

Figura 46 – Área 15 (Figuras 36 e 37) do curso superior (8 km a montante do reservatório Paraibuna).



OBS.: Na fotografia de 1966 observa-se a presença de uma ilha (em amarelo) que não existe na fotografia mais recente.

Fonte: A autora, 2019.

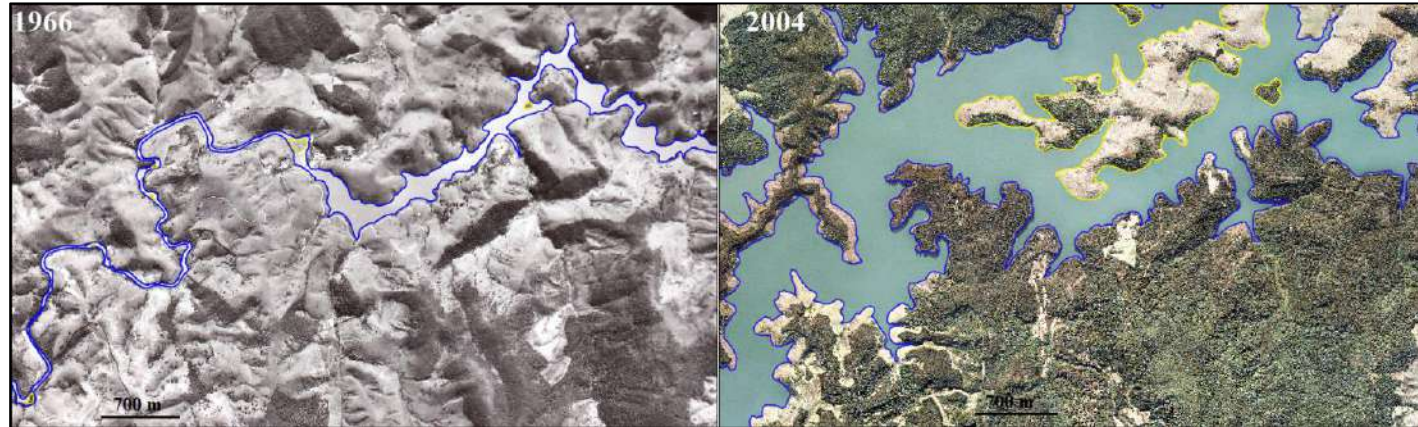
Figura 47 – Área 16 (Figuras 36 e 37) do curso superior (1 km a montante do reservatório Paraibuna).



OBS.: A fotografia antiga mostra a morfologia fluvial antes da construção da barragem de Paraibuna: canal mais estreito e presença de ilhas (em amarelo). Após a inundação do reservatório as ilhas desapareceram. O meandro abandonado na parte superior está presente nas duas fotografias, mostrando que alterações ocorriam antes da obra.

Fonte: A autora, 2019.

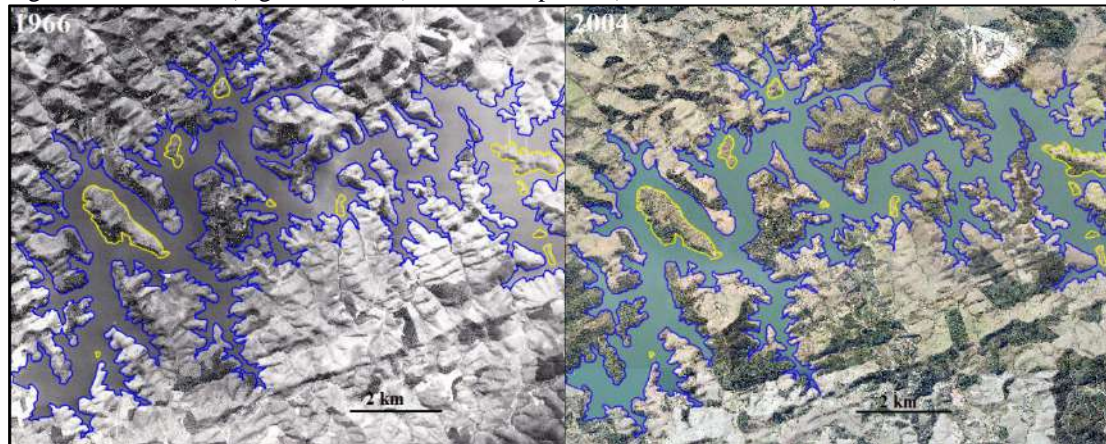
Figura 48 – Área 17 (Figuras 36 e 37) do curso superior (reservatório Paraibuna).



OBS.: Grandes mudanças morfológicas resultantes do alagamento de um trecho do canal em função da construção da barragem de Paraibuna. Ilhas pequenas desaparecem e novas ilhas (em amarelo) – antigos topos de morros – passam a fazer parte do cenário.

Fonte: A autora, 2019.

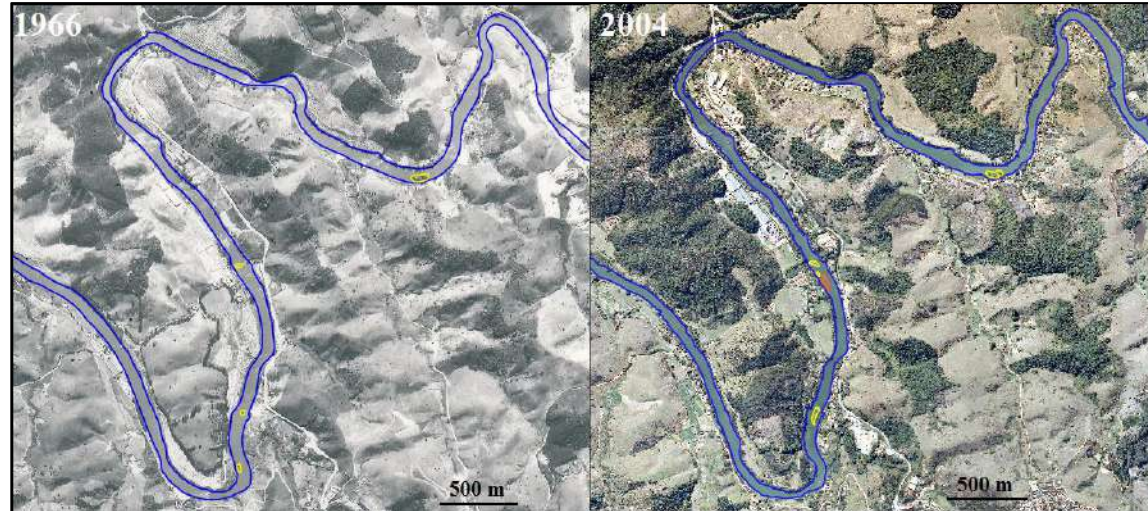
Figura 49 – Área 18 (Figuras 36 e 37) do curso superior (reservatório Santa Branca).



OBS.: Área alagada pelo reservatório de Santa Branca, existente desde 1961. Não se observam mudanças morfológicas significativas. Até pequenas ilhas (em amarelo) estão preservadas.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 50 – Área 19 (Figuras 36 e 37) do curso superior (localizada menos de 1 km a jusante do reservatório de Santa Branca).



OBS.: Algumas ilhas (em amarelo) aumentaram de dimensão e outras surgiram. Na fotografia mais recente há uma barra arenosa (em laranja).

Fonte: A autora, 2019.

Figura 51 – Área 20 (Figuras 36 e 37) do curso superior.



OBS.: Neste trecho, novas ilhas (em amarelo) e uma barra arenosa (em laranja) aparecem com o tempo.

Fonte: A autora, 2019.

#### 4.1.5 Morfologia transversal

No curso superior, há duas estações fluviométricas no canal do RPS que possuem dados para geração de perfil transversal: Estrada do Cunha e Santa Branca (estações 1 e 2, respectivamente, na Figura 23).

Da primeira estação (estação 1, Figura 23) – localizada no Rio Paraitinga/RPS, a montante da primeira barragem (Paraibuna) – foram elaborados perfis transversais de 1995 a 2010, dos quais três do período da estiagem e três da cheia (Figura 52). Da segunda (estação 2, Figura 23) – localizada a jusante das duas barragens com reservatório do curso superior (Paraibuna e Santa Branca) – foram elaborados perfis de 1996 a 2013, sendo três da estiagem e quatro da cheia (Figura 53). No curso superior não há dados para elaboração de perfis transversais anteriores à instalação das barragens, restringindo a análise às últimas décadas.

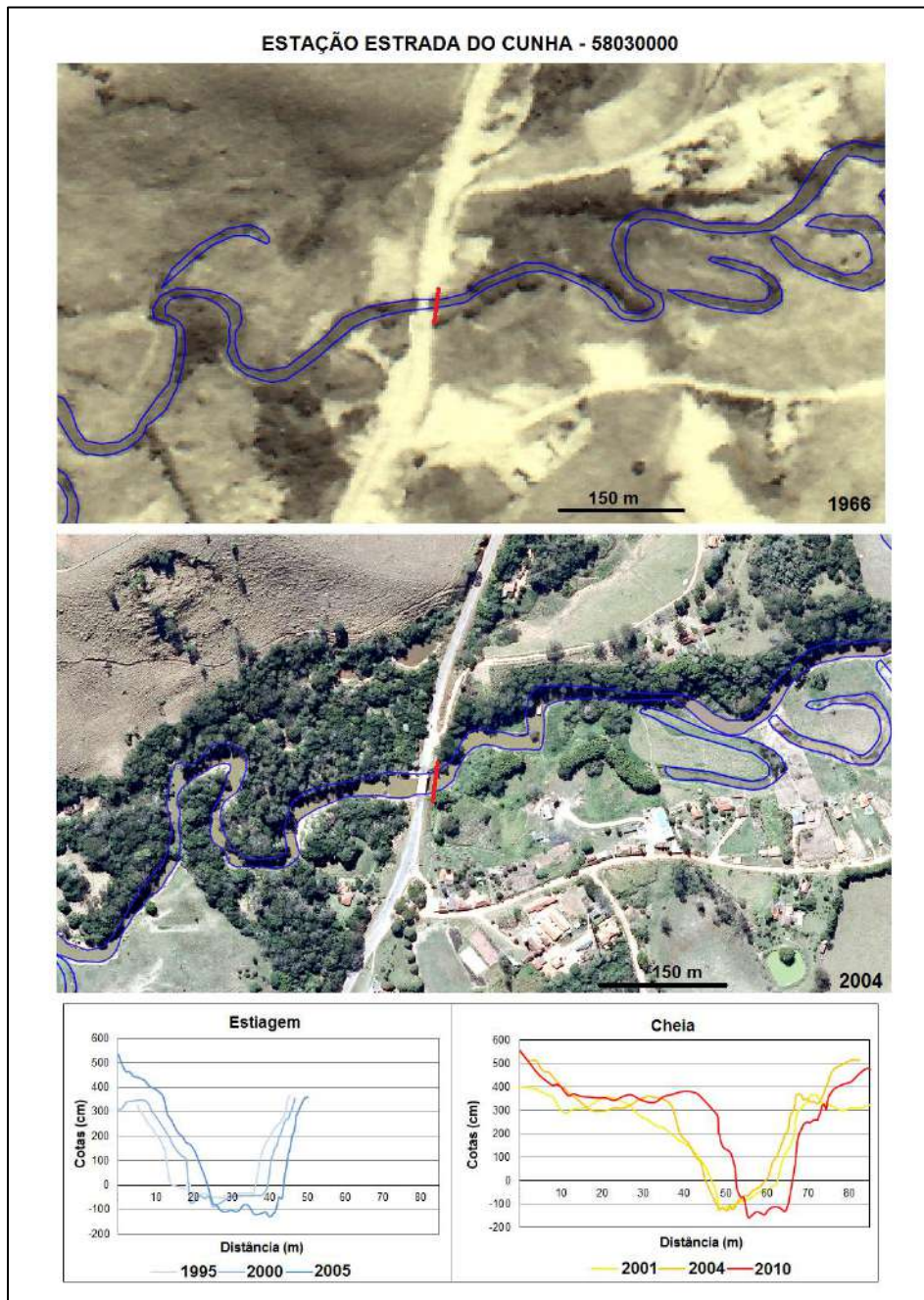
Nos perfis transversais da estação Estrada do Cunha foi possível observar mudanças na forma e na largura do canal fluvial ao longo dos anos (Figura 52); A forma do vale se manteve em “U” na época da estiagem, enquanto na cheia ocorreu alternância entre as formas “UV” e “U”, indicando, possivelmente, o revezamento entre processos deposicionais e erosivos (LIMA, 2006). Nos perfis foram observados processos de migração lateral do canal (de até ~ 8 m na estiagem e ~ 9 m na cheia), indicando a ocorrência de incisão ao longo dos anos. Na fotografia aérea do local foram registrados meandros abandonados no entorno do canal fluvial (Figura 52), sugerindo a ocorrência de processos de migração lateral.

Os perfis transversais da estação Santa Branca (Figura 53) mostraram maior homogeneidade ao longo dos anos, tanto na estiagem como na cheia. A forma do vale (em “UV”) se manteve em todos os perfis, e a migração lateral foi menor (de até ~ 2 m na estiagem e ~ 4 m na cheia) que a registrada na estação anterior (Figura 52). O controle estrutural do relevo e a regularização da vazão neste trecho – localizado a jusante de duas grandes barragens – impedem mudanças significativas na morfologia transversal desse segmento.

Após a elaboração dos perfis transversais, foram calculados, a partir deles, os parâmetros sugeridos por Su et al. (2015) que permitem identificar o impacto das barragens sobre a variabilidade do fluxo fluvial, e conseqüentemente, sobre a morfologia transversal do canal: área da seção transversal (A), profundidade média da água (PM) e a razão LA/PM, na qual LA

corresponde à largura da água (Tabela 3).

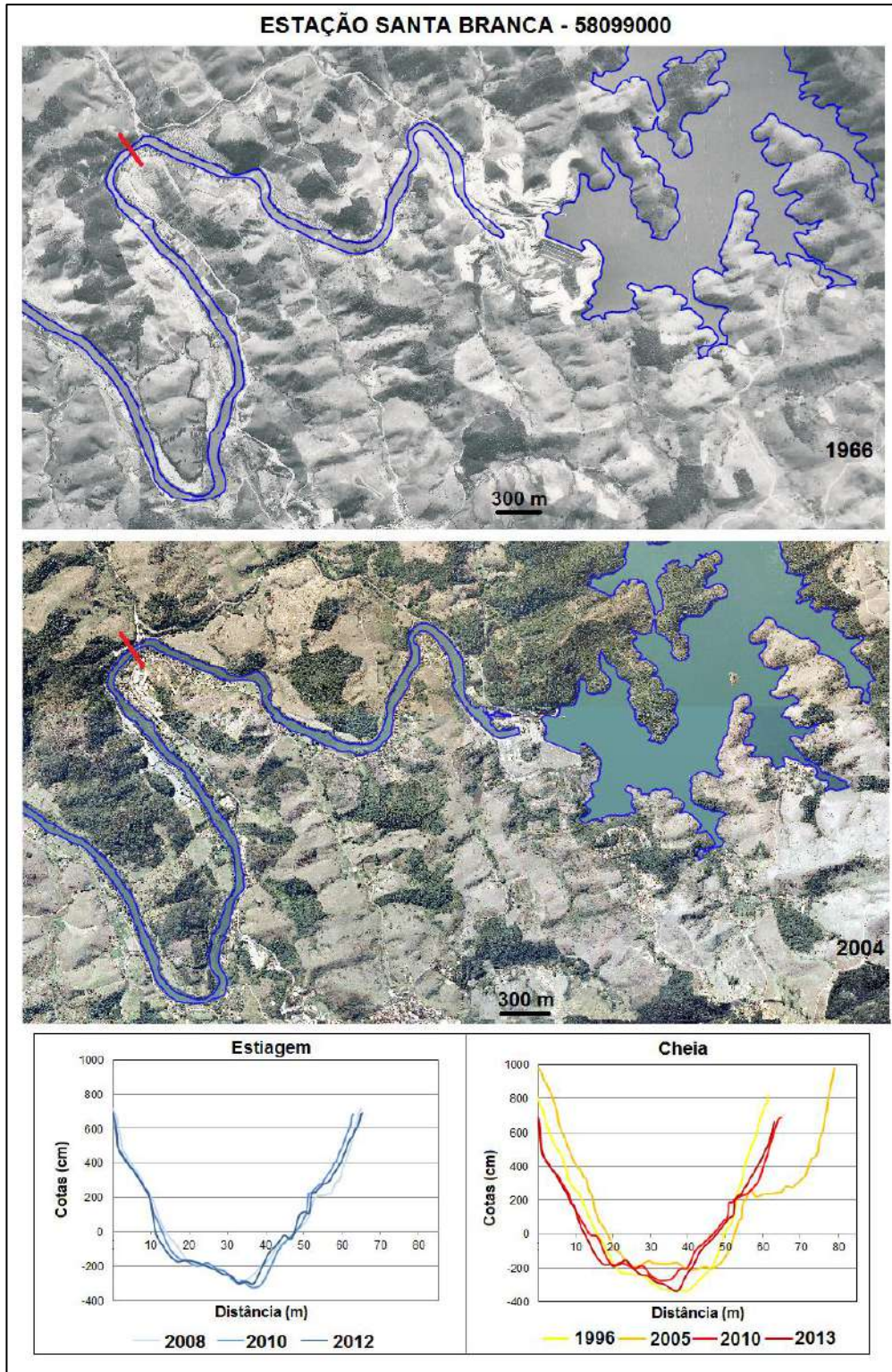
Figura 52 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Estrada do Cunha.



OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 53 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Santa Branca.



OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.  
 Fonte: A autora, 2019.

Tabela 3 – Parâmetros para avaliação de mudanças na morfologia transversal das duas estações fluviométricas do curso superior, uma não regularizada (Estrada do Cunha) e outra regularizada (Santa Branca).

ESTAÇÃO ESTRADA DO CUNHA									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
MAI/1995	16,2	15,6	1,0	16,8	NOV/2001	14,0	20,0	1,4	9,8
AGO/2000	13,8	16,9	1,2	11,3	MAR/2004	19,8	14,2	0,7	27,6
AGO/2005	14,9	23,7	1,6	9,4	NOV/2010	28,4	15,3	0,5	52,7
%Δ		<b>51,9</b>	<b>65,2</b>	<b>-44,3</b>	%Δ		<b>-23,5</b>	<b>-62,3</b>	<b>437,9</b>
ESTAÇÃO SANTA BRANCA									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
ABR/2008	42,1	125,4	3,0	14,1	FEV/1996	40,0	139,2	3,5	11,5
ABR/2010	41,4	146,5	3,5	11,7	DEZ/2005	39,4	114,4	2,9	13,6
JUN/2012	44,9	142,2	3,2	14,2	MAR/2010	45,5	141,4	3,1	14,6
					MAR/2013	43,0	135,7	3,2	13,6
%Δ		<b>13,4</b>	<b>6,3</b>	<b>0,3</b>	%Δ		<b>-2,5</b>	<b>-9,3</b>	<b>18,5</b>

Legenda: LA – largura da água (em m); A – área da seção transversal (em m<sup>2</sup>); PM – profundidade média (em m); LA/PM – razão entre a largura da água e a profundidade média; %Δ – percentual de variação entre as datas extremas do período (estiagem/cheia).

Fonte: A autora, 2019.

Na estação Estrada do Cunha (onde o fluxo fluvial não é afetado pela regularização realizada pelas barragens Paraibuna e Santa Branca, a jusante) o percentual de variação dos parâmetros A, PM e LA/PM foi bastante significativo, conforme esperado em canais fluviais sem controle de vazão (SU et al., 2015): ~ 52% para A, ~ 65% para PM e ~ -44% para a razão LA/PM na estiagem; ~ -24% para A, ~ -62% para PM e ~ 438% para a razão LA/PM na cheia.

Ao contrário, na estação Santa Branca, localizada imediatamente a jusante das barragens de Paraibuna e Santa Branca, o percentual de variação desses mesmos parâmetros foi menor: ~ 13% para A, ~ 6% para PM e inferior a 1% para a razão LA/PM na estiagem; ~ -3% para A, ~ -9% para PM e ~ 18% para a razão LA/PM na cheia, indicando o quanto a regularização do fluxo inibe suas oscilações naturais e, conseqüentemente, as mudanças na morfologia transversal do canal advindas das mesmas.

#### 4.1.6 Morfologia longitudinal

Nos perfis longitudinais do curso superior do RPS, elaborados a partir das folhas topográficas do IBGE e do MDE do SRTM (Figura 54) foram representados os domínios geológicos predominantes, as falhas e os pontos de captação dos principais afluentes do trecho.

A parte inicial do curso superior, geologicamente caracterizada pela presença de unidades paragnáissicas do Complexo Embu, apresenta relevo estruturalmente controlado, com declividade elevada, corredeiras e trechos encachoeirados. À medida que se aproxima de sua porção central, as unidades geológicas do Complexo Embu se intercalam com granitóides do Domínio Orógeno Araçuaí, e sua declividade diminui, favorecendo a formação de planícies aluviais no entorno de seu canal, que se apresenta ora sinuoso (e até meandrante), ora retilíneo. Após a porção central, o curso superior é marcado pela alternância entre granitóides do Domínio Orógeno Araçuaí e rochas do Complexo Paraíba do Sul e, na porção final, paragnaisses do Complexo Embu se revezam com rochas magmáticas pré-orogênicas (Figura 54).

