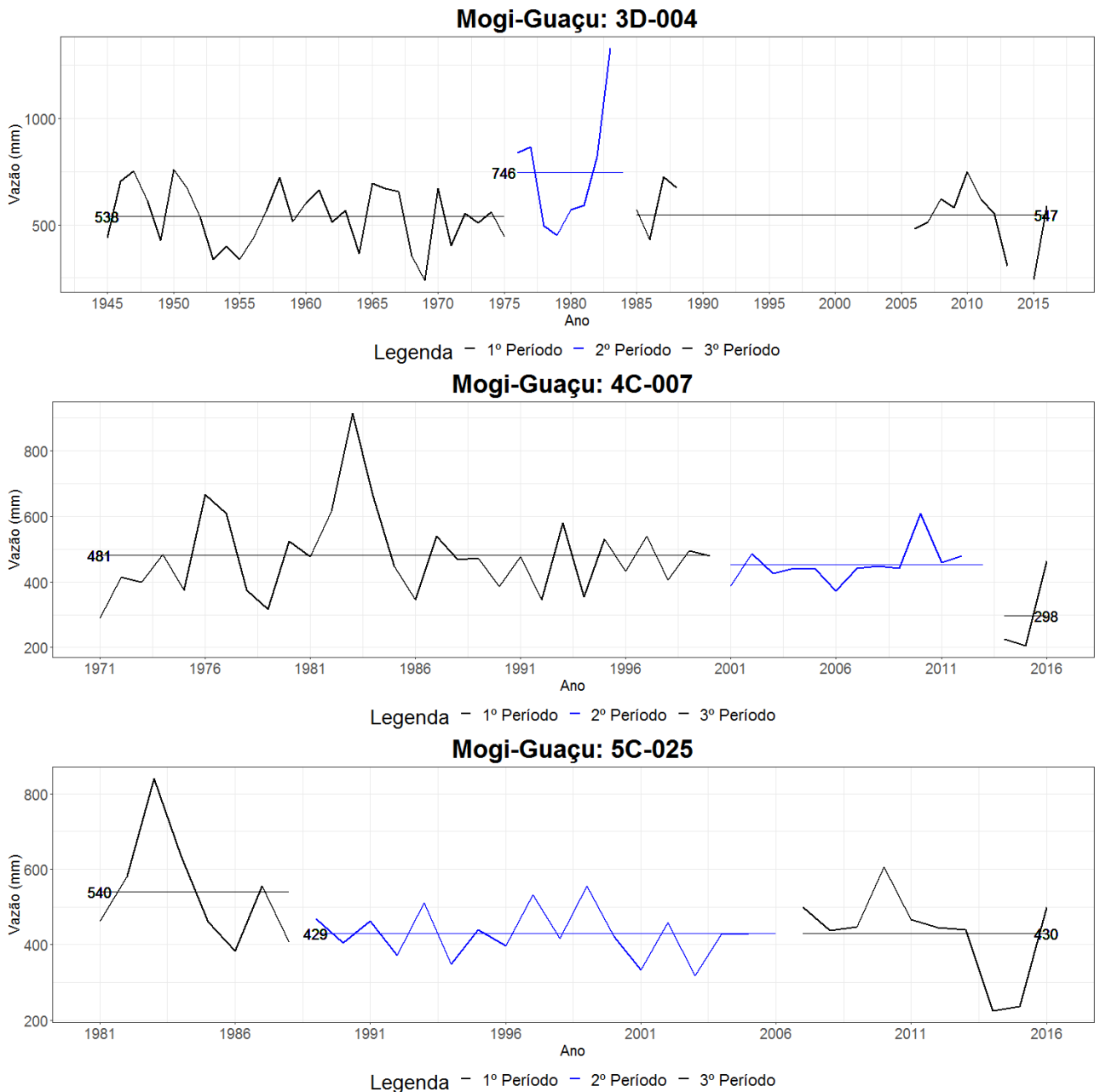


Figura 63 – Vazão anual nos postos 3D-004, 4C-007 e 5C-025 situados no rio Mogi-Guaçu. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

Na figura 63 é mostrado o resultado do teste de Pettitt aplicado em três postos pertencentes ao rio Mogi-Guaçu na bacia rio Mogi-Guaçu. Embora o teste de Pettitt tenha delimitado a ocorrência de três períodos com regimes diferentes de vazão, a obtenção do p-valor acima de 0,1 indica ou sugere a não existência de mudanças significativas nos regimes de vazão. Não obstante Vilanova (2014) examinou a tendência através do teste de Mann-Kendall em dois postos (61861000 e 61865000) no período de 1973 a 2006 a montante do posto 3D-004 e constatou uma tendência negativa tanto na vazão como na chuva. Esse mesmo autor menciona que são três as hipóteses possíveis associadas a mudanças no comportamento das variáveis hidrometeorológicas. Nesse caso, segundo o autor mudanças em componentes climáticas globais e regionais, alterações no uso do solo e aumento da captação impactam na precipitação e no escoamento fluvial.

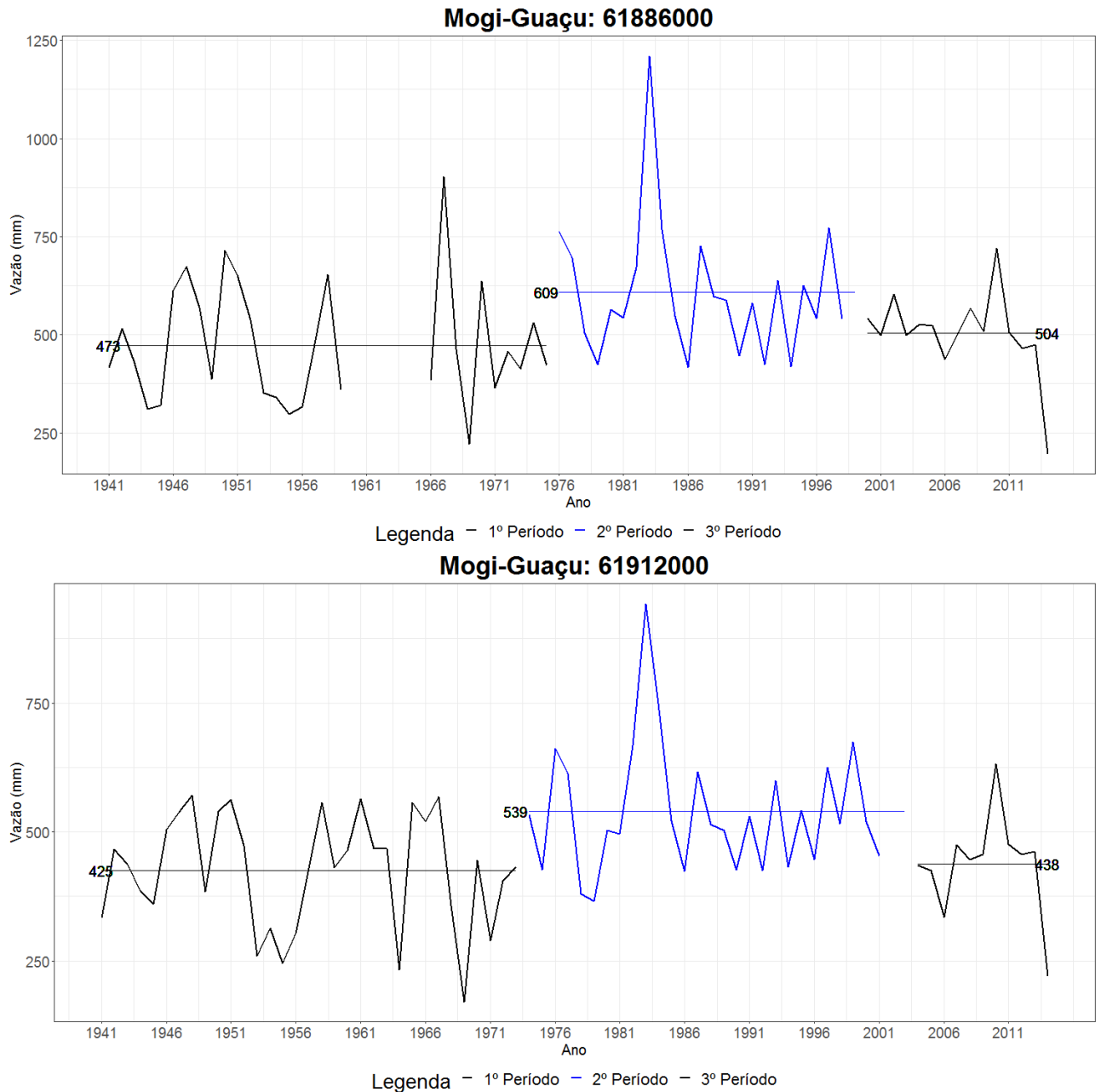


Figura 64 – Vazão anual nos postos 61886000 e 61912000 no rio Grande na bacia do Mogi-Guaçu. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

O resultado da aplicação do teste de Pettitt (figura 64) nos postos 61886000 e 61912000 localizados no rio Grande na bacia do Mogi-Guaçu evidencia grande similaridade nos padrões estatísticos dos padrões estatísticos em ambos os postos. Há muito provavelmente um ponto de ruptura em razão do p-valor abaixo de 10% situado em 1975 ocorrendo, então, um aumento na vazão de 29 e 27 %, respectivamente, nos postos 61886000 e 61912000. Posteriormente em 1999 e 2003 acontece um novo ponto de ruptura, contudo como o p-valor situou-se acima de 10 % não há uma indicação significativa na alteração da média da vazão.

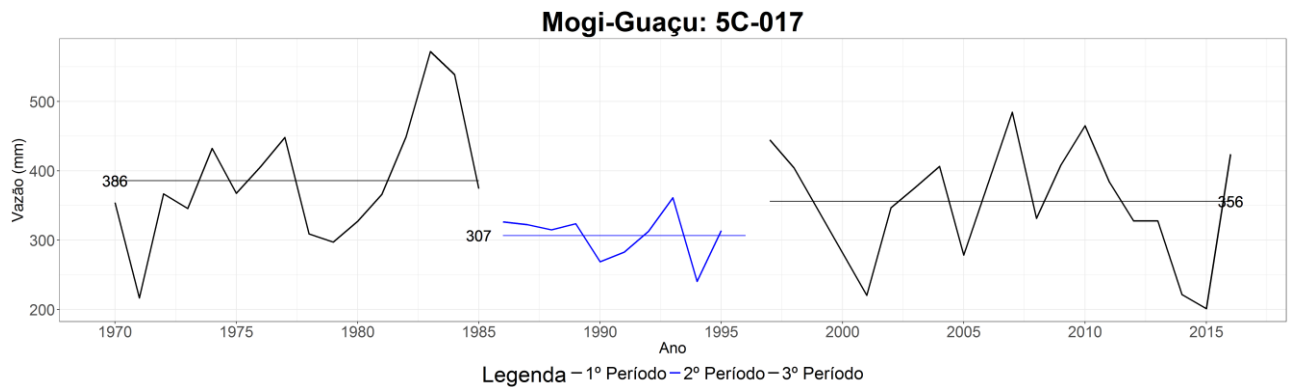


Figura 65 – Vazão anual no posto 5C-017 no ribeirão da Onça na bacia do Mogi-Guaçu. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

Na figura 65 é mostrado o resultado do teste de Pettitt na determinação de descontinuidade no posto 5C-017 no ribeirão da Onça na bacia do Mogi-Guaçu. O p-valor calculado (0,47 e 0,17, respectivamente) em relação a 1985 e a 1996 não mostra forte evidência de alteração no padrão estatístico da série.

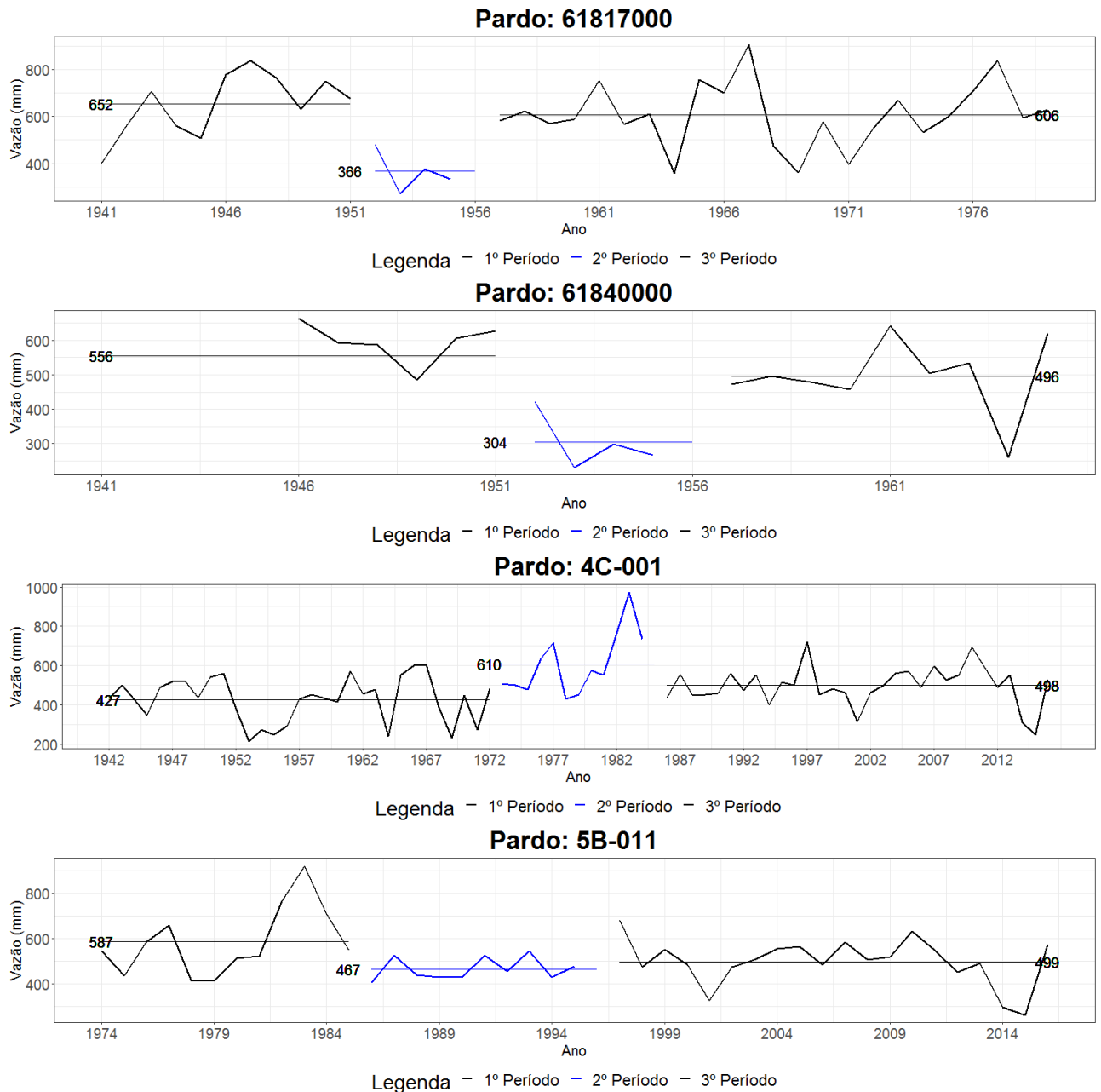


Figura 66 – Vazão anual em quatro postos da bacia do rio Pardo. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

Na figura 66 é mostrado o resultado da aplicação do teste de Pettitt em quatro postos localizados no rio Pardo na bacia do rio Pardo. Os postos 61817000 e 61840000 possuem dois pontos de ruptura na década de 1950 associados a um episódio de seca. O p-valor calculado para o primeiro ponto de ruptura foi de 0,66 % e 0,28 %, respectivamente, para os postos 61817000 e 61840000 não sendo, com isso, significativo para a caracterização de uma mudança na série. O posto 4C-001 evidencia uma mudança significativa na vazão na década de 1970 em razão do baixo valor de p-valor. Santos et al (2016) constatou no posto 61834000 (localizado próximo ao ponto 4C-001) a presença de uma tendência positiva na vazão máxima com base nos testes de Mann-Kendall e Spearman rho. Santos et al (2016) também obteve um ponto de ruptura em 1975 pelo teste de Pettitt sendo, com isso, próximo ao determinado nesse trabalho com a ocorrência de um ponto de ruptura. A principal razão para ocorrência de um ponto de ruptura no posto 4C-001 pode ser atribuída à operação das barragens de Limoeiro e

Euclides da Cunha inauguradas a montante, respectivamente, em 1958 e 1966. O posto 5B-011 não apresenta indicativos de uma mudança significativa nos parâmetros da vazão.

Para o Rio Pardo a detecção de pontos de rupturas com o uso do teste de Pettitt revelou que em todos os casos ocorreu uma descontinuidade em 1968. Santos et al (2016) usando uma média em 10 postos de chuva nessa mesma bacia não constatou pelo teste de Mann-Kendall uma alteração na tendência de chuva no intervalo entre 1941 a 2000 ou 2013. O resultado de Santos et (2016) pode ter sido afetado por usar apenas o acumulado de chuva no período chuvoso (dezembro a fevereiro).

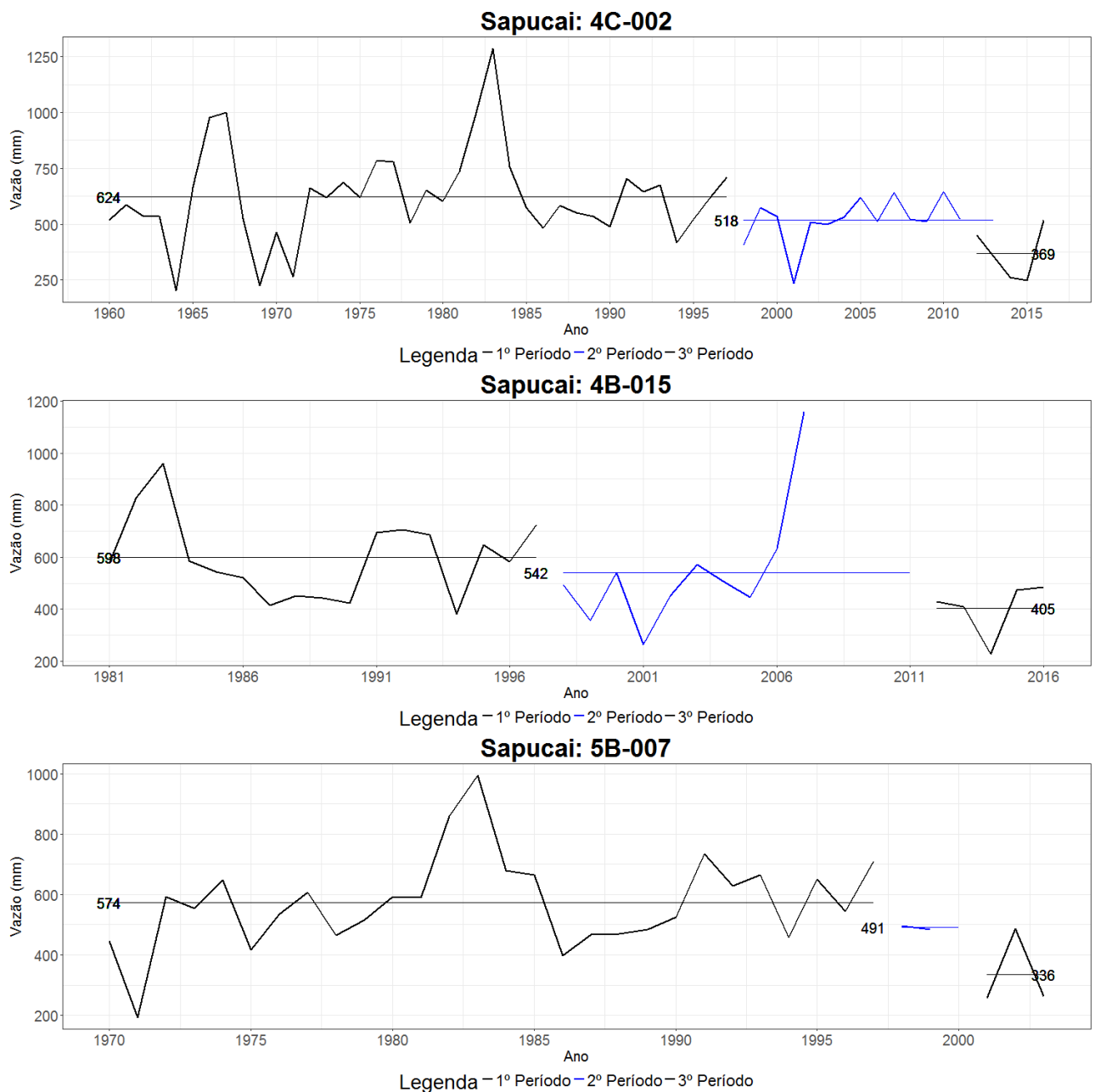


Figura 67 – Vazão anual em três postos da bacia do rio Pardo. As retas preta ou azul indicam a média da vazão conforme o período.

De um conjunto de três postos situados na bacia do Sapucaí-Mirim (figura 67) apenas o posto 4C-002 no rio Sapucaí localizado na bacia do Sapucaí-Mirim apresentou indicação ( $p$ -valor = 0,04) de uma mudança significativa nos parâmetros da vazão. Com base nisso, em 1997 a vazão média passou de 624 mm para 518 mm representando uma redução 27 % no escoamento.

#### 4.6 Balanço médio em escala regional

A relação entre a vazão média ( $m^3/s$ ) e a área de contribuição ( $km^2$ ) de postos hidrológicos indica a vazão específica (mm). Uma boa concordância da vazão específica entre postos significa uma produção por área média de água superficial semelhante, de onde pode-se supor que os controles de resposta chuva-vazão em média anual podem *a priori* ser semelhantes. Por controles entende-se que atuação dos sistemas sinóticos na área de estudo, os aquíferos e as propriedades físicas do solo são semelhantes o suficiente para não gerar alterações significativas nos processos de interação entre chuva e vazão. Esta relação foi verificada com dados da vertente leste da Serra da Canastra (Pruski, 2004) e dados da vertente oeste discutidos no presente trabalho. A vertente leste abrange as cabeceiras da bacia do Rio São Francisco no Estado de MG, que tem em comum a mesma região das cabeceiras dos Rios Sapucaí e Pardo, e imediatamente ao sul a Serra da Mantiqueira em regiões próximas das cabeceiras das bacias dos rios Mogi-Guaçu, rios PCJ e particularmente no Paraíba do Sul nas nascentes de leste. Também em comum em grande parte destas regiões está a dinâmica dos processos de geração de chuva.

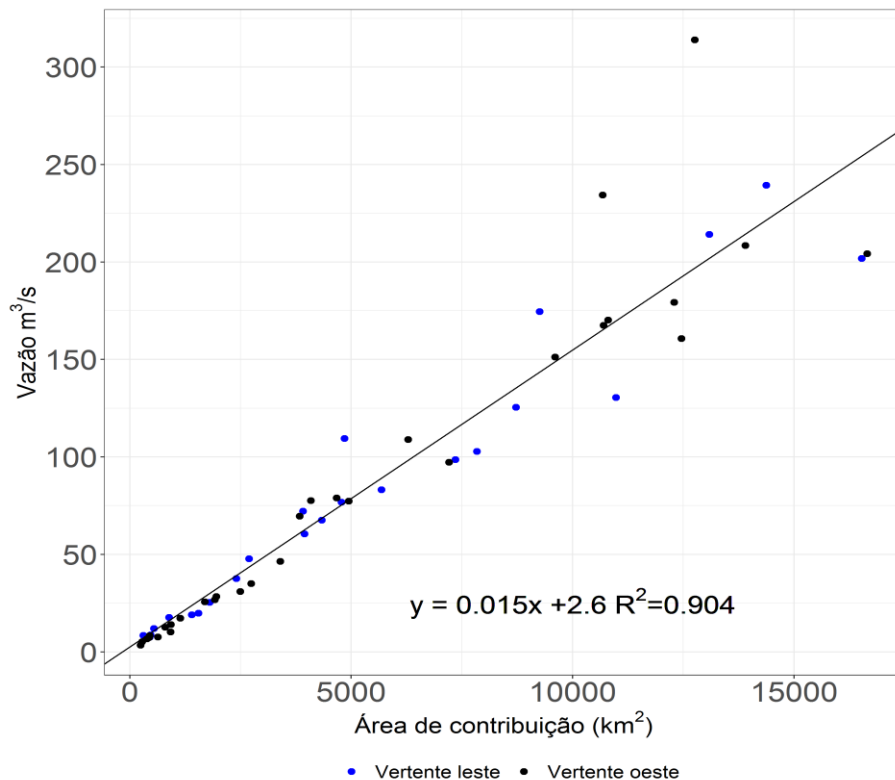


Figura 68 - Comparação entre a relação entre a área de contribuição e vazão conforme a vertente leste Pruski (2004) e a vertente oeste.

O conjunto de postos mostrou uma relação significativa com a área de contribuição (Fig. 68), que mostrou pequena dispersão para áreas menores que  $10.000 \text{ km}^2$ , e maior dispersão para áreas superiores até aproximadamente  $15.000 \text{ km}^2$ . Essa diferença na forma da dispersão pode estar associada com a mudanças nos processos chuva-vazão com o aumento da área de contribuição. Não foi notada nenhuma diferença marcante entre os postos nas vertentes leste e oeste, o que sugere que os dois conjuntos de dados (este trabalho e Pruski, 2004) estão indicando estimativas médias de vazão em regiões razoavelmente homogêneas no contexto de processos de resposta chuva-vazão.

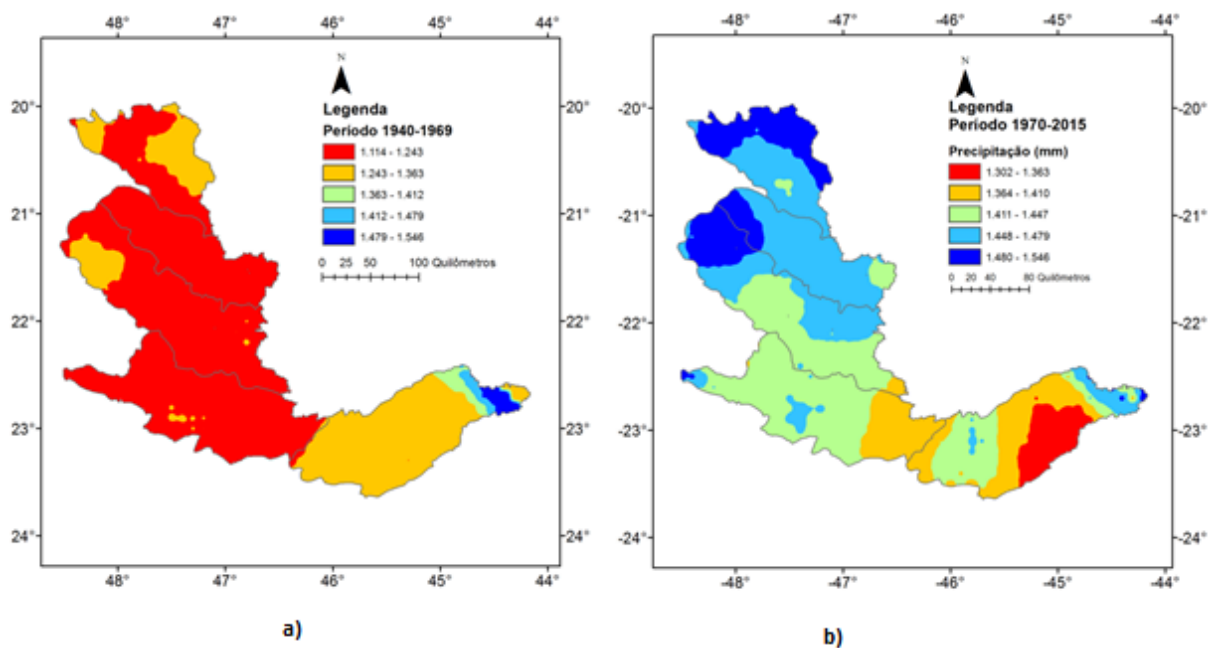


Figura 69– Precipitação anual média (interpolação espacial) em dois intervalos de tempo: (a) 1940-1969 e (b) 1970-2015 nas bacias do PCJ, Pardo, Paraíba do Sul, Mogi-Guaçu e Sapucaí.

Na figura 69 é mostrada a precipitação anual média em dois diferentes intervalos gerado pela interpolação por meio do inverso da distância ponderada. No primeiro intervalo (1940-1969) quanto no segundo intervalo (1970-2015), a precipitação situou-se entre 1114 até 1660 mm. No primeiro intervalo a maior precipitação ocorre na bacia do Paraíba do Sul e os menores volumes ocorrem, principalmente, nas bacias do Pardo e Mogi-Guaçu. Esse padrão na distribuição de chuva ocorre atribuído ao efeito da continentalidade. O segundo período é marcado por uma mudança significativa no padrão de chuva. Nesse caso, os menores valores ocorrem na bacia do Paraíba do Sul e os mais altos estão presentes na bacia do Sapucaí e Pardo onde a topografia é mais elevada. Com isso, há um menor efeito da continentalidade na distribuição de chuva sobre as bacias, uma vez que é sabido que a presença dos setores mais altos da Serra da Mantiqueira contribui para maiores valores de chuva, em geral próximos de 1800 mm (Copasa, 2011).



#### 4.7 Inclusão do termo do armazenamento na estimativa de ET

Na figura 70 é mostrado o resultado do cálculo da anomalia da espessura de LWE ( espessura do conteúdo de água líquida inferida pelo Grace) durante o período de maio de 2002 a junho de 2017 em cada uma das bacias do presente estudo. No caso das bacias do Pardo, Mogi-Guaçu e Sapucaí a anomalia de LWE foi a mesma em razão da resolução espacial. A amplitude máxima observada dessa anomalia corresponde a 86 cm. Há um ciclo sazonal bem definido com os máximos ocorrendo durante ou no final da estação chuvosa representando um certo atraso em relação ao pico mensal da chuva. Esse comportamento é esperado. O efeito da seca de 2014 é bem visível com a ocorrência de um mínimo absoluto próximo de -60 cm em 2015 e com a lenta recuperação depois aos níveis anteriores.

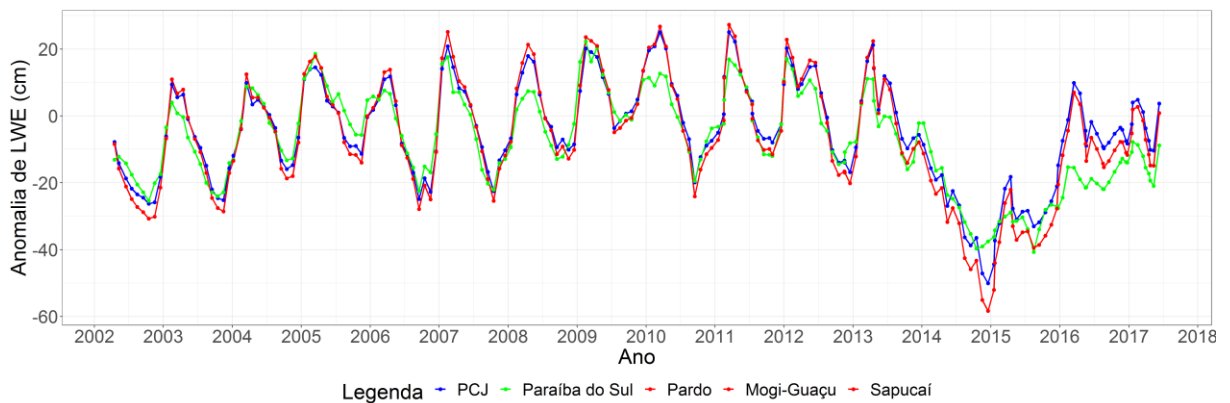


Figura 70 – Anomalia da espessura de LWE (cm de água) estimada pelo Grace nas bacias do PCJ, Paraíba do Sul, Pardo, Mogi-Guaçu e Sapucaí. Devido à resolução as bacias do rio Pardo, Mogi-Guaçu e Sapucaí possuem os mesmos valores.