Após sua porção central, foram instaladas, em série, duas grandes barragens no canal do RPS: Paraibuna (1977) e Santa Branca (1961). Com o enchimento de seus reservatórios (Figuras 36 e 37), que ocupam um trecho praticamente contíguo do curso superior, uma extensão de aproximadamente 100 km do canal foi alagada (Figura 54).

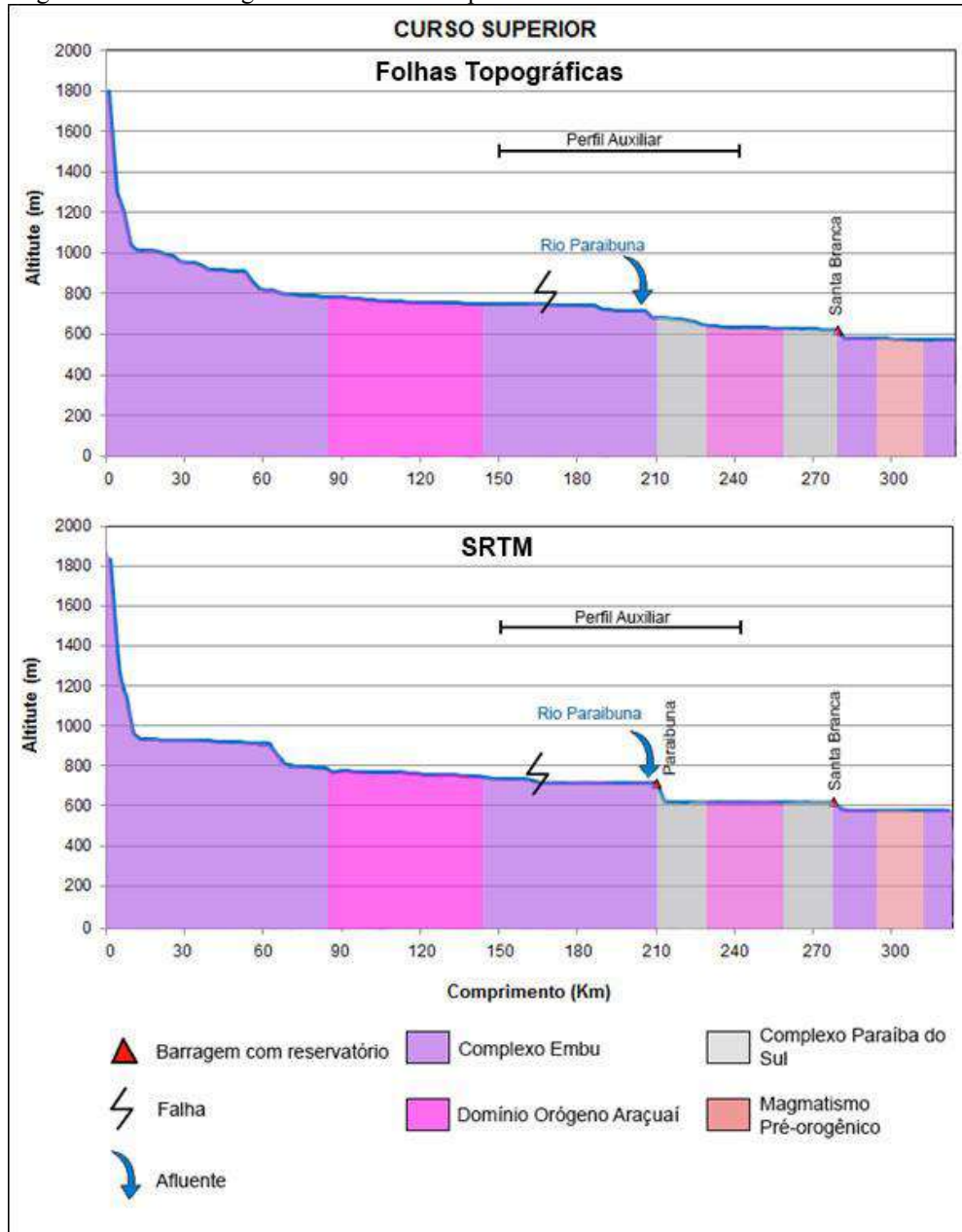
Os perfis longitudinais do curso superior apresentaram *knickpoints* naturais na primeira metade de sua extensão e artificiais na segunda metade, desenvolvidos em função das barragens ali construídas (Figura 54). É importante ressaltar que a barragem Santa Branca já existia na data de geração dos dois insumos utilizados para construção do perfil longitudinal, estando, portanto, representada em ambos os perfis do curso superior. Já a barragem Paraibuna, construída após a elaboração das cartas topográficas utilizadas para construção do perfil de 1950/60, foi contemplada somente no perfil mais recente, no qual ela introduziu um *knickpoint* artificial e, com isso, um desnível vertical de quase 100 m (Figura 54).

A razão  $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$  do curso superior, calculada a partir do perfil longitudinal de 1950/60 foi 4,71, e a partir do perfil longitudinal de 2000, foi 4,81. Nas duas épocas, os valores obtidos (>2) correspondem a um trecho desequilibrado ou desajustado (ETCHEBEHERE, 2000;



MELO, FUJITA e SANTOS, 2009; FUJITA et al., 2011), o que não surpreende, em face da existência de uma falha e *knickpoints* naturais e artificiais em ambos os perfis (Figura 54).

Figura 54 – Perfis longitudinais do curso superior do RPS.



Fonte: A autora, 2019. Elaborado a partir de folhas topográficas 1:50.000 do IBGE (décadas de 1950/60) e MDE do SRTM, 2000.

Legenda: MDE – Modelo digital de elevação; SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission.

No entanto, a diferença observada entre os perfis (que pode estar relacionada ao ligeiro aumento da razão  $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$  de 1950/60 a 2000), foi a presença, em 1950/60, de apenas um *knickpoint* artificial (introduzido pela barragem Santa Branca), enquanto em 2000, um segundo *knickpoint* artificial (criado pela barragem Paraibuna) foi observado. Com isso, a tendência à evolução para um perfil mais côncavo e liso com o tempo não ocorreu no curso superior. Ao contrário, entre as décadas analisadas, novas irregularidades surgiram, indicando o aumento do desajuste do seu perfil longitudinal (Figura 54).

## 4.2 Curso médio superior do RPS

O curso médio superior do RPS apresenta características muito distintas do curso anteriormente apresentado e também dos demais situados a sua jusante. Com seu vale caracterizado por planícies aluviais onde coexistem diferentes tipos de atividades antrópicas, as alterações observadas em sua paisagem e em seus parâmetros hidrológicos, sedimentológicos e morfológicos são muitas. Ao avaliar essas alterações, não se pode considerar unicamente os impactos produzidos pela regularização de fluxo exercida pelas barragens a montante, mas também aqueles advindos das demais atividades que vêm exaustivamente explorando seus recursos há décadas.

### 4.2.1 Paisagem

Situado em território paulista e com aproximadamente 208 km de extensão, o curso médio superior do RPS vai do município de Guararema até Cachoeira Paulista (Figuras 7 e 8). A altitude média nessa porção do Vale do Paraíba é de 515 m e a declividade média é de 0,19 m/km (ANA, 2001). Nesse trecho, o curso fluvial deixa a Serra do Mar para entrar na região geomorfologicamente conhecida como Depressão do Rio Paraíba do Sul (Figura 9). Nesse domínio, seu curso fluvial apresenta-se bastante sinuoso e meandrante, atravessando grandes

várzeas.

O clima tropical subquente úmido prevalece na maior parte desse curso, com temperaturas médias variando entre 15 e 18°C (Figura 10). Na porção mais a montante do curso esse clima apresenta 1 a 2 meses secos ao longo do ano e, à medida que flui para jusante, passa a apresentar três meses secos. Na porção central do curso médio superior, entre os municípios de Pindamonhangaba e Lorena, passa a prevalecer o clima subquente semi-úmido, com temperaturas médias idênticas àsquelas encontradas nos trechos onde predomina o subquente úmido, mas com um período de seca mais prolongado (4 a 5 meses). Após este trecho, o rio volta a passar por áreas onde o clima subquente predominante é novamente o úmido com três meses secos.

Em seu curso médio superior, o RPS corta importantes municípios paulistas em acelerado crescimento urbano: Jacareí, São José dos Campos, Caçapava, Taubaté, Pindamonhangaba, Guaratinguetá, Lorena e Cachoeira Paulista (Figura 4). Esse curso apresenta as margens pouco protegidas por Unidades de Conservação federais e estaduais (Figura 6), com pequenas porções dentro da APA da BRPS. A cobertura vegetal predominante é do tipo secundária, intercalada com atividades agrárias (Figura 14). Grande parte do entorno desse curso fluvial é urbanizado ou ocupado por estabelecimentos agropecuários, pastagens e outras atividades diversificadas (Figura 15). Dentre estas últimas é importante ressaltar o predomínio de duas atividades nas planícies aluviais do curso médio superior: o cultivo de arroz irrigado e a mineração de areia.

O cultivo de arroz nas várzeas do curso médio superior é uma prática agrícola presente principalmente nos municípios de São José dos Campos, Guaratinguetá, Tremembé e Taubaté. A produção anual de arroz desses municípios, segundo o Censo Agropecuário de 2006, foi de quase 40.000 t (IBGE, 2006). Essa prática agrícola contribui com o aumento do nível de poluição do RPS ao elevar as concentrações de fertilizantes e matéria orgânica na água, oriundos da prática inadequada de adubação para produção sob inundação (ANDRADE, 2010).

Até a primeira metade do século XX, no trecho paulista que vai de São José dos Campos a Cachoeira Paulista, em épocas de cheias, era comum o transbordamento das águas do RPS, que alagavam as áreas marginais aos meandros onde o arroz era cultivado. Ao transbordarem, as águas permaneciam nas várzeas por muito tempo, o que obrigava os rizicultores a esperar até que as mesmas voltassem ao leito principal do rio para recomeçarem o plantio. Como medida de “proteção” das várzeas contra as enchentes, o governo do estado de São Paulo, por intermédio do DAEE, realizou em 1951, cortes nos meandros do RPS visando sua retificação. Foram

construídos pôlderes<sup>1</sup> com sistemas de irrigação e drenagem, alterando significativamente o curso fluvial nesse trecho (DAEE, 2016).

Outra atividade praticada nas várzeas do curso médio superior do RPS que afeta diretamente a qualidade da água e também a morfologia do canal é a extração de areia, explorada desde 1949, quando se esgotaram as reservas dos rios Tietê e Pinheiros (ANA, 2012). Com estoques cada vez mais distantes dos centros urbanos, o volume de areia extraído do RPS vem aumentando desde então, quando este rio se tornou o maior fornecedor para o mercado paulista. As areias do RPS são utilizadas na construção civil, correspondendo a 10% da produção nacional. De 1993 a 2003, esta atividade aumentou cerca de 190%, e a tendência é que aumente ainda mais, já que não há substituto viável para esse minério na construção civil (REIS et. al., 2006).

A areia é extraída nas planícies aluviais principalmente sob o sistema de cavas, que levam à formação de grandes lagos nas margens do canal, alterando significativamente o regime hídrico do RPS neste trecho em função do aumento das taxas de evaporação de água. Inicialmente, a areia era retirada diretamente do leito do rio, passando, posteriormente, a ser extraída das várzeas, embora ainda existam retiradas clandestinas diretamente do leito do rio. Estudos da própria ANA analisam a viabilidade de retorno da extração de areia diretamente da calha, como uma possível solução às frequentes enchentes que ocorrem principalmente em Guaratinguetá, onde, graças ao intenso assoreamento, o leito do RPS apresenta pequena profundidade (ANA, 2012).

A extração de areia que acontece no curso médio superior do RPS é de baixo custo e submetida ao licenciamento ambiental da Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB) desde 1976, sendo permitida nas várzeas de Jacareí, São José dos Campos, Caçapava, Tremembé, Taubaté e Pindamonhangaba. O Zoneamento Ambiental da Atividade Minerária de Extração de Areia (ZMA) de 1999, revelou que 58,2% das cavas mapeadas estão em áreas ilegais, em municípios paulistas não pertencentes ao ZMA, como Aparecida, Cachoeira Paulista, Canas, Roseira, Lorena e Potim. Por meio de imagens de alta resolução, foi comprovado que a extração ilegal de areia nesses locais ocorre tanto em cavas associadas à formação de lagos lindeiros às margens do rio, como dentro do próprio leito (SILVA; SIMI; RUDORFF, 2011).

---

1 Estruturas hidráulicas artificiais de drenagem para controle de cheias em terrenos de baixa altitude, normalmente próximos a áreas ribeirinhas ou costeiras. O sistema é composto por diques, reservatórios, dutos e bombas.

A atividade mineradora de areia apresenta-se ostensiva no curso médio superior do Paraíba, podendo comprometer o futuro uso de suas águas e terras agricultáveis. Apesar do cultivo de arroz consumir consideráveis volumes de água, as cavas de areia consomem anualmente 2,8 vezes mais água por unidade de área que aquela prática agrícola. A água perdida anualmente por evaporação das cavas é suficiente para irrigar mais de 4500 ha de arroz do Vale do Paraíba (REIS et al., 2006). Considerando o consumo médio de água per capita do Estado de São Paulo, a perda de água por evaporação das cavas do RPS durante o ano de 2003 – período de intensa crise hídrica na Região Sudeste – teria sido suficiente para abastecer uma cidade com cerca de 320.000 habitantes (REIS et al., 2006).

Além de afetar o balanço hídrico, outro passivo ambiental resultante da atividade de mineração de areia seria o resíduo proveniente dessa atividade, que eventualmente atinge o canal fluvial. Em 2016, por exemplo, uma lagoa (antiga cava desativada) que recebia os rejeitos de uma cava de areia ativa de Jacareí arrebentou e os resíduos foram carreados diretamente para o RPS, obrigando a CETESB a interromper o abastecimento de água na região devido ao brusco aumento da concentração de MPS na água (EBC, 2016).

Localizado em uma extensa planície aluvial, e submetido a uma série de interferências antrópicas, a susceptibilidade à erosão no curso médio superior varia de alta a muito alta, predominando esta última em sua maior parte (Figura 16). Embora as mudanças geomorfológicas sejam eventos naturais ao longo da evolução de cursos fluviais, a interferência humana neste trecho é imensa, o que acelera a ocorrência desses eventos.

No curso médio superior não há barragens, nem reservatórios. Porém, o mesmo está localizado imediatamente à jusante dos reservatórios de Paraibuna e Santa Branca, construídos no curso superior. A retenção de água nesses grandes reservatórios a montante e a presença de atividades que consomem quantidades expressivas de água do rio – como a extração de areia em cavas e agricultura irrigada nas várzeas – afetam a disponibilidade hídrica do canal o que, conseqüentemente, implicará em mudanças geomorfológicas no mesmo.

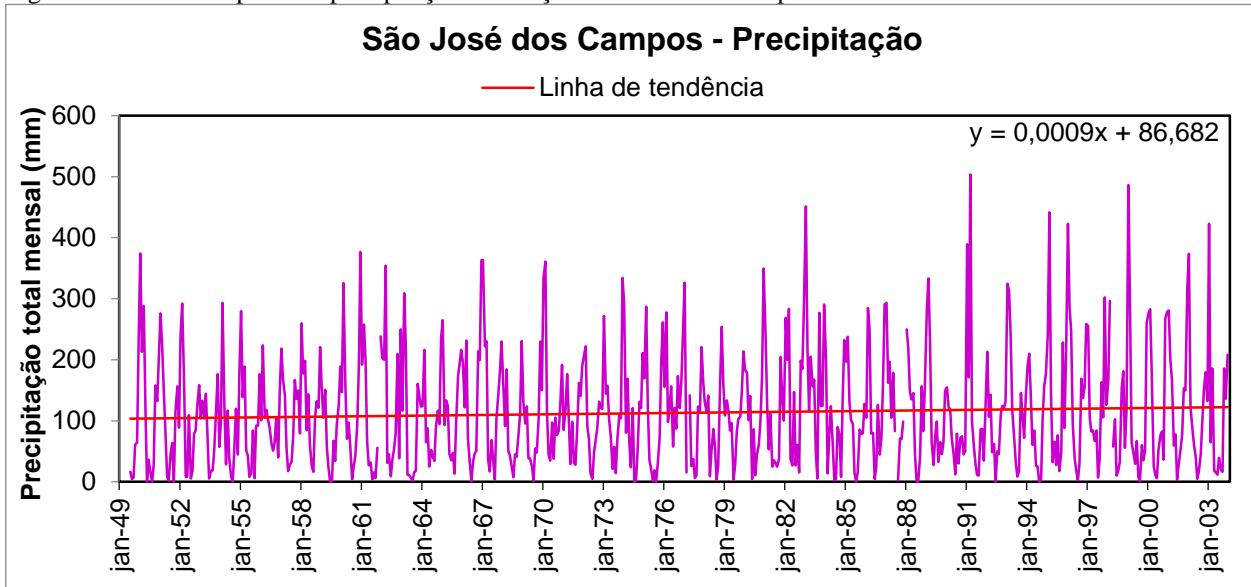
#### 4.2.2 Parâmetros hidrológicos

Para a análise do comportamento de chuvas e dos parâmetros hidrológicos do curso médio superior foram utilizadas séries temporais de três estações pluviométricas (São José dos Campos, Pindamonhangaba e Guaratinguetá) e duas fluviométricas (Pindamonhangaba e Guaratinguetá) (Figura 23).

A estação pluviométrica São José dos Campos (C, Figura 23), situada na porção superior desse curso, possui série completa de chuvas totais mensais de 1949 a 2003 (Figura 55). As estações pluviométricas Pindamonhangaba e Guaratinguetá (D e E, respectivamente, Figura 23), ambas localizadas na porção mediana do curso médio superior, possuem séries pluviométricas quase completas, de 1932 a 2018 e de 1930 a 2014, respectivamente (Figuras 56 e 57). Ressalta-se que no curso médio superior não há barragens com reservatório, embora este trecho do RPS esteja imediatamente a jusante dos dois grandes reservatórios das barragens Paraibuna e Santa Branca, situados na porção distal do curso superior (Figura 20).

Assim como as séries temporais das estações pluviométricas do curso superior (Figuras 28 e 29), as séries históricas de precipitação total mensal das três estações do curso médio superior também apresentaram ligeira tendência crescente ao longo das décadas analisadas (Figuras 55 a 57). Os correlogramas das três séries pluviométricas (Figura 58) indicaram ausência de correlação serial nos dados de dois anos consecutivos, conforme esperado para séries de chuvas (MARENGO; ALVES, 2005). Em face da ausência de autocorrelação aplicou-se o teste de Mann-Kendall tradicional às séries pluviométricas dessas estações para avaliar a direção e a significância da tendência dessas séries. Os resultados dos testes confirmaram a tendência positiva (com significância estatística), obtida anteriormente por regressão linear (Figuras 55 a 57) das séries de precipitação das três estações (Tabela 4).