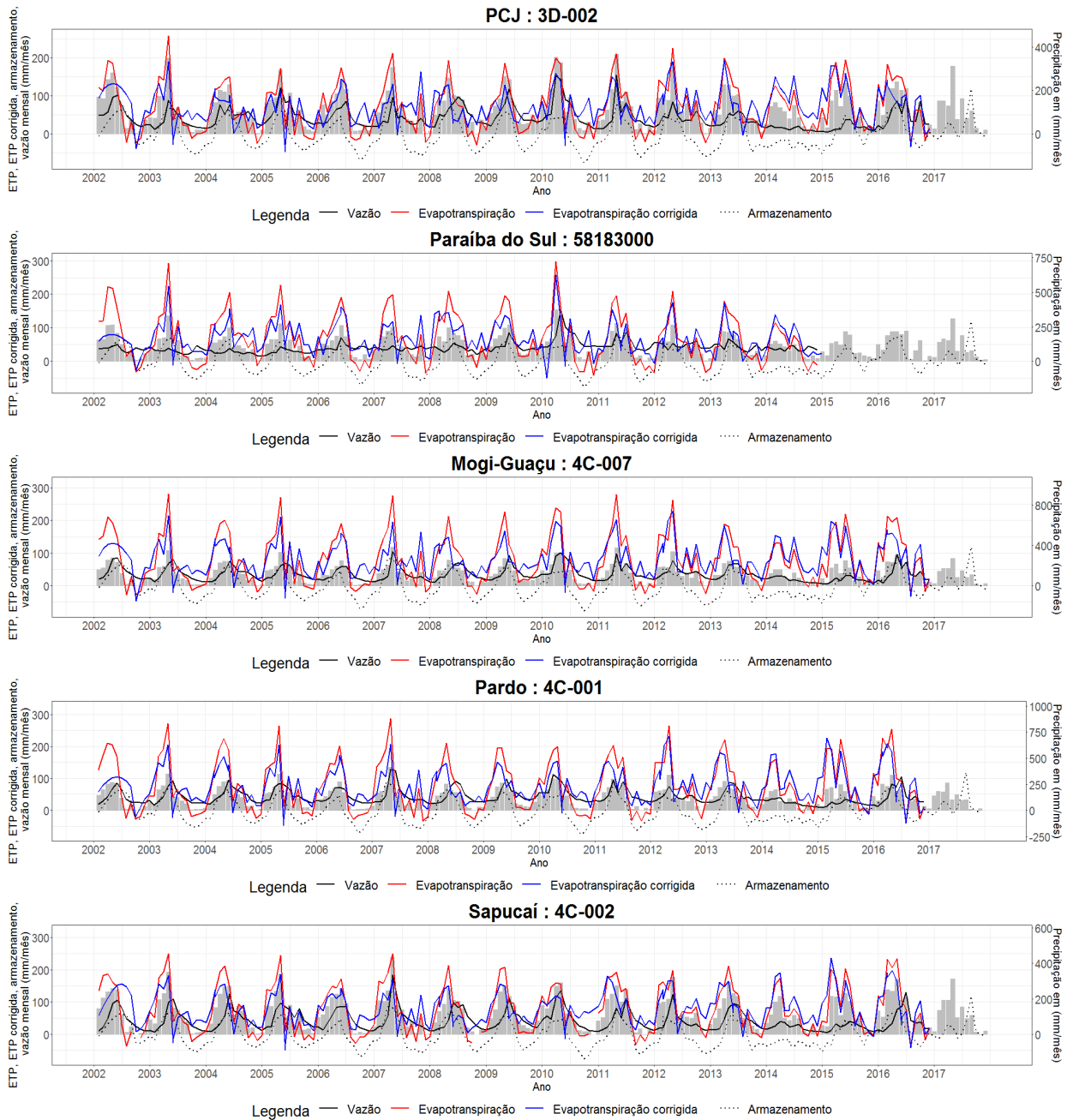


Figura 71 – Componentes do balanço hídrico mensal como vazão, ET, ET corrigida e termo do armazenamento em cinco diferentes pontos.

Na figura 71 é mostrado o resultado do balanço hídrico mensal para cinco diferentes pontos representativos de cada bacia conforme indicado. Os resultados estão plotados conforme o ano hidrológico. Os postos escolhidos foram 3D-002, 58183000, 4C-007, 4C-001 e 4C-002. A ET mensal calculada pelo balanço hídrico simplificado e aquela ET corrigida com o termo do armazenamento possuem ambas um ciclo sazonal bem definido, com valores mais altos na estação chuvosa e mais baixos e às vezes negativo (devido à metodologia) na estação seca. Há uma tendência da ET corrigida ser menor do que a ET sem correção no período chuvoso, enquanto que nos meses seco a ET corrigida é maior do que a ET simples. A única exceção fica para o armazenamento no período entre 2014 a 2015 no qual houve pouca flutuação em razão da seca.

Esta comparação é mais clara na figura 72 pela comparação em cinco diferentes postos em cada uma das bacias. Os resultados mostram que a ET corrigida tende a apresentar valores mais baixo que a ET simplificada, principalmente na estação chuvosa.

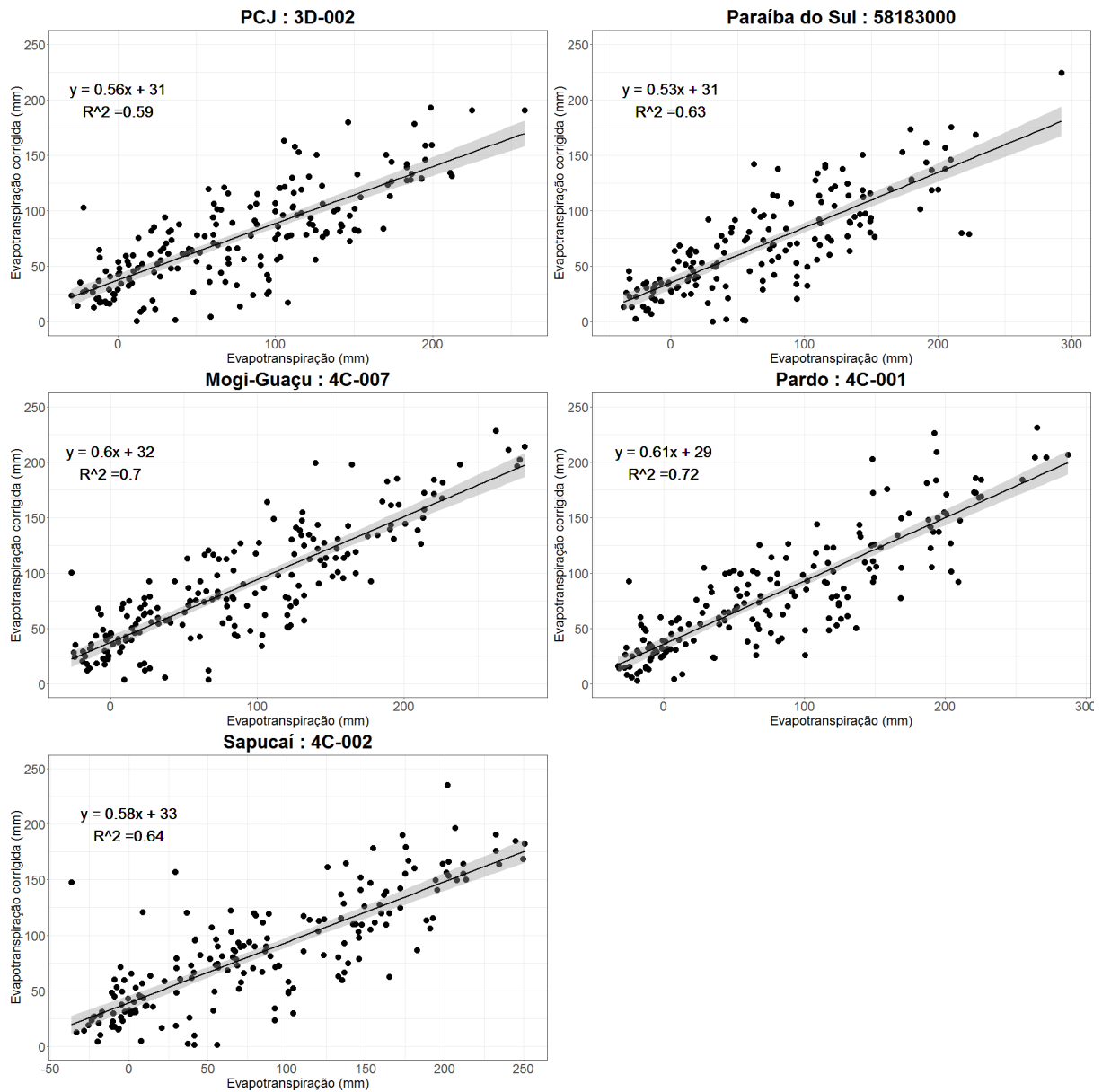


Figura 72 – Ajuste linear da evapotranspiração corrigida em relação e evapotranspiração em cinco diferentes postos.

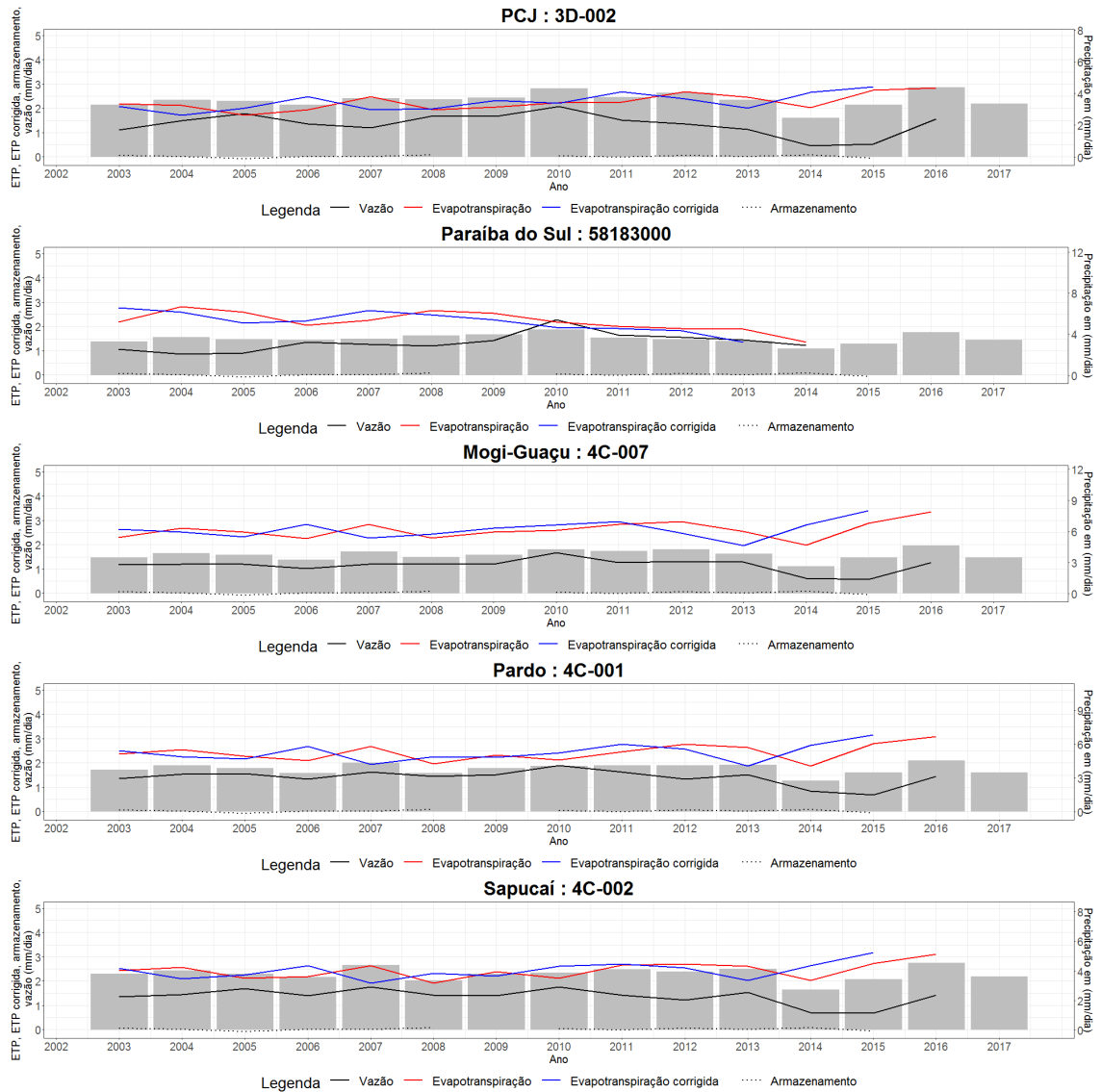


Figura 73 – Componentes do balanço hídrico anual como vazão, evapotranspiração (ET), evapotranspiração corrigida e termo do armazenamento em cinco diferentes postos.

Na figura 73 é mostrado o balanço hídrico anual em cinco diferentes postos calculado em mm por dia entre 2002 a 2017. A evapotranspiração e evapotranspiração corrigida apresentam resultados semelhantes ou quase iguais em alguns anos. A comparação entre elas ano a ano (Fig. 74) mostra que a ET simplificada superestima a ET corrigida entre 2% a 4% no caso dos postos investigados. Trata-se de uma ordem grandeza razoável, esperada em função da ordem de grandeza do termo de armazenamento.

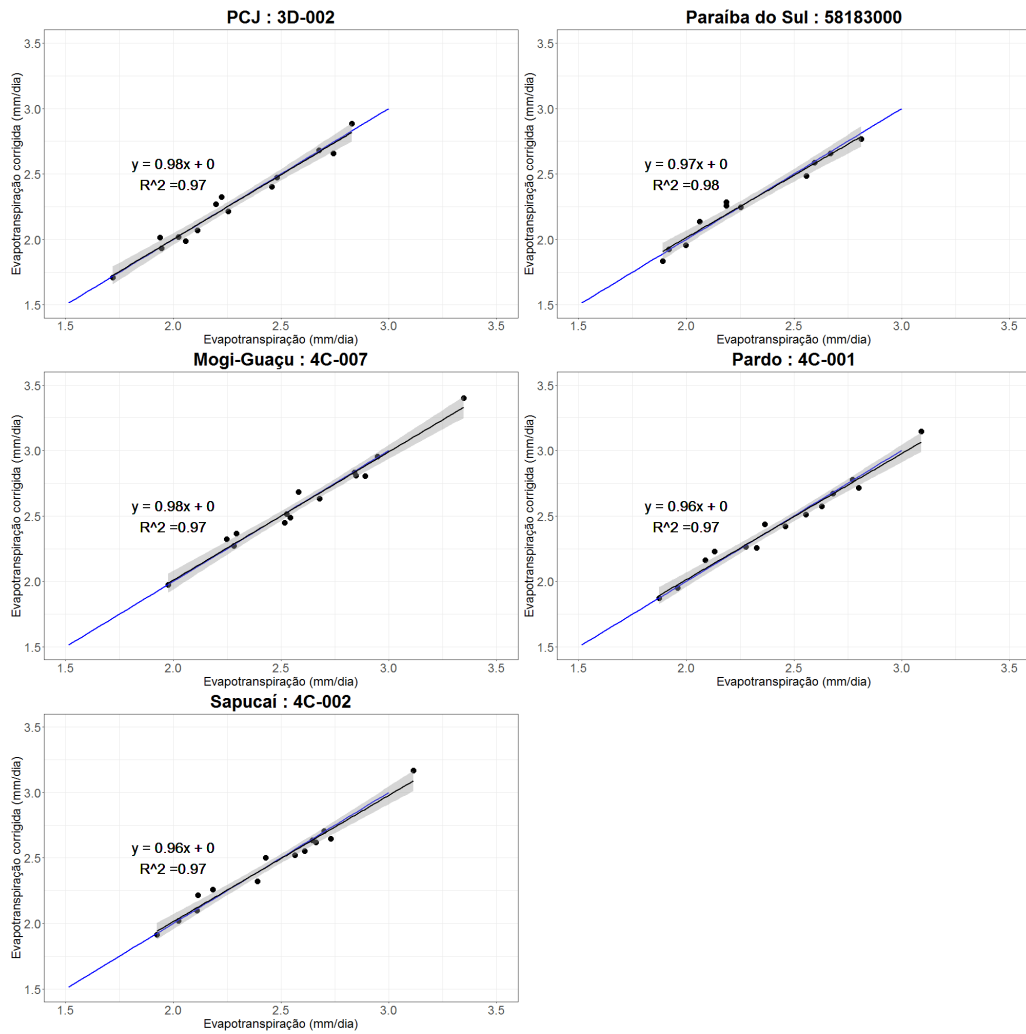


Figura 74 – (Ordenada) ET média anual (mm/dia) calculada incluindo-se o termo de armazenamento, versus sem a inclusão (abscissa) para cinco postos de medição.

#### 4.8 Médias regionais

A Tabela 9 resume a variabilidade espacial média temporal da vazão, da evapotranspiração e dos índices hidroclimatológicos (coeficiente de escoamento CE, índice evaporativo IE e índice de escoamento básico IB). Nestas médias não foram contabilizados os postos com padrões influenciados por erros, falhas longas ou controle de barramento na vazão. Conforme esperado razoavelmente, a variabilidade espacial da vazão foi muito mais expressiva do que a da chuva, e a variabilidade dentre os postos maior do que dentre as bacias.

UGRHI	Curso (rio)	Estação	Precipitação P (mm)	Vazão Q (mm)	ET (mm)	E. Básico (mm)	CE (%)	IEB (%)
<b>Paraíba do Sul</b>	Bocaina	58220000	1355	458	897	316	34	69
<b>Paraíba do Sul</b>	Paraitinga	58030000	1326	501	825	376	38	75
<b>Paraíba do Sul</b>	Paraíba do Sul	58133000	1348	497	951	382	37	77
<b>PCJ</b>	Camanducaia	3D-002	1304	553	751	367	42	66
<b>PCJ</b>	Grande	62395000	1328	381	947	227	29	60
<b>PCJ</b>	Camanducaia	3D-001	1314	478	836	295	36	62
<b>Mogi-Guaçu</b>	Grande	61886000	1344	533	870	357	40	67
<b>Mogi-Guaçu</b>	Mogi-Guaçu	4C-007	1342	460	763	351	34	76
<b>Mogi-Guaçu</b>	Grande	61912000	1343	473	882	351	35	74
<b>Mogi-Guaçu</b>	Mogi-Guaçu	5C-025	1353	387	966	220	29	57
<b>Pardo</b>	Pardo	4C-001	1343	692	651	231	52	33
<b>Pardo</b>	Pardo	5B-011	1354	407	947	220	30	54
<b>Sapucaí</b>	Sapucaí	4C-002	1346	583	763	376	43	64
<b>Sapucaí</b>	Sapucaizinho	4B-015	1406	605	801	396	43	65
<b>Sapucaí</b>	Sapucaí-Mirim	5B-007	1366	547	819	414	40	76

Tabela 9 - Médias de longo prazo de cada estação: UGRHI (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo), rio, código estação fluviométrica, precipitação média anual (mm), vazão média anual (mm), Escoamento básico médio anual (mm) (mm), coeficiente de escoamento médio, e razão do escoamento básico sobre vazão.

Para os extremos médios de chuva obteve-se:

- dentre os postos, 1304 mm/a no posto SD-002 (rios PCJ) e de 1406 mm/a no posto 4B-015 (Sapucaí), ou seja uma diferença de 102 mm/a ou 8% (Fig. 7a);
- dentre os bacias, de 1315 mm/a nos rios PCJ e de 1373 mm/a na bacia do Sapucaí, ou seja uma diferença de 57 mm/a ou 4%.

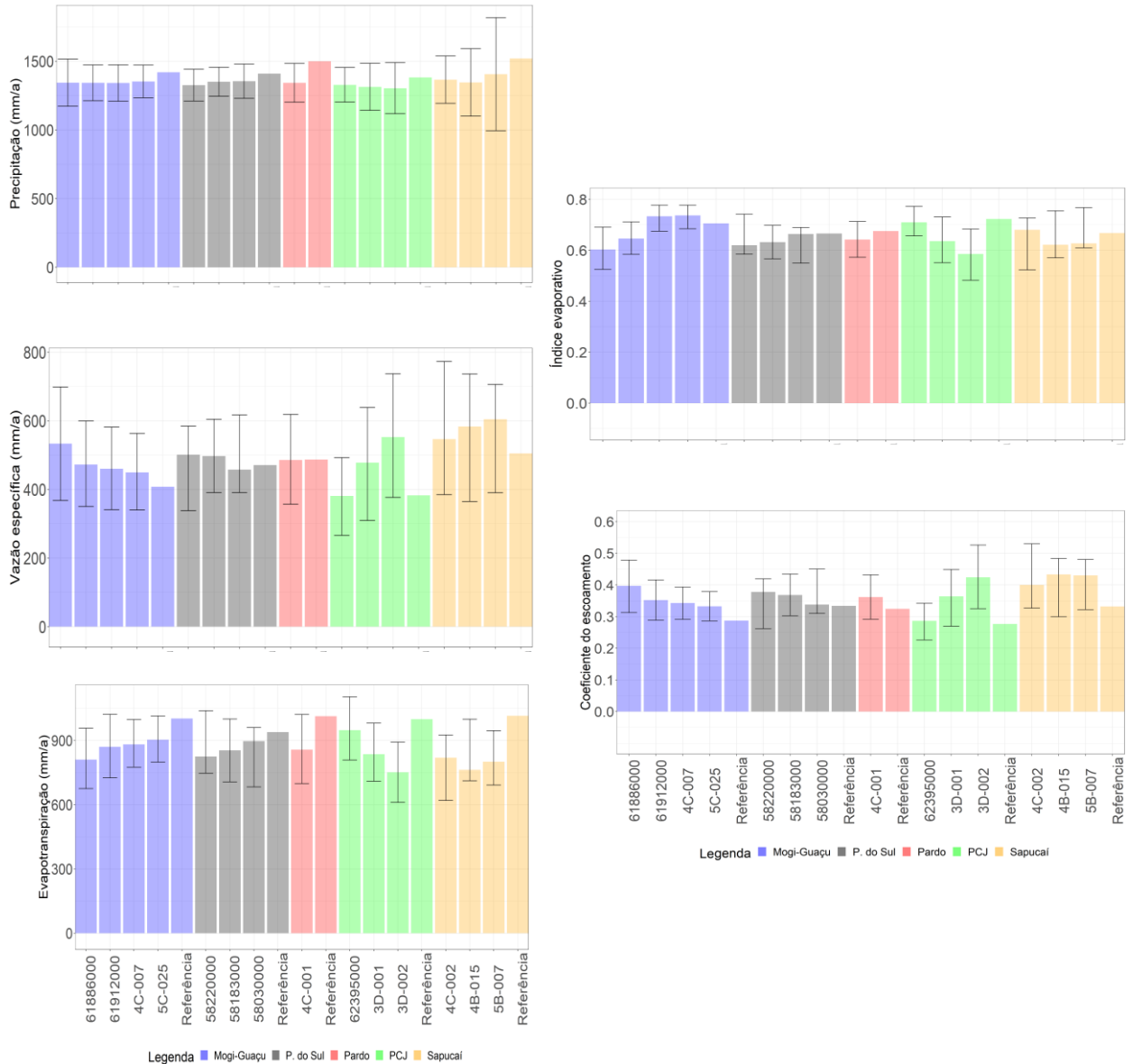


Figura 75- Médias anuais de longo prazo de cada estação: precipitação média anual (mm), vazão média anual (mm), evapotranspiração (mm), coeficiente de escoamento médio e índice evaporativo.

Para os extremos médios de vazão obteve-se:

- dentre os postos, 381 mm/a no posto 62395000 (rio Jundiáí no PCJ) e de 692 mm/a no posto 4C-001 (Pardo), ou seja uma diferença de 311 mm/a ou 82% (Fig. 74.b)
- dentre os bacias, de 463 mm/a no Mogi-Guaçu e de 578 mm/a na bacia do Sapucaí, ou seja uma diferença de 115 mm/a ou 25%.

Para os extremos médios do escoamento básico obteve-se:

- dentre os postos, 220 mm/a no posto 5B-011 (rio Pardo) e de 414 mm/a no posto 5B-007 (Sapucaí), ou seja uma diferença de 194 mm/a ou 88%.
- dentre os bacias, de 226 mm/a no Pardo e de 395 mm/a na bacia do Sapucaí, ou seja uma diferença de 170 mm/a ou 75%.

Para os extremos médios de evapotranspiração obteve-se:

- dentre os postos, 651 mm/a no posto 4C-001 (Pardo) e de 966 mm/a no posto 5C-025 (Mogi-Guaçu), ou seja uma diferença de 315 mm/a ou 48% (Fig. 74c)

- dentre os bacias, de 794 mm/a no Sapucaí e de 870 mm/a na bacia do Mogi-Guaçu, ou seja uma diferença de 76 mm/a ou 10%.



## 5.0 Conclusão

Este trabalho abordou e buscou ampliar o entendimento de padrões hidroclimatológicos com base em séries de vazões e chuva de longo período, em cinco bacias de mesoescala do estado de São Paulo: rios PCJ, Mogi-Guaçu, Pardo, Paraíba do Sul e Sapucaí. Foi analisado o balanço hídrico em 31 áreas de contribuições em termos de precipitação, evapotranspiração e vazão. A análise procurou examinar e detectar a ocorrência de pontos de descontinuidade através de métodos como Rodionov (2004) no caso da chuva e teste de Pettitt (1979) para vazão e chuva. Esses pontos de ruptura aparecem associados à mudança climática, mudança no uso de solo, maior demanda de recursos hídricos e construção de barragem.

O ciclo sazonal da precipitação e vazão mostrou um padrão semelhante entre todos os postos, com o pico de precipitação em Janeiro, e para a vazão geralmente com um mês de atraso em Fevereiro, havendo para a vazão entre Janeiro a Março geralmente um máximo suavizado. A chuva varia muito desde Janeiro (em torno de  $240 \text{ mm mês}^{-1}$ ) continuamente até Março (atingindo aproximadamente  $170 \text{ mm mês}^{-1}$ ), e neste trimestre chuvoso a vazão varia pouco e em torno de  $75 \text{ mm mês}^{-1}$ , sendo um pouco mais elevadas nas bacias do Sapucaí e Pardo, menores no PCJ e Paraíba do Sul, e com grande variabilidade entre os postos no Mogi-Guaçu. A precipitação mínima ocorre sempre em Agosto, em torno de  $25 \text{ mm mês}^{-1}$ , comparando-se todas as bacias, e as vazões mínimas geralmente em agosto e setembro de forma suavizada, em torno de 20 a  $30 \text{ mm mês}^{-1}$ , sendo um pouco menores nas bacias do Sapucaí, Pardo e Mogi-Guaçu, e levemente acima nas demais bacias PCJ e Paraíba do Sul.

O escoamento básico máximo geralmente atinge o máximo marcadamente em Março, para todas as bacias em torno de  $50 \text{ mm mês}^{-1}$  para os rios Pardo e Sapucaí, e um pouco abaixo em torno de  $30 \text{ mm mês}^{-1}$ , mas com grande variabilidade entre os postos para as demais bacias. O mínimo do escoamento básico coincidiu com a vazão em Agosto-Setembro, com um pequena redução de aproximadamente  $5 \text{ mm mês}^{-1}$  em relação à vazão.

A aplicação do método de Rodionov para detecção de pontos de rupturas na precipitação revela em grande parte dos casos analisados a ocorrência de pontos de descontinuidade em meados de 1970 e no início de década de 1990, caracterizando a chuva em três intervalos. O primeiro com uma média mais baixa, seguido do segundo período com aumento e, por fim, o terceiro intervalo com nova queda. Por exemplo, para a bacia do Paraíba do Sul a precipitação média no primeiro período foi de 1320 mm, seguido do segundo intervalo com 1439 mm e, finalmente, no terceiro período com 1313 mm. O teste de Pettitt aplicado revelou a ocorrência de uma descontinuidade em 1968 para todas as séries de chuva com nível de significância baixa, indicando que a chuva separou-se em dois padrões estatísticos, em concordância com outras sugestões da literatura.

A comparação entre elas ano a ano (Fig. 74) mostra que a ET simplificada superestima a ET corrigida entre 2% a 4% no caso dos postos investigados. Trata-se de uma ordem grandeza razoável, esperada em função da ordem de grandeza do termo de armazenamento.

Comparando-se os postos representativos das bacias investigadas, a avaliação dos termos climatológicos de precipitação sugeriu chuva anual entre 1300 a 1400 mm/a, e um pouco menor de forma geral na bacia dos rios PCJ em torno de 50 mm/a em relação às demais. Com exceção de um posto que mostrou um valor muito afastado dos demais (4C001 Rio Pardo), a estimativa da vazão variou aproximadamente entre 375 mm/a até 600 mm/a dentre os postos, geralmente maiores na bacia do Sapucaí, menores no PCJ, e no Mogi-Guaçu

com grande variabilidade entre os postos. Analogamente, a evapotranspiração variou entre 750 mm/a até 950 mm/a dentre a maioria dos postos, com menores valores na bacia do Sapucaí, e comparáveis nas bacias do Paraíba do Sul, Mogi-Guaçu e PCJ, que internamente mostraram alta variabilidade entre os postos. A variabilidade espacial da estimativa do coeficiente de escoamento foi muito vinculada à variabilidade da vazão calculada, enquanto que a variabilidade do índice evaporativo foi por sua vez vinculada à variabilidade da ET calculada.

### **5.1 Sugestões para futuros trabalhos**

Dentre as possíveis sugestões para aprimorar e complementar o presente estudo se destaca:

- I. Investigar a variabilidade intrassazonal associada à oscilação Madden Julian;
- II. Calcular o período de retorno da precipitação;
- III. Testar o ajuste da vazão anual máxima a outros modelos de probabilidade como, por exemplo, Gumbel e Weibull;
- IV. Conduzir testes de hipóteses de modo a inferir possíveis mudanças no desvio padrão nas variáveis hidrológicas;
- V. Aplicar métodos de estimação do início da estação chuvosa (IEC), fim da estação chuvosa (FEC) e duração da estação chuvosa (DEC).