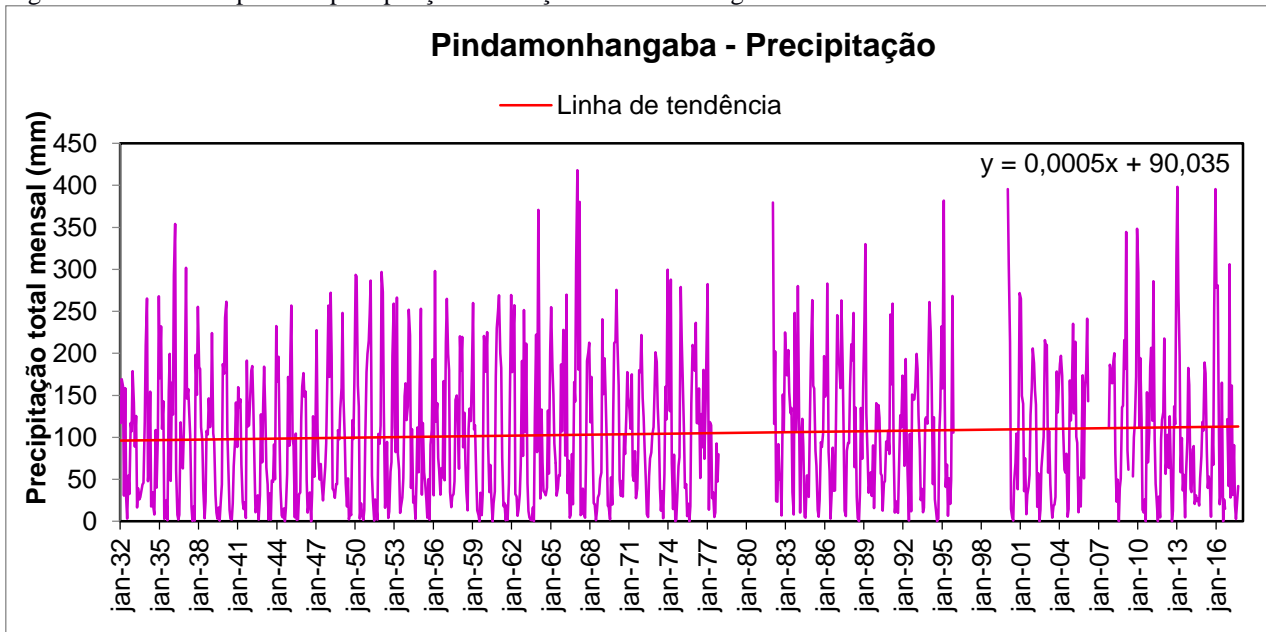
Figura 55 – Série temporal de precipitação da estação São José dos Campos.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

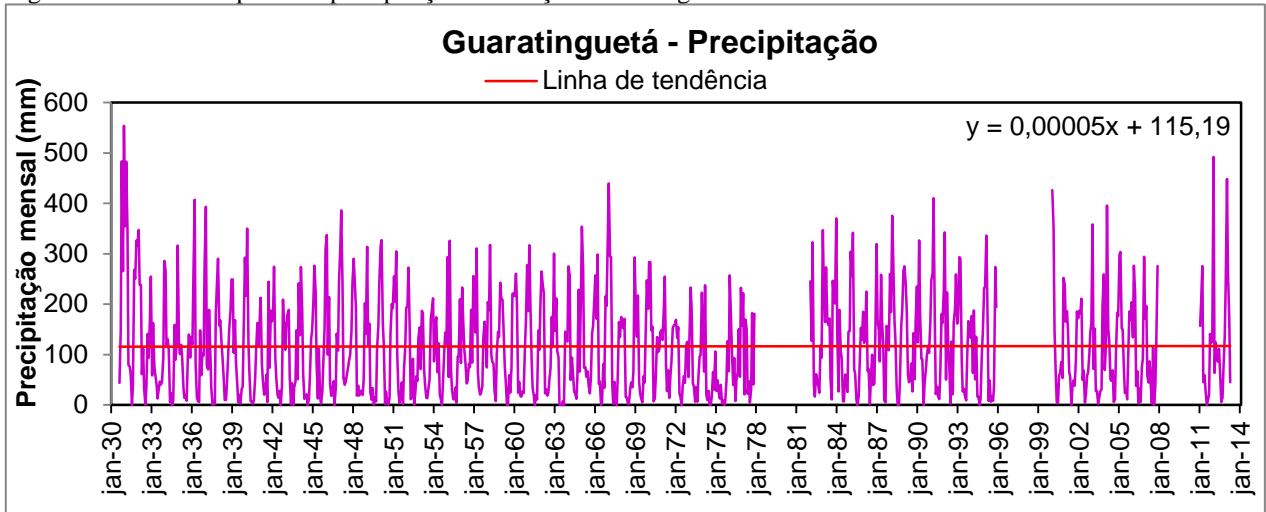
Figura 56 – Série temporal de precipitação da estação Pindamonhangaba.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

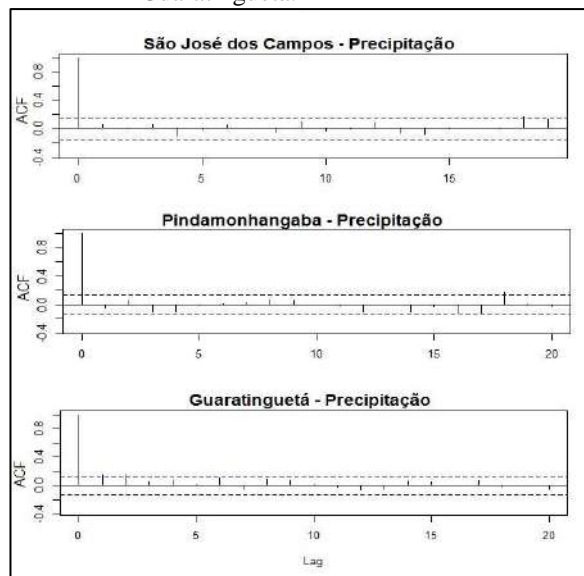
Figura 57 – Série temporal de precipitação da estação Guaratinguetá.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 58 – Correlogramas das séries temporais de chuvas totais mensais das estações São José dos Campos, Pindamonhangaba e Guaratinguetá.



OBS.: As linhas tracejadas representam os limites de confiança a 95% para a hipótese de não ter correlação serial.

Legenda: ACF – Função de autocorrelação; Lag – Intervalo de tempo em anos.

Fonte: A autora, 2019.



Tabela 4 – Resultado do teste de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de chuvas totais mensais das estações São José dos Campos, Pindamonhangaba e Guaratinguetá.

ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA		TESTE DE MANN-KENDALL		
Código	Nome	S	Tendência	SE
C	São José dos Campos	0,484	Positiva	Sim
D	Pindamonhangaba	0,295	Positiva	Sim
E	Guaratinguetá	0,341	Positiva	Sim

Legenda: S – teste estatístico de Mann-Kendall (Equação 1); SE – significância estatística.

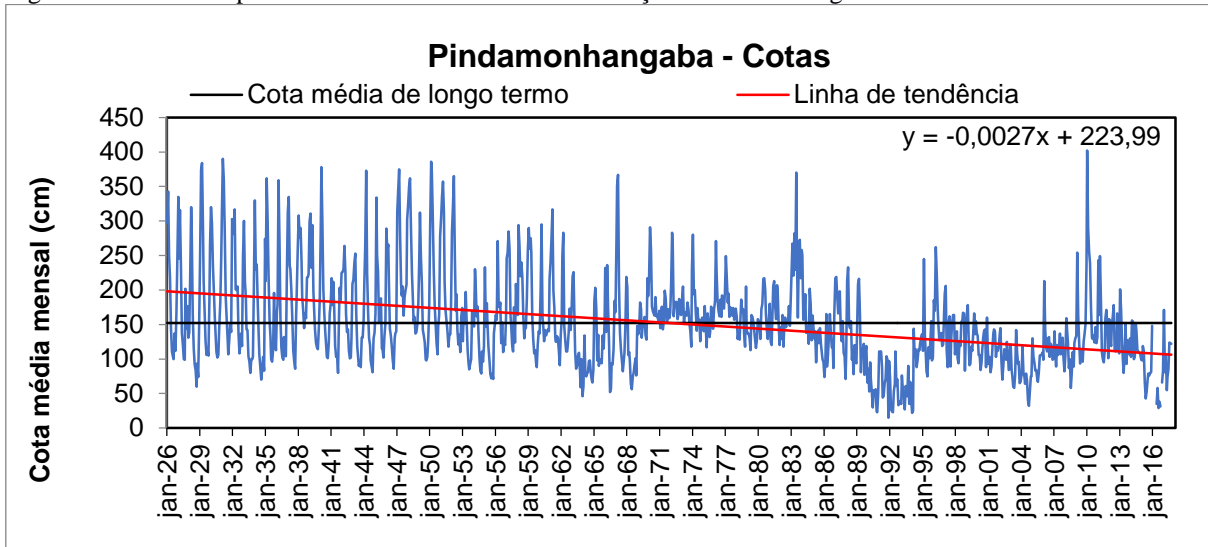
Fonte: A autora, 2019.

As estações fluviométricas Pindamonhangaba e Guaratinguetá (estações 3 e 4, respectivamente, Figura 23), ambas na porção central do curso médio superior, possuem séries completas de cotas médias mensais de 1926 a 2018 e de 1923 a 2018, respectivamente (Figuras 59 e 60). Ambas se localizam nas várzeas paulistas, onde predominam atividades de agricultura irrigada de arroz e extração de areia (em cavas) nos meandros abandonados. Além dessas atividades antrópicas (consumidoras de grandes volumes de água do RPS), no trecho onde estão situadas essas estações o rio também sofre influência da regularização de fluxo realizada a montante, no curso superior, pelas barragens de Paraibuna e Santa Branca (Figura 20).

A cota média de longo termo do RPS na estação Pindamonhangaba (1926-2018) é de 152,2 cm, e na estação Guaratinguetá (1923-2018), de 198,4 cm; nas duas séries as linhas de tendência mostram comportamento decrescente nos valores de cotas médias ao longo de quase um século de amostragens (Figuras 59 e 60). As linhas de tendência apresentaram valores abaixo da cota média de longo termo após 1971 em ambas as estações fluviométricas (Figuras 59 e 60), mesmo com as séries de chuvas mostrando tendência positiva nesse curso (Figuras 55 a 57).

Cabe lembrar que as barragens de Santa Branca e Paraibuna, a montante das estações fluviométricas do curso médio superior, entraram em operação em 1961 e 1977, respectivamente. Nas séries temporais das estações Pindamonhangaba e Guaratinguetá foi possível perceber, pelo comportamento das cotas médias mensais a partir desses anos, o reflexo da regularização que essas barragens começaram a realizar sobre o fluxo do RPS (Figuras 59 e 60): a amplitude entre os valores máximos e mínimos das cotas médias, que antes de 1961 eram de cerca de 300-400 cm, diminuiu para aproximadamente 100-200 cm. Além da diminuição da amplitude entre as cotas extremas, os valores das cotas máximas e mínimas também ficaram mais baixos nas duas estações após a regularização efetuada por barragens.

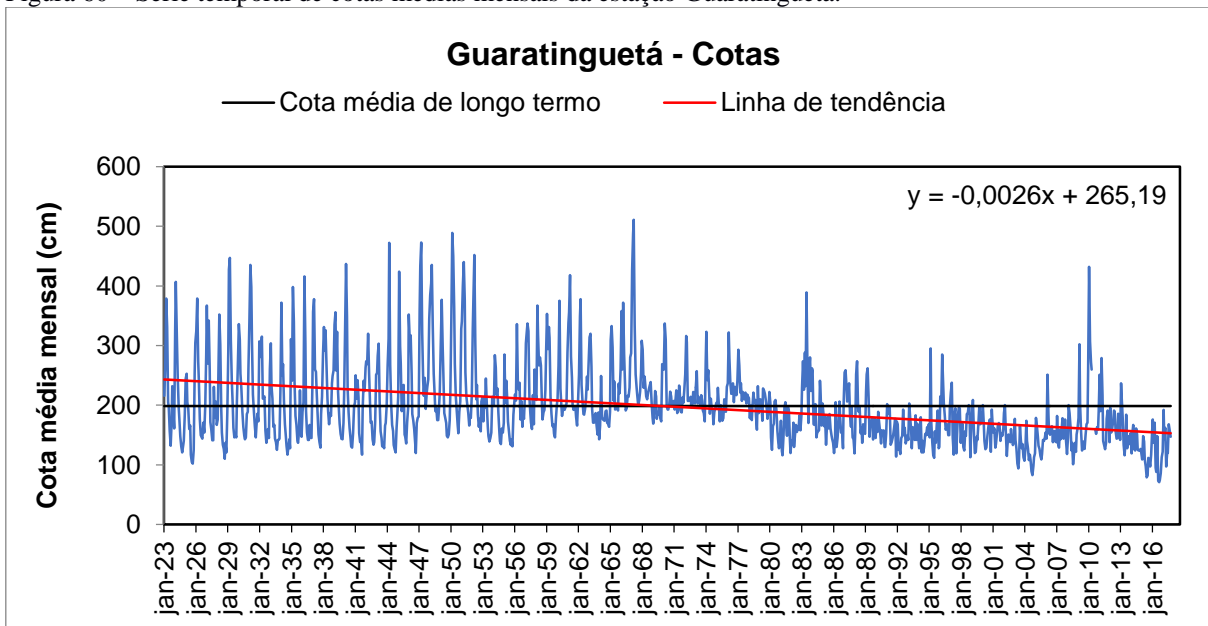
Figura 59 – Série temporal de cotas médias mensais da estação Pindamonhangaba.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 60 – Série temporal de cotas médias mensais da estação Guaratinguetá.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

Assim como aconteceu com as séries hidrológicas do curso superior, os correlogramas das séries de cotas médias mensais das duas estações fluviométricas do curso médio superior (Figura 61) mostraram existência de autocorrelação, principalmente entre os dados de um determinado

ano e do ano anterior, o que é esperado quando se trata de séries hidrológicas de rios regularizados. Assim, para avaliar o grau de significância estatística da linha de tendência dessas séries aplicou-se o teste Sazonal de Mann-Kendall em substituição ao teste de Mann-Kendall tradicional, que deve ser aplicado a séries sem correlação serial. No teste Sazonal de Mann-Kendall utilizaram-se dados dos meses de pico de cotas (dezembro a fevereiro), os mais afetados pelo controle de fluxo realizado após a instalação de barragens. Este teste confirmou a tendência negativa (com significância estatística) do comportamento das cotas das duas estações (Tabela 5).

Embora as séries pluviométricas das três estações desse curso (Figuras 55 a 57) tenham apresentado tendência ligeiramente positiva, esse comportamento não foi acompanhado pelas séries de suas duas estações fluviométricas (Figuras 59 e 60). No curso superior, isso também aconteceu com a série hidrológica da estação Santa Branca (Figura 32), localizada a jusante das barragens com reservatório daquele curso, que apresentou comportamento negativo, contrário ao comportamento das chuvas da estação mais próxima. Isso sugere que, em ambos os cursos, atividades antrópicas seriam as causas da diminuição dos valores de vazão e cotas do RPS, já que as séries de chuvas apresentaram comportamento oposto.

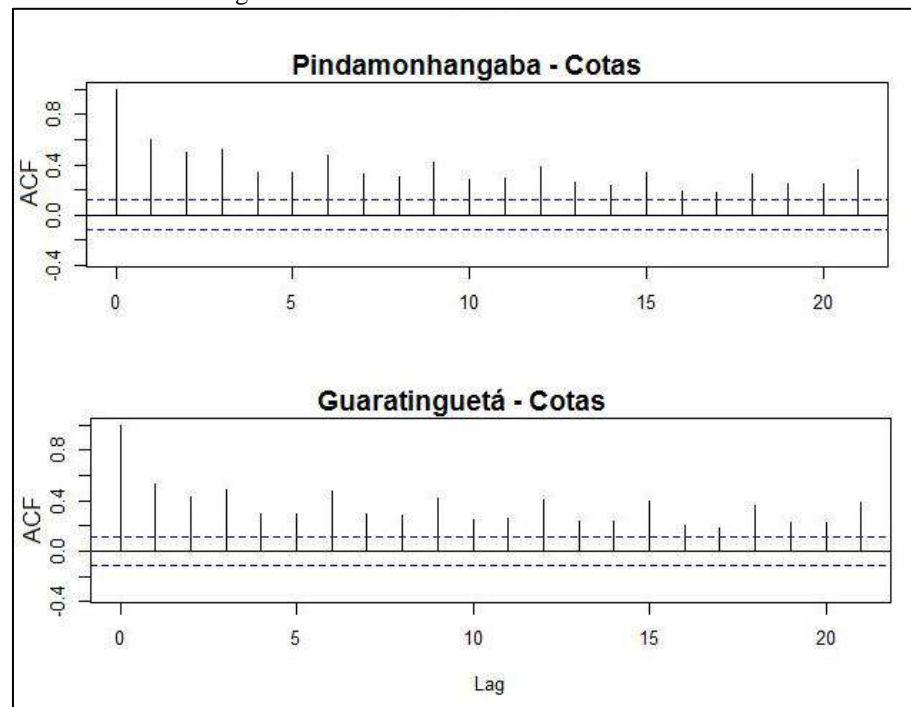
Tabela 5 – Resultados do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de cotas médias mensais das estações Pindamonhangaba e Guaratinguetá.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA		TESTE SAZONAL DE MANN-KENDALL		
Código	Nome	S	Tendência	SE
3	Pindamonhangaba	-0,321	Negativa	Sim
4	Guaratinguetá	-0,322	Negativa	Sim

Legenda: S – teste estatístico de Mann-Kendall (Equação 1); SE – significância estatística.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 61 – Correlogramas das séries temporais de cotas médias mensais dos meses de pico (dezembro a fevereiro) para as estações Pindamonhangaba e Guaratinguetá.



OBS.: As linhas tracejadas representam os limites de confiança a 95% para a hipótese de não ter correlação serial.

Legenda: ACF – Função de autocorrelação; Lag – Intervalo de tempo em anos.

Fonte: A autora, 2019.

Graças à existência de muitas interferências antrópicas no curso médio superior do RPS que consomem volumes expressivos de água (como extração de areia em cavas e agricultura irrigada) e atuam modificando seu fluxo fluvial, não é fácil determinar o quanto desse impacto pode ser atribuído às barragens. No entanto, ao verificar que ocorreram quedas expressivas nos valores de cotas justamente a partir dos anos em que as águas do RPS foram submetidas a grandes interferências hidráulicas (1961 e 1977, após o início de operação das barragens Santa Branca e Paraibuna, respectivamente), foi possível confirmar, neste curso, o papel das barragens na alteração dos padrões hidrológicos originais do RPS (Figuras 59 e 60). Desde a instalação das mesmas, a assinatura do fluxo fluvial nas duas estações analisadas não voltou a apresentar as mesmas características originais.

Na assinatura hidrológica das séries de cotas do curso médio superior (Figuras 59 e 60) também foi possível notar os efeitos das grandes estiagens que em 1952-1955, 2001-2003 (MARENGO; ALVES, 2005) e em 2013-2014 assolaram a Região Sudeste brasileira; nesses períodos, os hidrogramas registraram quedas significativas nos valores das cotas médias mensais.

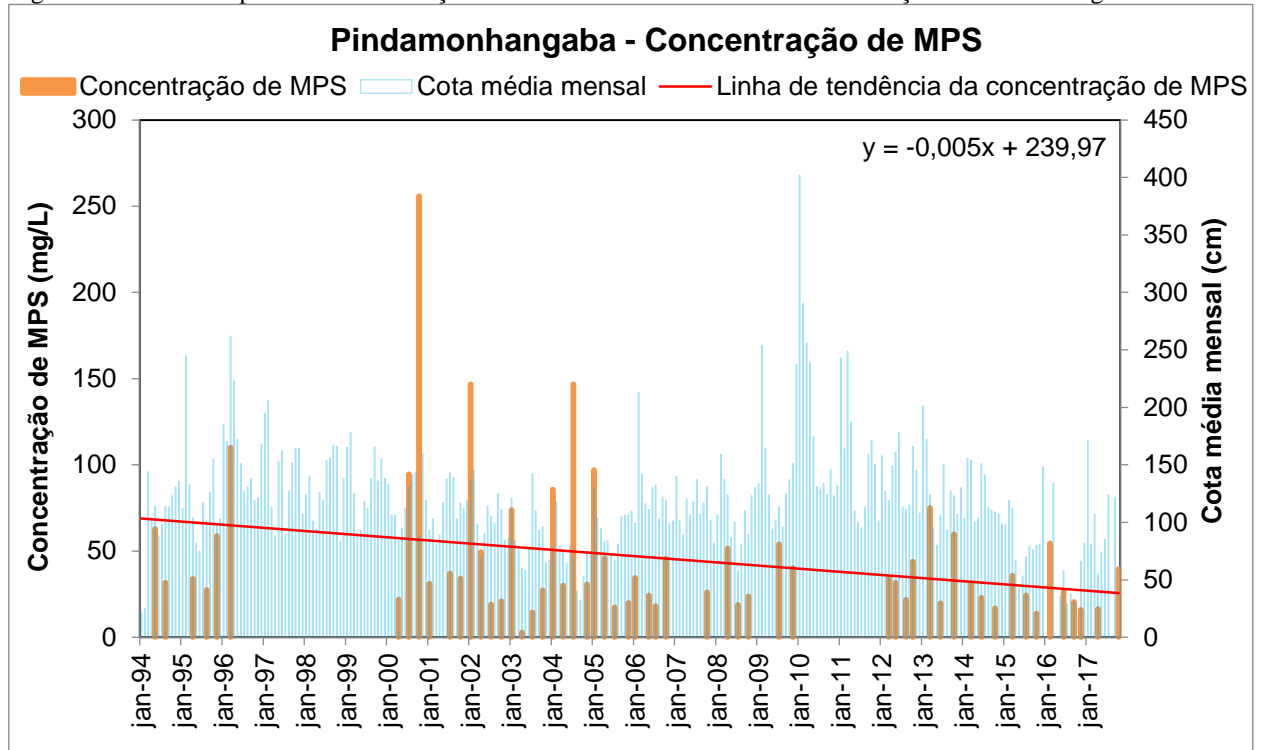
#### 4.2.3 Parâmetros sedimentológicos

No curso médio superior, apenas a estação Pindamonhangaba (estação 3, Figura 23 e Quadro 4) possui série histórica de concentração de MPS com quantidade de dados suficiente para análise. Nesta estação, embora os parâmetros hidrológicos tenham sido coletados por quase um século (Figura 59), as amostragens para determinação de concentração de MPS foram realizadas com periodicidade irregular, e somente de 1994 a 2017 (Figura 62).

Assim como as séries temporais de cotas médias mensais desse curso, a série de concentração de MPS mostrou comportamento decrescente ao longo do tempo (Figura 62). Os valores de concentração de MPS, principalmente dos meses de pico, diminuíram ao longo dos anos. No trecho do RPS onde se localiza essa estação (estação 3, na Figura 23), há influência tanto da regularização de fluxo exercida pelas barragens Santa Branca e Paraibuna, no final do curso superior, a montante, como também das atividades que retiram água e sedimentos do rio, como a mineração de areia e o cultivo de arroz irrigado.

A média de concentração de MPS da estação Pindamonhangaba foi 46,4 mg/L, e os valores de pico coincidiram, na maioria das vezes, com os meses de verão (Figura 62), quando ocorrem chuvas mais intensas que elevam as vazões, cotas e a carga sedimentar dos rios. De 1994 a 2017, valores de pico acima de 100 mg/L foram observados em algumas ocasiões, mas somente até 2005. Após este ano, os valores não ultrapassaram 75 mg/L. No final de 2012 e início de 2013, a grande estiagem que acometeu a Região Sudeste impactou ainda mais os parâmetros hidrológicos e, conseqüentemente, a concentração de MPS, cujos valores não ultrapassaram 60 mg/L.

Figura 62 – Série temporal de concentração de MPS e cotas médias mensais da estação Pindamonhangaba.



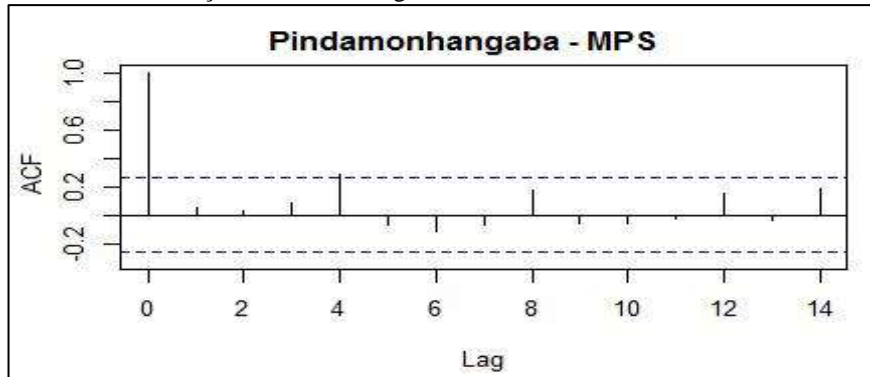
OBS.: Em vermelho, a linha de tendência obtida por regressão linear para a concentração de MPS; a equação da reta está representada no canto superior direito.

Legenda: MPS – Material particulado em suspensão.

Fonte: A autora, 2019.

A série de dados de concentração de MPS não mostrou a autocorrelação esperada entre as amostragens de um ano e as do ano anterior (Figura 63), apesar de a estação Pindamonhangaba estar situada em um trecho fluvial regularizado. Isso pode ter sido consequência da frequência irregular de amostragens. Apesar da ausência de autocorrelação, o teste de Mann-Kendall – que nesse caso seria o mais indicado – não foi aplicado à série para confirmar a direção da tendência e a significância estatística do comportamento negativo indicado pela regressão linear em função do pequeno número de amostragens, o que poderia comprometer os resultados.

Figura 63 – Correlograma da série temporal de concentração de MPS da estação Pindamonhangaba.



OBS.: As linhas tracejadas representam os limites de confiança a 95% para a hipótese de não ter correlação serial.

Legenda: ACF – Função de autocorrelação; Lag – Intervalo de tempo em anos.

Fonte: A autora, 2019.

A série de concentração de MPS de Pindamonhangaba não possui dados anteriores à instalação das duas grandes barragens (Paraibuna e Santa Branca) que existem a montante, no curso superior. As séries de cotas desse trecho do rio mostraram diminuição acentuada após os anos em que as barragens iniciaram sua operação (Figuras 59 e 60). Como os parâmetros sedimentológicos e hidrológicos estão intrinsecamente relacionados, é possível inferir que a queda nos parâmetros hidrológicos ocorrida após o início da regularização de fluxo a montante tenha impactado os valores de concentração de MPS no mesmo período. Porém, como o curso médio superior do RPS está submetido não somente às interferências hidráulicas, mas também a outras atividades que alteram seu fluxo e inclusive consomem seus sedimentos (como a extração de areia), não se pode atribuir exclusivamente às barragens (reguladoras do fluxo) e aos seus reservatórios (que retêm sedimentos) a autoria dos impactos na concentração de MPS que foram observadas na série temporal da estação Pindamonhangaba (Figura 62). De acordo com Kondolf (1997), além de afetar a morfologia do canal, atividades mineradoras, quando realizadas em trechos localizados a jusante de barragens, produzem um impacto significativo, normalmente causando déficit de sedimentos a jusante. Assim, todas as atividades antrópicas existentes nesse curso devem ser consideradas ao tentar compreender a diminuição da concentração de MPS nas últimas décadas.

#### 4.2.4 Morfologia de vista em planta

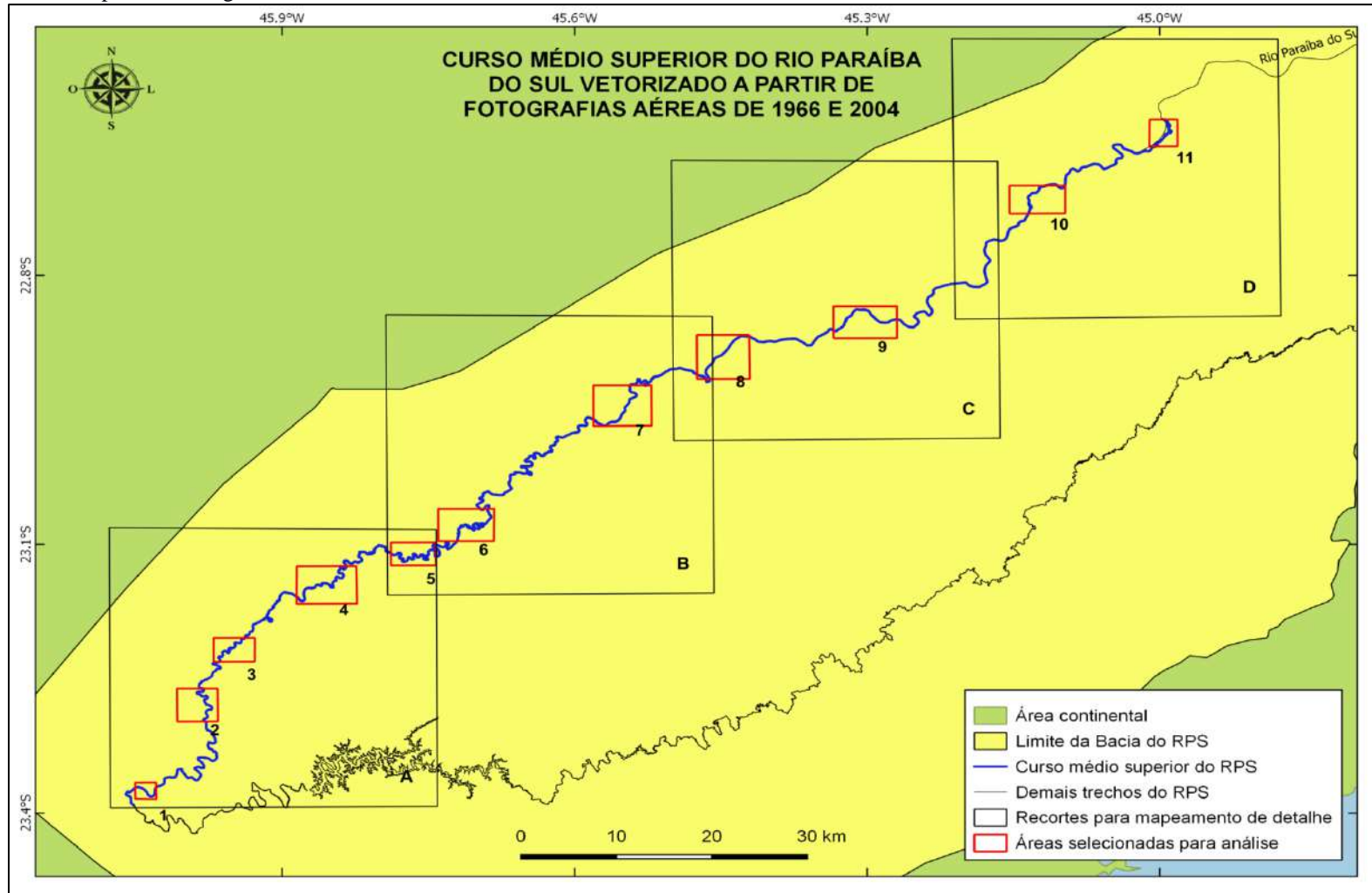
Para a análise da morfologia de vista em planta do curso médio superior do RPS foram vetorizados os elementos de hidrografia extraídos de fotografias aéreas de 1966 e 2004 (Figuras 25 e 26). O curso médio superior apresenta-se bastante sinuoso e meandrante na maior parte de sua extensão. Para sua melhor representação, houve a necessidade de subdividi-lo e cartografá-lo em quatro recortes (A, B, C e D, na Figura 64). Assim foi possível identificar as feições presentes no trecho e avaliar as alterações a que as mesmas foram submetidas ao longo das décadas que separam os insumos utilizados. Assim, para cada um dos quatro recortes (A, B, C e D) foram gerados dois produtos cartográficos distintos: um a partir do mapeamento fluvial realizado por meio das fotos de 1966, e outro das de 2004 (Figuras 65 a 72).

Para realizar a análise morfológica de maior detalhe, onze áreas dentro desses recortes cartográficos foram selecionadas (Figura 64) em diferentes escalas – de acordo com o tamanho das feições que se pretendeu analisar – e numeradas na ordem crescente (de 1 a 11), do ponto mais a montante àquele mais a jusante do curso médio superior (Figura 64). Nessas áreas, a hidrografia (canal fluvial, meandros e reservatórios) foi representada em azul, as ilhas em amarelo e as barras arenosas em laranja sobre as fotografias de ambas as datas. A vetorização das cavas de areia permitiu quantificar essas feições e avaliar se a atividade mineradora aumentou ao longo das décadas. Em 1966, a área ocupada por cavas correspondia a 1360 ha e, em 2004, a 3200 ha (aumento de 136%). Visualmente se percebe esse aumento: nas áreas 2, 3, 5, 6, 7 e 9 (localizadas nos recortes A, B e C, Figura 64), as áreas das cavas (em rosa) em 1966 (Figuras 65 a 67) são bem inferiores àquelas registradas em 2004 (Figuras 69 a 71).

Meandros abandonados nas planícies aluviais foram observados tanto nas fotos de 1966 como nas mais recentes. Alguns são resultantes da política de contenção de inundações adotada pelo governo paulista que, através do DAEE, realizou cortes nos meandros para retificação do canal em 1951; outros são provavelmente resultantes da própria dinâmica fluvial natural. O registro de alguns meandros abandonados exclusivamente nas fotos de 2004 mostrou que algumas incisões do canal são processos mais recentes, provavelmente intensificados nas últimas décadas tanto pelas atividades antrópicas, como pela regularização realizada pelas barragens.

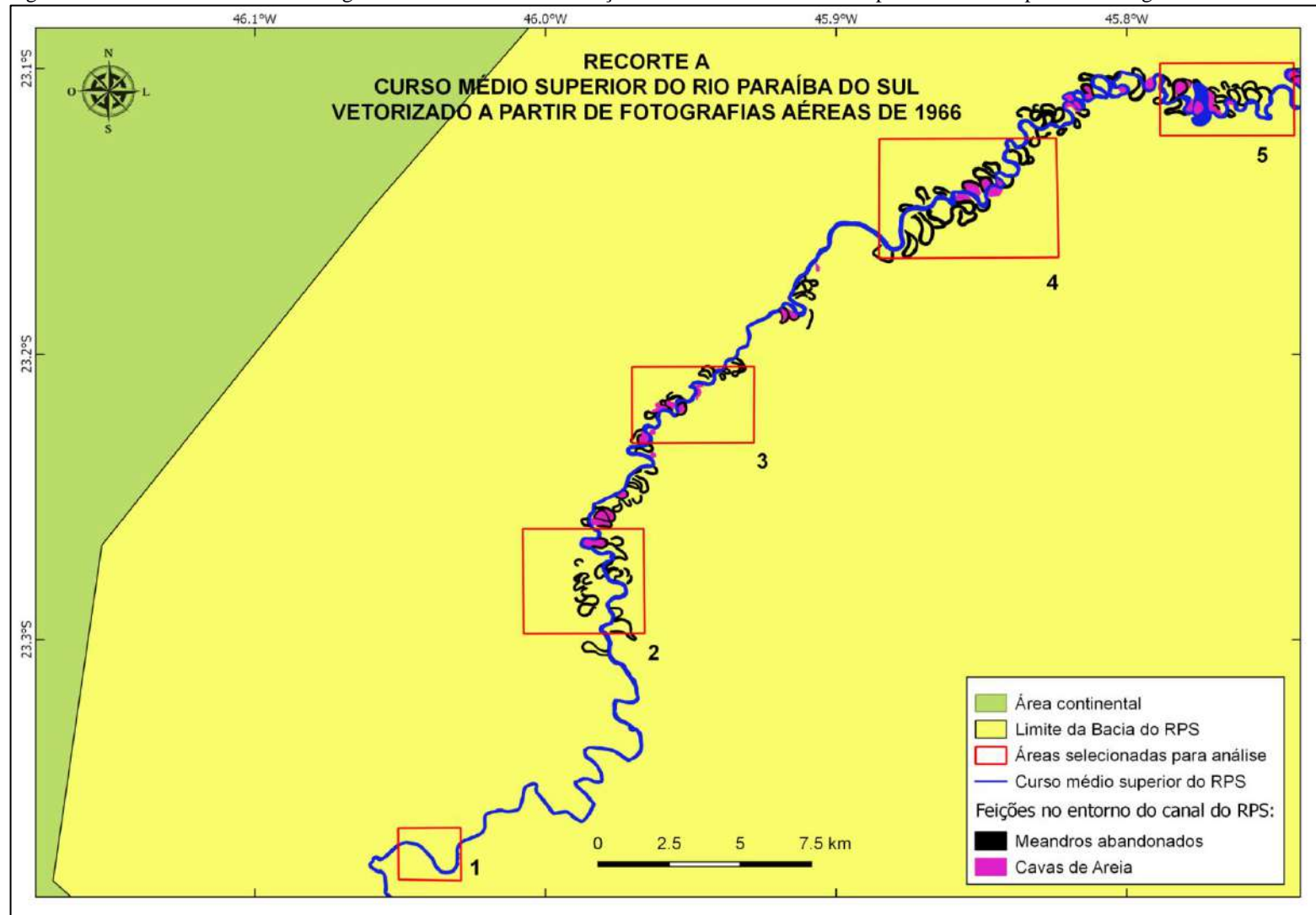


Figura 64 – Localização dos recortes para elaboração dos produtos cartográficos resultantes da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias aéreas do IBGE, de 1966 e 2004.



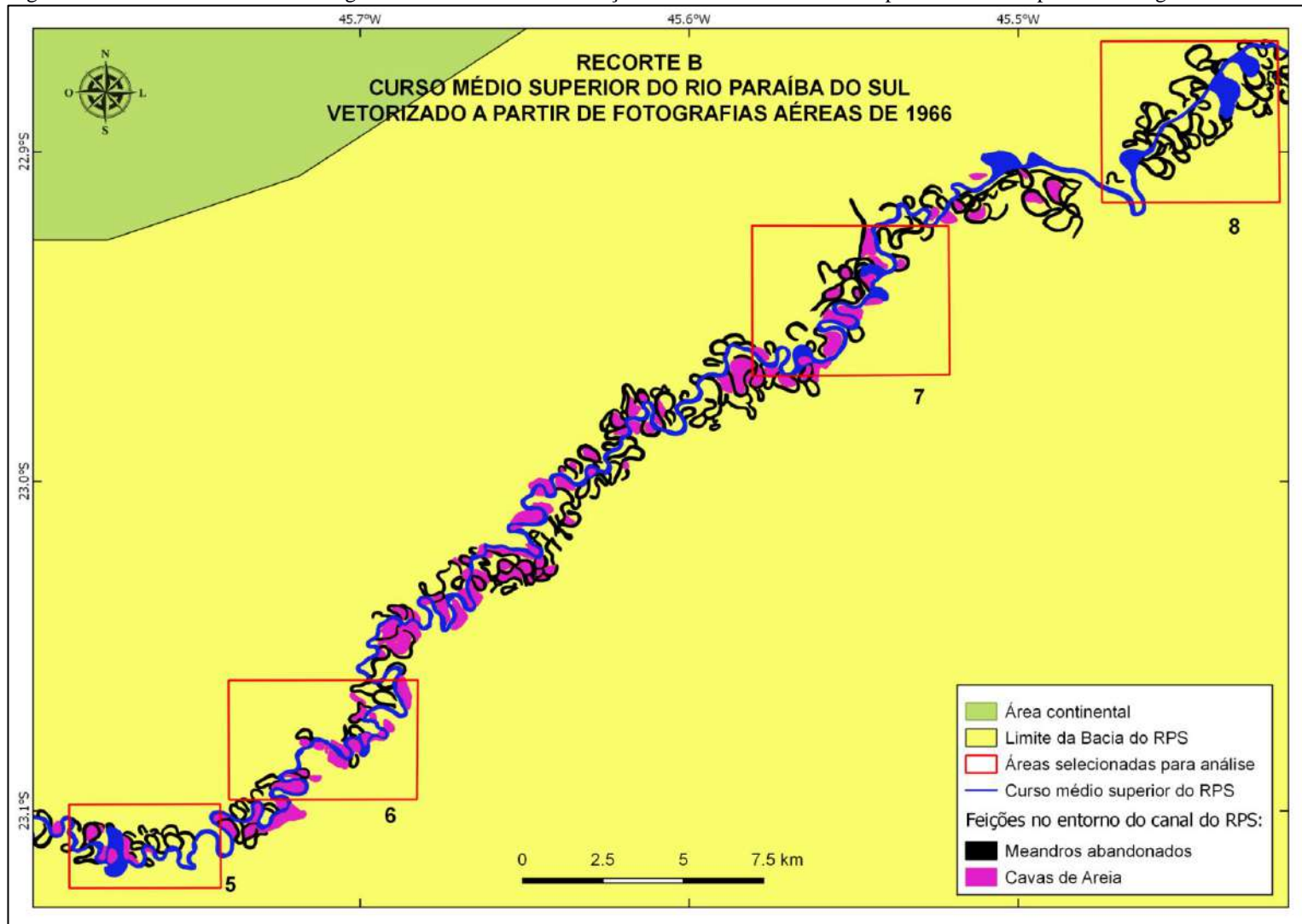
Fonte: A autora, 2019.

Figura 65 – Recorte A: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 1966.



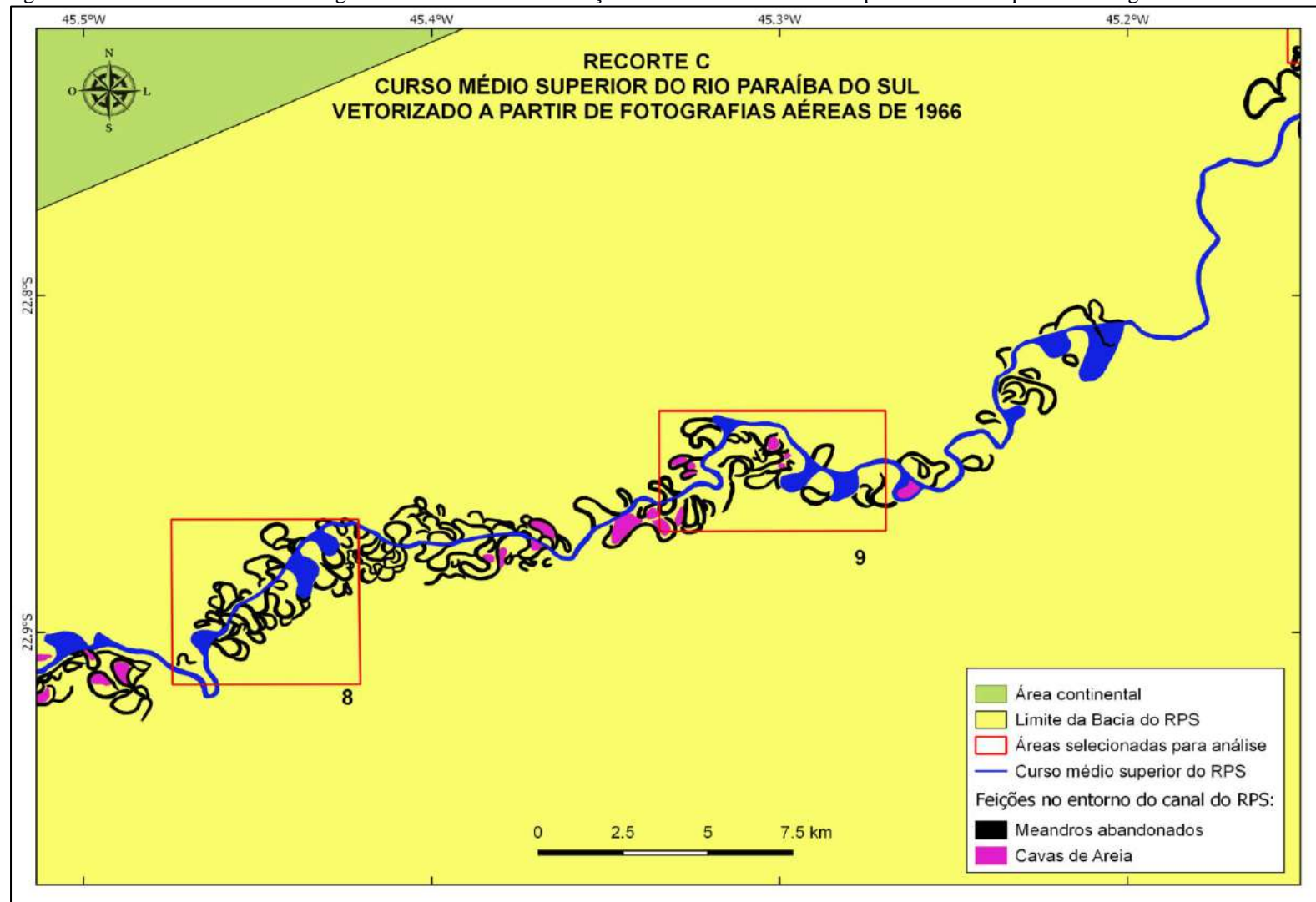
Fonte: A autora, 2019.