## 6.0 Bibliografia

- ANA - Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil - Informe 2016**. 2016. Disponível em <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe-conjuntura-2016.pdf>
- ALBERTIN, L.L.; MAUAD, F.F. **Utilização de simulação computacional no gerenciamento integrado da água na bacia do Sapucaí-Grande no Estado de São Paulo**. Revista Minerva, v. 3, p. 215-222, 2006.
- ALVES, L.M.; MARENGO, J.A.; CAMARGO JR., H.; CASTRO, C. **Início da estação chuvosa na região Sudeste do Brasil: Parte 1 – Estudos observacionais**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.3, p.385-394, 2005.
- AMEKUDZI, L et al. **Variabilities in rainfall onset, cessation and length of rainy season for the various agro-ecological zones of Ghana**. Climate, v. 3, n. 2, p. 416-434, 2015.
- BARRY, R.G.; CHORLEY, R.J. **Atmosfera, tempo e clima**. 9. ed – Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BRUNNER, G. W. and FLEMING, M. J. HEC-SSP Statistical Software Package. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC) .2010.
- CAMARGO, M.B.; PEDRO JR., M.J.; ALFONSI, R.R.; ORTOLANI, A.A.; BRUNINI, O. **Probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas mensais e anual no estado de São Paulo**. Bragantia, v. 52, n.2, p. 161-168. 1993.
- CEBALLOS, J. C. e M. J. BOTTINO. **Estimativa de radiação solar por satélite: Desempenho do modelo operacional GL1.2**. In: Anais, XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza. 2004.
- CBP. Comitê da Bacia Hidrográfica do Pardo. **Relatório de situação 2016 – Ano Base 2015**. Disponível em <http://www.sigrh.sp.gov.br/cbhparado/documentos>
- CHANGE, IPCC Climate. Synthesis Report Summary for Policymakers. 2014. URL: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf), 2014.
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu. **Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu 2016-2019**. 2015. Disponível em [http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/9069/diagnostico\\_sintese\\_cbh-mogi.pdf](http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/9069/diagnostico_sintese_cbh-mogi.pdf)
- COMITÊS, P. C. J. et al. **Plano das bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá**. 2011.
- COPASA. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí**. 2010. Disponível em [http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/planos\\_diretores\\_BH/sapucaí.pdf](http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/planos_diretores_BH/sapucaí.pdf)
- COPPETEC. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – Resumo: Diagnóstico dos Recursos Hídricos Relatório Final**. 2006

DE ARAUJO MENDES, M.F.; LACERDA, G.A.; DA SILVA FILSEN, T.T. **Determinação das relações entre os quantis de vazões máximas diárias obtidas através de diferentes metodologias temporais de amostragem**. Percurso Acadêmico, p. 30-44, 2012.

DINIZ, F.A.; RAMOS, A.M; REBELLO, E.R.G. **Brazilian climate normals for 1981-210**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 53, nº 2, p. 131-143, 2018.

EHLERS, R.S. **Análise de Séries Temporais**. Notas de aula. Disponível em <http://www.each.usp.br/rvicente/AnaliseDeSeriesTemporais.pdf>

ENGLAND, J.R; JOHN, F. et al. **Guidelines for determining flood flow frequency—Bulletin 17C**. US Geological Survey, 2019.

FREDERICE, A; BRANDÃO, J.L.B. **Efeito do Sistema Cantareira sobre o regime de vazões na bacia do rio Piracicaba**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 4, p. 797-810, 2016.

FLYNN, K.M.; KIRBY, W. H.; HUMMEL, P.R. **User's manual for program PeakFQ, annual flood-frequency analysis using Bulletin 17B guidelines**. 2006.

FUKA, D. R. et al. **Package ‘EcoHydRology’**. 2014.

GROPPO, J.D.; MILDE, L.C; MORAES, J.M.;GUANDIQUE, E.M.; MARTINELLI, L.A. **Análise da vazão e da precipitação na bacia do Rio Piracicaba: Detecção desiniais devido a intervenções antrópicas**. Revista de Ciências e Tecnologia, v. 9, n. 18, 2001.

GROPPO, J.D., BEDUSCHI, C. E., MENUZZO, R., MORAES, J. M., MARTINELLI, L. A. **Análise de séries temporais de vazão e precipitação em algumas bacias do estado de São Paulo com diferentes graus de intervenções antrópicas**. Revista Brasileira de Geociências. , v.24, p.181 - 192, 2005.

HARTMANN, D.L. **Global physical climatology**. Newnes, 2015.

HÍDRICOS, CERH CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS. **Relatório de situação dos recursos hídricos do Estado de São Paulo**. Comitê do Plano Estadual de Recursos Hídricos. São Paulo, 1999.

HIRSCH, R. M. **A Perspective on Nonstationarity and Water Management 1**. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, v. 47 n.3, p. 436-446. 2011

INTERAGENCY ADVISORY COMMITTEE ON WATER DATA. **Guidelines for determining flood flow frequency: Bulletin 17B of the Hydrology Subcommittee**. Office of Water Data Coordination, US Geological Survey, 1982.

JENNINGS, M. E.; BENSON, M. A. **Frequency curves for annual flood series with some zero events or incomplete data**. Water Resources Research, v. 5, n. 1, p. 276-280, 1969.

JOHANSSON, B.; CHEN, D. The influence of wind and topography on precipitation distribution in Sweden: statistical analysis and modelling. International Journal of Climatology., v. 23: 1523-1535, 2003.

KOBIYAMA, M. et al. **Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais**. Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, v. 1, p. 834-846, 2004.

- MARENGO, J. A.; ALVES, L.M. **Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.
- MARENGO, J. A., NOBRE, C. A., SELUCHI, M. E., CUARTAS, A., ALVES, L. M., MENDIONDO, E. M., SAMPAIO, G. **A seca e crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo**. Revista USP, São Paulo, nº106. pp. 31-44. 2015.
- MORAES, J.M. et al. **Análise de intervenção das séries temporais de vazão dos principais rios da bacia do rio Piracicaba**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 2, p. 65-79, 1997.
- MORAES, J.M. et al. **Trends in hydrological parameters of a southern Brazilian watershed and its relation to human induced changes**. Water Resources Management, v. 12, p. 295-311, 1998.
- MARCUZZO, F.F.N; ANDRADE, L.R; MELO, D.C. **Métodos de interpolação matemática no mapeamento de chuvas do estado do Mato Grosso**. Revista Brasileira de Geografia Física. V.4. p. 793-804. 2011.
- MARTINELLI, M. **Clima do Estado de São Paulo**. Confins. Revue franco-brésilienne de géographie. Revista franco-branco de geografia, n. 8, 2010.
- MELLO, C.R. de et al. **Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, n. 5, p. 925-933, 2003.
- MINUZZI, R.B. et al . **Climatologia do comportamento do período chuvoso da região sudeste do Brasil**. Rev. bras. meteorol., São Paulo , v. 22, n. 3, p. 338-344, Dec. 2007 .
- MORETTIN, P.A. **Análise de Séries Temporais**. 2º ed. São Paulo. Editora Egard Blucher. 2006.
- NETO, J.L.S. **Avaliação das mudanças no regime das chuvas do Estado de São Paulo durante um século (1888-1993)**. Acta Scientiarum. Technology, v. 21, p. 915-921, 1999.
- NAGHETTINI, M., & PINTO, É. J. D. A. **Hidrologia estatística**. CPRM. 2007.
- NUNES, H.L; VICENTE, A.K. e CANDIDO, D.H. **TEMPO E CLIMA**. Editora Oficina de Texto. 2009.
- OKI, T., ENTEKHABI, D. and HARROLD, T. I. **The Global Water Cycle. In The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics** Eds R. Sparks and C. Hawkesworth. 2005.
- PEIXOTO, J.P., and OORT, A.H. **Physics of climate**. Springer, Berlin. 1992.
- PELLEGRINO, G.Q. **Análise espaço-temporal de dados hidrológicos da bacia do rio Piracicaba**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 1995.
- PELLEGRINO, G.Q. et al. **Análise Espaço Temporal de componentes hidroclimáticos na bacia do Rio Piracicaba**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 9, n. 1, p. 125-135, 2001.
- PETTITT, A. N. **A non-parametric approach to the change-point problem**. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979.

PILON, P.J. **Guidelines for reducing flood losses**. United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2002.

PINHEIRO, A; GRACIANO, R.L.G and SEVERO, D.L. **Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil**. Revista Brasileira de Meteorologia. vol.28, n.3, pp.281-290. 2013.

PRUSKI, F.F. et al. **Precipitação média anual e vazão específica média de longa duração, na Bacia do São Francisco**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 8, n. 2/3, p. 247-253, 2004.

PRADO, L.F.; F, A.J.P.; HALLAK, R.; LOBO, G.A. **Climatologia da precipitação no Estado de São Paulo**. Congresso Brasileiro de Meteorologia. Vol 14. 2006.

PRADO, L.F. **Oscilação intercadal do Pacífico e seus impactos no regime de precipitação no Estado de São Paulo**. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2010.

RAJAGOPALAN, B. **Hydrologic frequency analysis in a changing climate**. Workshop on Nonstationarity, Hydrologic Frequency Analysis, and Water Management. p. 107-114. 2010.

REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. **Regimes de precipitação na América do Sul : Uma Revisão Bibliográfica**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.2, 1985-204. 2010.

RODIONOV, S. N. **A sequential algorithm for testing climate regime shifts**. Geophysical Research Letters, v. 31, n. 9, 2004.

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.

SANT'ANNA NETO, J.L. **Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 1, dez. 2005.

SANTOS, L.C.C et al. **Estimativa de vazões máximas de projeto por métodos determinísticos e probabilísticos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2010.

SANTOS, C. A. et al. **Análise estatística da não estacionariedade de séries temporais de vazão máxima anual diária na bacia hidrográfica do rio Pardo**. Holos, v. 7, p. 179-193, 2016.

SCHÄDLER, B. **Long water balance time series in the upper basins off four important rivers in Europe – Indicators for climatic changes?** IAHS Publ. no. 168, pp. 209–219. 1987.

TUCCI, C. E. M., **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Editora UFRGS, Porto Alegre - RS, 4ª Edição. 2012.

VERA, C.; HIGGINS, W.; AMBRIZZI, T.; GARREAUD, R.; GOCHIS, D.; GUTZLER, D.; LETTENMAIER, D; MARENGO, J.; MECHOSO, C.R; NOGUES-PAEGLE, J.; SILVA DIAS, P.L.; E ZHANG, C. **Toward a Unified View of the American Monsoon Systems**. Journal of Climate, vol. 19, p. 4977–5000. 2006.

VISSMAN, W.; HARBAUGH, T.E. e KNAPP, J.W. **Introduction to Hydrology**. New York: Intext Educational Publishers. 1972.

VILANOVA, M.R.N. **Tendências hidrológicas na região do alto rio Mogi-Guaçu, sul de Minas Gerais**. Revista Agrogeoambiental, v. 6, n. 3, 2014.

WIESE, D. N.; Yuan, C. B; F.; Landerer, W; Watkins, M. M. JPL GRACE Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height Release 06 Coastal Resolution Improvement (CRI) Filtered Version 1.0. Ver. 1.0. PO.DAAC, CA, USA. 2018.

WEBB, J.W.; WHITE, K.D. **Nonstationarity in Water Management: USACE Perspective**. Workshop on Nonstationarity, Hydrologic Frequency Analysis, and Water Management in Boulder, Colorado. Colorado Water Institute Information Series. 2010. p. 16-19.

### Anexo A

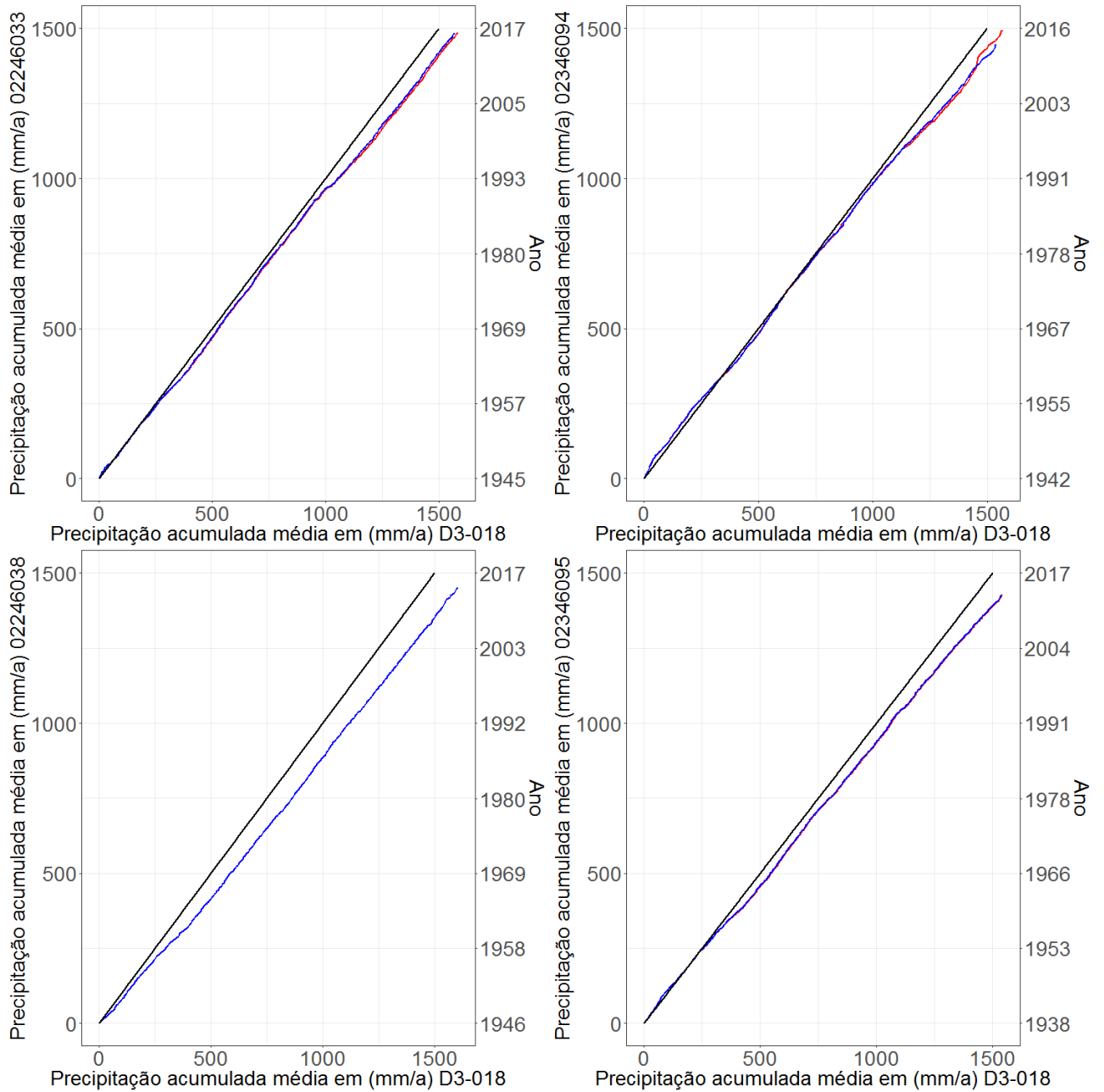


Figura A 1 – Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos 02246033, 02346094, 02246038 e 02346095 tendo por referência o posto D3-018 localizado na bacia do PCJ. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.



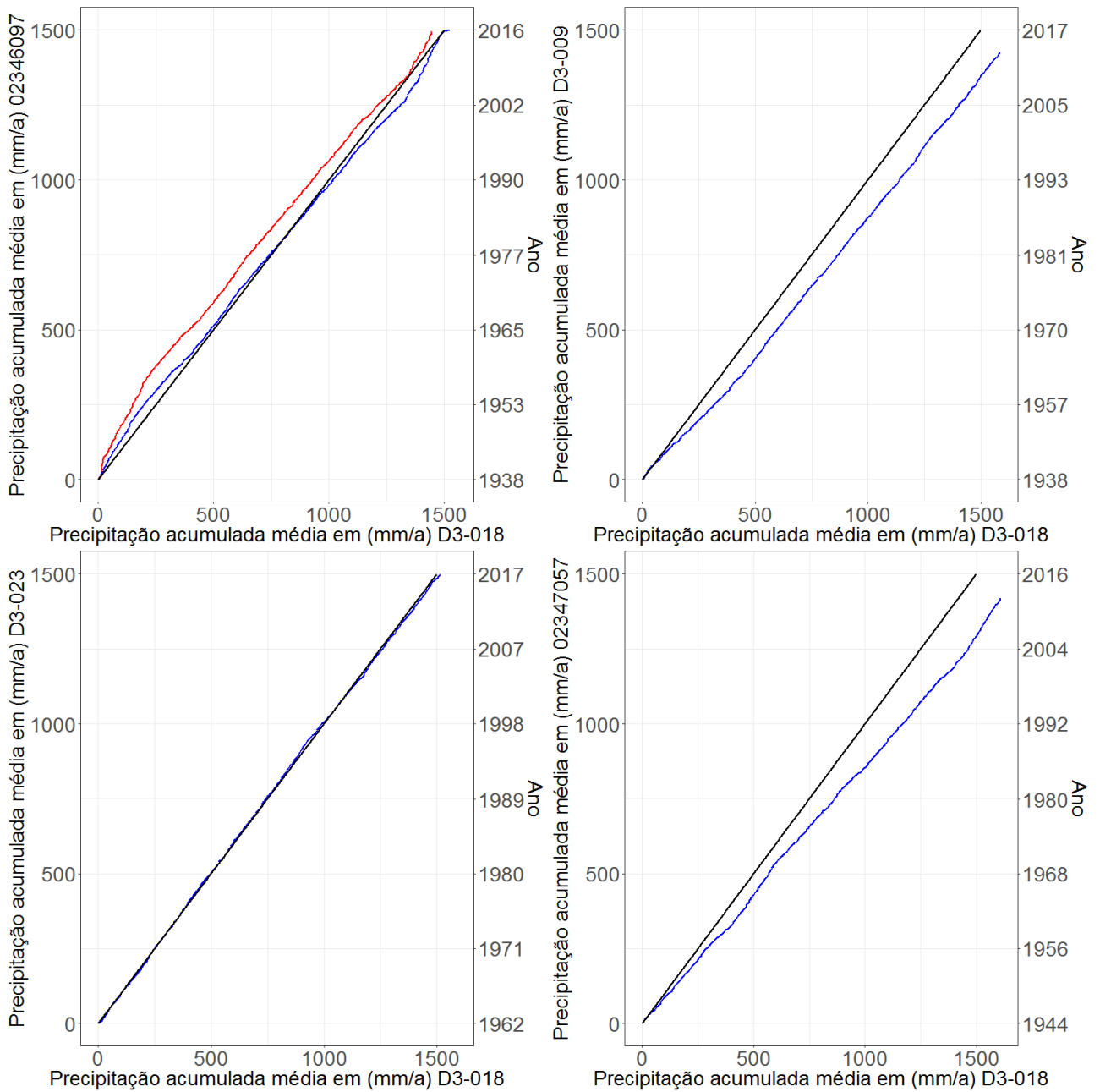


Figura A 2- – Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos 02346097, D3-009, D3-023 e 02347057 tendo por referência o posto D3-018 localizado na bacia do PCJ. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

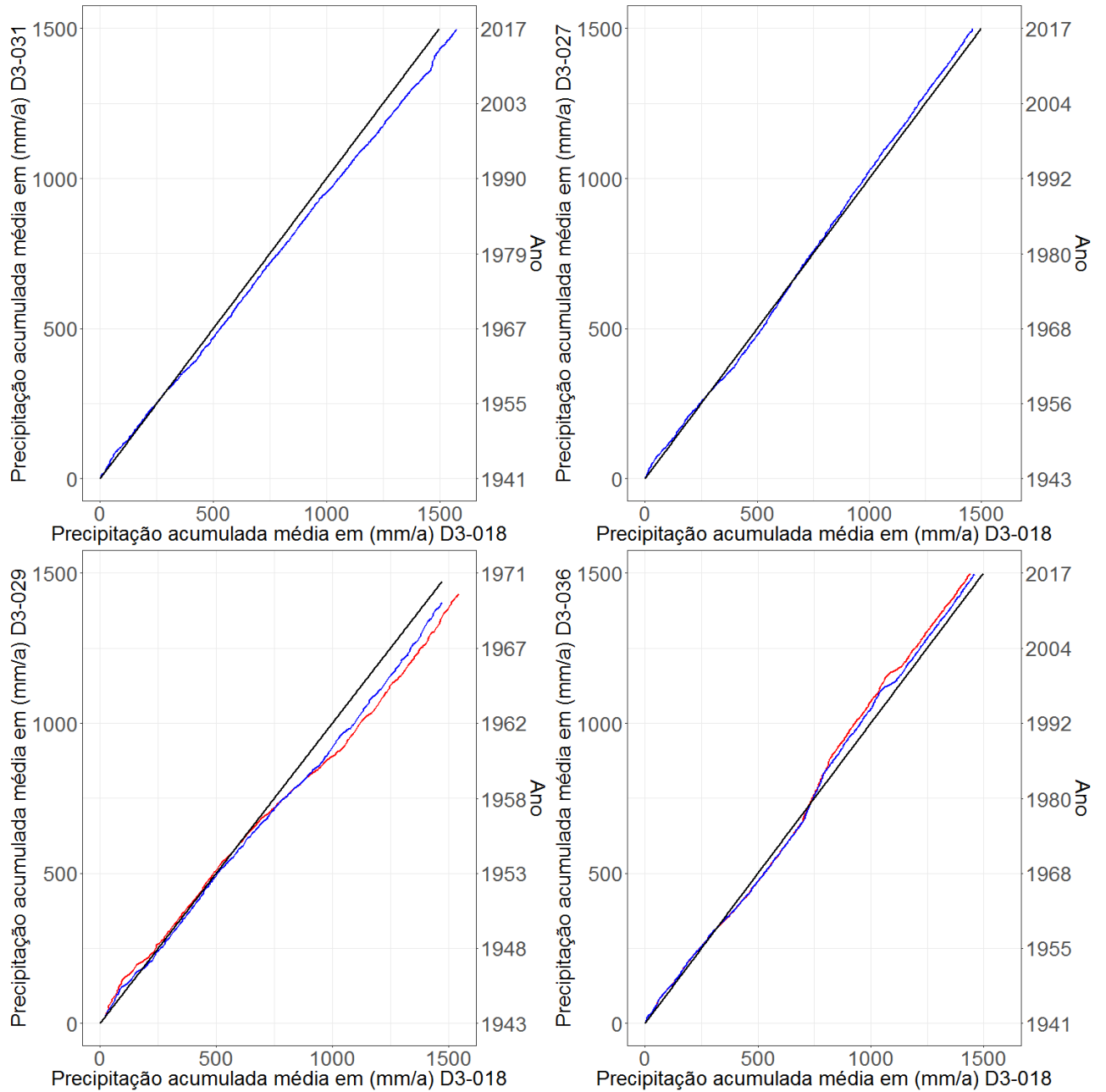


Figura A 3 – Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos D3-031, D3-027, D3-029 e D3-036 tendo por referência o posto D3-018 localizado na bacia do PCJ. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

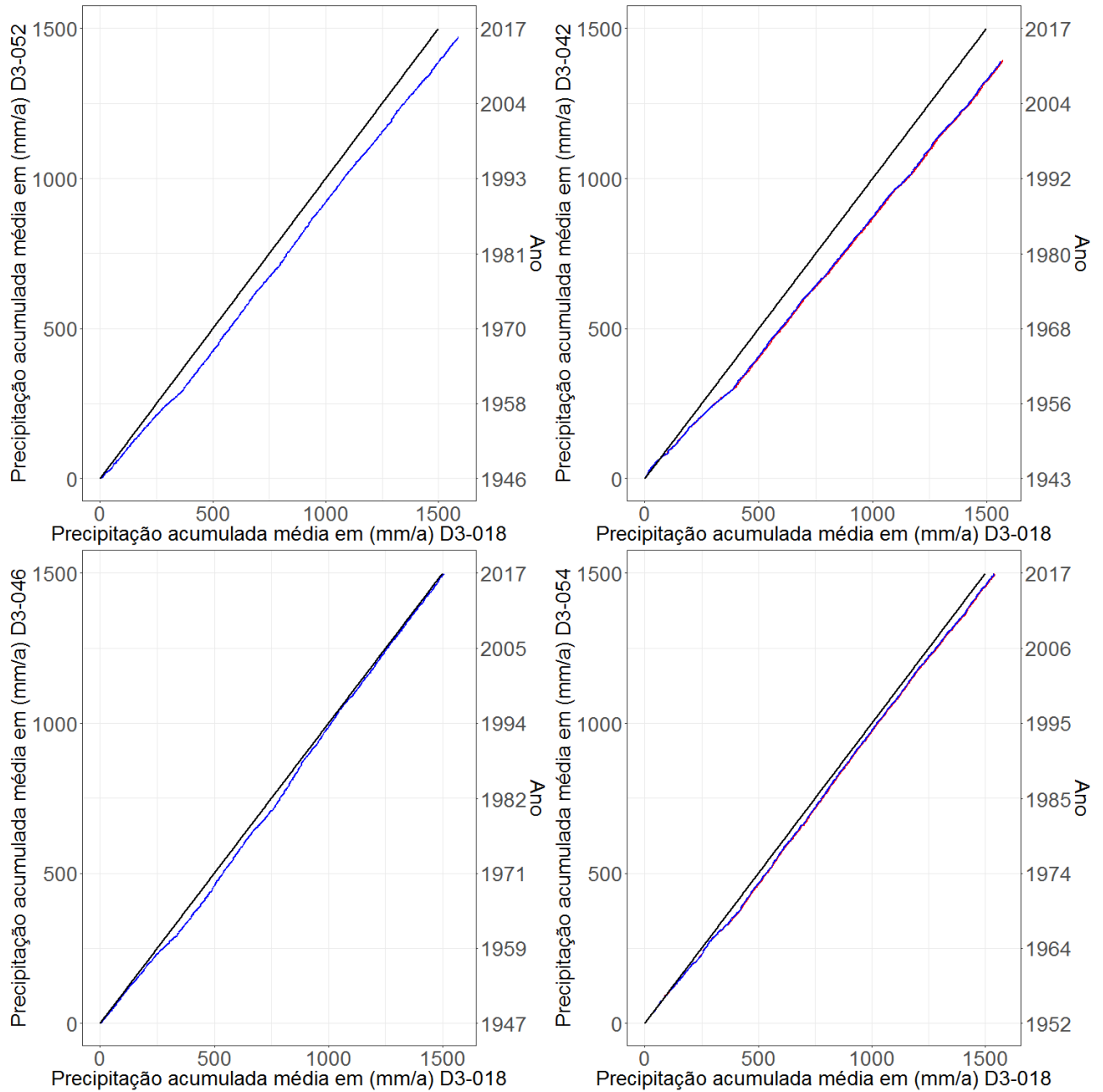


Figura A 4 – Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos D3-052, D3-042, D3-054 e D3-046 tendo por referência o posto D3-018 localizado na bacia do PCJ. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida

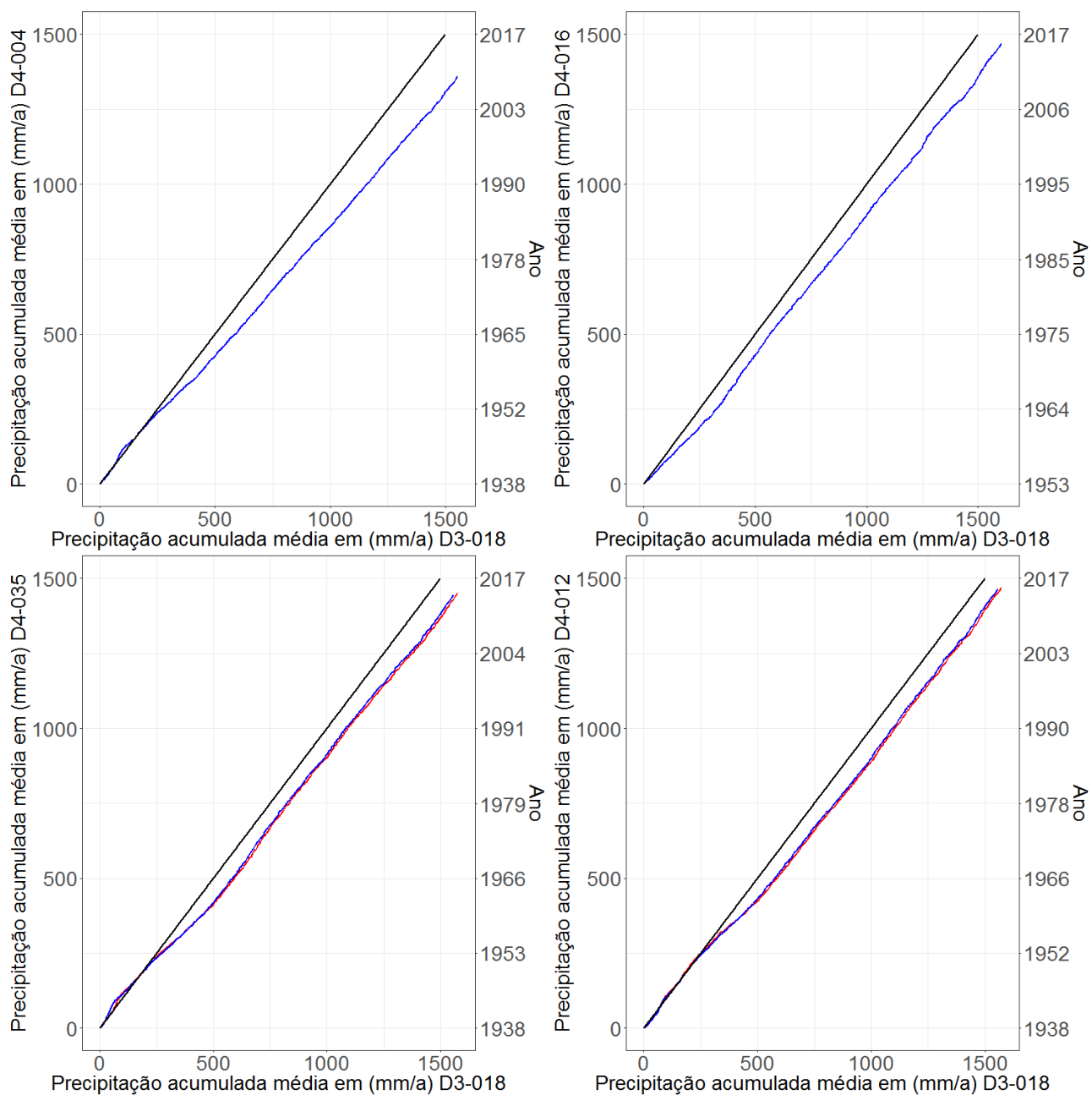


Figura A 5 Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos D4-004, D4-016, D4-012 e D4-035 tendo por referência o posto D3-018 localizado na bacia do PCJ. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