Figura 66 – Recorte B: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 1966.



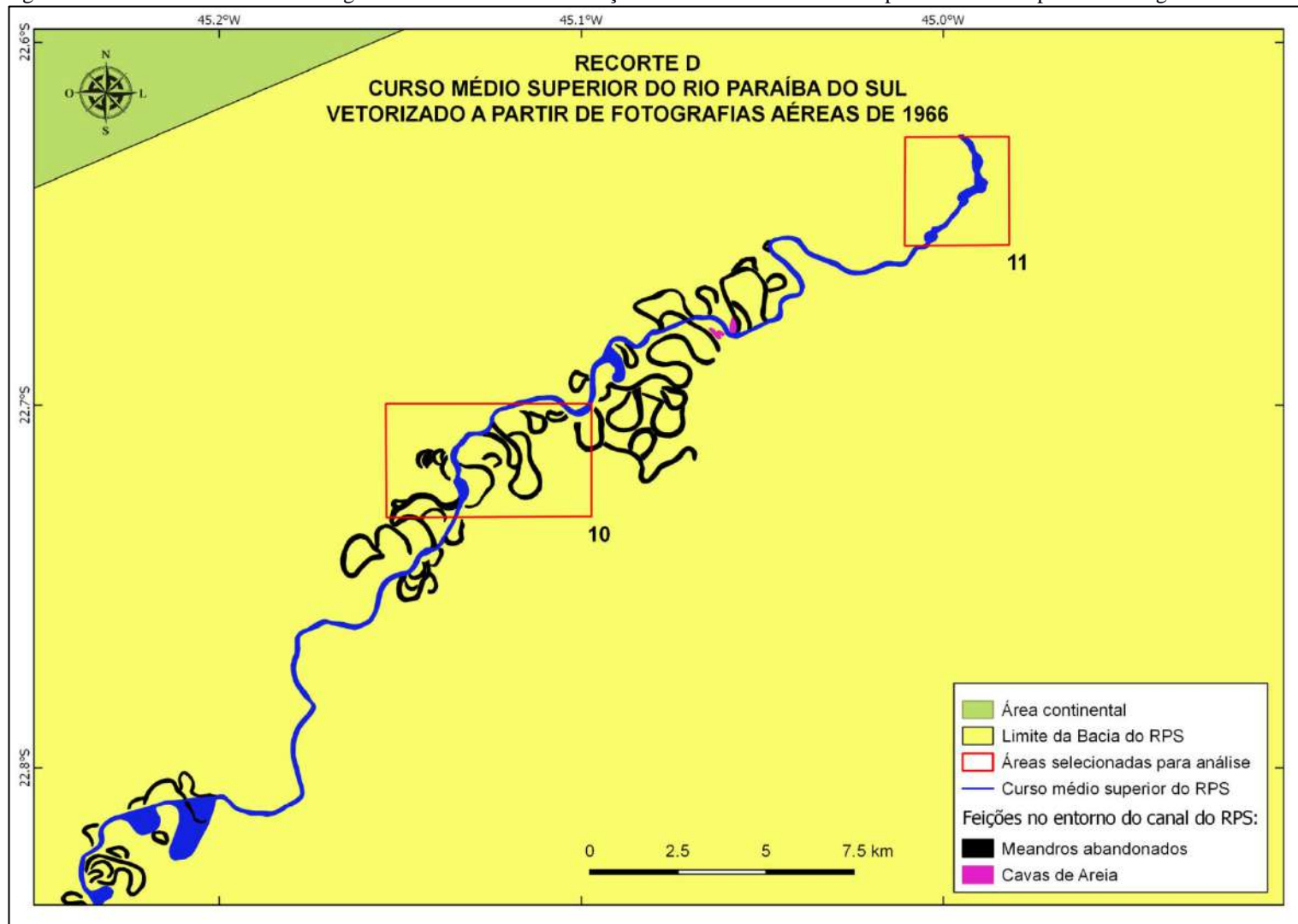
Fonte: A autora, 2019.

Figura 67 – Recorte C: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 1966.



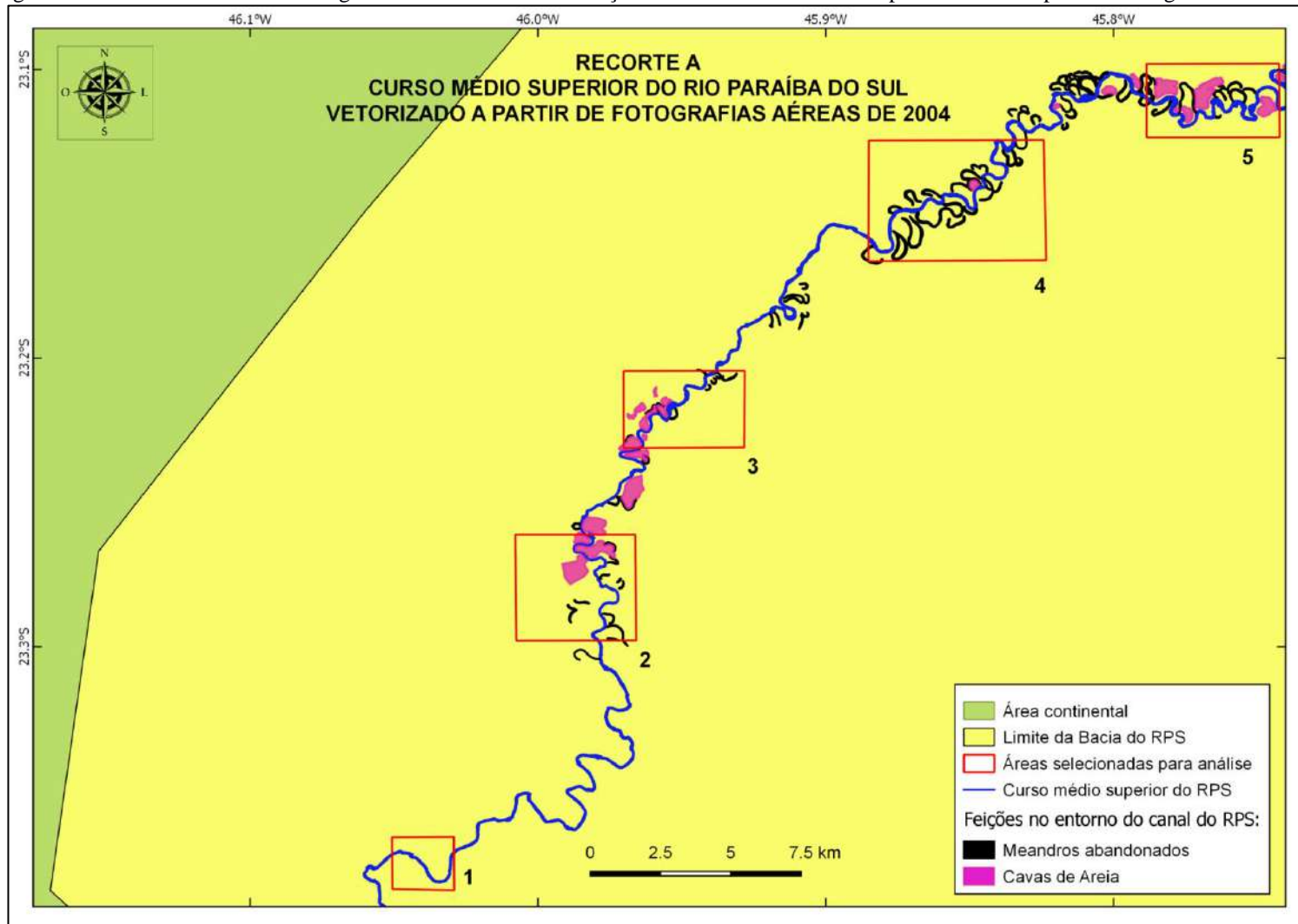
Fonte: A autora, 2019.

Figura 68 – Recorte D: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 1966.



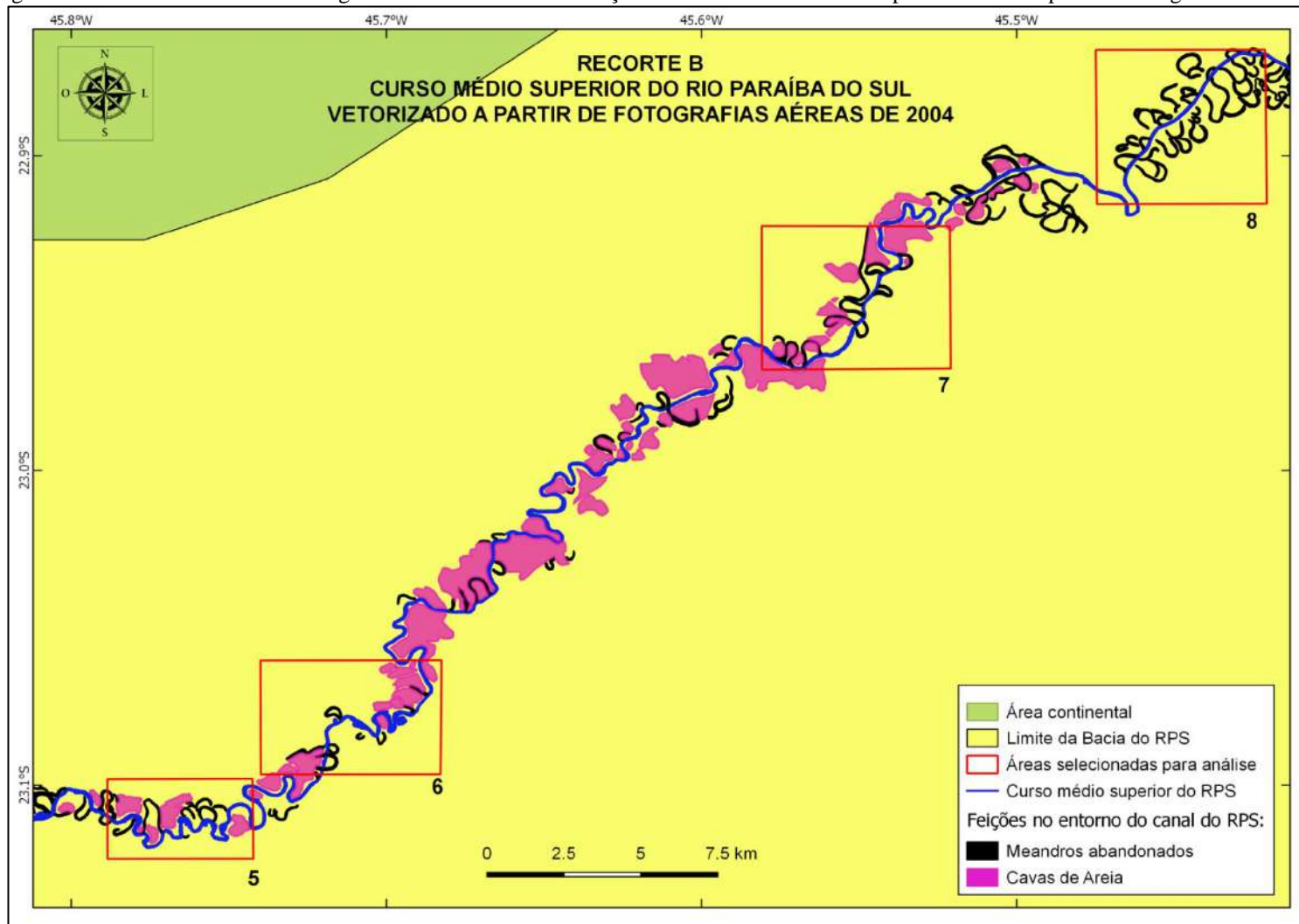
Fonte: A autora, 2019.

Figura 69 – Recorte A: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 2004.



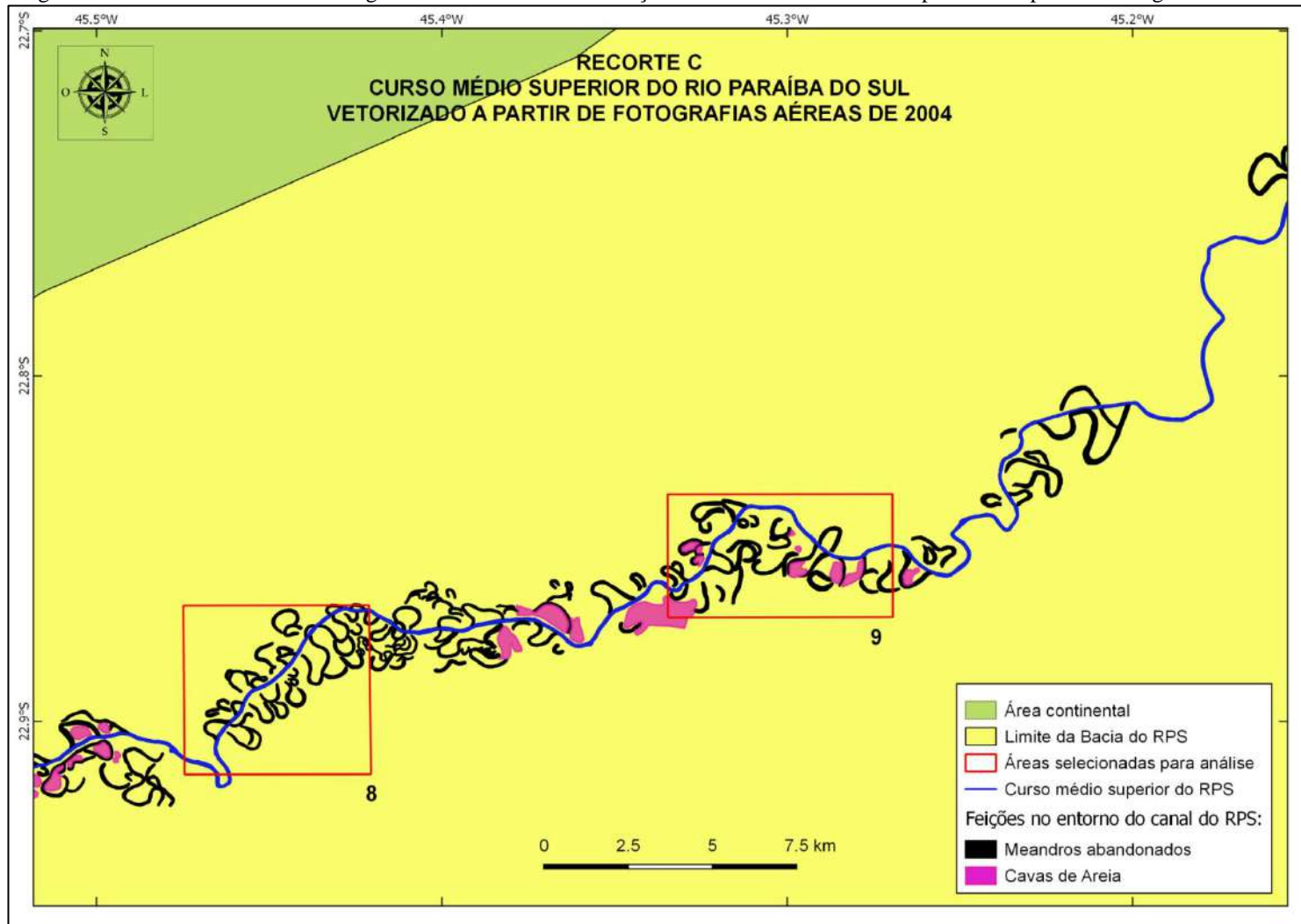
Fonte: A autora, 2019.

Figura 70 – Recorte B: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 2004.



Fonte: A autora, 2019.

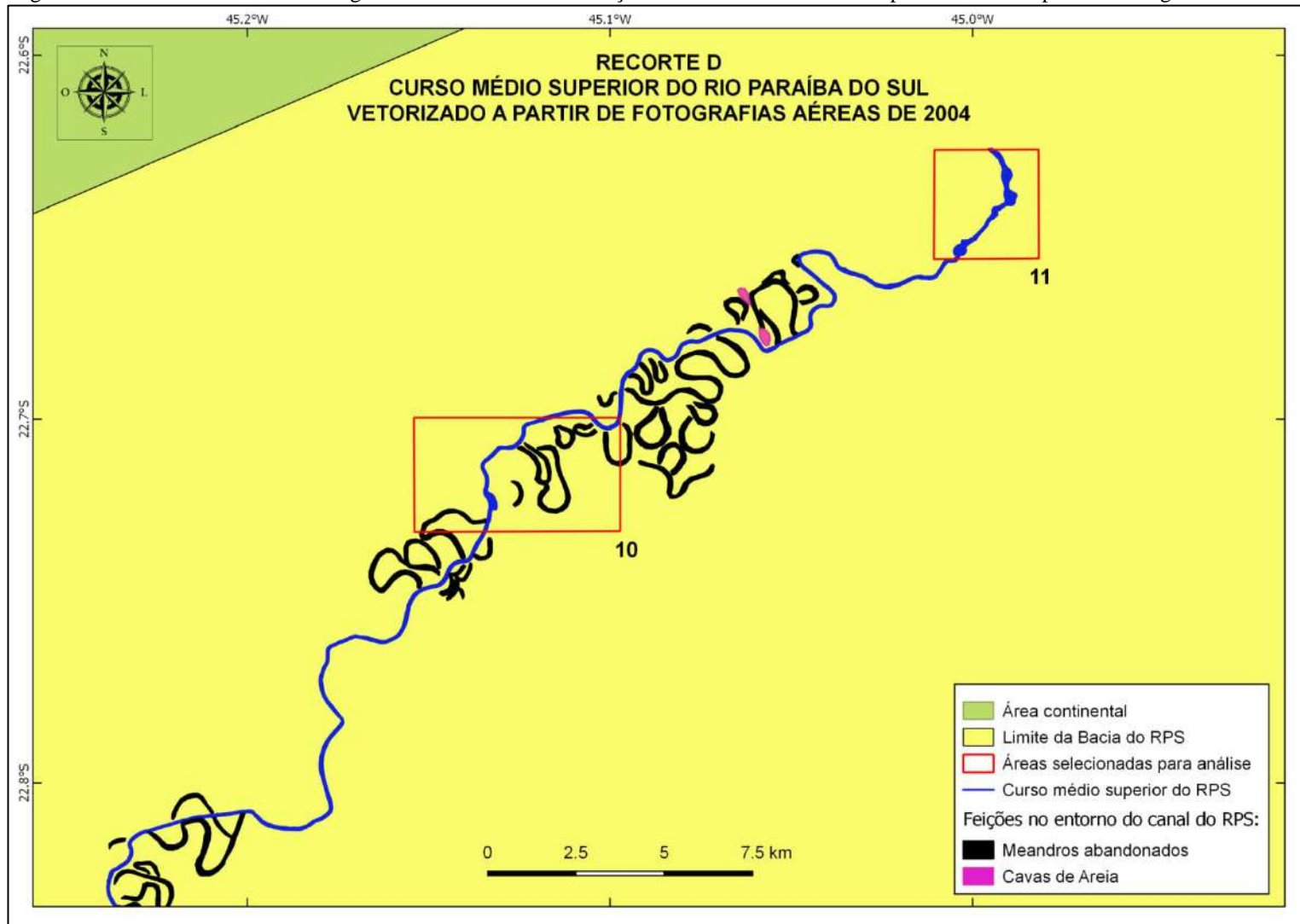
Figura 71 – Recorte C: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do a partir de fotografias de 2004.



Fonte: A autora, 2019.



Figura 72 – Recorte D: Produto cartográfico resultante da vetorização manual do curso médio superior do RPS a partir de fotografias de 2004.



Fonte: A autora, 2019.

Na área 1 (Figura 73), localizada na porção mais a montante do curso médio superior (Figura 64), 80 km a jusante do reservatório de Paraibuna e 50 km a jusante do reservatório de Santa Branca, foi possível verificar a influência da retenção de água nos reservatórios acima: a largura média do canal fluvial nesta área diminuiu 12 m de 1966 a 2004. Um detalhe que evidencia a diminuição do volume de água disponível foi o surgimento de uma ilha de 40 m de comprimento em 2004. Não há mineração de areia nem rizicultura irrigada nesta área.

A área 2 (Figura 74), situada aproximadamente 20 km a jusante da primeira (Figura 64), apresentou uma diminuição ainda mais significativa da largura média do canal fluvial: 70 m. Nessa porção, o RPS não sofreu apenas a influência dos reservatórios a montante, mas também da atividade mineradora de areia, extraída em cavas (Figuras 65 e 69) e do cultivo irrigado, principalmente de arroz. Aumento na área ocupada pelas cavas pode ser observado quando comparadas as fotos de 1966 e 2004 (Figura 74). Observaram-se meandros abandonados tanto em 1966 como em 2004. Alguns, no entanto, foram ocupados por construções ou viraram cavas para extração de areia. O cultivo irrigado foi registrado nas duas épocas.

Na área 3 (Figuras 64 e 75) também foram observados meandros abandonados em ambas as fotografias, extração de areia (inclusive localizadas em alguns desses meandros abandonados) e agricultura irrigada nas áreas de várzea. Além disso, nesse trecho foram observadas barras de pontal na fotografia antiga (ausentes na recente). Algumas delas foram incorporadas às margens do canal, diminuindo, assim, sua largura, enquanto outras desapareceram. Apesar de ter ocorrido alargamento na parte central do canal neste trecho, em média, houve diminuição de 70 m em sua largura. Ainda na parte central, apesar do aumento da largura do canal, a turbidez da água sinaliza a ocorrência de processo de assoreamento (Figura 75).

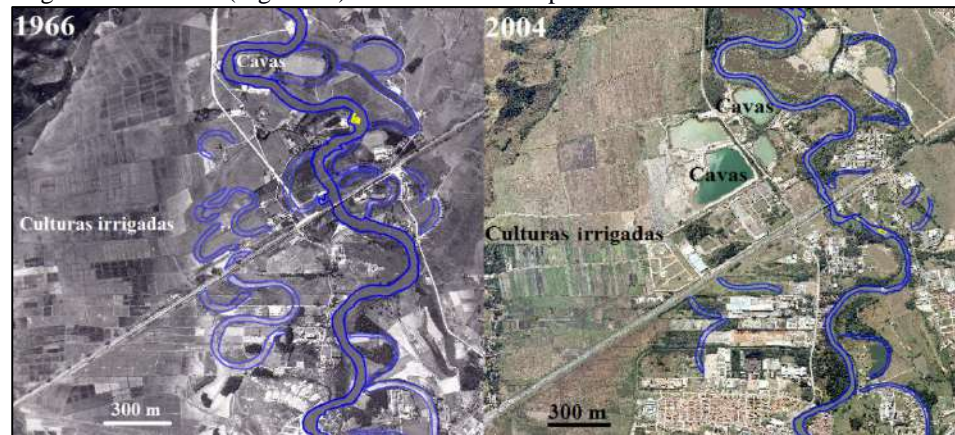
Na área 4 (Figuras 64 e 76) há também meandros abandonados em ambas as fotografias. As barras de pontal (em laranja) e ilhas (em amarelo) presentes na fotografia de 1966 não foram observadas na fotografia mais recente, tendo sido incorporadas às margens do canal, cuja largura diminuiu cerca de 100 m. Ao contrário do que ocorreu nas demais áreas, nesta, há maior presença de cavas de areia na fotografia de 1966 que na de 2004. Houve, no período entre as fotos, a desconexão de um braço do RPS de seu canal principal, levando à incorporação de uma grande ilha (de 350 m de comprimento) às margens do mesmo. O antigo canal tornou-se um meandro abandonado (circulado em vermelho na foto de 2004, Figura 76).

Figura 73 – Área 1 (Figura 64) do curso médio superior.



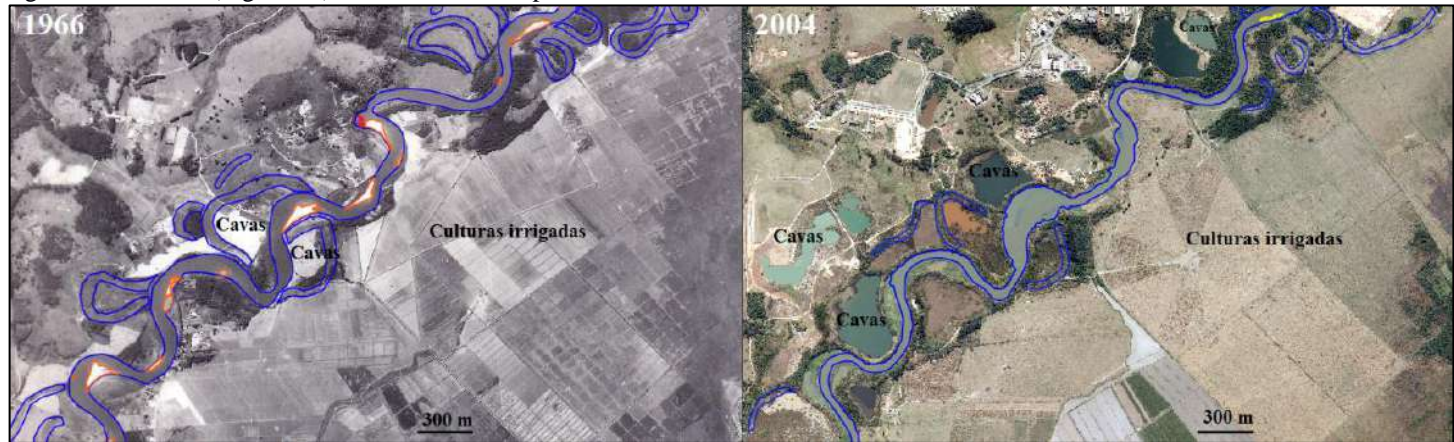
OBS.: Observa-se diminuição na largura média do canal fluvial e aparecimento de uma ilha (em amarelo).  
 Fonte: A autora, 2019.

Figura 74 – Área 2 (Figura 64) do curso médio superior.



OBS.: Presença de meandros abandonados, agricultura irrigada e cavas de areia.  
 Desaparecimento de algumas ilhas e aparecimento de outras (em amarelo).  
 Fonte: A autora, 2019.

Figura 75 – Área 3 (Figura 64) do curso médio superior.



OBS.: Canal fluvial e meandros abandonados cercados por agricultura irrigada e cavas de areia. Barras de pontal (em laranja) na fotografia antiga não estão presentes na fotografia recente.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 76 – Área 4 (Figura 64) do curso médio superior.



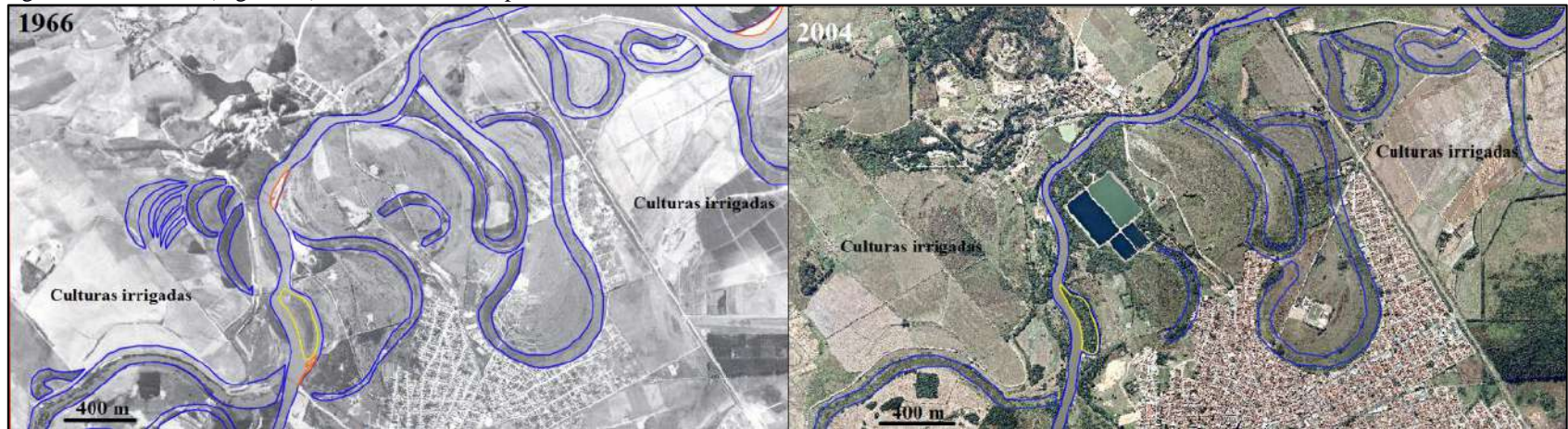
OBS.: Barras de pontal (em laranja) e ilhas (em amarelo) na fotografia de 1966 não estão presentes na fotografia recente. No detalhe (circulado em vermelho), um braço do RPS se desconectou do curso principal, tornando-se um meandro abandonado e incorporando uma ilha às margens do mesmo.

Fonte: A autora, 2019.

Nas áreas 5 a 9 do curso médio superior (Figura 64 e Apêndices E, F e G) também foram observados as mesmas características das áreas 2, 3 e 4 (Figuras 74 a 76): meandros abandonados em ambas as épocas (1966 e 2004); área do entorno do canal fluvial ocupada por agricultura irrigada e cavas de areia, exceto na área 8 (Apêndice F), que apresenta apenas culturas irrigadas; e a maioria das barras arenosas foram registradas apenas em 1966 (algumas incorporadas em 2004 às margens do canal, enquanto outras, desapareceram). Em todas essas áreas o número de cavas para extração de areia aumentou de 1966 a 2004 e houve diminuição do volume de água do rio, refletido na diminuição da largura média do canal, que foi de 15 m, 36 m, 18 m, 24 m e 37 m nas áreas 5, 6, 7, 8 e 9, respectivamente (Apêndices E, F e G). A diminuição do volume de água no canal levou à desconexão de alguns canais do curso principal, diminuindo a sinuosidade dessas áreas. Isso ocorreu, por exemplo, na área 5 (Apêndice E), criando um novo meandro abandonado e levando a ilha de 1450 m de comprimento existente em 1966 a ser incorporada às margens do canal. O mesmo aconteceu com uma ilha de 760 m existente em 1966 na área 6 (Apêndice E), com três ilhas de 570 m, 520m e 840 m de comprimento na área 7 (Apêndice F), com outras três ilhas de 380 m, 1450 m e 820 m de comprimento na área 8 (Apêndice F) e, finalmente, com três ilhas de 630 m, 1240 m e 980 m de comprimento na área 9 (Apêndice G). Nessas áreas, a perda de sinuosidade após 1966 não pode ser atribuída às obras de retificação do DAEE, realizadas em 1951.

Na área 10 (Figuras 64 e 77), o curso médio superior ainda atravessa planícies aluviais de baixa declividade e apresenta atividades agrícolas nas fotografias de ambas as datas. Porém, deixa de sofrer a ação direta da extração de areia em cavas. Meandros abandonados vistos na fotografia de 1966 são imperceptíveis em 2004 devido à ocupação da área por plantações. Uma barra de pontal existente em 1966 deixou de existir em 2004. Porém, a ilha registrada em 1966 também o foi em 2004, com o mesmo comprimento (620 m), mas com largura diminuída de cerca de 40 m. A largura média do canal diminuiu em 53 m no intervalo de tempo entre as fotografias. Finalmente, a área 11 (Figuras 64 e 78), localizada na porção final do curso médio superior, distante das várzeas a montante, em uma área de transição para o curso seguinte, não apresenta agricultura irrigada, nem extração de areia em cavas. A largura média do canal também diminuiu (em 37 m) e algumas ilhas desapareceram ao serem incorporadas às margens do canal, como consequência da redução do volume de água. Uma delas tinha 770 m de comprimento.

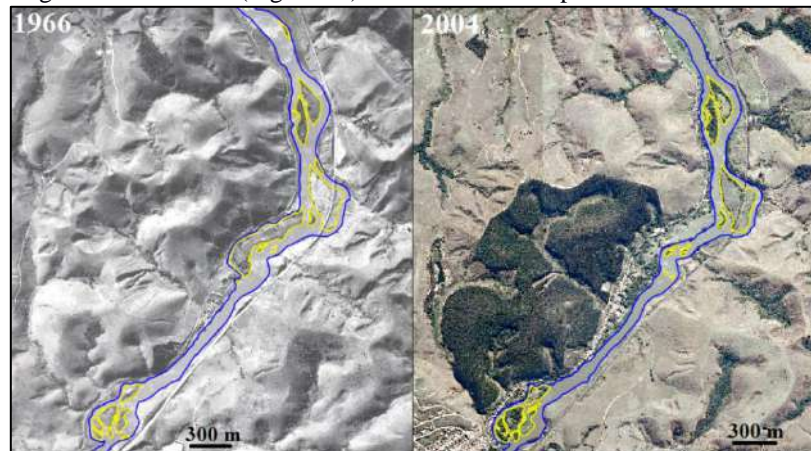
Figura 77 – Área 10 (Figura 64) do curso médio superior.



OBS: A barra de pontal (em laranja) existente na fotografia de 1966 não está presente na fotografia recente. A ilha (em amarelo) existente em 1966 continua presente em 2004, porém, com largura menor.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 78 – Área 11 (Figura 64) do curso médio superior.



OBS.: Manutenção de algumas ilhas (em amarelo) e incorporação de outras às margens do canal.

Fonte: A autora, 2019.

As principais alterações observadas na morfologia de vista em planta das áreas 1 a 11 do curso médio superior do RPS foram organizadas em um quadro (Apêndice H).

#### 4.2.5 Morfologia transversal

No curso médio superior foram elaborados perfis transversais do canal do RPS a partir de dados de duas estações fluviométricas: Pindamonhangaba e Guaratinguetá (estações 3 e 4, respectivamente, na Figura 23). Ambas estão localizadas nas planícies aluviais do Paraíba do Sul, a jusante das barragens de Paraibuna e Santa Branca e, portanto, sujeitas à regularização de fluxo que é realizada a montante por essas obras. Cabe lembrar que além dessa interferência antrópica, o canal do RPS nesse trecho é submetido a práticas agrícolas (rizicultura irrigada) e extrativistas (exploração de areia) ostensivas, que intervêm não somente sobre o fluxo fluvial, mas também sobre a forma do canal.

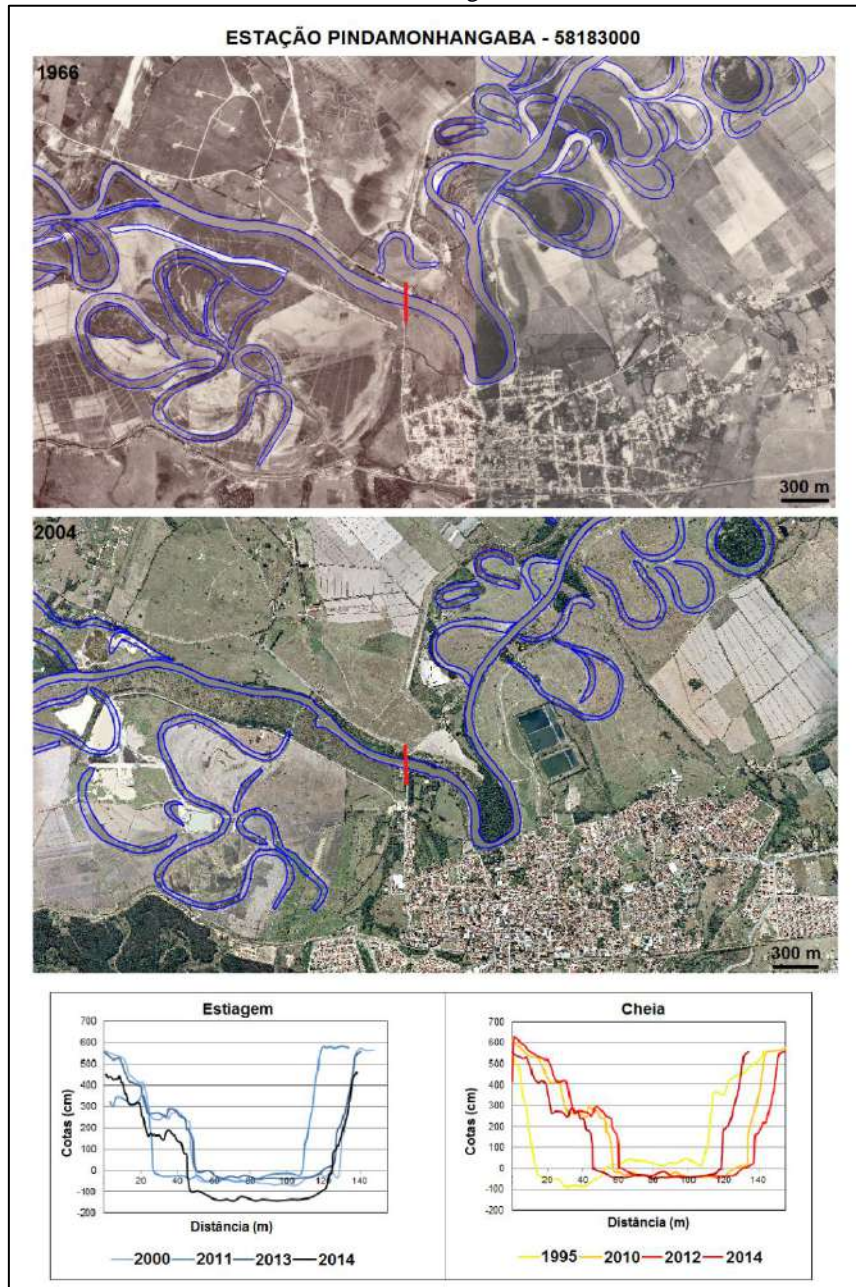
Os perfis transversais da estação Pindamonhangaba foram elaborados a partir de dados de 1995 a 2014, sendo quatro do período da estiagem e quatro da cheia (Figura 79). Da estação Guaratinguetá foram elaborados perfis de 1994 a 2016, sendo cinco do período da estiagem e quatro da cheia (Figura 80). No curso médio superior não há dados de perfil transversal anteriores à instalação das barragens com reservatório do RPS, ficando a análise restrita às últimas décadas.

Nos perfis da estação Pindamonhangaba (Figura 79), foi possível observar a mudança na posição do canal fluvial com o tempo, indicando processos de avulsão lateral (de até ~ 20m na estiagem e ~ 30 m na cheia), normalmente frequentes em terrenos de várzeas, como os do curso médio superior. Os meandros abandonados registrados pelas fotografias aéreas (Figura 79) atestam a ocorrência de migração lateral nesse trecho. A forma em “U” do vale fluvial, típica de ambientes deposicionais (LIMA, 2006), se manteve ao longo dos anos, tanto na estiagem como na cheia (Figura 79). Os perfis da estação Guaratinguetá (Figura 80) também mostraram migração lateral do canal fluvial, tanto na estiagem (de até ~ 12 m) como na cheia (de até ~ 30 m). A forma do vale em “U” também se manteve com o tempo, como na estação Pindamonhangaba (Figura 79), embora nesta, na época da cheia, o fundo do canal tenha se mostrado mais irregular.

Os parâmetros sugeridos por Su et al. (2015) para avaliação de mudanças na morfologia

transversal do canal do curso médio superior do RPS foram calculados a partir dos perfis transversais das duas estações supracitadas (Tabela 6).

Figura 79 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Pindamonhangaba.

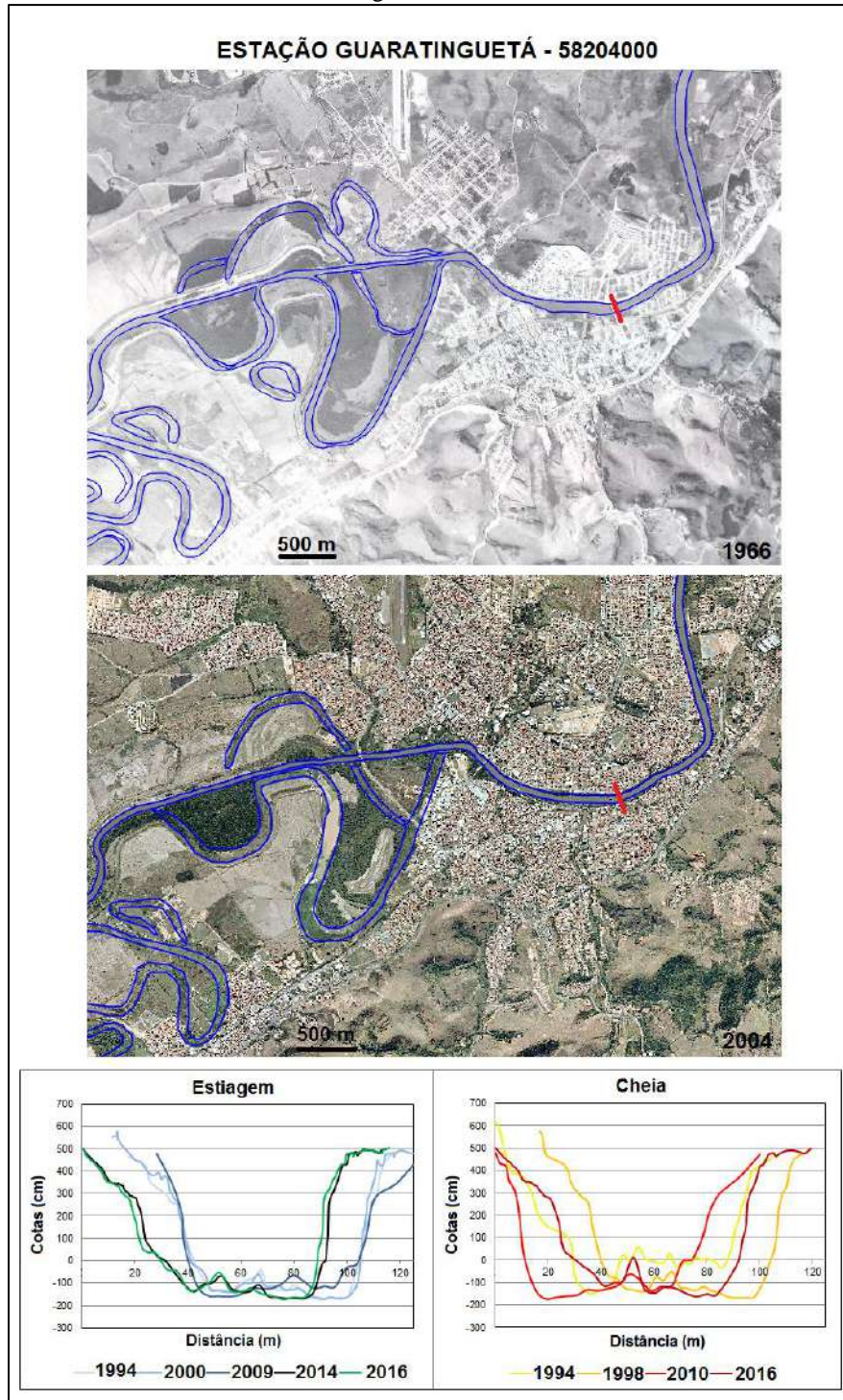


OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.