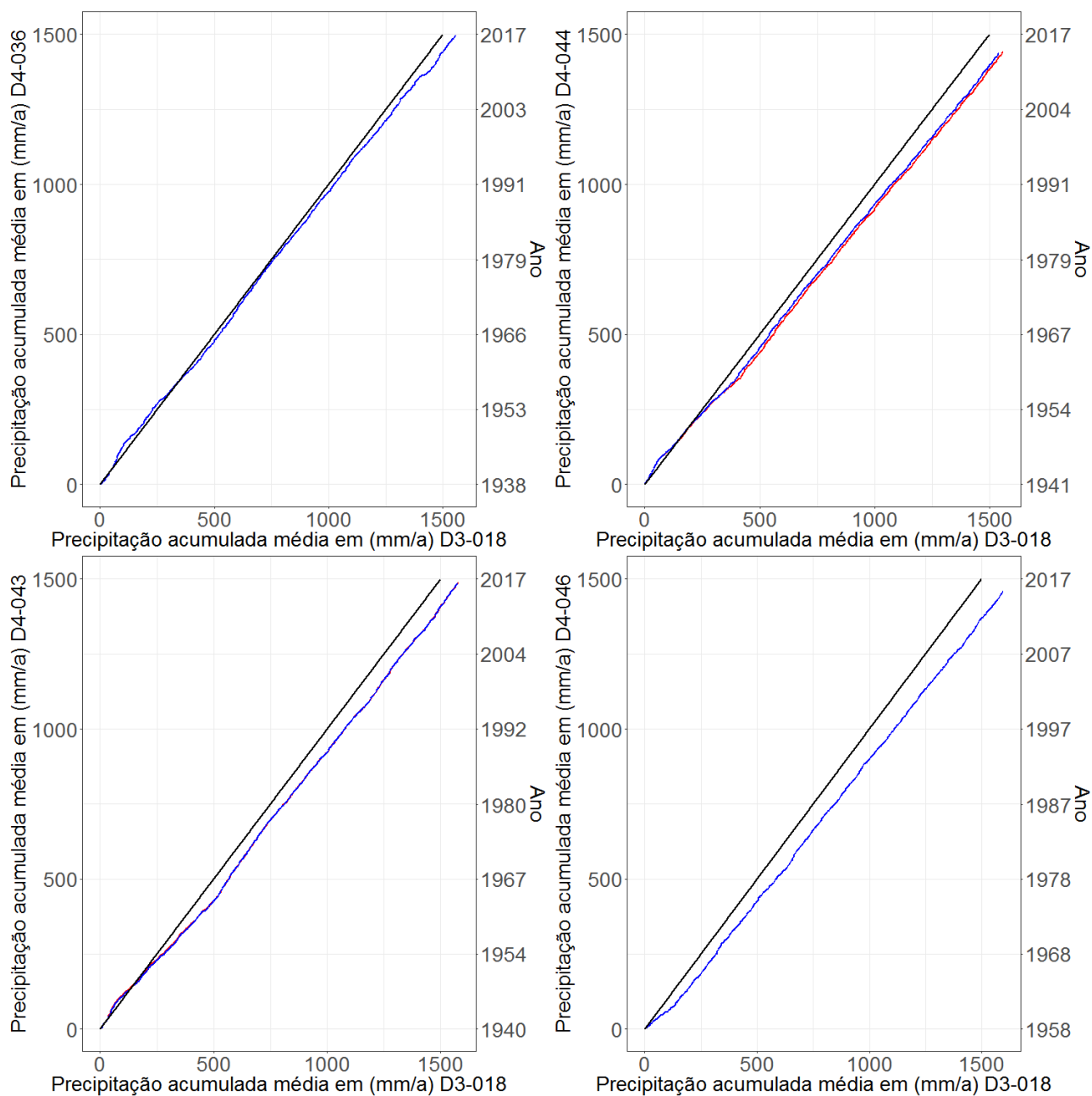


Figura A 6 Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos D4-036, D4-044, D4-046 e D4-043 tendo por referência o posto D3-018 localizado na bacia do PCJ. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

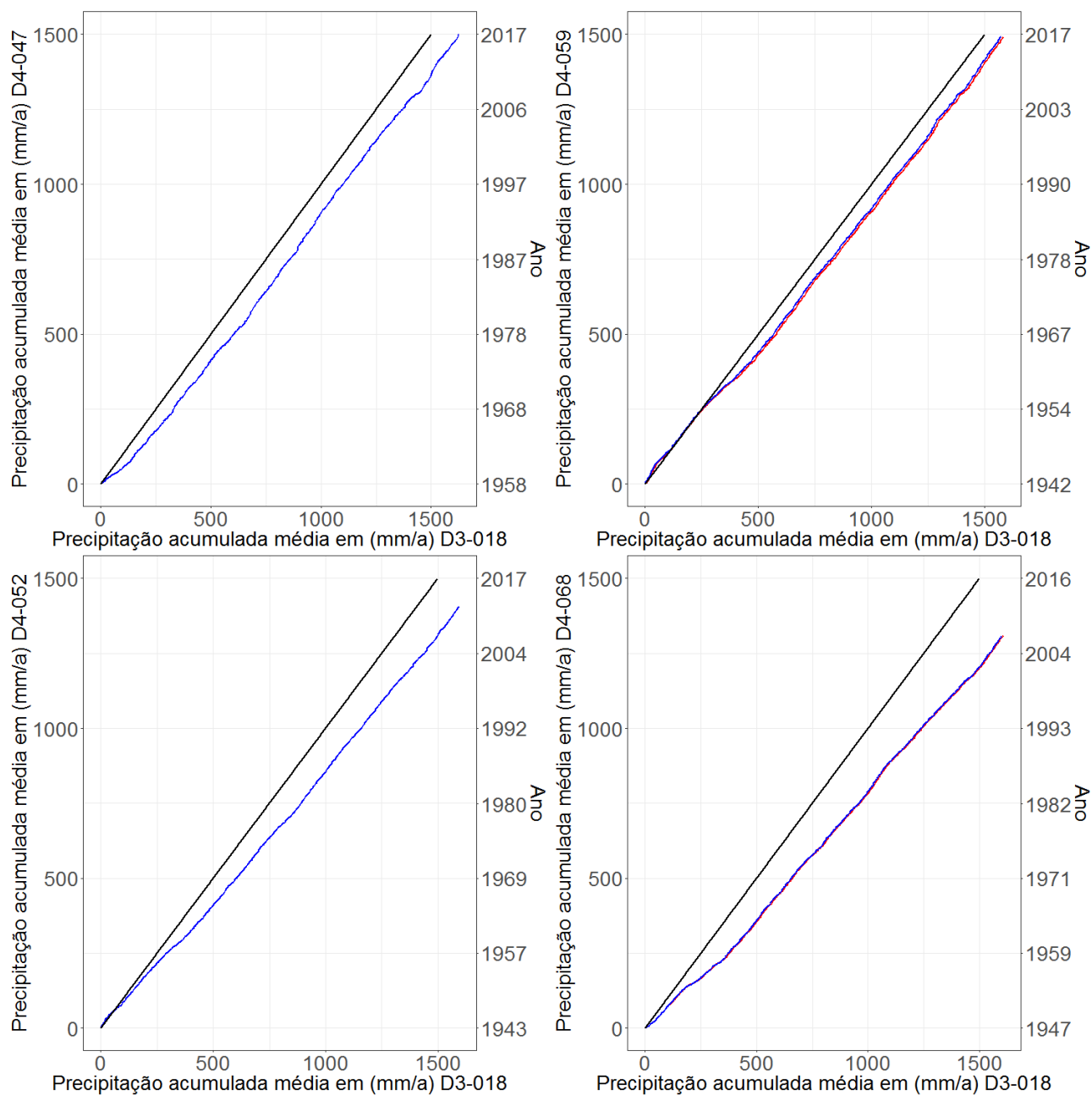


Figura A 7 Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos D4-047, D4-059, D4-068 e D4-052 tendo por referência o posto D3-018 localizado na bacia do PCJ. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

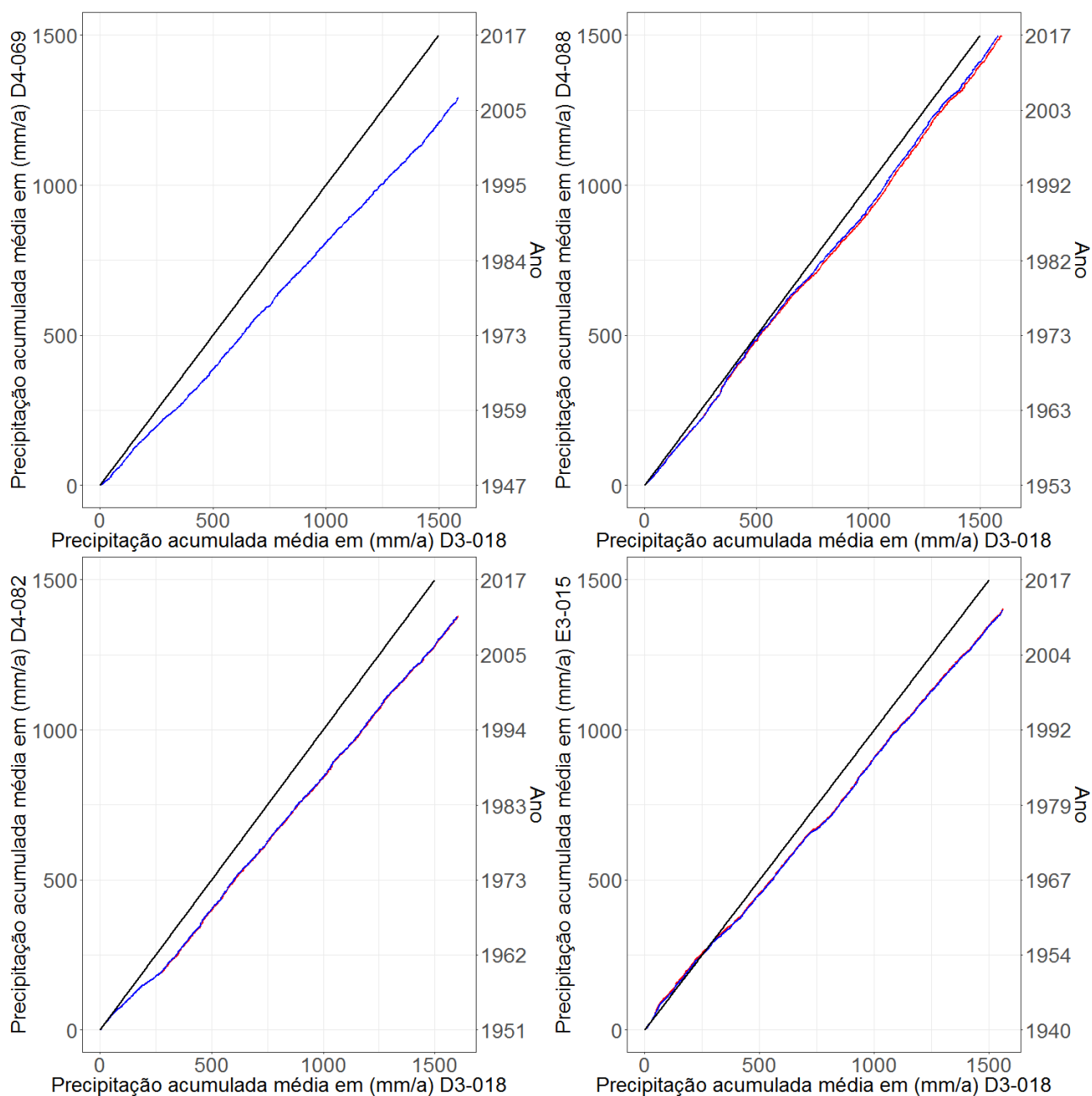
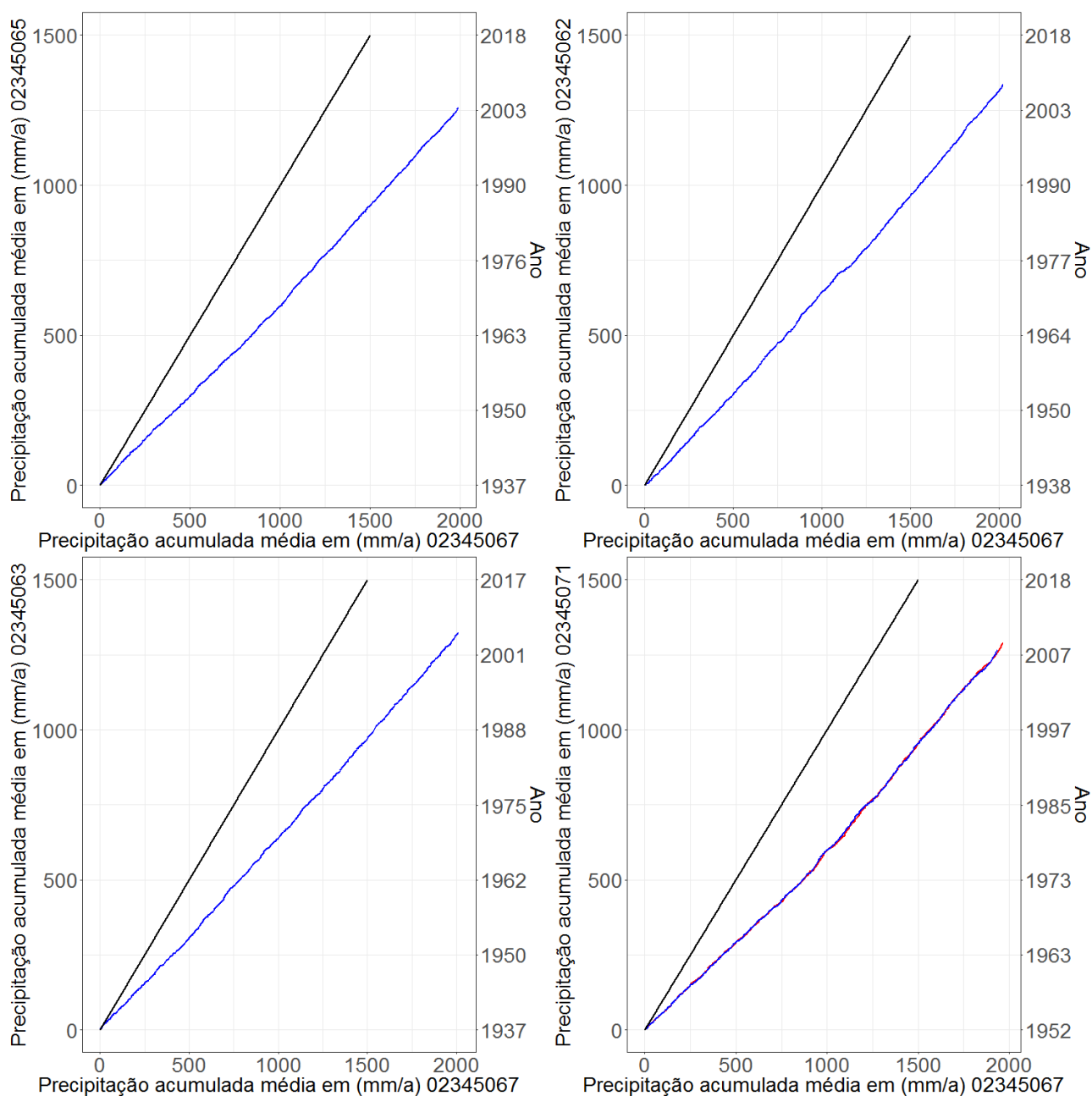


Figura A 8 - Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos D4-069, D4-088, E3-015 e D4-082 tendo por referência o posto D3-018 localizado na bacia do PCJ. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.



**Figura A 9 – Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos 02345065, 02345062, 02345071 e 02345063 tendo por referência o posto 02345067 localizado na bacia do Paraíba do Sul. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.**



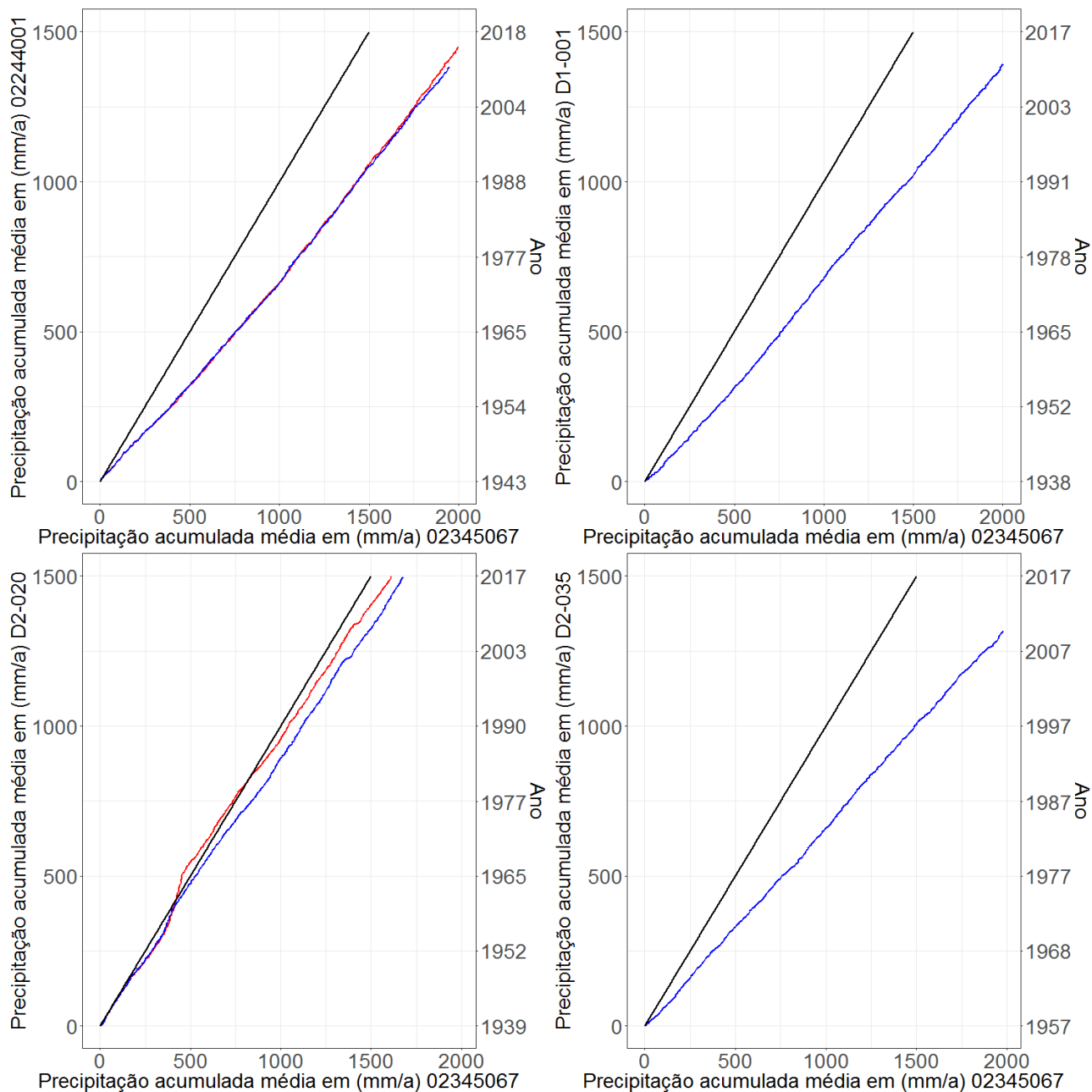


Figura A 10 – Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos 02244001, D1-001, D2-035 e D2-020 tendo por referência o posto 02345067 localizado na bacia do Paraíba do Sul. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

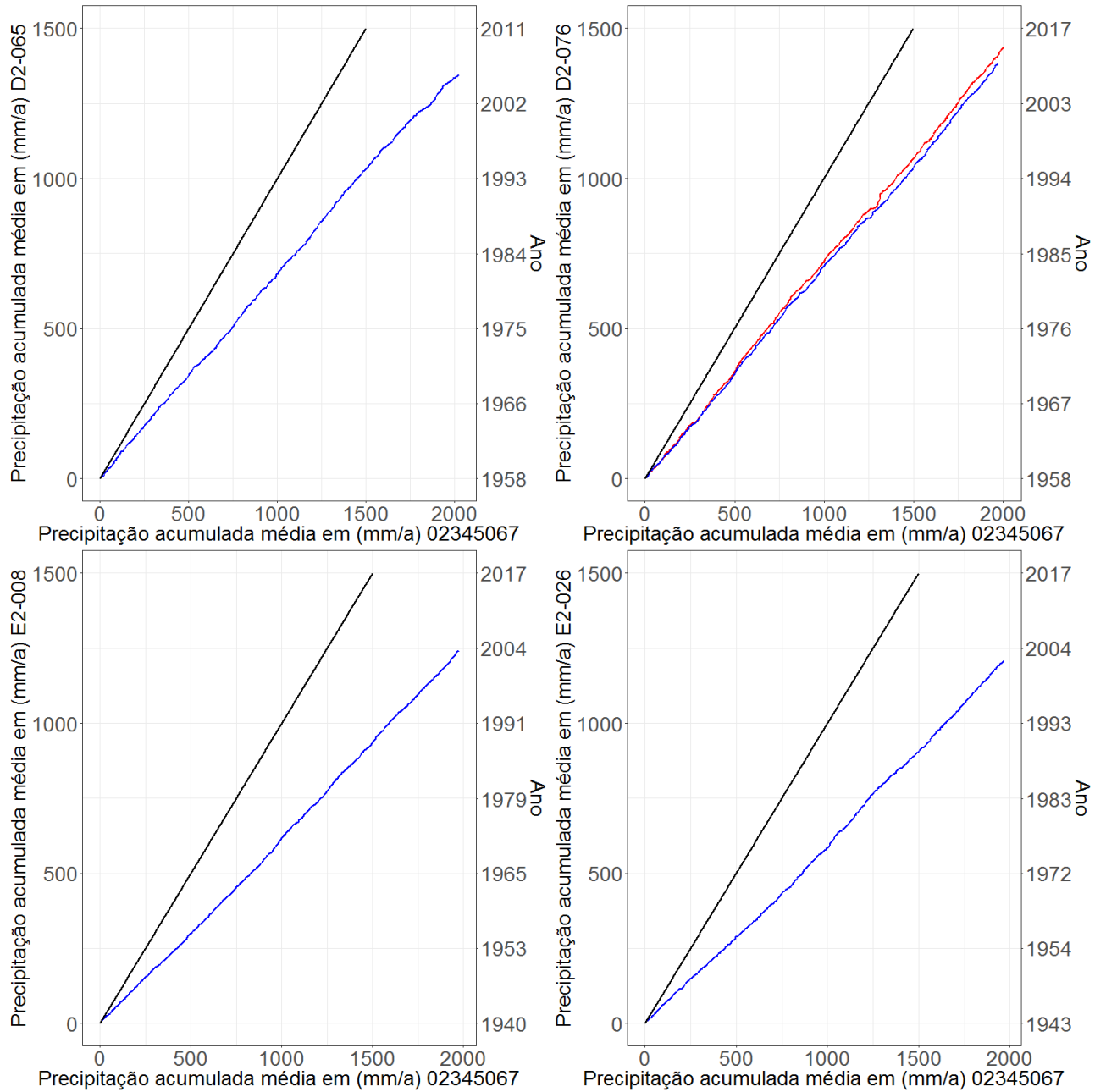


Figura A 11 - Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos D2-065, D2-076, E2-026 e E2-008 tendo por referência o posto 02345067 localizado na bacia do Paraíba do Sul. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

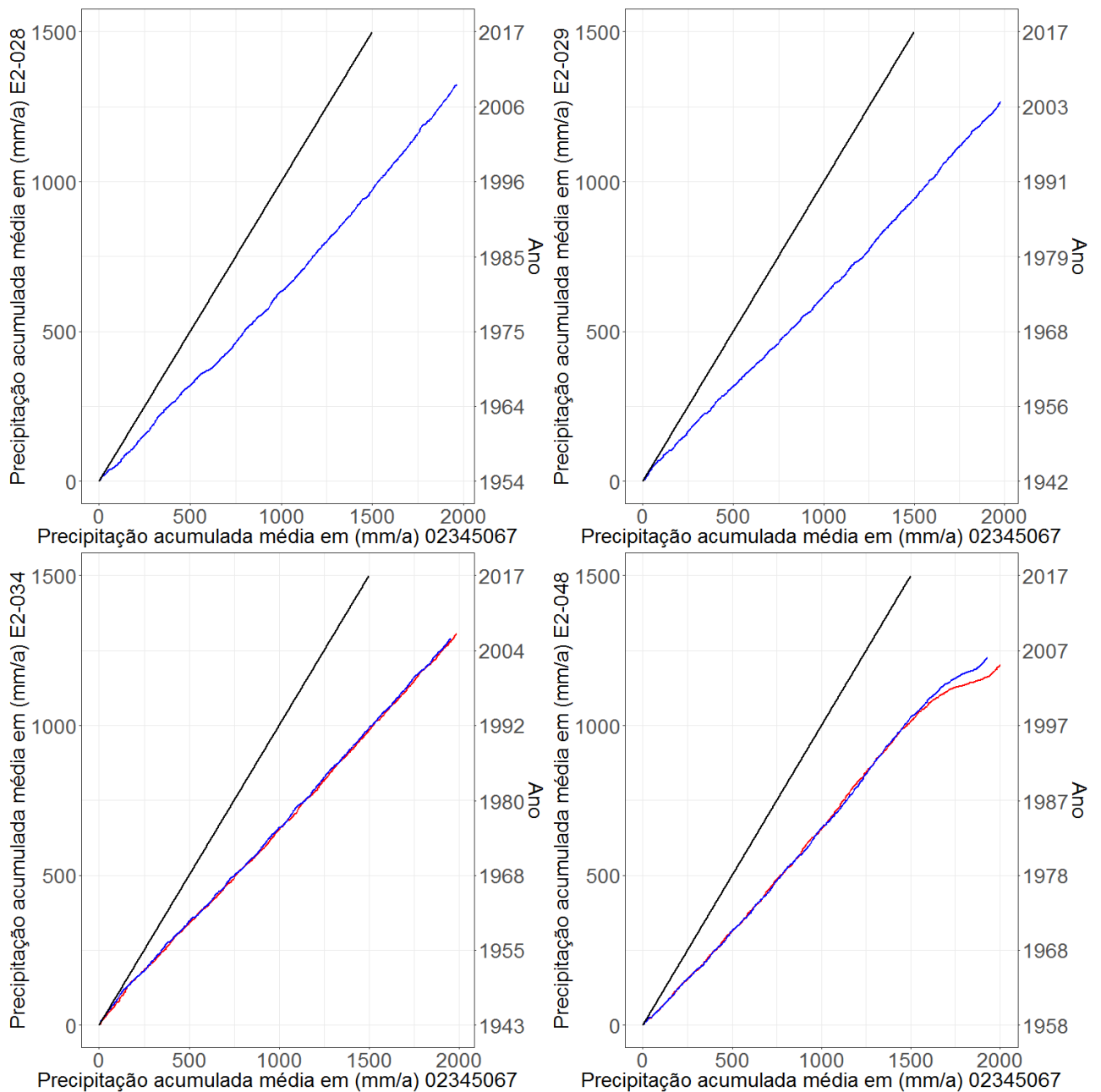


Figura A 12 - Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos E2-028, E2-029, E2-048 e E2-034 tendo por referência o posto 02345067 localizado na bacia do Paraíba do Sul. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

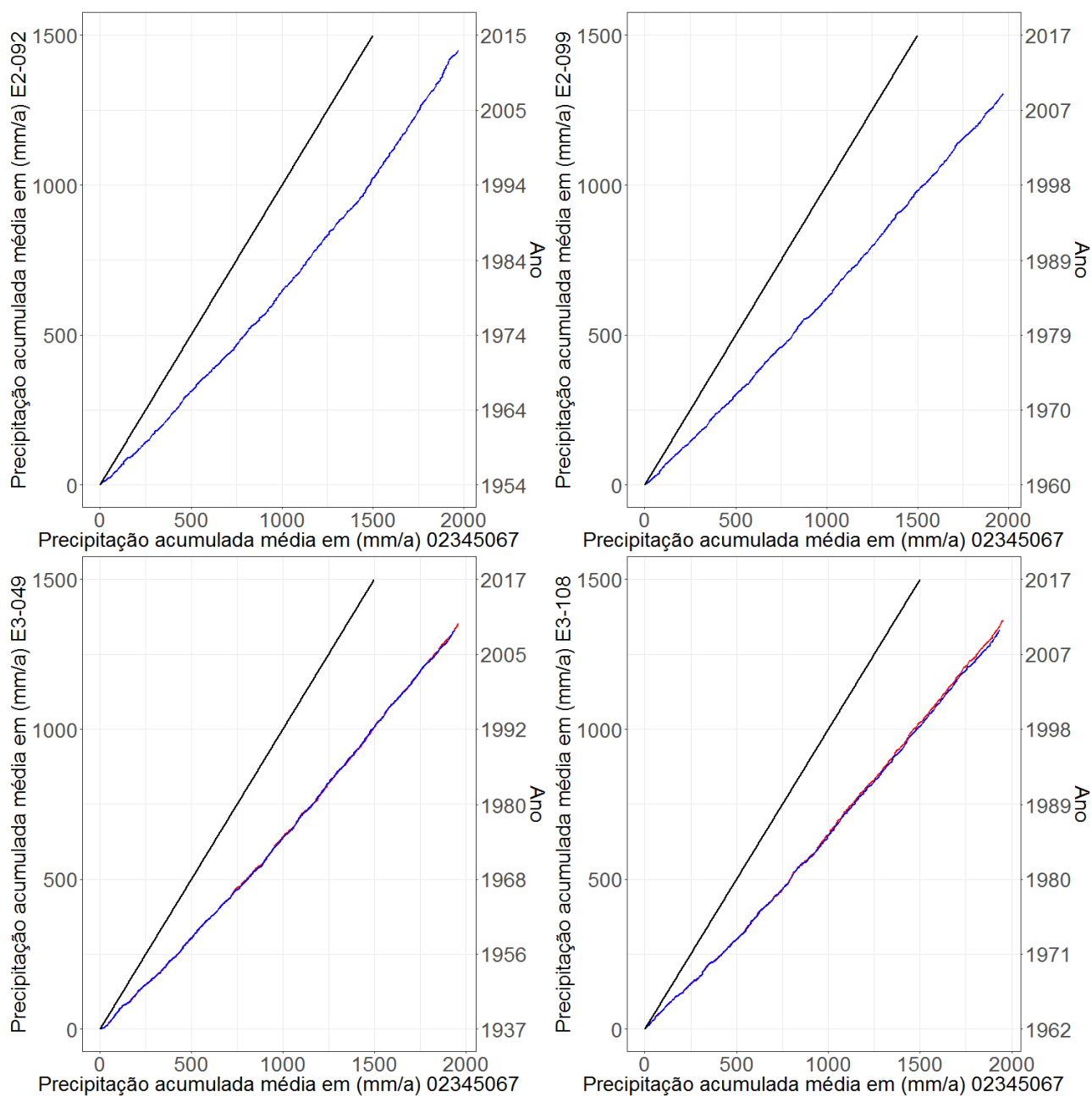


Figura A 13 - Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos E2-092, E2-099, E3-108 e E3-049 tendo por referência o posto 02345067 localizado na bacia do Paraíba do Sul. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

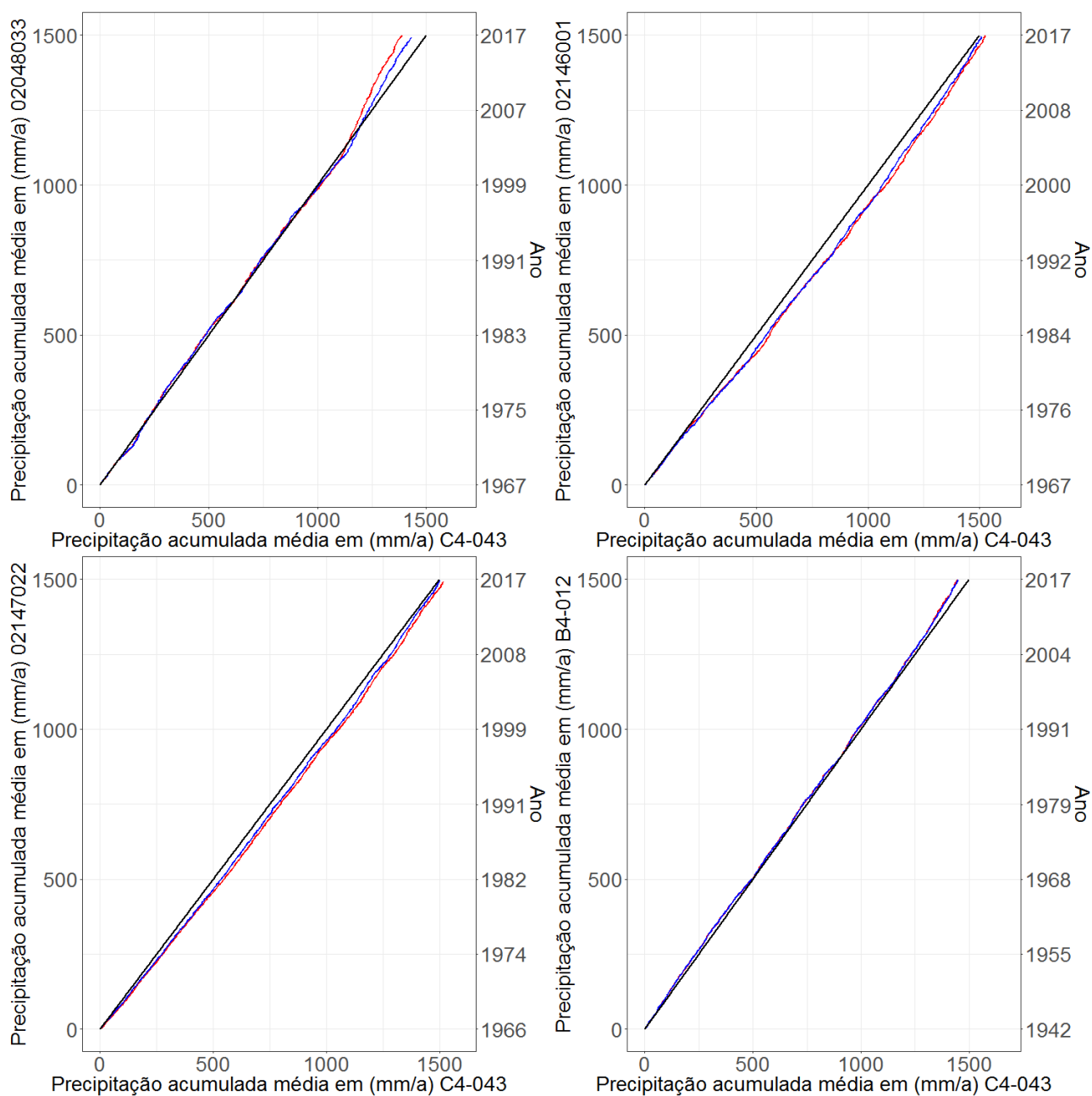


Figura A 14 - Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos 02048033, 02146001, B4-012 e 02147022 tendo por referência o posto C4-043 localizado na bacia do Paraíba do Sul. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

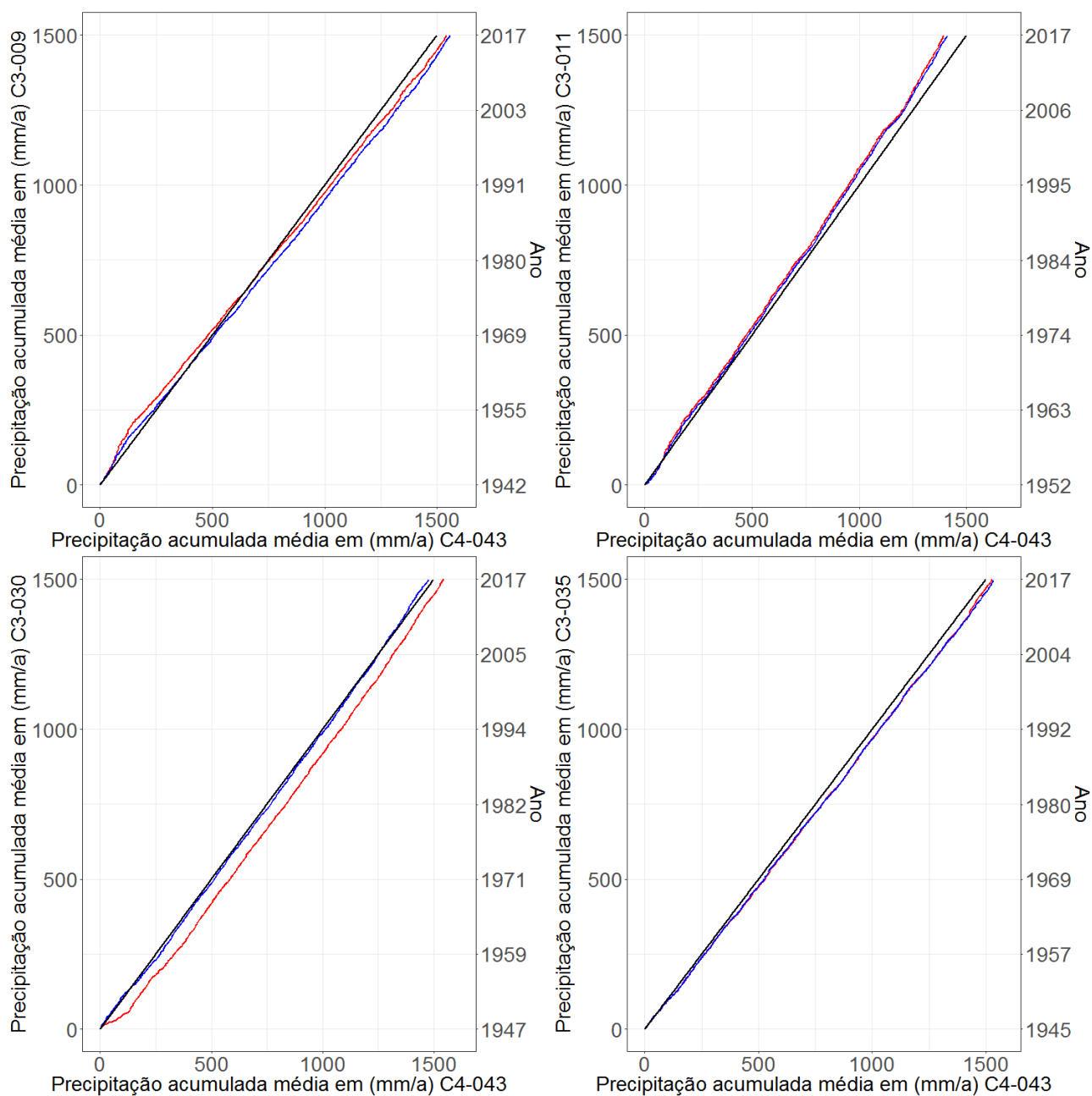


Figura A 15 - Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos C3-009, C3-011, C3-035 e C3-030 tendo por referência o posto C4-043 localizado na bacia do Paraíba do Sul. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

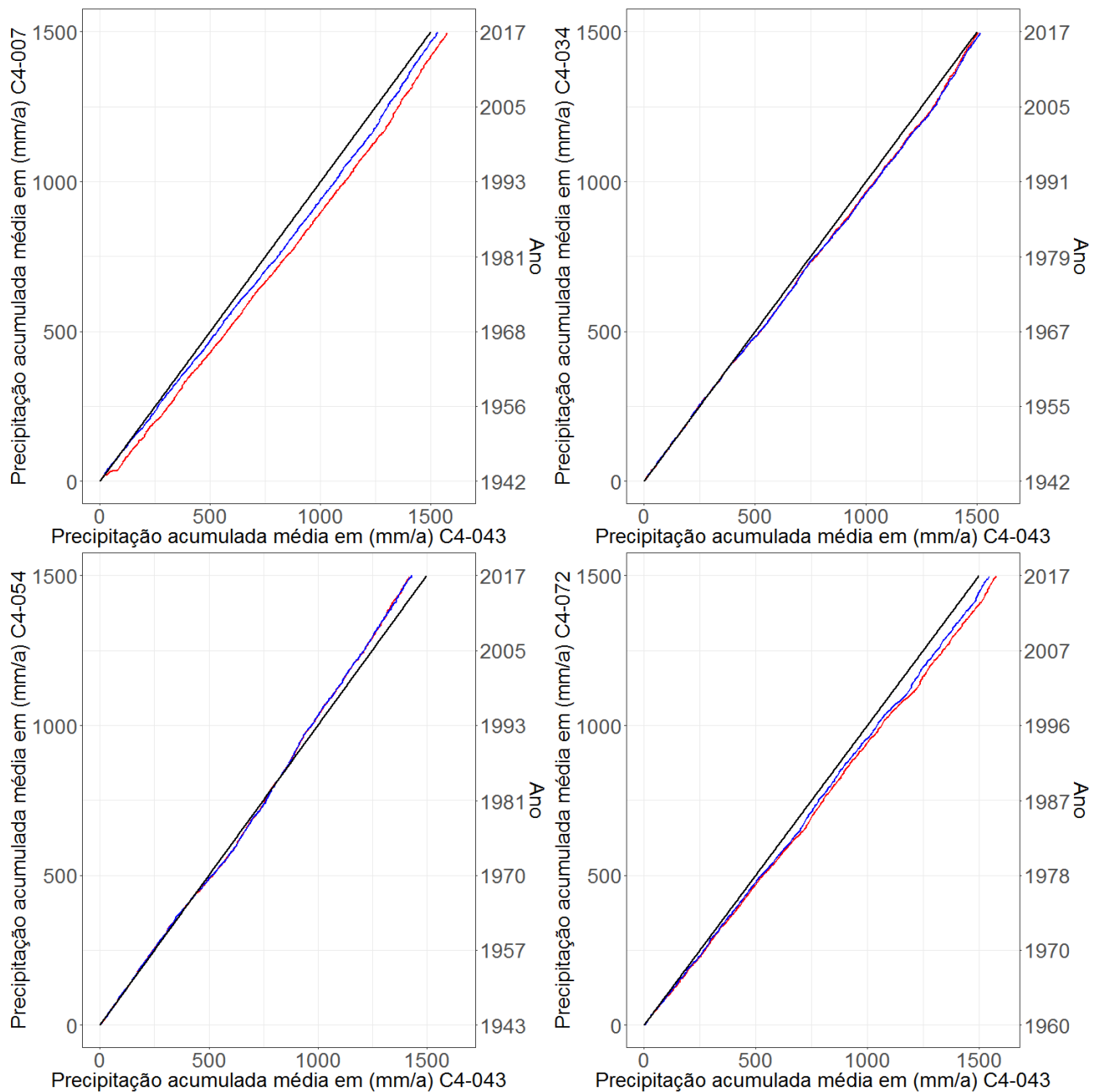


Figura A 16- Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos C4-007, C4-034, C4-072 e C4-054 tendo por referência o posto C4-043 localizado na bacia do Paraíba do Sul. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

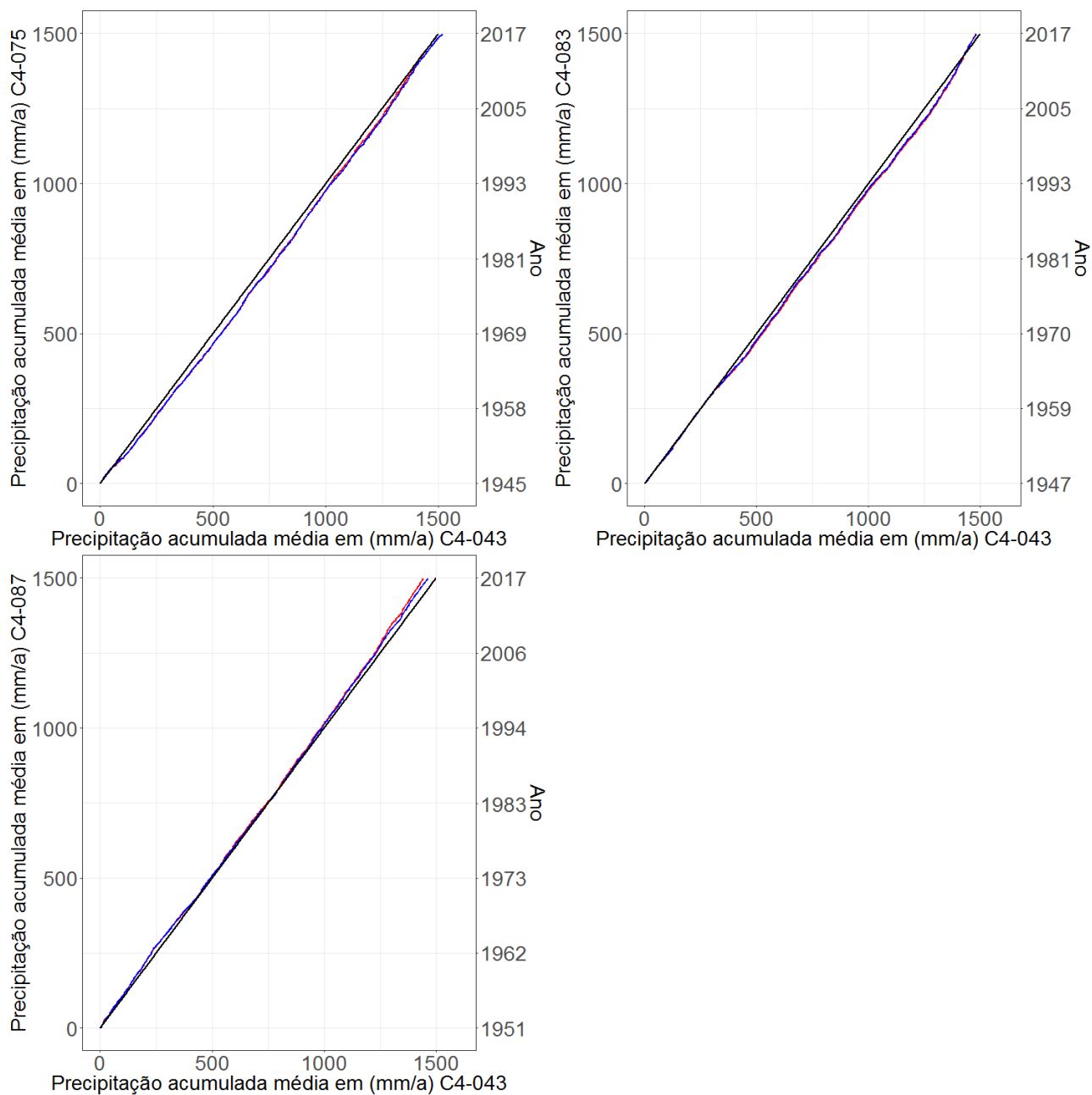


Figura A 17– Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos C4-075, C4-083 e C4-087 tendo por referência o posto C4-043 localizado na bacia do Paraíba do Sul. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.



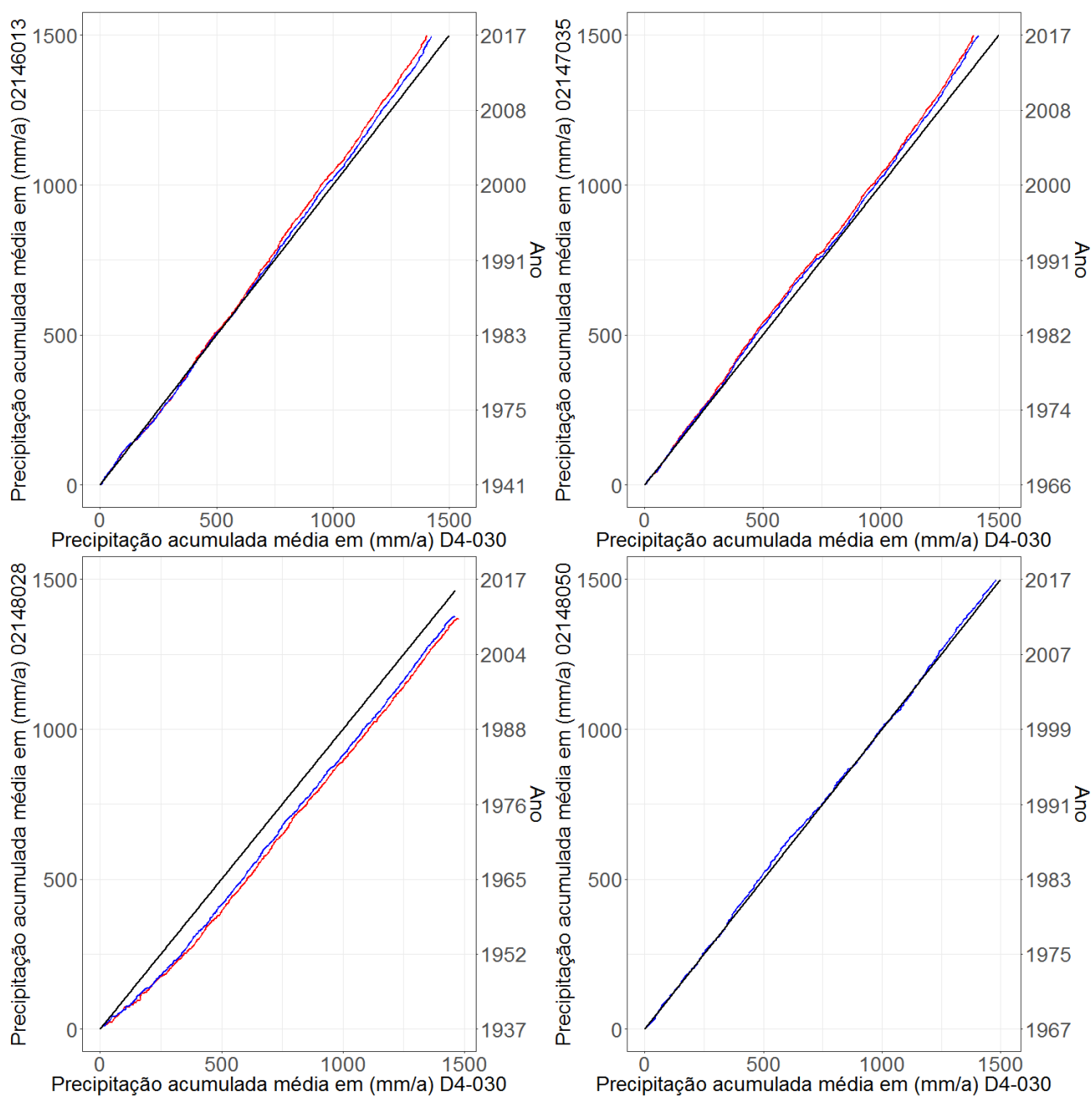


Figura A 18 – Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos 02146013, 02147035, 02148050 e 02148028 tendo por referência o posto D4-030 localizado na bacia do Mogi-Guaçu. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

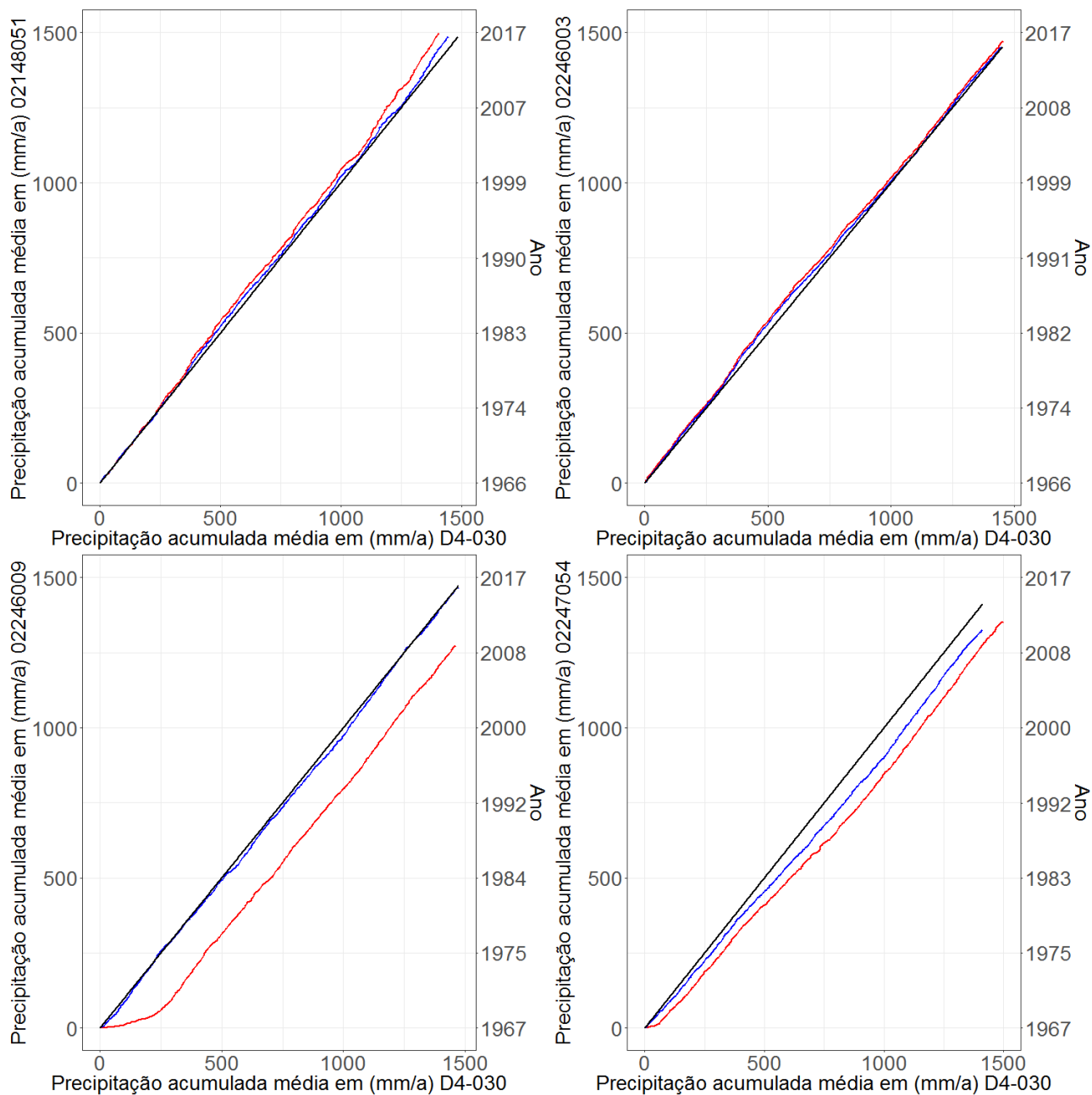


Figura A 19 – Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos 02148051, 02246003, 02247054 e 02246009 tendo por referência o posto D4-030 localizado na bacia do Mogi-Guaçu. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

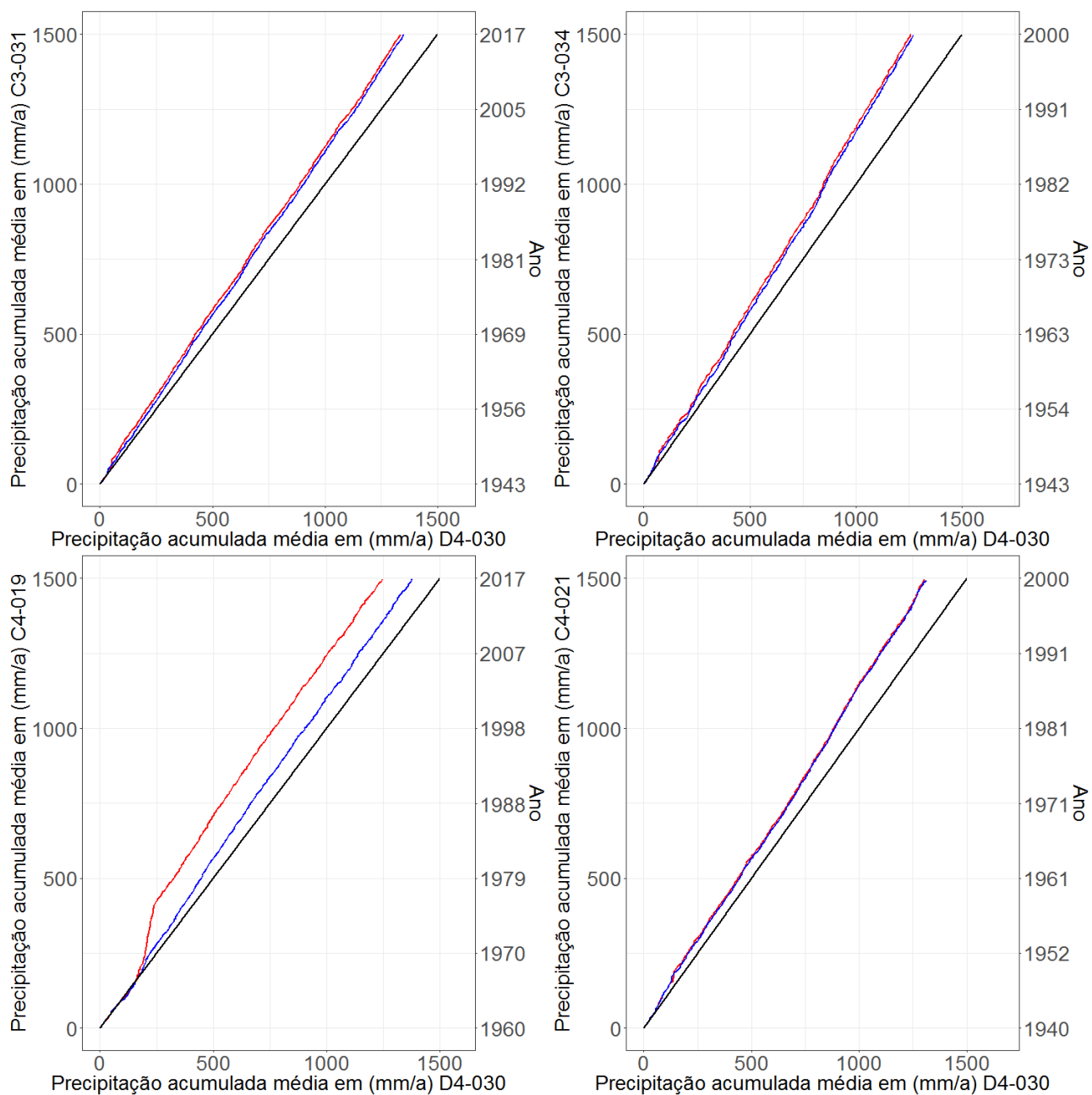


Figura A 20 – Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos C3-031, C3-034, C4-021 e C4-019 tendo por referência o posto D4-030 localizado na bacia do Mogi-Guaçu. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

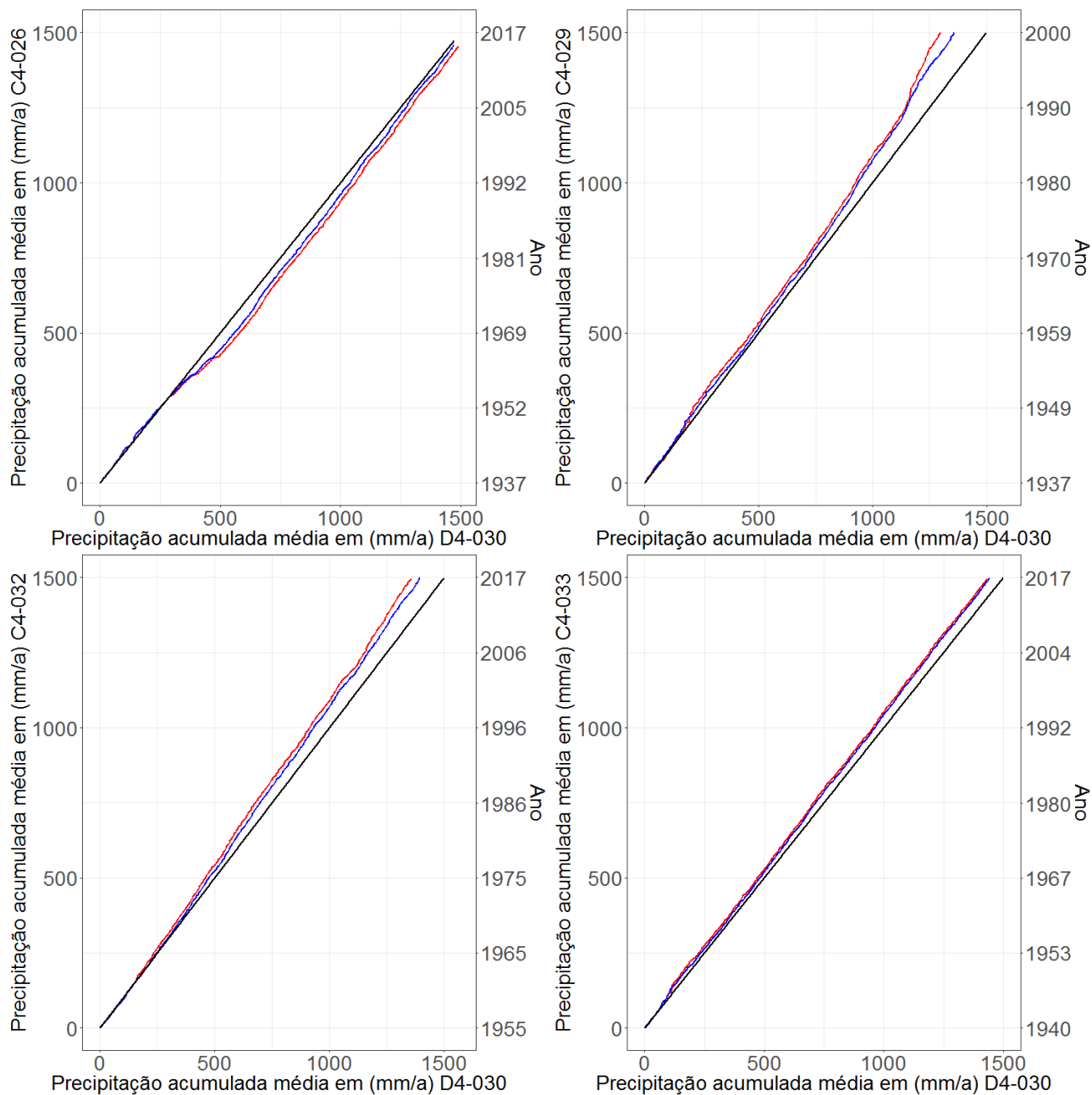


Figura A 21– Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos C4-026, C4-029, C4-033 e C4-032 tendo por referência o posto D4-030 localizado na bacia do Mogi-Guaçu. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