Fonte: A autora, 2019.



Figura 80 – Perfis transversais dos períodos da estiagem e da cheia da estação fluviométrica Guaratinguetá.



OBS.: Nas fotografias aéreas, o segmento vermelho refere-se à localização do perfil transversal.

Fonte: A autora, 2019.

Tabela 6 – Parâmetros para avaliação de mudanças na morfologia transversal das estações fluviométricas do curso médio superior.

ESTAÇÃO PINDAMONHANGABA									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
JUN/2000	81,8	99,0	1,2	67,6	FEV/1995	97,3	61,3	0,6	154,4
ABR/2011	83,8	112,0	1,3	62,7	JAN/2010	80,1	119,3	1,5	53,8
MAI/2013	77,5	80,0	1,0	75,1	DEZ/2012	77,9	110,6	1,4	54,9
ABR/2014	83,8	178,8	2,1	39,3	MAR/2014	74,0	99,0	1,3	55,3
%Δ		<b>80,6</b>	<b>76,3</b>	<b>-41,9</b>	%Δ		<b>61,5</b>	<b>112,4</b>	<b>-64,2</b>
ESTAÇÃO GUARATINGUETÁ									
ESTIAGEM					CHEIA				
DATA	LA	A	PM	LA/PM	DATA	LA	A	PM	LA/PM
ABR/1994	68,1	154,7	2,3	30,0	OUT/1994	66,6	92,3	1,4	48,1
JUL/2000	67,0	151,1	2,3	29,7	MAR/1998	68,7	148,2	2,2	31,8
AGO/2009	69,5	153,4	2,2	31,5	MAR/2010	70,0	172,2	2,5	28,5
MAI/2014	69,3	144,9	2,1	33,1	NOV/2016	68,4	111,5	1,6	42,0
AGO/2016	70,4	121,8	1,7	40,7					
%Δ		<b>-19,4</b>	<b>-23,3</b>	<b>37,1</b>	%Δ		<b>-24,8</b>	<b>-24,4</b>	<b>31,8</b>

Legenda: LA – largura da água (em m); A – área da seção transversal (em m<sup>2</sup>); PM – profundidade média (em m); LA/PM – razão entre a largura da água e a profundidade média; %Δ – percentual de variação entre as datas extremas do período (estiagem/cheia).

Fonte: A autora, 2019.

Tanto na estação Pindamonhangaba como na estação Guaratinguetá, os parâmetros A, PM e LA/PM não apresentaram um comportamento unidirecional com o tempo, oscilando entre as datas dos períodos analisados, tanto na estiagem como na cheia (Tabela 6). Na estação Pindamonhangaba, por exemplo, na estiagem, os valores de A aumentaram de 2000 a 2011, diminuíram de 2011 a 2013, e voltaram a aumentar de 2013 a 2014; na cheia, houve aumento de A, de 1995 a 2010, e em seguida diminuição desse parâmetro até 2014 (Tabela 6).

Na estação Pindamonhangaba, a variação dos parâmetros calculados ficou em torno de 81% para A, ~ 76% para PM e ~ -42% para a razão LA/PM, na estiagem, e de ~ 62% para A, ~ 112% para PM e ~ -64% para a razão LA/PM, no período da cheia; na estação Guaratinguetá, a variação ficou em torno de ~ -20% para A, de ~ -23% para PM e de ~ 37% para a razão LA/PM na estiagem e ~ -25% para A, de ~ -24% para PM e de ~ 32% para a razão LA/PM, na cheia (Tabela 6).

Apesar de essas estações estarem a jusante das barragens Paraibuna e Santa Branca e, por

isso, submetidas à regularização de vazão, a presença de atividades consumidoras de grandes volumes de água nesse trecho do RPS (como a mineração em cavas e a rizicultura irrigada) acabaram mascarando os efeitos esperados de um fluxo regularizado. Por causa das intervenções que ocorrem sobre o fluxo fluvial que passa por essas estações, oscilações de vazão (que a princípio seriam amenizadas pela regularização) podem acontecer mais frequentemente que naquelas estações onde a regularização é a principal atividade antrópica sobre o fluxo. As séries hidrológicas das estações Pindamonhangaba e Guaratinguetá (Figuras 59 e 60, respectivamente), de fato, não apresentam uma assinatura tão regular como a da estação Santa Branca (Figura 32), típica de um fluxo intensamente controlado. Todas as interferências que modificam o fluxo fluvial que passa pelas estações do curso médio superior intensificam sua variabilidade e, conseqüentemente, a dos parâmetros calculados a partir dos seus perfis transversais. Quando comparados aos parâmetros obtidos dos perfis transversais da estação Santa Branca (Figura 53 e Tabela 3), os parâmetros do curso médio superior apresentaram uma variabilidade significativamente maior (Tabela 6).

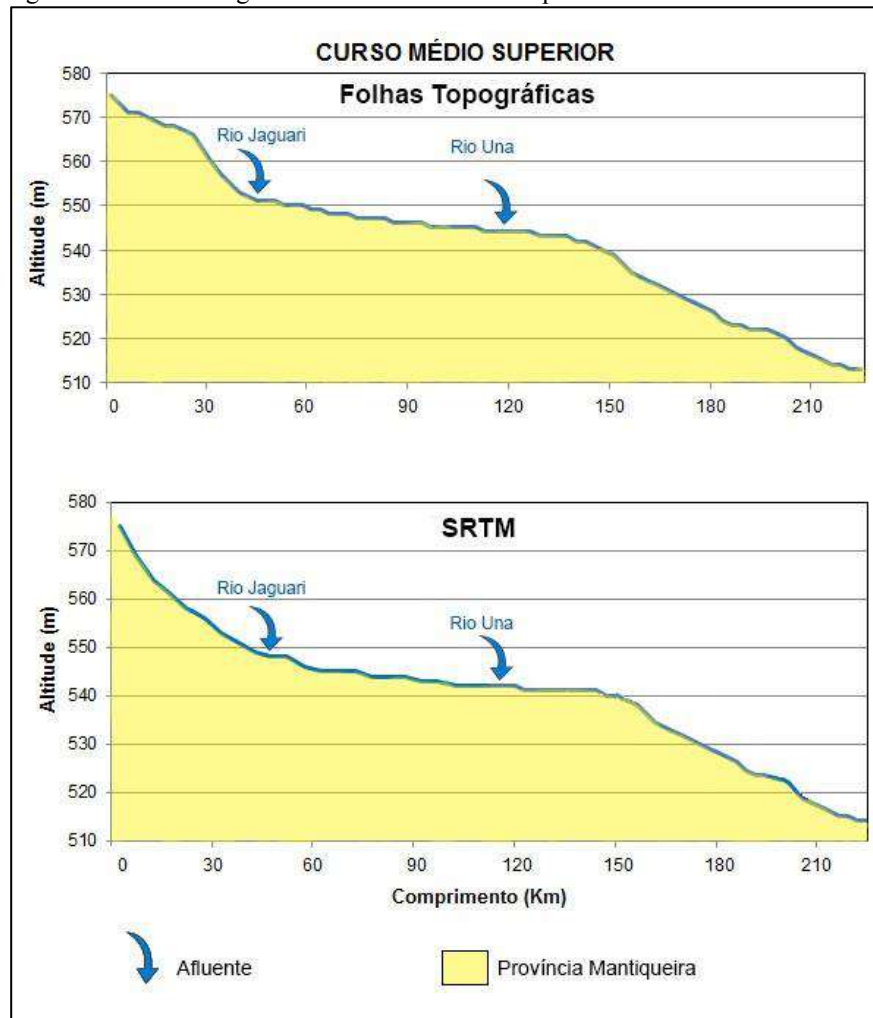
#### 4.2.6 Morfologia longitudinal

O curso médio superior é geologicamente homogêneo, caracterizado pelo domínio das rochas da Província Mantiqueira (depósitos aluvionares do Quaternário). Seu perfil longitudinal não apresenta falhas ou zonas de cisalhamento compressional (Figura 81). O canal do RPS, sinuoso/meandrante na maior parte deste curso, atravessa extensas planícies aluviais, onde recebe a confluência dos rios Jaguari e Una ao longo de seu trajeto. Neste curso, de baixa declividade, não foram construídas barragens (Figura 20 e 81).

A razão  $RDE_{\text{trecho}}/RDE_{\text{total}}$  do curso médio superior, calculada a partir dos perfis longitudinais das décadas de 1950/60 e 2000 foi, respectivamente, 0,57 e 0,54, apresentando uma diminuição de aproximadamente 5% com o tempo. Esses valores (inferiores a 2), caracterizam trechos em equilíbrio (ou ajustados), sem anomalias significativas, segundo Etchebere (2000), Melo, Fujita e Santos (2009) e Fujita et al. (2011).

Apesar da presença de atividades antrópicas ostensivas no curso médio superior, que alteram a morfologia do canal fluvial do RPS (como extrativismo de areia e agricultura irrigada), elas não impediram a suavização esperada do perfil longitudinal com o passar dos anos. A mudança para um perfil menos irregular aconteceu, principalmente em sua porção mais a montante, próximo à confluência com o rio Jaguari, onde um *knickpoint* bem acentuado no perfil de 1950/60 aparece atenuado em 2000 (Figura 81).

Figura 81 – Perfis longitudinais do curso médio superior do RPS.



Fonte: A autora, 2019. Elaborado a partir de folhas topográficas 1:50.000 do IBGE (décadas de 1950/60) e MDE do SRTM, 2000.

Legenda: MDE – Modelo digital de elevação; SRTM – *Shuttle Radar Topographic Mission*.

### 4.3 Curso médio inferior do RPS

No curso médio inferior está instalada a maioria das barragens do RPS, que alteram seu fluxo fluvial e desviam mais da metade de seu volume de águas para alimentar o rio Guandu. Este capítulo traz um panorama de sua paisagem e as análises das transformações que as barragens vêm, há décadas, acarretando a seus parâmetros hidrológicos, sedimentológicos e morfológicos.

#### 4.3.1 Paisagem

O curso médio inferior é o mais extenso dos quatro cursos do RPS (Figuras 7 e 8). Ele começa no município paulista de Cachoeira Paulista, adentra o vale fluminense no município de Resende, torna-se um rio fronteiro com Minas Gerais entre os municípios de Chiador (MG) e Três Rios (RJ) e continua como um limite natural entre esses dois estados até Pirapetinga (MG) e Cantagalo (RJ), a partir de onde volta a circular exclusivamente em terras fluminenses até atingir – após 480 km de percurso – o município de São Fidélis. Sua declividade média é a segunda maior (1,0 m/km, Figura 8) dos cursos fluviais do RPS, inferior apenas à do curso superior (ANA, 2001).

Localizado entre as serras da Mantiqueira (ao norte), do Mar e dos Órgãos (ao sul), esse curso pertence, em sua maior parte, ao domínio geomorfológico conhecido como Depressão do RPS (Figura 9). Circundada por serras paralelas com rochas pré-cambrianas de idade superior a 500 mil anos, essa região da bacia passou por um processo de “rifteamento” que culminou com a formação de um vale “encaixado” em sua porção rebaixada (CEIVAP, 2014). Nesse trecho, submetido a intenso controle estrutural, o RPS apresenta vários segmentos encachoeirados. A ausência de meandros abandonados evidencia a maior estabilidade na forma do canal fluvial em relação aos demais cursos, principalmente ao médio superior, onde o canal corta grandes várzeas e os processos de avulsão são marcantes.

Quanto à morfologia, no curso médio inferior o RPS começa sinuoso a montante, adquire

característica retilínea para, finalmente, apresentar padrão entrelaçado/anastomosado apenas em sua porção terminal, na transição para o curso inferior. Graças ao controle estrutural, nesse curso as alterações morfológicas naturais de curto prazo são menos pronunciadas quando comparadas aos demais.

Quanto ao clima (Figura 10), do início do curso médio inferior até sua porção central, varia de tropical subquente úmido (com 3 meses secos e temperaturas médias entre 15 e 18°C) ao tropical subquente semi-úmido (com temperaturas médias idênticas ao anterior, mas com um período de estiagem mais longo, de 4 a 5 meses). Da porção central desse curso até seu final, o RPS passa a fluir sob o domínio do clima tropical quente semi-úmido (com temperaturas médias superiores a 18°C em todos os meses e com 4 a 5 meses secos ao longo do ano).

Atravessando uma parte bastante urbanizada da Região Sudeste onde a vegetação original praticamente não existe mais, a maior parte do curso médio inferior encontra-se em áreas de vegetação secundária (Figura 14). Municípios de médio porte com produção industrial relevante estão localizados neste trecho (Figura 4), como Resende, Barra Mansa, Volta Redonda e Três Rios (RJ).

Não há Unidades de Conservação federais neste trecho (Figura 6), apenas as unidades estaduais Refúgio de Vida Silvestre do Médio Paraíba (criada em 2016), abrangendo uma parte da área fluminense da bacia que se estende de Resende a Três Rios, e a Área de Relevante Interesse Ecológico Ilhas do Paraíba do Sul, que engloba algumas ilhas localizadas no canal principal do RPS entre os municípios fluminenses de Quatis e Barra Mansa (ICMBIO, 2017). As áreas não urbanizadas são ocupadas por atividades agrícolas e pastagens (Figura 15).

A susceptibilidade à erosão varia de alta a muito alta (Figura 16) no curso médio inferior, cujas margens – desordenadamente ocupadas – são constantemente submetidas a eventos erosivos após as chuvas de verão. Nos municípios fluminenses de Barra Mansa, Paraíba do Sul e Sapucaia, deslizamentos e desmoronamentos são frequentemente noticiados nessa época do ano.

O curso médio inferior é o trecho que apresenta o maior número de obras hidráulicas instaladas (Figura 20): PCH Lavrinhas e PCH Queluz (ambas a fio d'água), UHE Funil (com reservatório), UEL Santa Cecília (com pequeno reservatório, e onde ocorre a transposição para o rio Guandu), PCH de Anta (com reservatório) e UHE Ilha dos Pombos (a fio d'água).

Em Barra do Piraí, a UEL Santa Cecília realiza, desde 1952, o desvio de cerca de dois terços das águas do RPS para o rio Guandu, o que contribuiu com a decadência econômica desse

trecho até Três Rios (Figura 4). O trecho abaixo desse município sofreu menos com os impactos da transposição, pois ali o RPS recebe a contribuição de dois importantes afluentes: os rios Paraibuna e Piabanha (Figura 5), que garantiram, a jusante dessa confluência, a manutenção das condições hidrológicas mínimas do RPS até a primeira década do século XXI. Desde 2013, porém, a segurança hídrica dos municípios a jusante da confluência vem sendo ameaçada após a entrada em operação da barragem de Anta, que represou as águas do RPS para atender a PCH de mesmo nome, integrante do AHE Simplício (Figura 20).

#### 4.3.2 Parâmetros hidrológicos

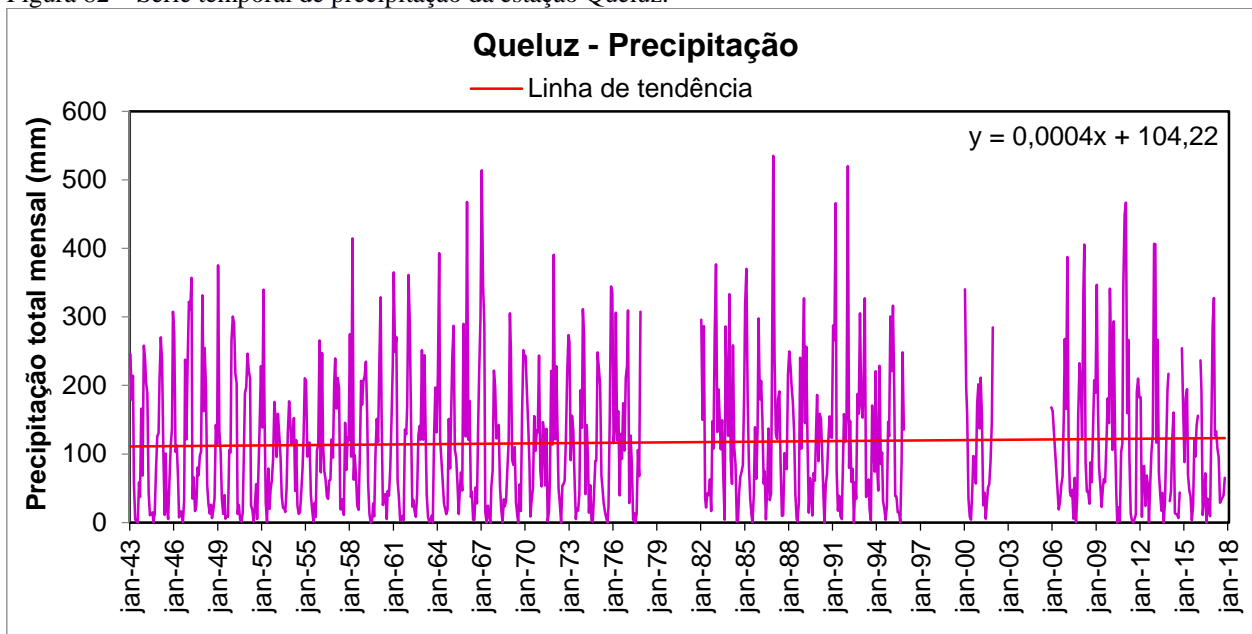
No curso médio inferior, foram utilizadas séries históricas de chuvas totais mensais de quatro estações pluviométricas, e séries de vazões ou cotas médias mensais de sete estações pluviométricas (Figura 23).

A estação pluviométrica Queluz (F, Figura 23), situada na porção inicial do curso médio inferior, a jusante das barragens Lavrinhas e Queluz (ambas sem reservatório, operando a fio d'água) e a montante da barragem (com reservatório) de Funil, possui série temporal de precipitação total mensal de 1943 a 2018, embora com lacunas em três períodos (Figura 82). As estações Volta Redonda e Moura Brasil (G e H, respectivamente, na Figura 23) estão situadas mais próximas à porção central do curso médio inferior, ambas a jusante da barragem de Funil. A primeira – cuja série temporal (incompleta) de chuvas vai de 1943 a 2018 (Figura 83) – está situada a montante da usina elevatória de Santa Cecília, onde ocorre o desvio de águas do RPS para o rio Guandu (G, Figura 23). Já a estação Moura Brasil – com série de precipitação completa de 1936 a 2018 (Figura 84) – localiza-se a jusante da barragem de Santa Cecília e a montante da barragem (com reservatório) de Anta (H, Figura 23). Finalmente, a estação pluviométrica de Anta (I, Figura 23), situada imediatamente a jusante da barragem homônima e de todas as demais barragens com reservatório existentes no RPS, situa-se na extremidade final do curso médio inferior e possui série temporal de 1944 a 2018, com dois períodos sem dados (Figura 85).

Em todas as estações pluviométricas do curso médio inferior as séries históricas de precipitação total mensal apresentaram tendência crescente ao longo das décadas analisadas

(Figuras 82 a 85). Os correlogramas das quatro séries temporais indicaram ausência de correlação serial entre os dados de dois anos consecutivos (Figura 86), conforme esperado para séries de chuvas (MARENGO; ALVES, 2005). Diante disso, aplicou-se o teste de Mann-Kendall tradicional a essas séries para avaliar a direção e a significância da tendência das mesmas. Os resultados dos testes corroboraram a tendência positiva anteriormente observada nos gráficos de precipitação total mensal, bem como a significância estatística desse comportamento (Tabela 7).

Figura 82 – Série temporal de precipitação da estação Queluz.