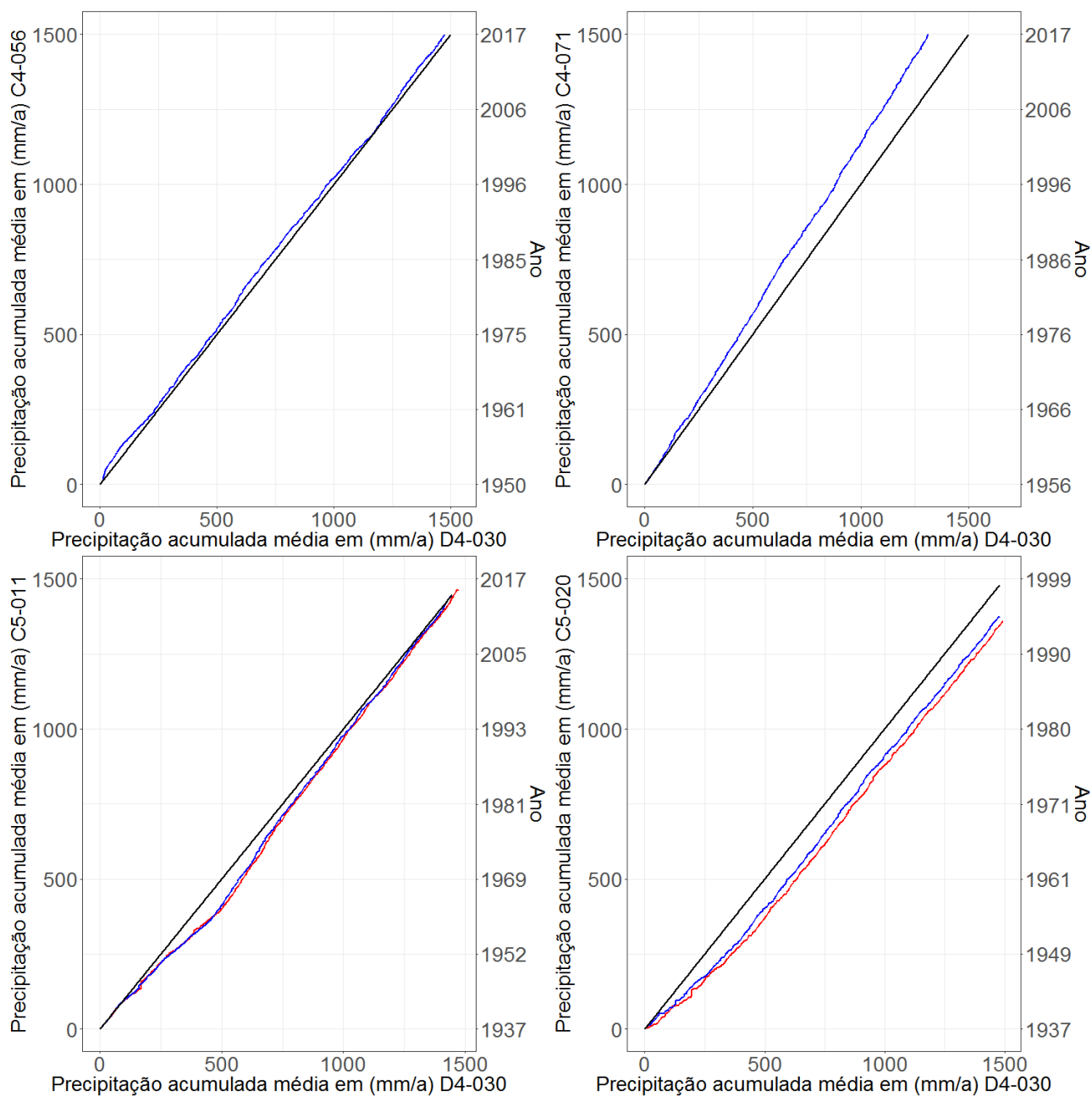


Figura A 22 – Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos C4-056, C4-071, C5-020 e C5-011 tendo por referência o posto D4-030 localizado na bacia do Mogi-Guaçu. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

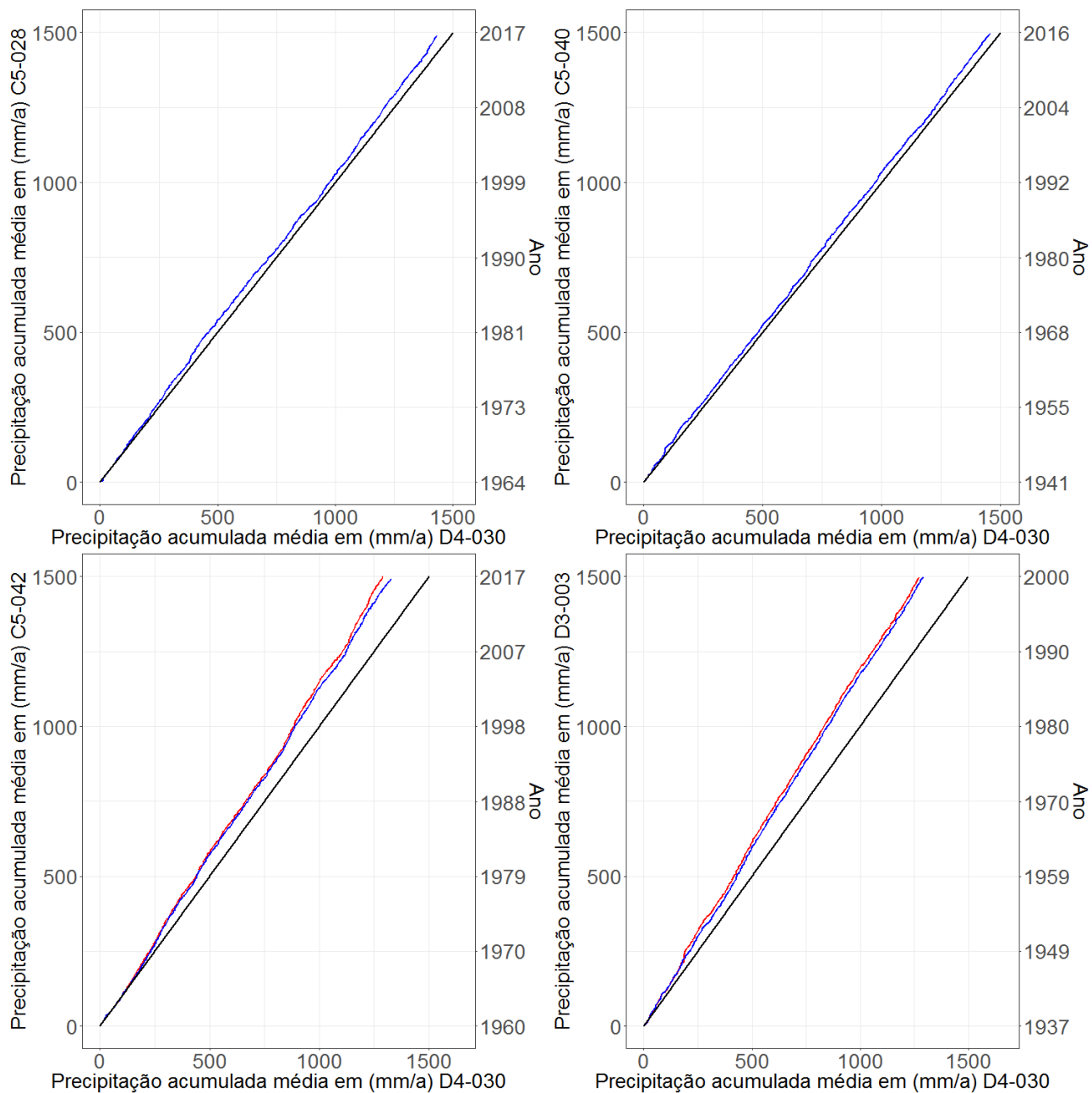


Figura A 23– Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos C5-028, C5-040, D3-003 e C5-042 tendo por referência o posto D4-030 localizado na bacia do Mogi-Guaçu. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

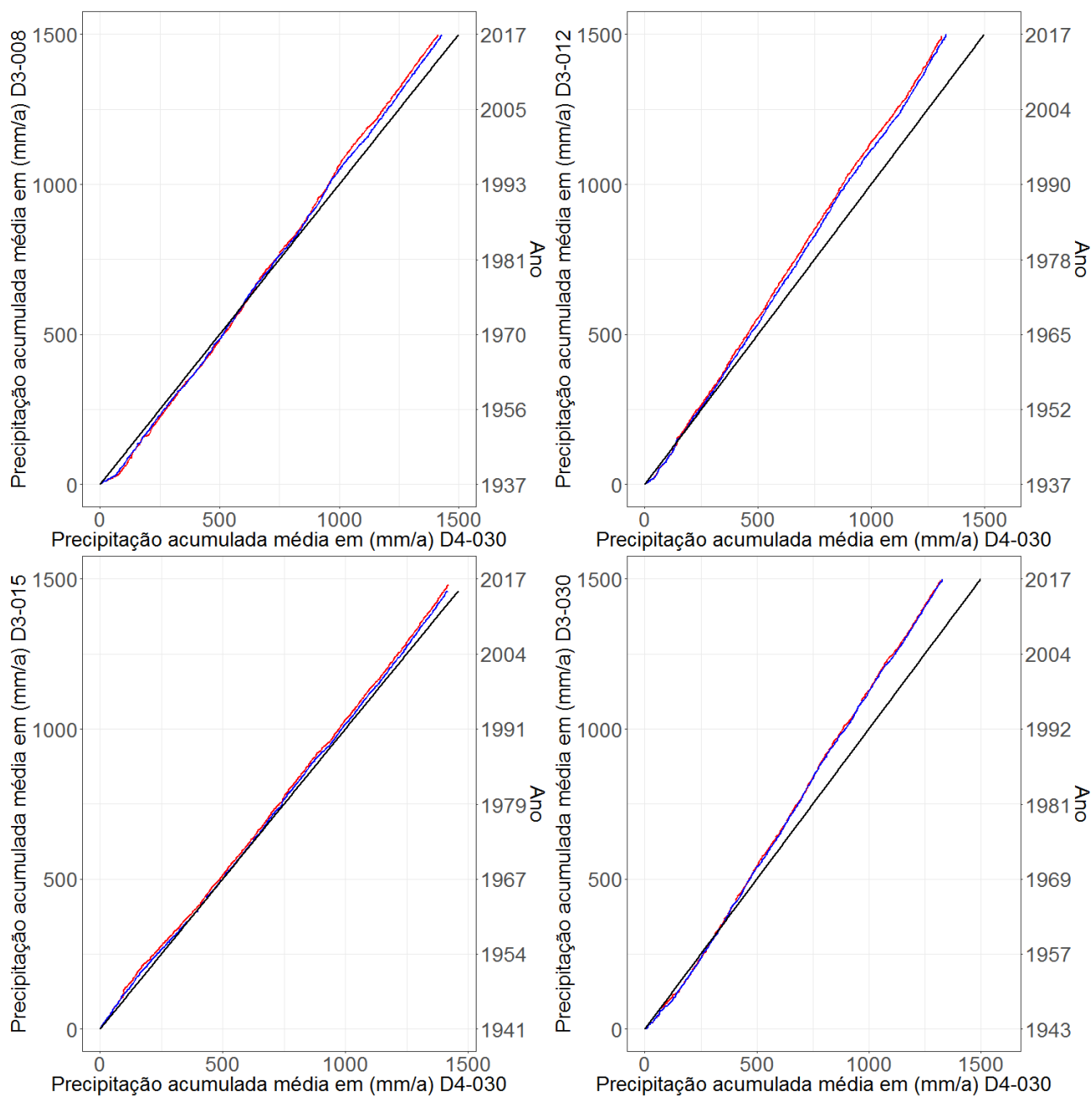


Figura A 24 – Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos D3-008, D3-012, D3-030 e D3-015 tendo por referência o posto D4-030 localizado na bacia do Mogi-Guaçu. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

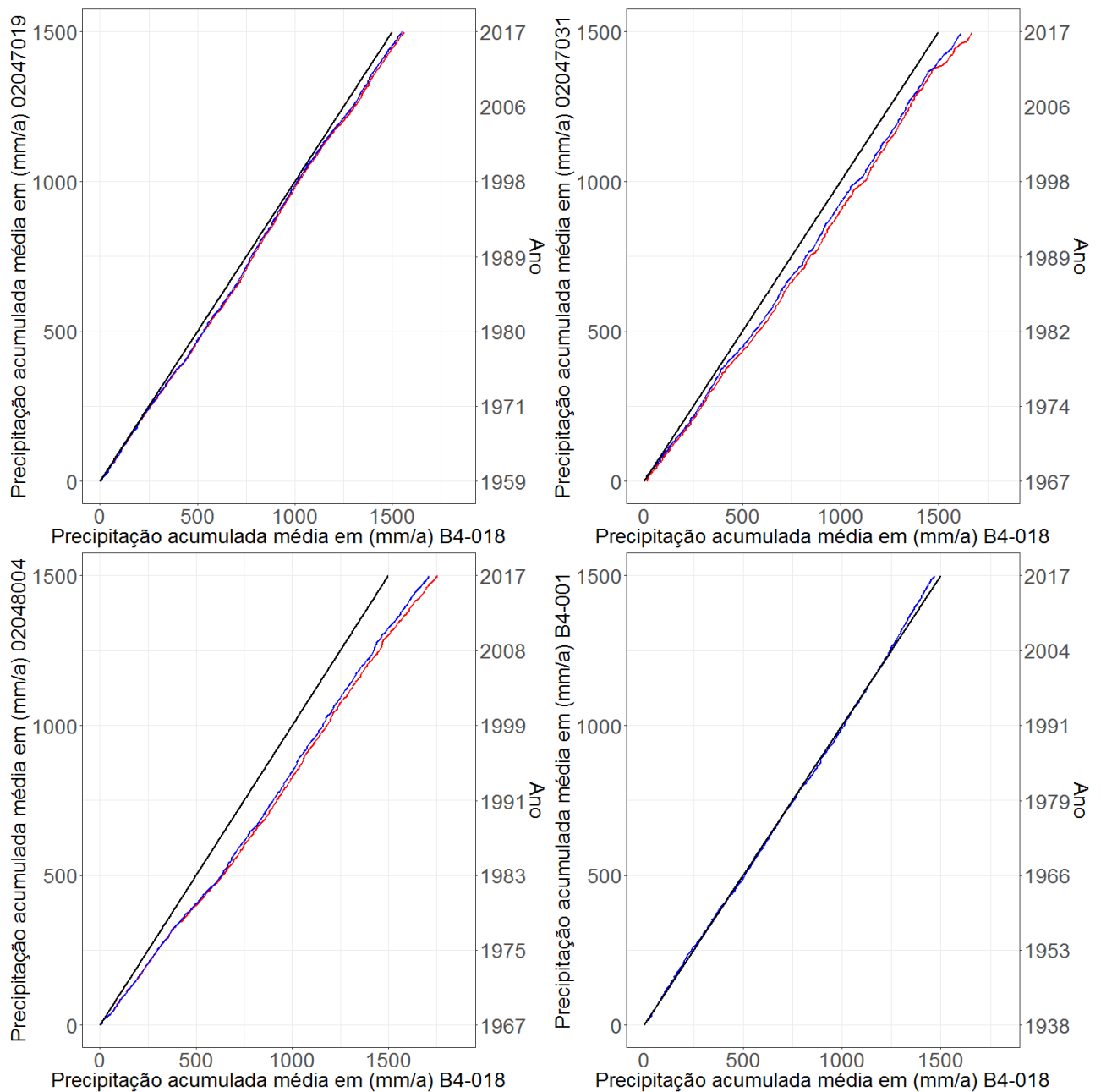


Figura A 25– Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos 02047019, 02047031, B4-001 e 02048004 tendo por referência o posto B4-018 localizado na bacia do Sapucaí. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.



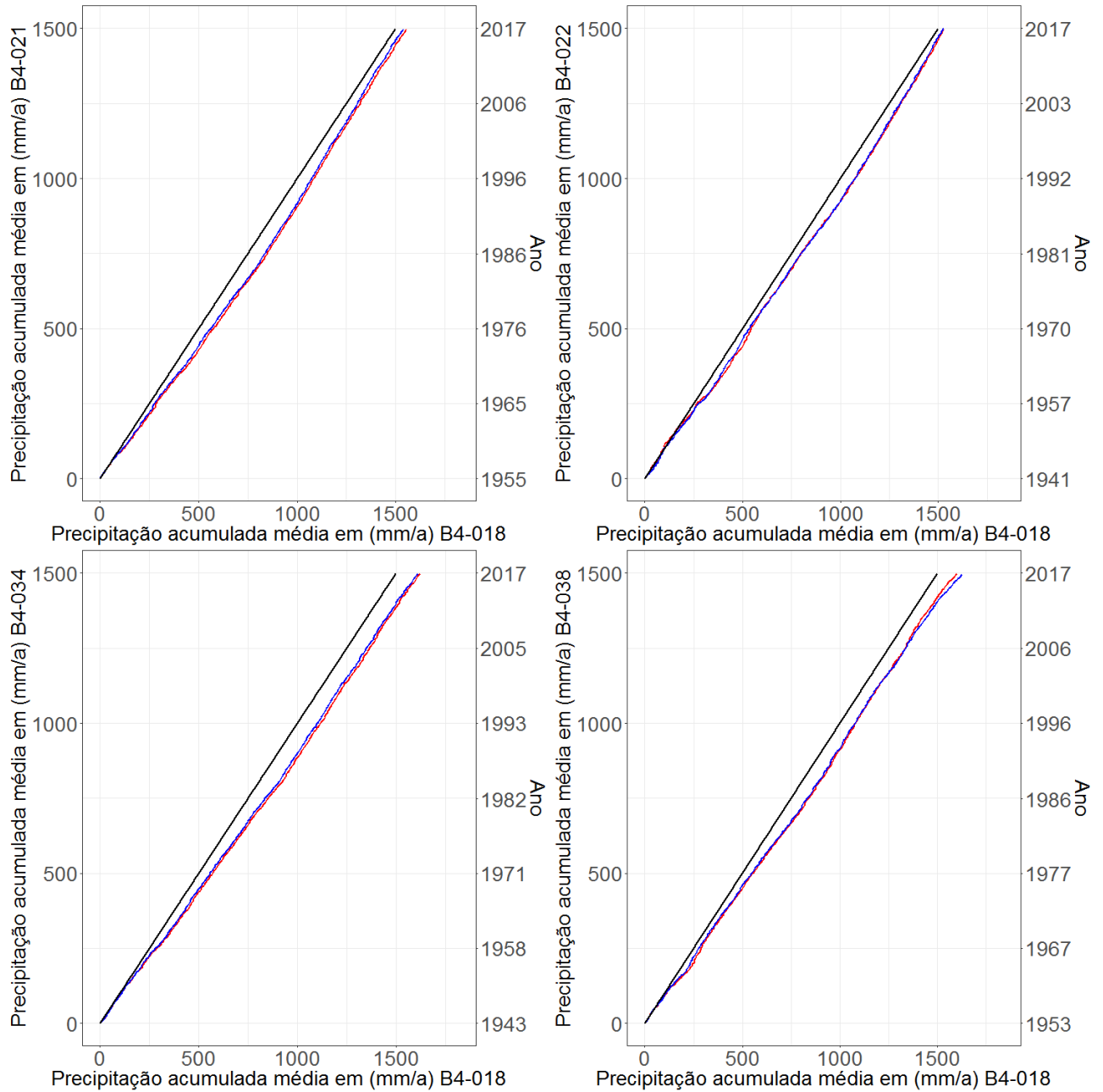


Figura A 26– Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos B4-021, B4-022, B4-038 e B4-034 tendo por referência o posto B4-018 localizado na bacia do Sapucaí. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

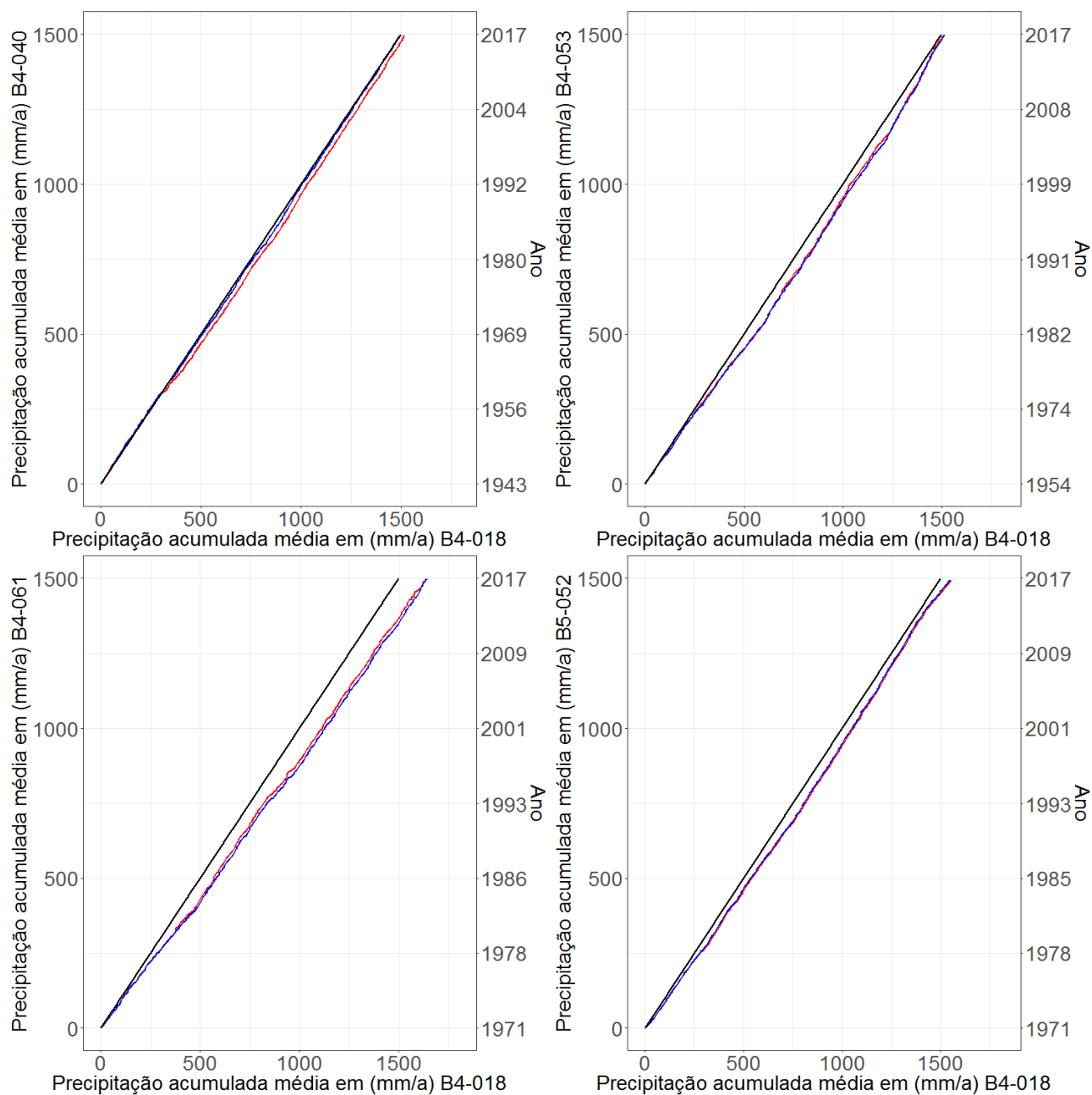


Figura A 27– Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos B4-040, B4-053, B5-052 e B4-061 tendo por referência o posto B4-018 localizado na

bacia do Sapucaí. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.

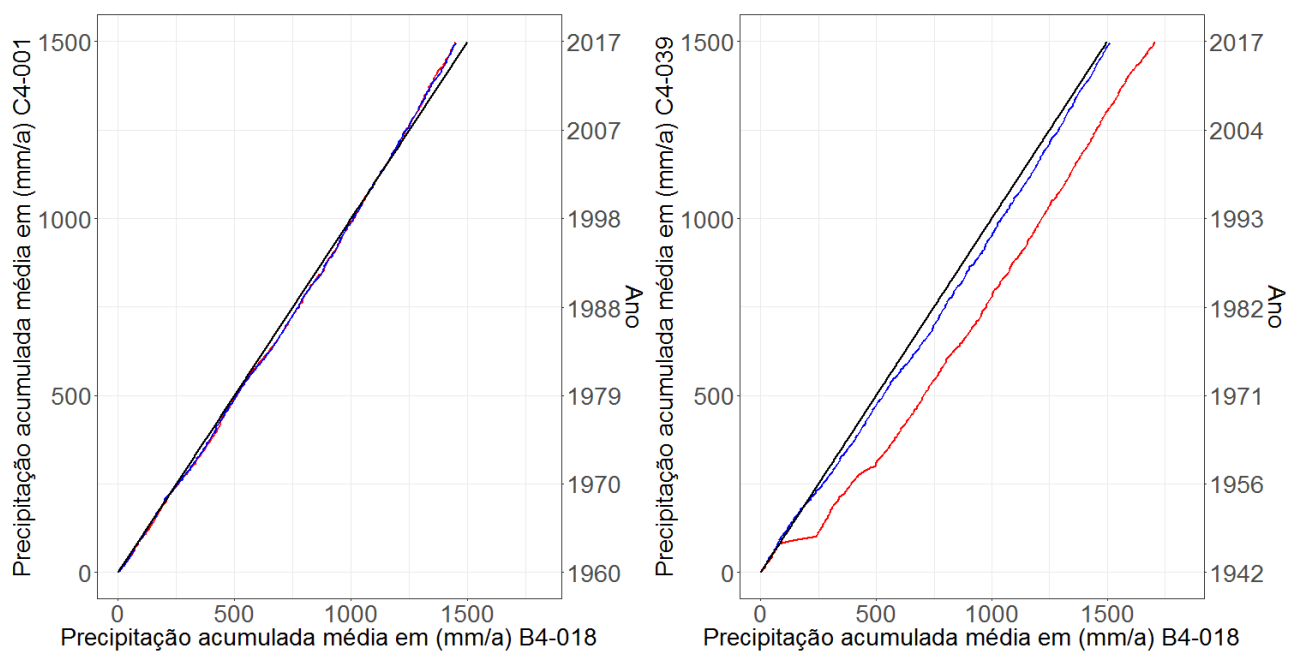


Figura A 28– Resultado da aplicação do método da dupla-massa nos postos C4-001 e C4-039 tendo por referência o posto B4-018 localizado na bacia do Sapucaí. A linha vermelha representa a série original e a linha azul a série consistida.



### Disponibilidade de dados de chuva Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá

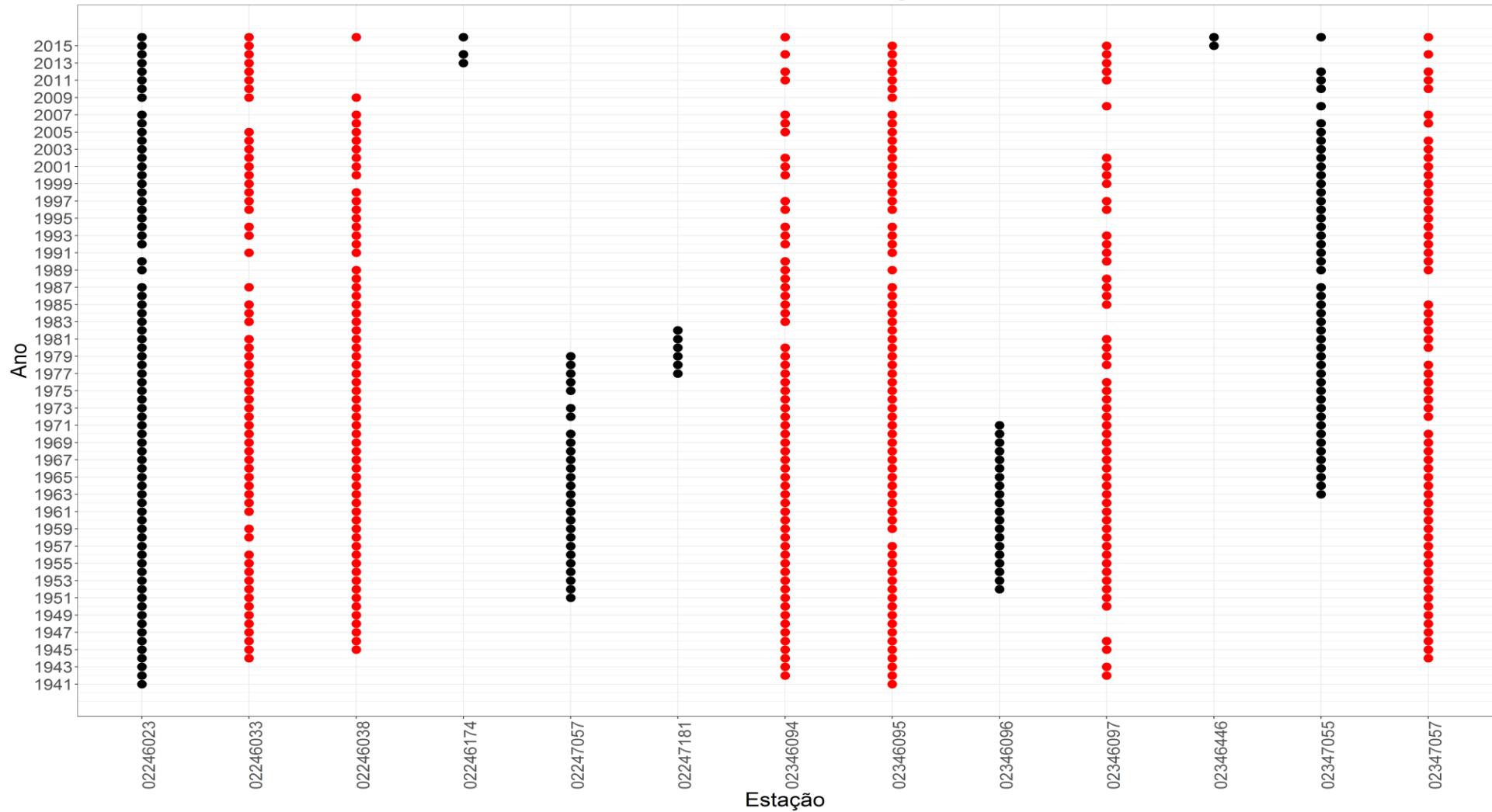


Figura 2 – Disponibilidades de dados de chuva da ANA na bacia do PCJ. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de vazão Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí

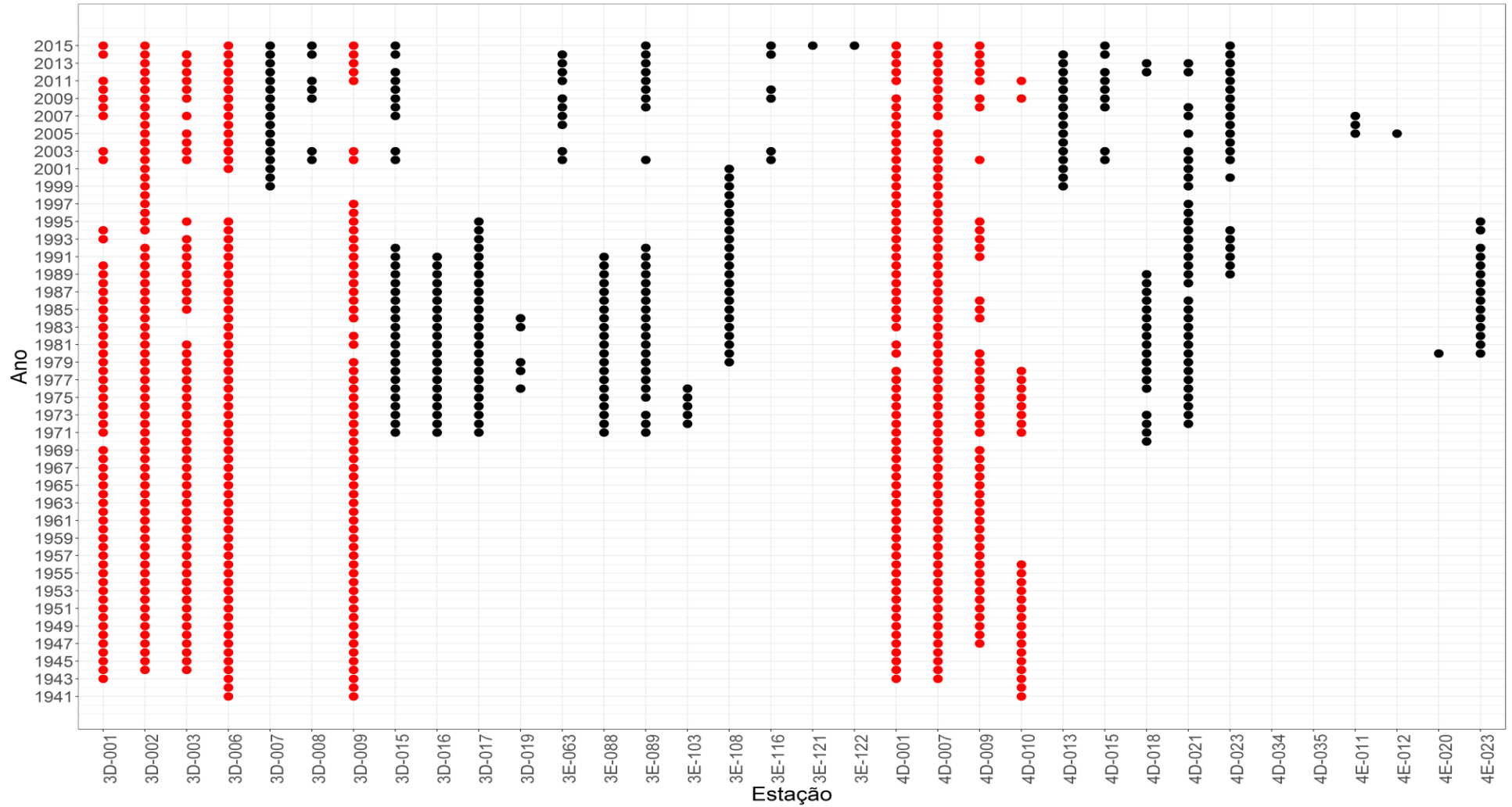


Figura 3 – Disponibilidades de dados de vazão da DAEE na bacia do PCJ. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de vazão Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá

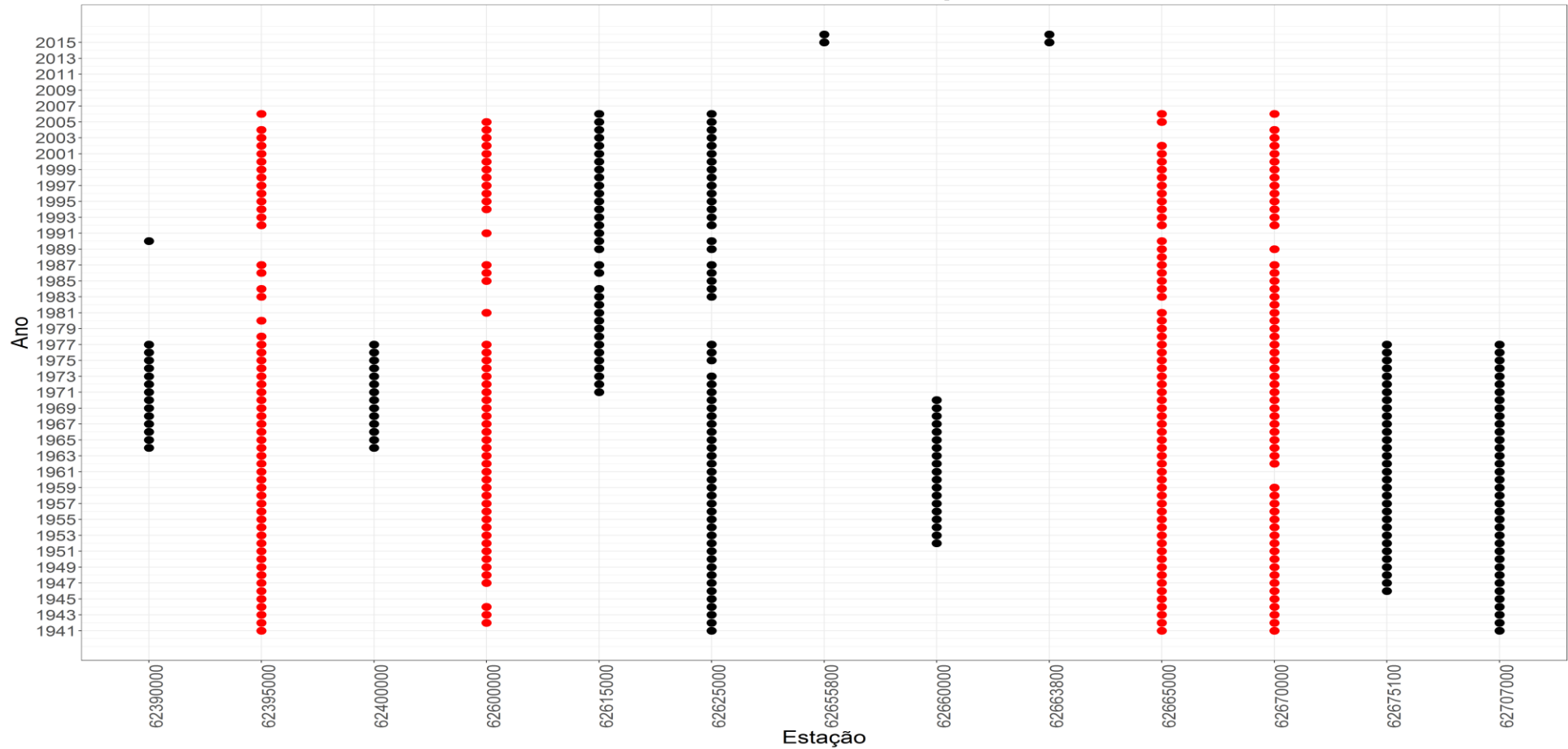


Figura 4 – Disponibilidades de dados de vazão da ANA na bacia do PCJ. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de chuva Bacia do Paraíba do Sul

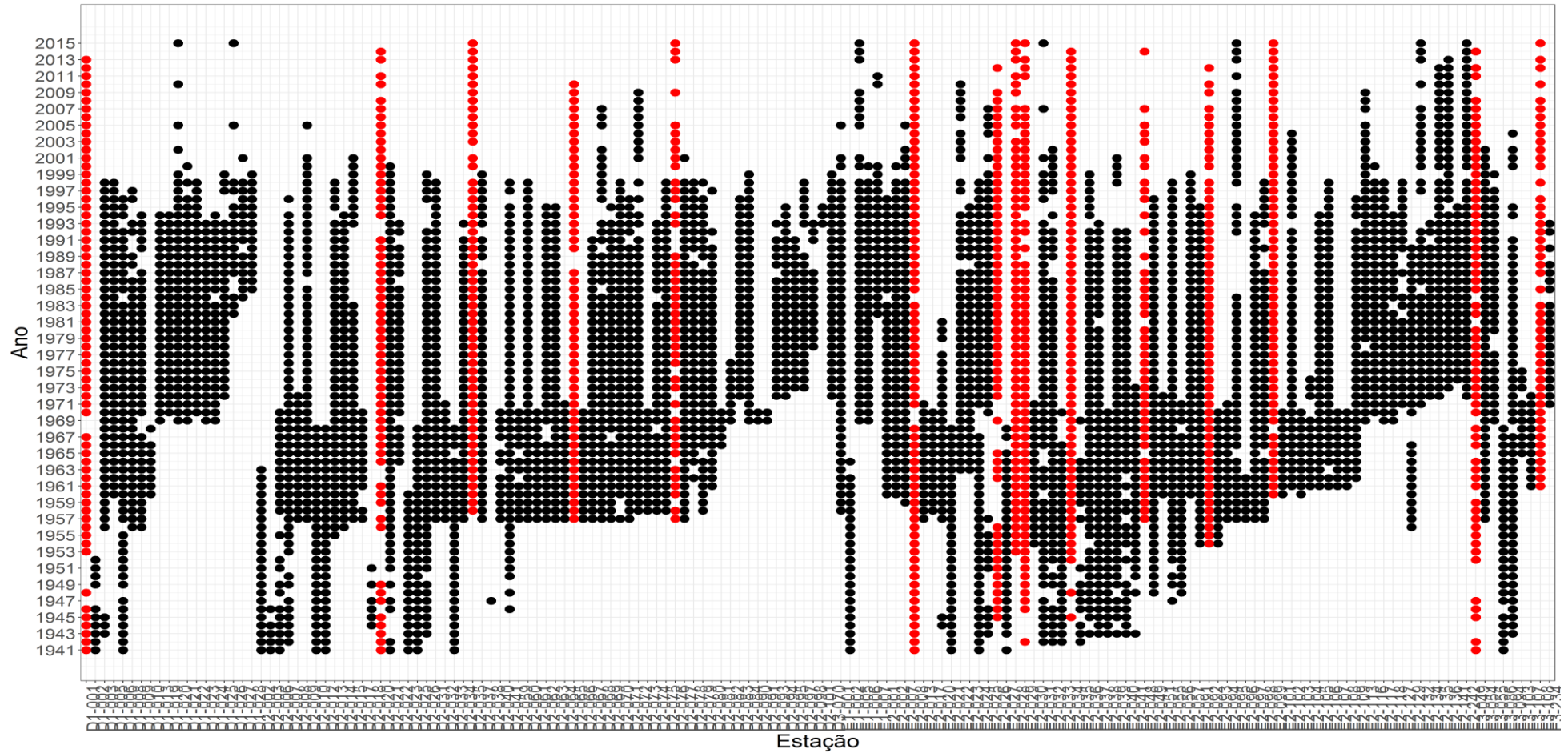


Figura 5 - Disponibilidades de dados de chuva do DAEE na bacia do Paraíba do Sul. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.



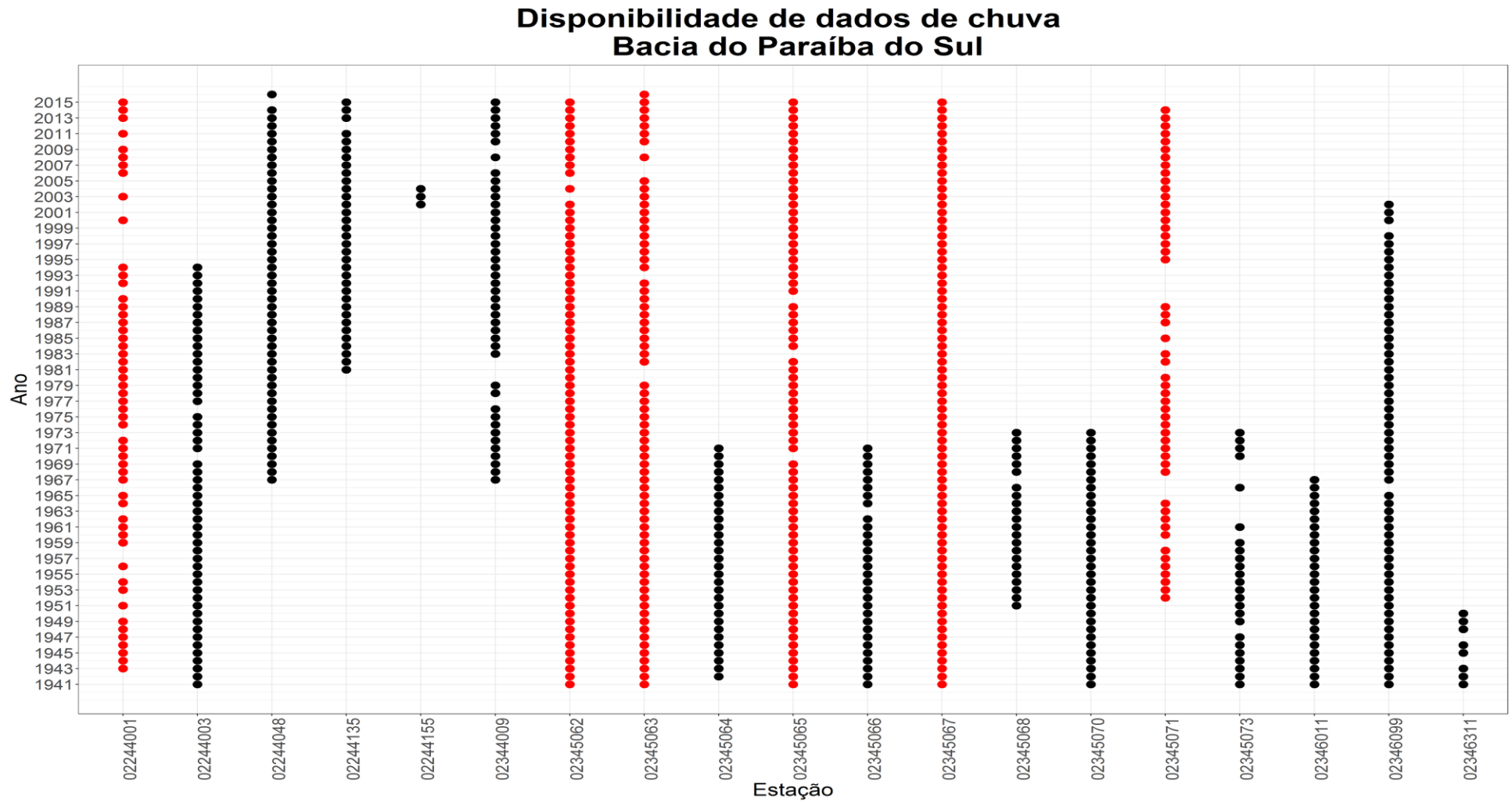


Figura 6 - Disponibilidades de dados de chuva da ANA na bacia do Paraíba do Sul. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

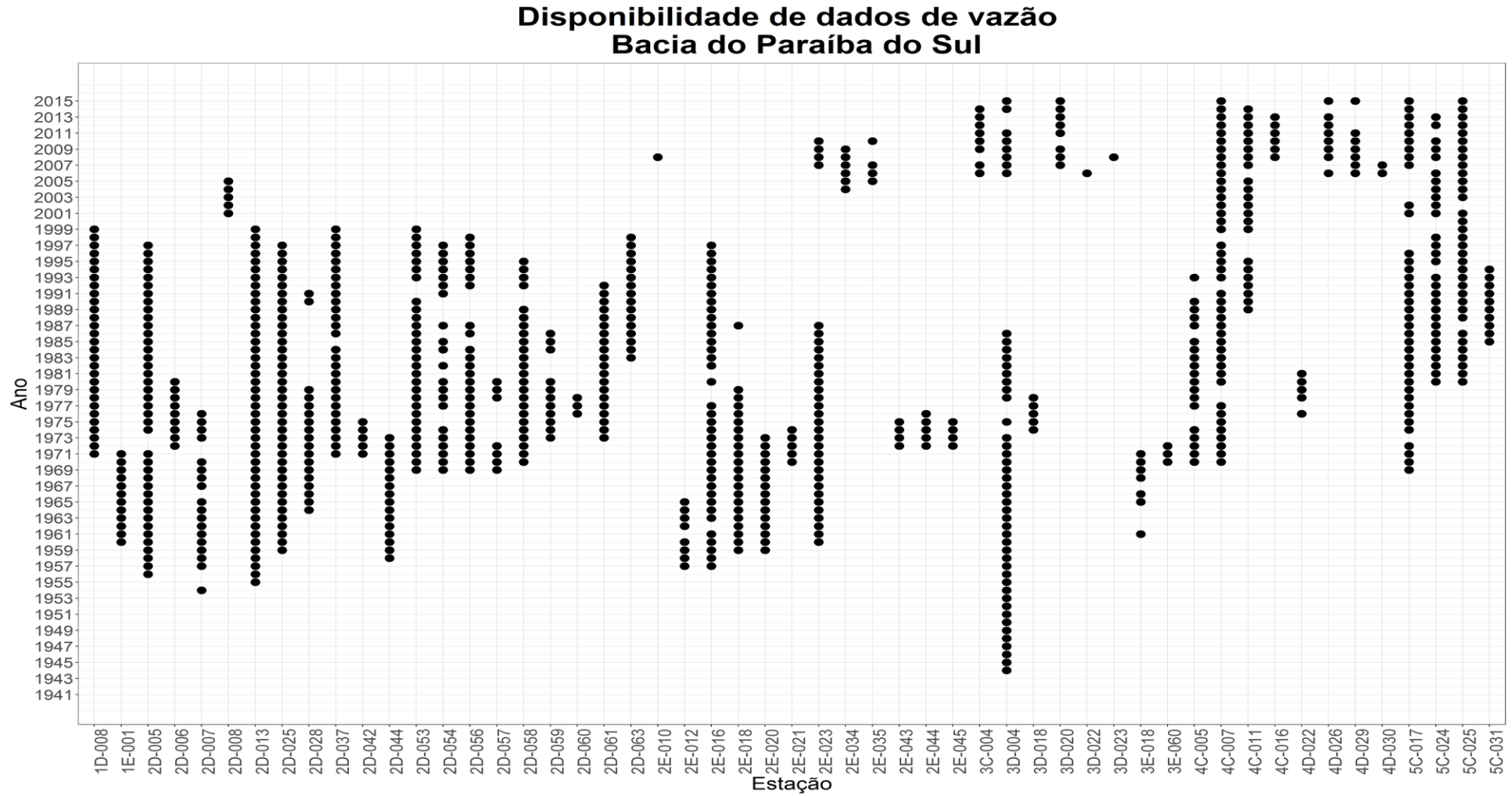


Figura 7 - Disponibilidades de dados de vazão do DAEE na bacia do Paraíba do Sul. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de vazão Bacia do Paraíba do Sul

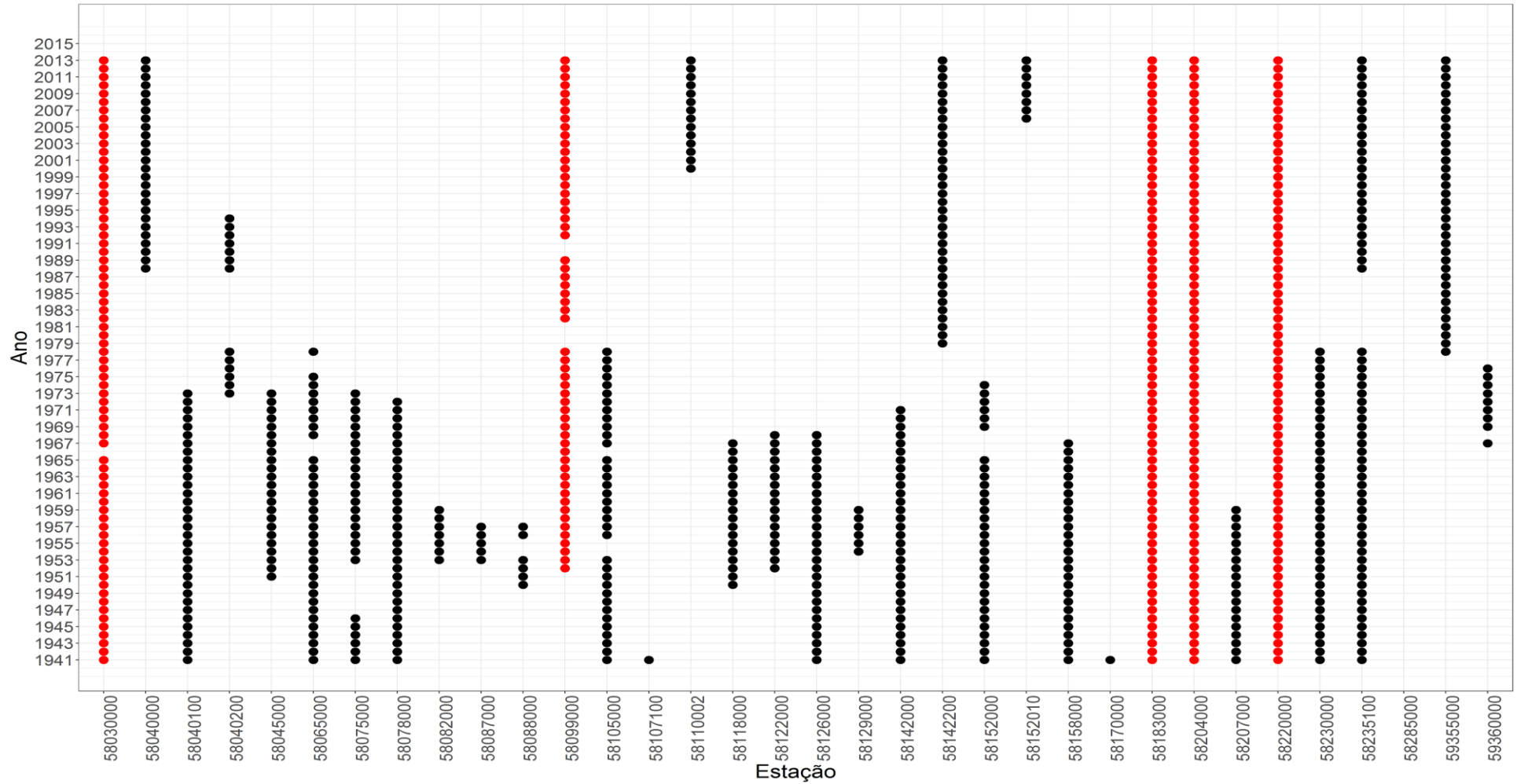


Figura 8 - Disponibilidades de dados de vazão da ANA na bacia do Paraíba do Sul. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de chuva Bacia do Pardo

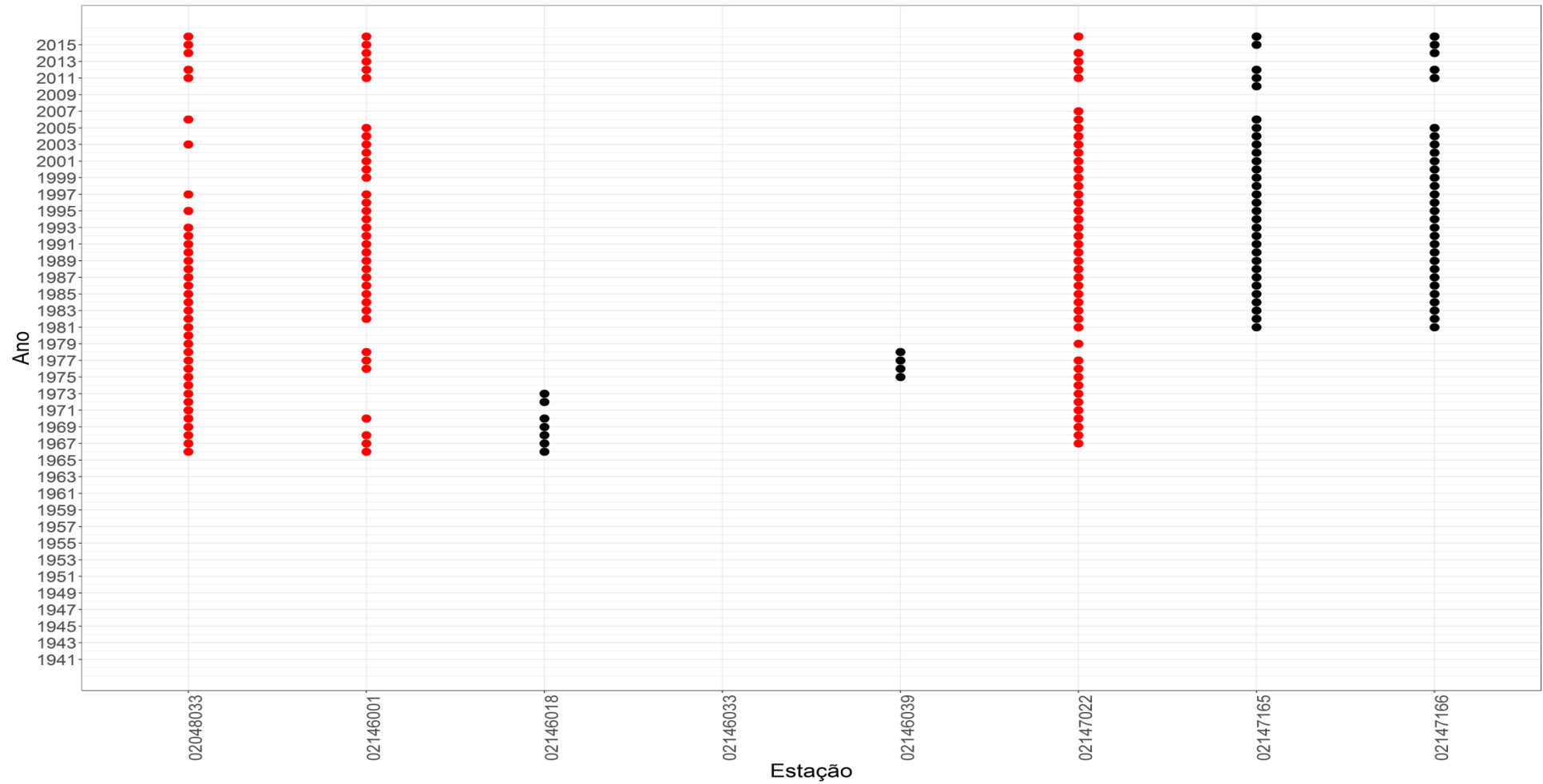


Figura 9 - Disponibilidades de dados de chuva do DAEE na bacia do Pardo. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de chuva Bacia do Pardo

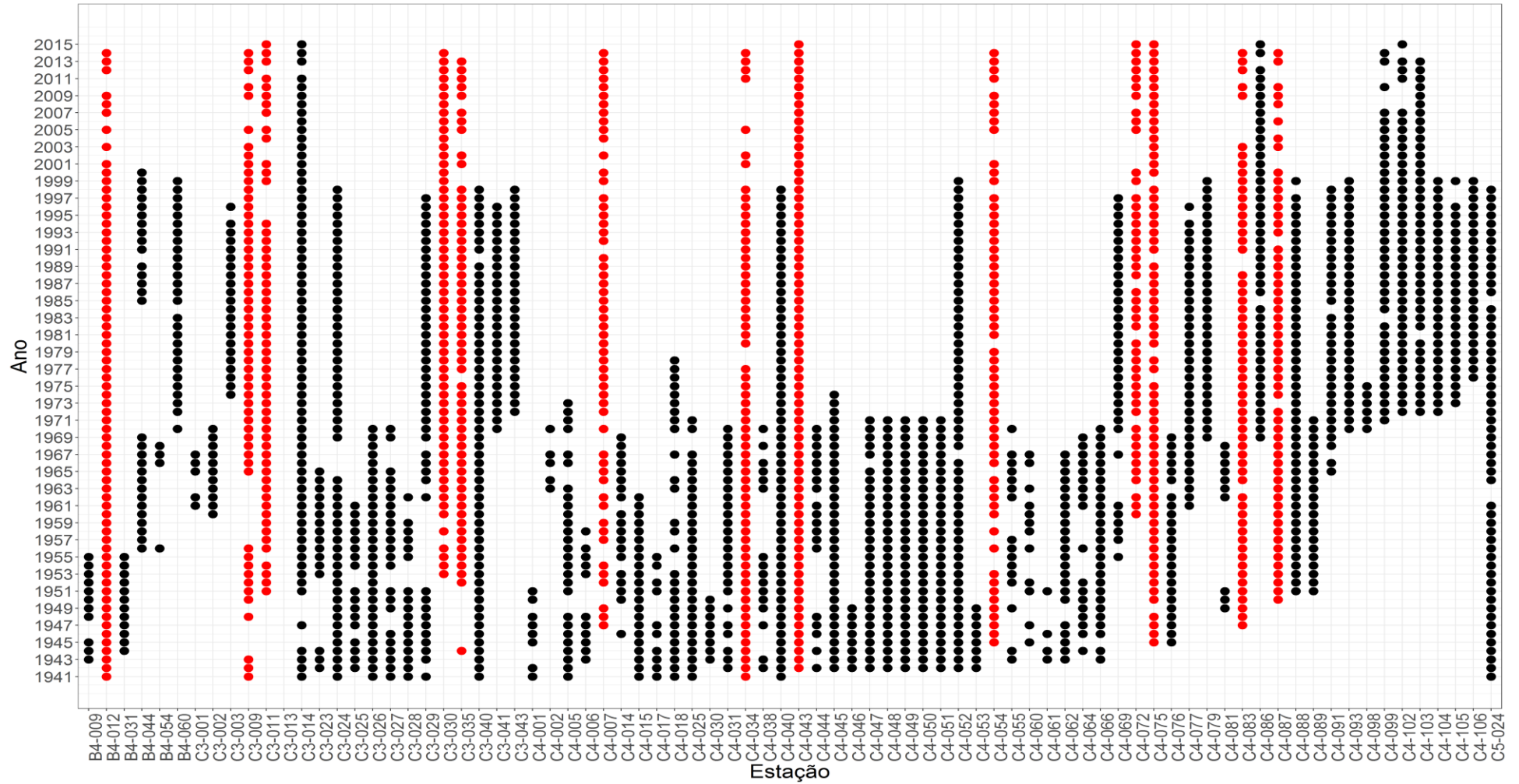


Figura 10 - Disponibilidades de dados de chuva da ANA na bacia do Pardo. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de vazão Bacia do Pardo

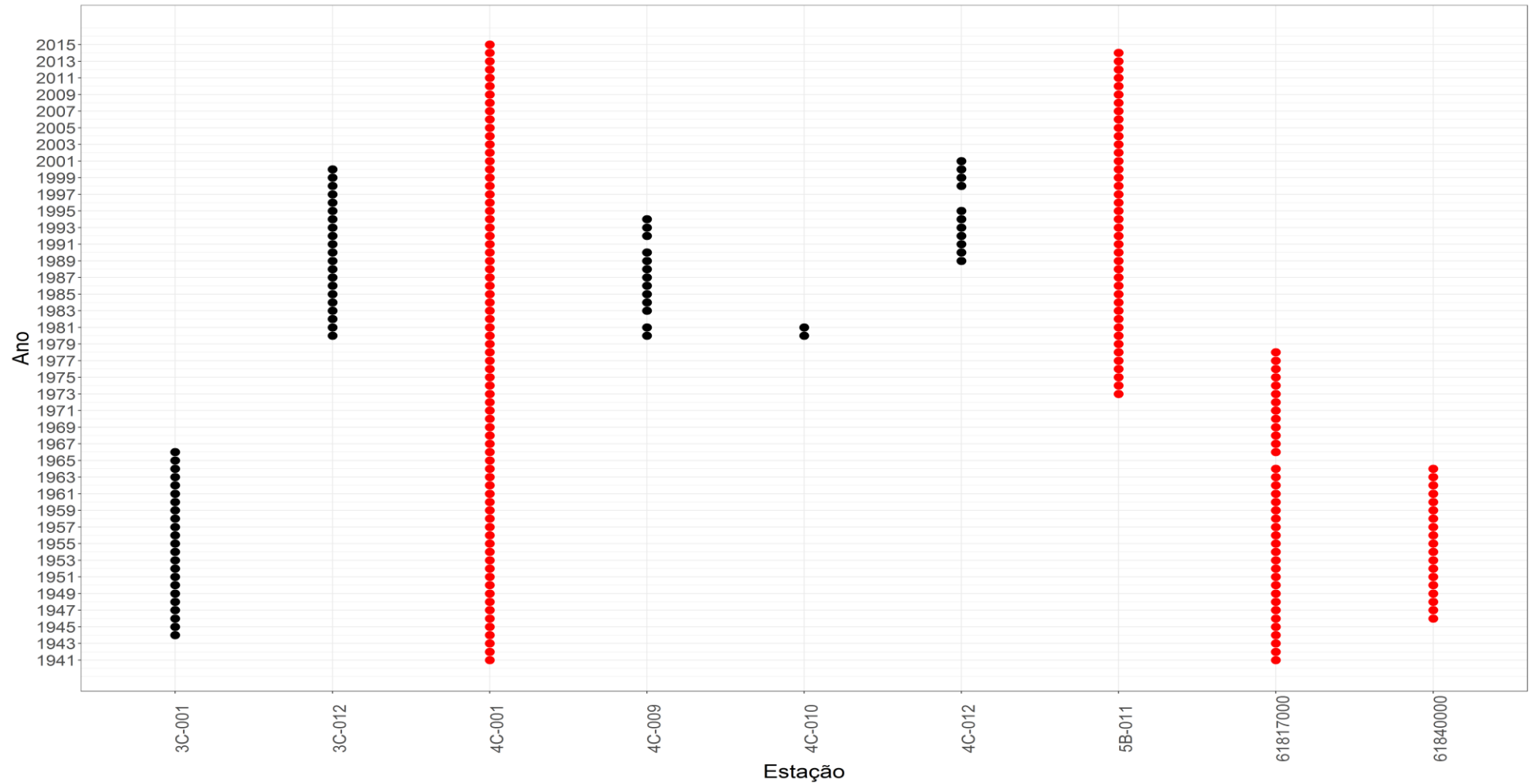


Figura 11 - Disponibilidades de dados de vazão do DAEE e ANA na bacia do Pardo. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de chuva Bacia do Mogi-Guaçu

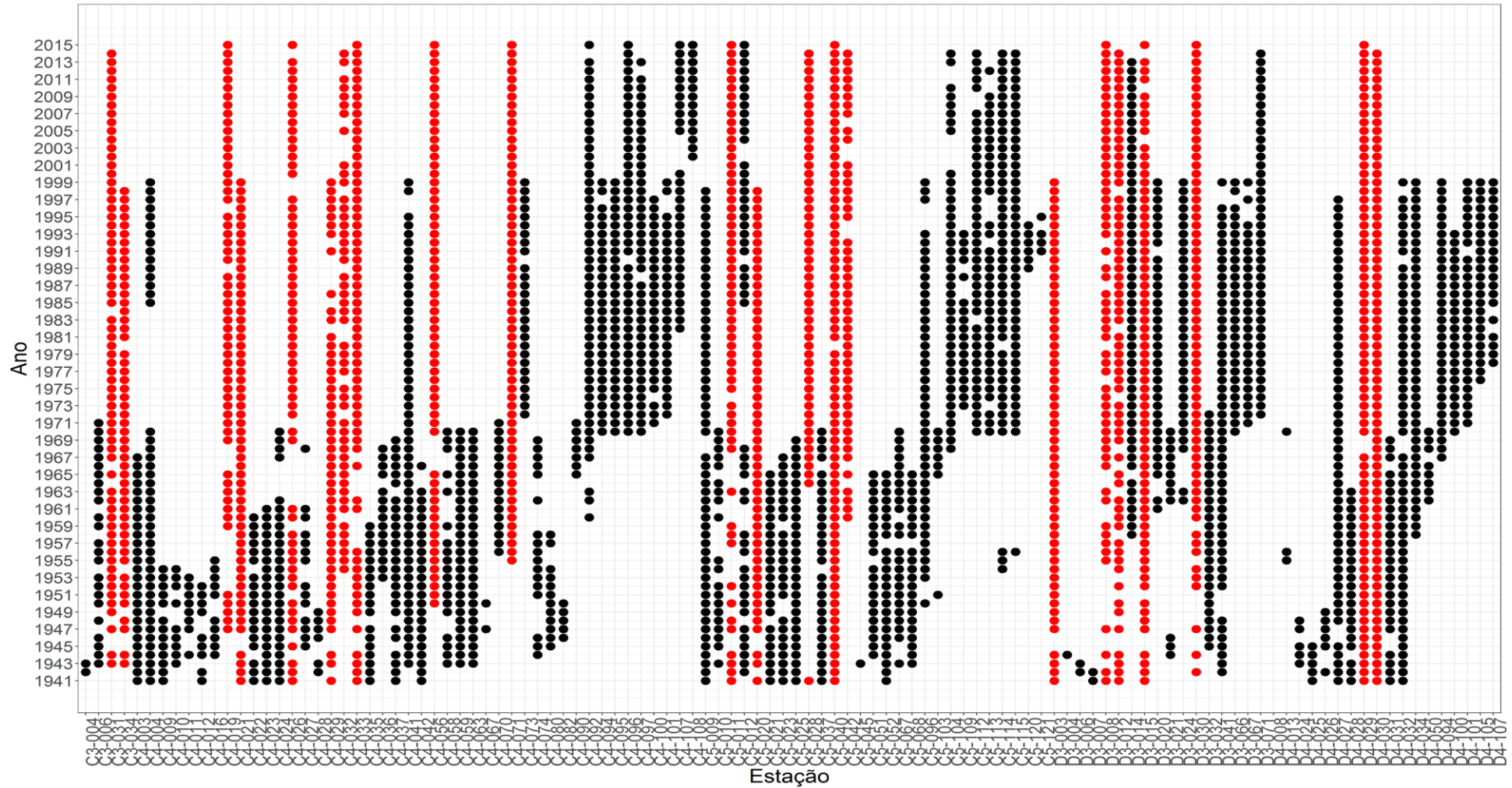


Figura 12 - Disponibilidades de dados de chuva do DAEE na bacia do Mogi-Guaçu. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de chuva Bacia do Mogi-Guaçu

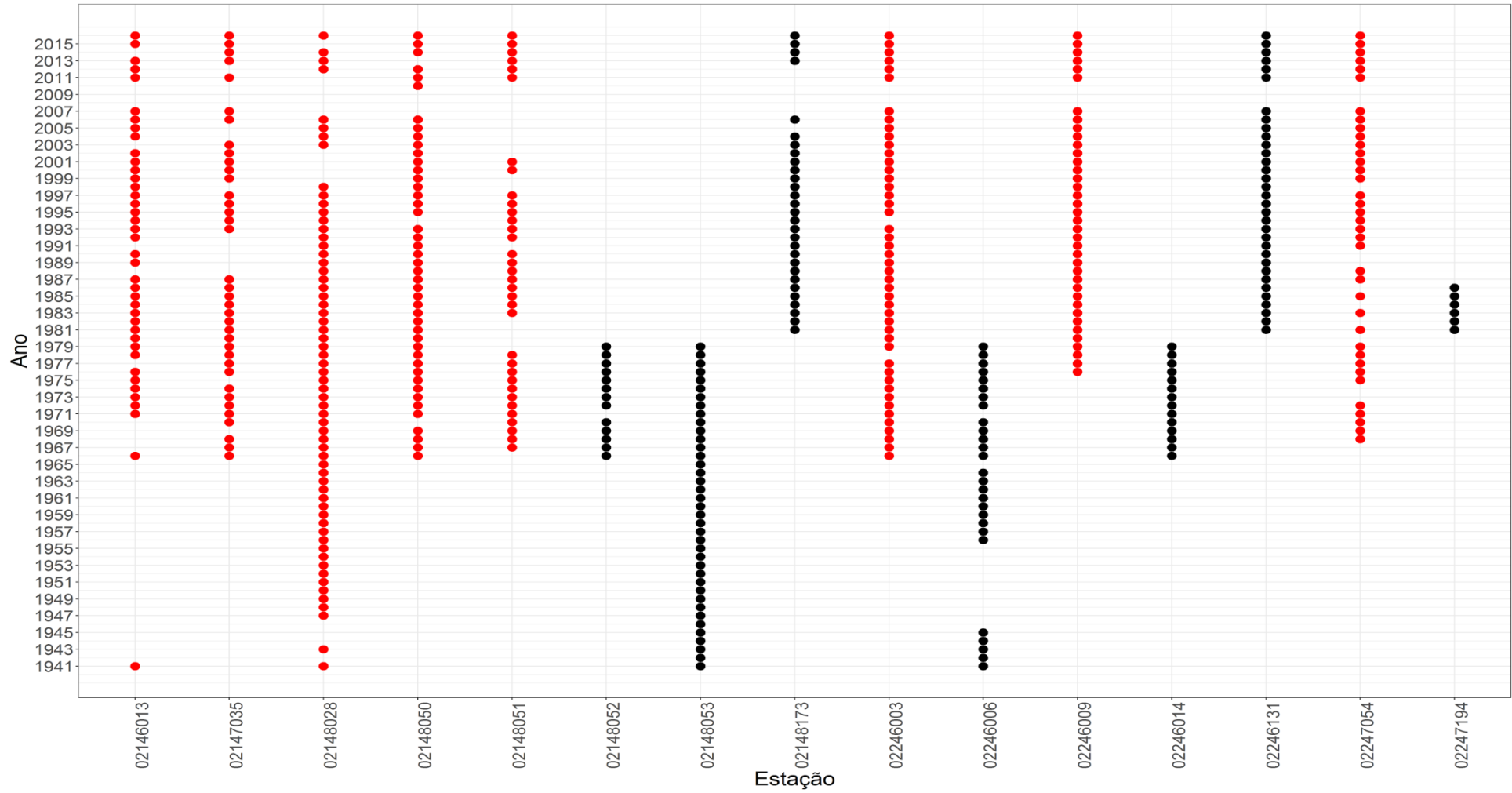


Figura 13 - Disponibilidades de dados de chuva da ANA na bacia do Mogi-Guaçu. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.



### Disponibilidade de dados de vazão Bacia do Mogi-Guaçu

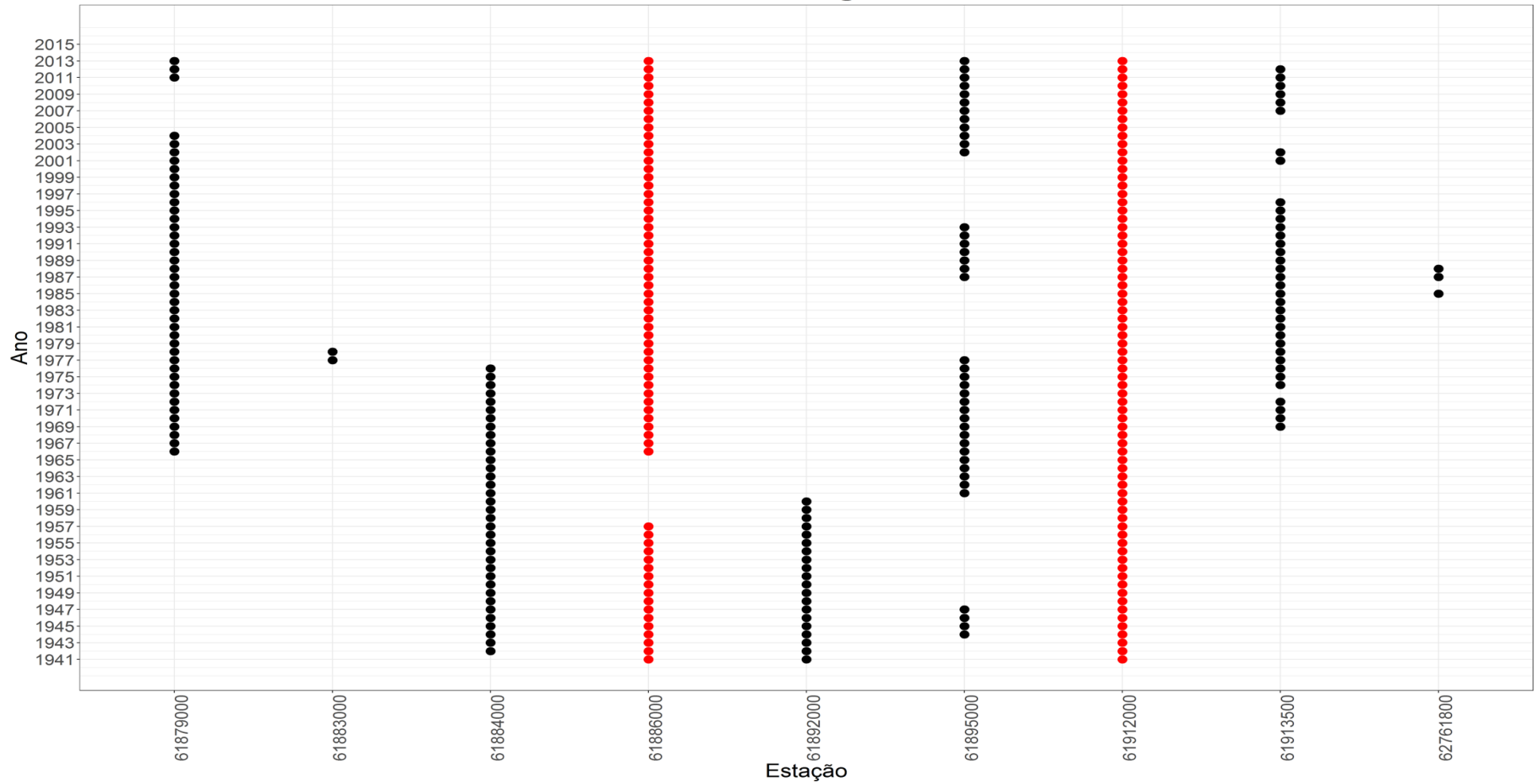


Figura 14 - Disponibilidades de dados de vazão da ANA na bacia do Mogi-Guaçu. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de vazão Bacia do Mogi-Guaçu

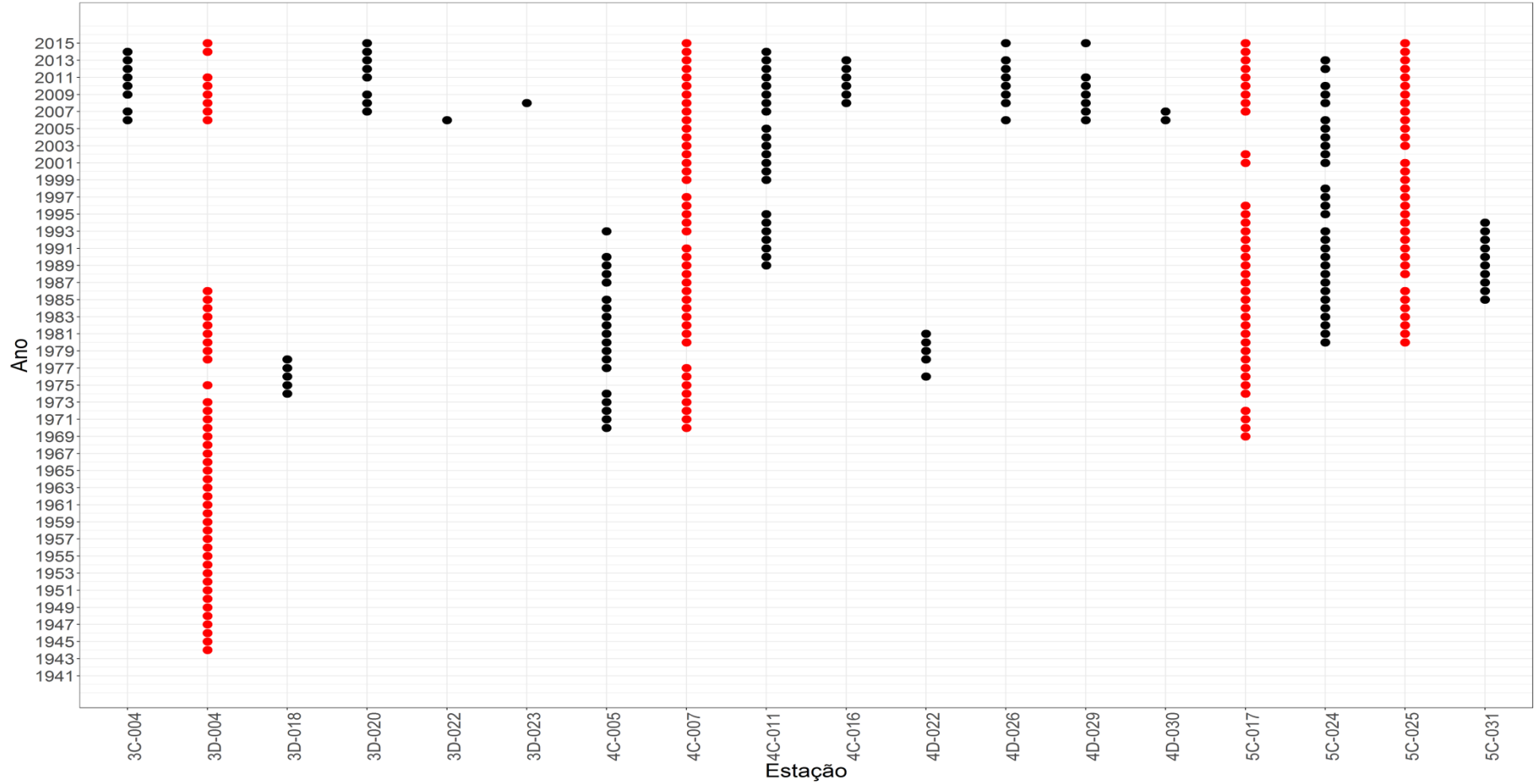


Figura 15 - Disponibilidades de dados de vazão do DAEE na bacia do Mogi-Guaçu. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

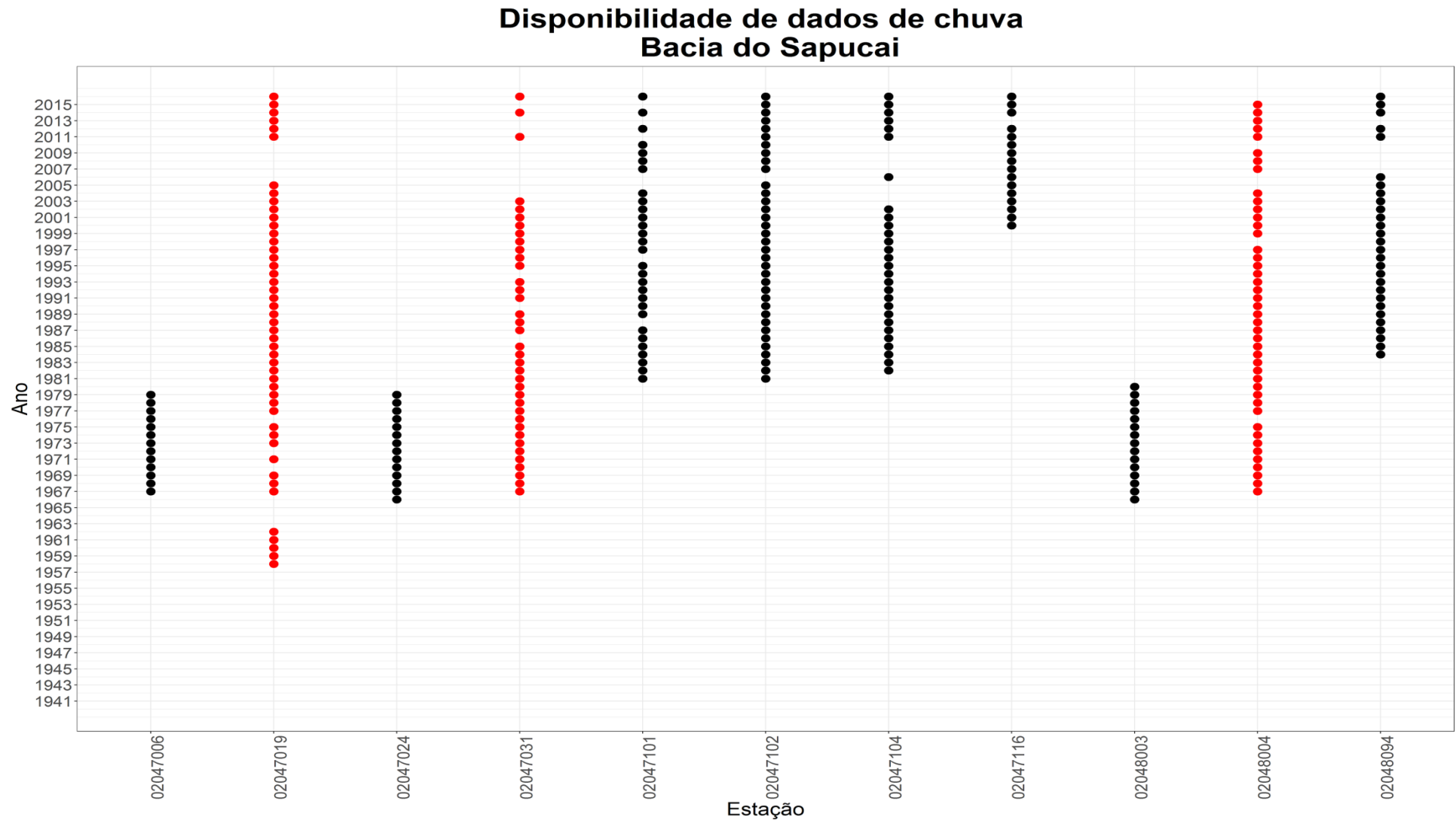


Figura 16 - Disponibilidades de dados de chuva da ANA na bacia do Sapucaí. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de chuva Bacia do Sapucaí

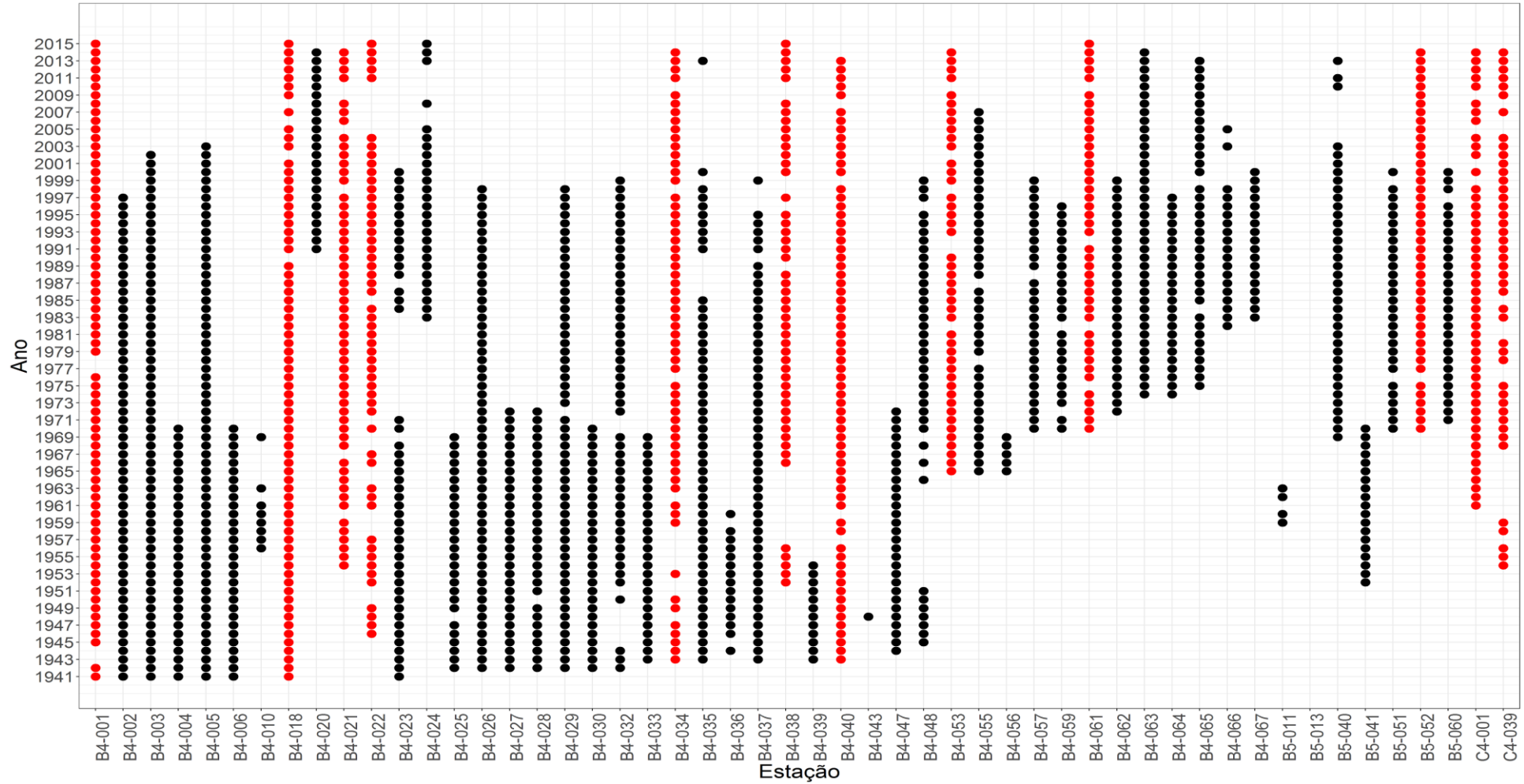


Figura 17 - Disponibilidades de dados de chuva do DAEE na bacia do Sapucaí. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de vazão Bacia do Sapucaí

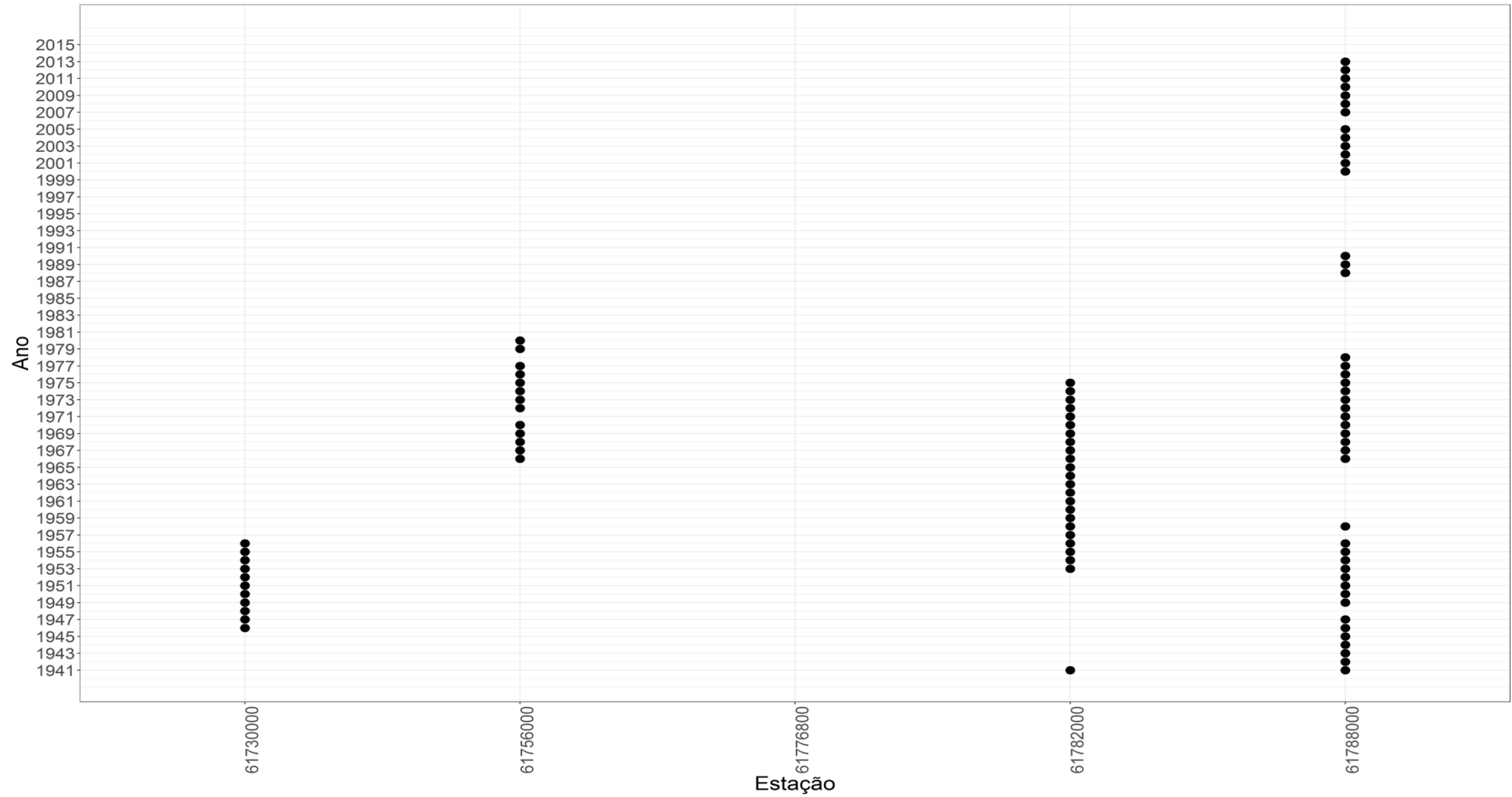


Figura 18 - Disponibilidades de dados de vazão da ANA na bacia do Sapucaí. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

### Disponibilidade de dados de vazão Bacia do Sapucaí

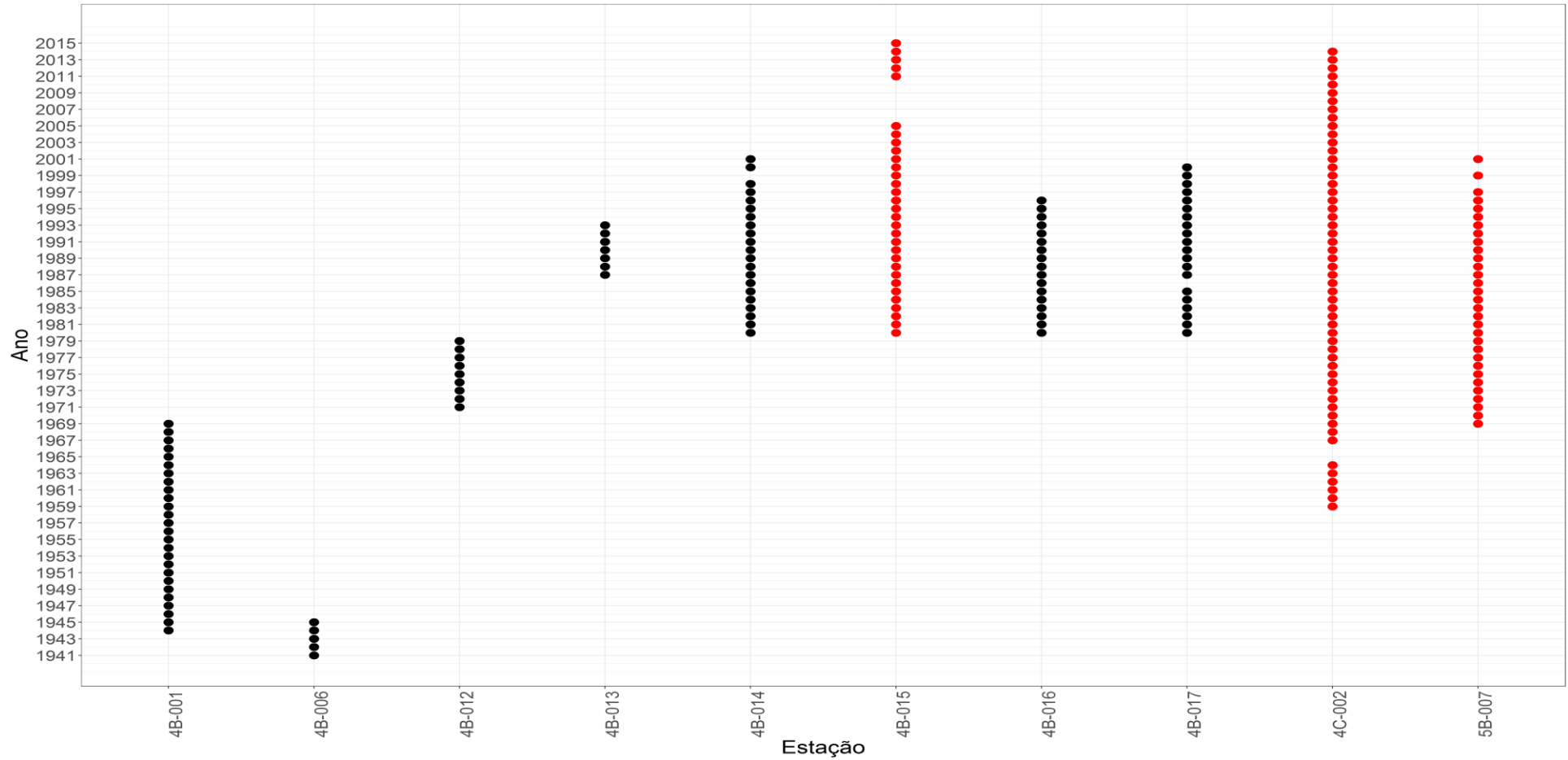


Figura 19 - Disponibilidades de dados de vazão do DAEE na bacia do Sapucaí. Os pontos em vermelhos indicam as estações com maior quantidade de dados.