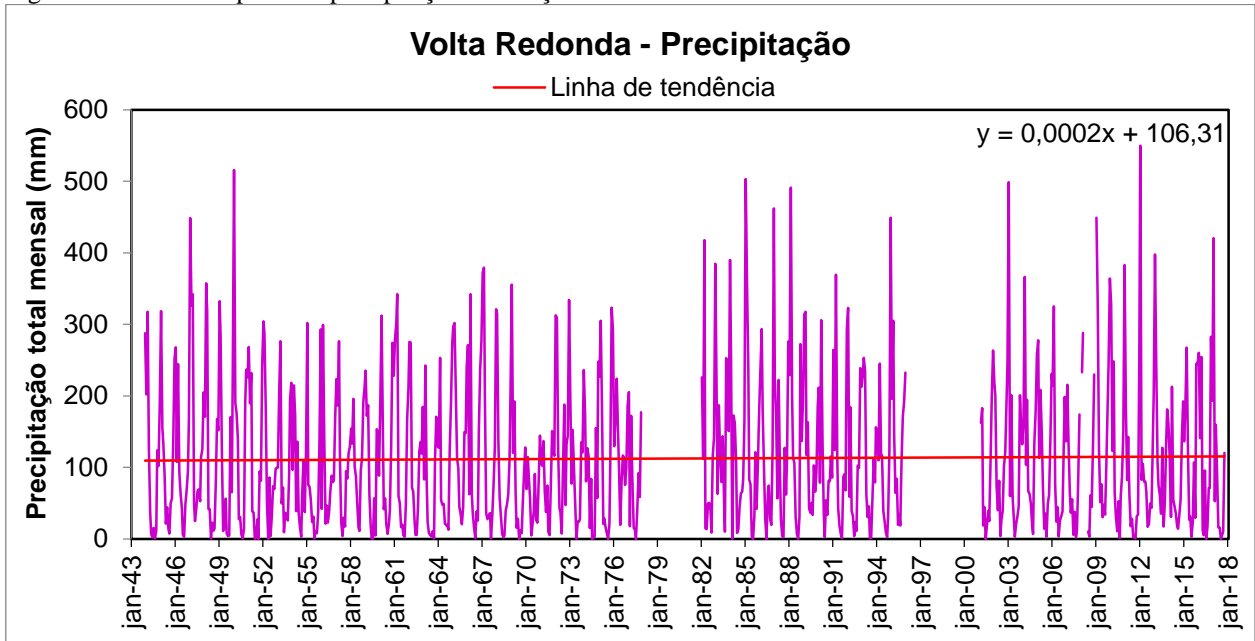


OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.



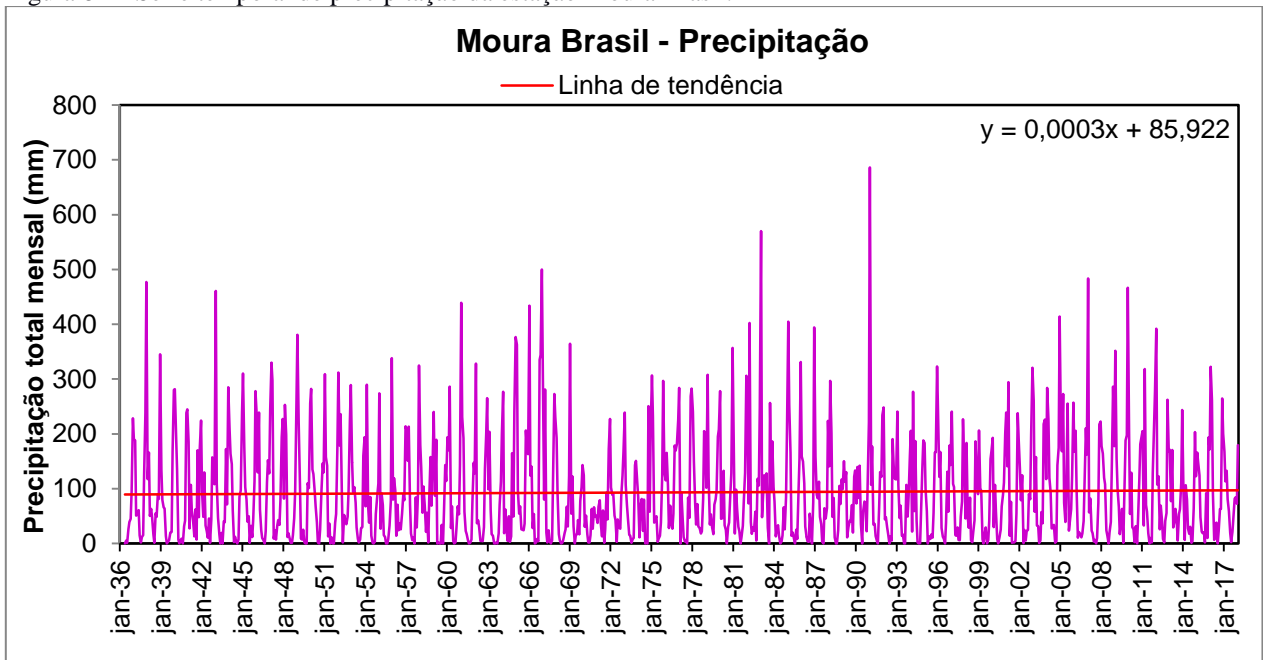
Figura 83 – Série temporal de precipitação da estação Volta Redonda.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

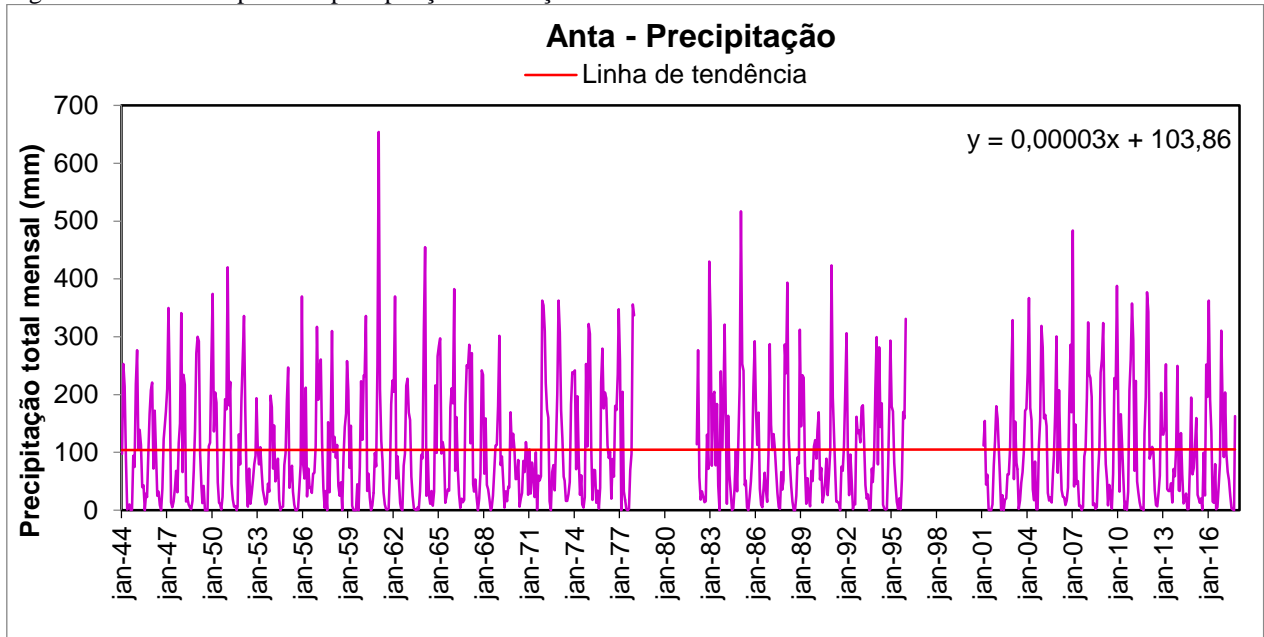
Figura 84 – Série temporal de precipitação da estação Moura Brasil.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 85 – Série temporal de precipitação da estação Anta.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

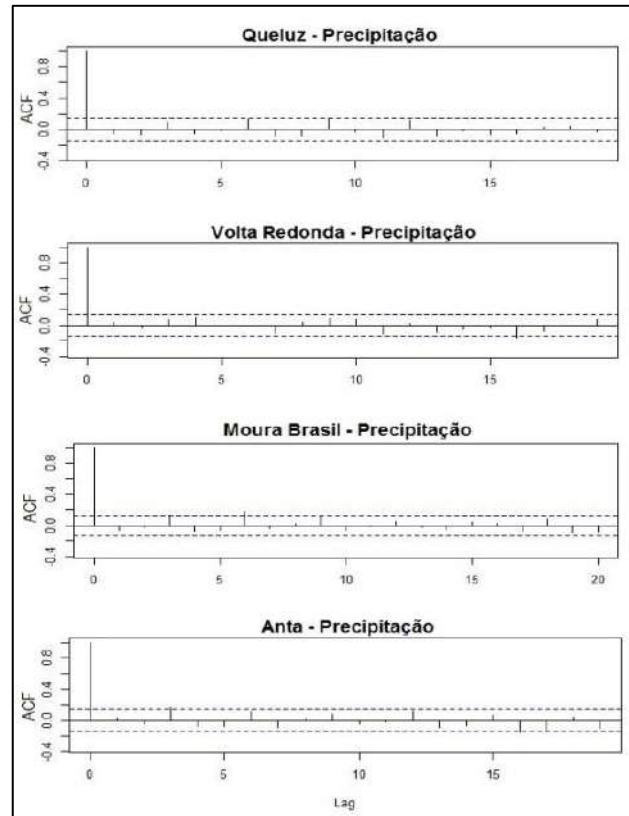
Tabela 7 – Resultado do teste de Mann-Kendall aplicado sobre as séries de chuvas totais mensais das estações Queluz, Volta Redonda, Moura Brasil e Anta.

ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA		TESTE DE MANN-KENDALL		
Código	Nome	S	Tendência	SE
F	Queluz	0,383	Positiva	Sim
G	Volta Redonda	0,375	Positiva	Sim
H	Moura Brasil	0,202	Positiva	Sim
I	Anta	0,330	Positiva	Sim

Legenda: S – teste estatístico de Mann-Kendall (Equação 1); SE – significância estatística.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 86 – Correlogramas das séries de chuvas totais mensais das estações Queluz, Volta Redonda, Moura Brasil e Anta.



OBS.: As linhas tracejadas representam os limites de confiança a 95% para a hipótese de não ter correlação serial.

Legenda: ACF – Função de autocorrelação; Lag – Intervalo de tempo em anos.

Fonte: A autora, 2019.

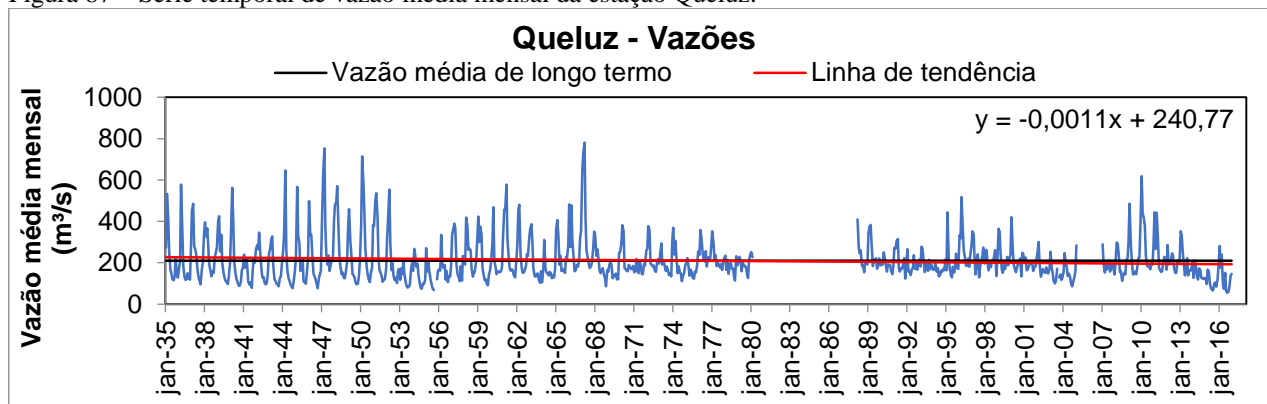
A estação fluviométrica Queluz (estação 5, Figura 23), instalada no mesmo local da estação pluviométrica homônima, localiza-se imediatamente a jusante das barragens Lavrinhas e Queluz (ambas sem reservatório) e a montante da barragem de Funil (com reservatório). Essa estação possui série de vazões de 1935 a 2016, com lacunas de 1980 a 1988 e de 2005 a 2006 (Figura 87). Sua vazão média de longo termo é 210,4 m<sup>3</sup>/s e, ao contrário do comportamento observado na série de chuvas da estação Queluz (Figura 82), a série histórica de vazões mostrou comportamento decrescente (Figura 87), com valores abaixo da média de longo termo após 1977, ano em que o maior reservatório do RPS (da barragem de Paraibuna, no curso superior) iniciou suas operações de controle de fluxo a montante.

No hidrograma da estação Queluz (Figura 87) também se observou que a amplitude de

vazão (diferença entre os valores máximos e mínimos) diminuiu ao longo das décadas. A série temporal mostrou mudanças no comportamento do fluxo fluvial em três ocasiões (Figura 87): após 1961, com o início das operações de regularização da barragem Santa Branca, a montante, quando um novo padrão de assinatura hidrológica foi observado no gráfico da série de vazões; após 1969, quando entrou no circuito de regularização o reservatório de Funil, que, embora a jusante, impactou a vazão na estação Queluz, pois suas operações hidráulicas são realizadas de maneira integrada às operações das demais barragens localizadas a montante, no curso superior, para garantir a vazão necessária para a transposição e para os demais usos da água do RPS em todos os seus cursos; e após 1977, ano de início da operação da grande barragem Paraibuna, a montante, que intensificou ainda mais o controle de vazão.

No início da década de 1950, os efeitos da grande estiagem registrada no Sudeste do Brasil nesse período (de 1952 a 1955) devem ser considerados ao avaliar a diminuição dos valores de vazão média e da amplitude entre os valores extremos (máximos e mínimos) da estação Queluz (Figura 87). A transposição de águas do RPS para o rio Guandu já existia desde 1952, mas em um ponto cerca de 100 km a jusante dessa estação; logo, não se pode afirmar que essa operação afetava, na época, os parâmetros hidrológicos da estação Queluz. Além dos impactos da estiagem de 1952-1955, também é possível observar os efeitos das estiagens de 2001 a 2003 (MARENGO; ALVES, 2005) e 2013-2014 no hidrograma da estação Queluz (Figura 87).

Figura 87 – Série temporal de vazão média mensal da estação Queluz.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

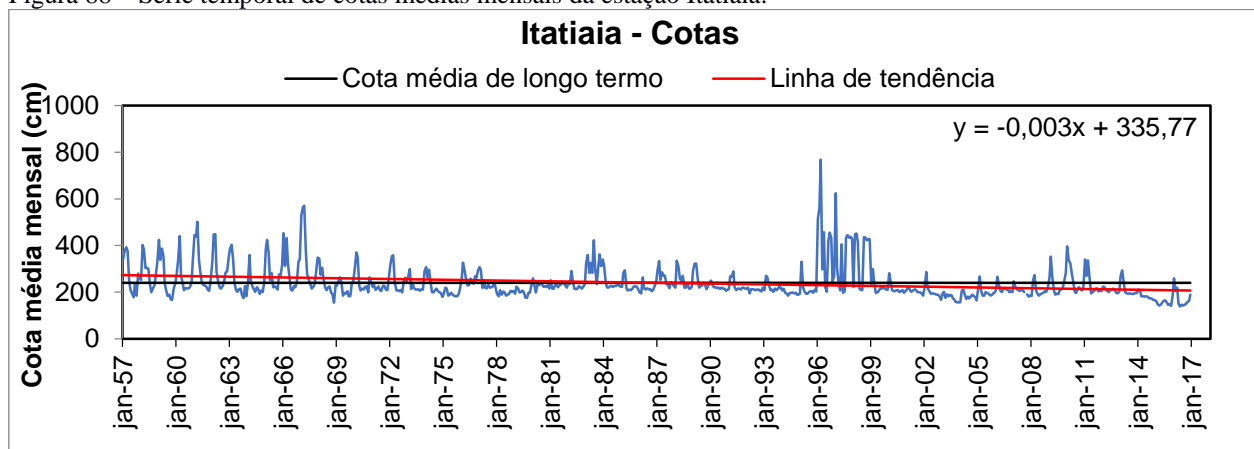
A estação fluviométrica Itatiaia (estação 6, Figura 23), imediatamente a jusante do reservatório da barragem de Funil, possui série completa de cotas médias mensais de 1957 a 2017

(Figura 88). A cota média de longo termo desse período é 240,0 cm e a linha de tendência da série histórica de cotas mostrou comportamento negativo, contrário ao observado na série de chuvas da estação Queluz (Figura 82), a mais próxima dali.

É importante salientar que, assim como observado na estação fluviométrica anterior (Queluz, Figura 87), a partir dos anos de 1961, 1969 e 1977 (quando iniciaram as operações de Santa Branca, Funil e Paraibuna, todas a montante dessa estação), a assinatura da série hidrológica mudou, refletindo a regularização do fluxo realizada por essas barragens (Figura 88). A assinatura hidrológica apresentou menor amplitude entre os valores máximos e mínimos das cotas médias mensais depois desses eventos. Em 1961, essa mudança não foi muito significativa, já que a barragem Santa Branca encontra-se relativamente mais distante que a barragem de Funil (Figura 23); a partir de 1969, porém, quando esta última (situada imediatamente a montante da estação Itatiaia) entrou em operação, a alteração na assinatura hidrológica foi marcante (Figura 88).

Os efeitos das estiagens de 2001-2003 (MARENGO; ALVES, 2005) e de 2013-2014 também estão registrados na série da estação Itatiaia (Figura 88). Entre 1997 e 1999 os valores das cotas máximas ficaram bem acima da média, provavelmente devido às chuvas intensas provocadas pela presença de forte El Niño que atuou sobre a região nesse período (INPE, 2018).

Figura 88 – Série temporal de cotas médias mensais da estação Itatiaia.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

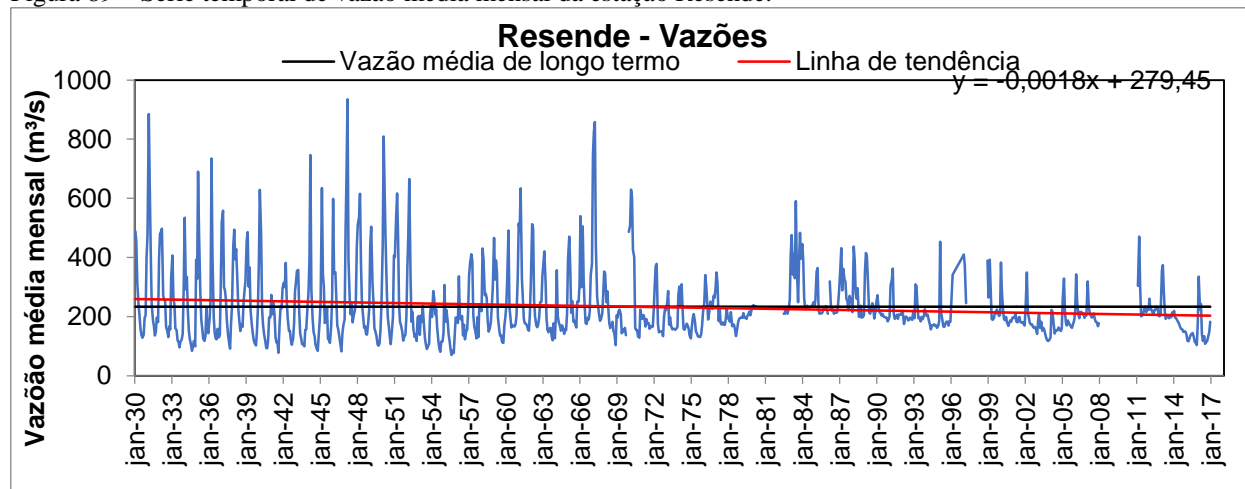
Fonte: A autora, 2019.

Situações semelhantes às anteriores foram observadas na série temporal de vazões da estação fluviométrica Resende (estação 7, Figura 23). Essa estação – também a jusante da

barragem de Funil e a cerca de 20 km desta – possui série de vazões médias mensais de 1930 a 2017, com lacunas nos períodos de 1981-1983, de 1998-1999 e de 2008-2010 (Figura 89). A vazão média de longo termo da série histórica foi de 232,9 m<sup>3</sup>/s e, a partir de 1969 – quando Funil entrou em operação – a linha de tendência da série passou a apresentar valores abaixo da média de longo termo (Figura 89). O comportamento decrescente da linha de tendência das vazões também se mostrou contrário ao comportamento observado nas séries temporais de chuvas das estações pluviométricas do entorno (Queluz e Volta Redonda, Figuras 82 e 83, respectivamente).

Assim como nas estações do curso médio inferior anteriormente analisadas, foi possível verificar no hidrograma da estação Resende (Figura 89) que, após a entrada em operação de obras de regularização de fluxo (Santa Branca, em 1961, Funil, em 1969 e Paraibuna em 1977), ocorreu significativa diminuição na amplitude de vazão (principalmente após a barragem de Funil, a mais próxima desta estação, ter entrado no circuito de regularização). As estiagens de 1952-1955, 2001-2003 (MARENCO; ALVES, 2005) e de 2013-2014 que ocorreram na Região Sudeste também impactaram o comportamento hidrológico nessa estação. Nesses períodos, o hidrograma registrou queda nos valores de vazão média (Figura 89).

Figura 89 – Série temporal de vazão média mensal da estação Resende.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

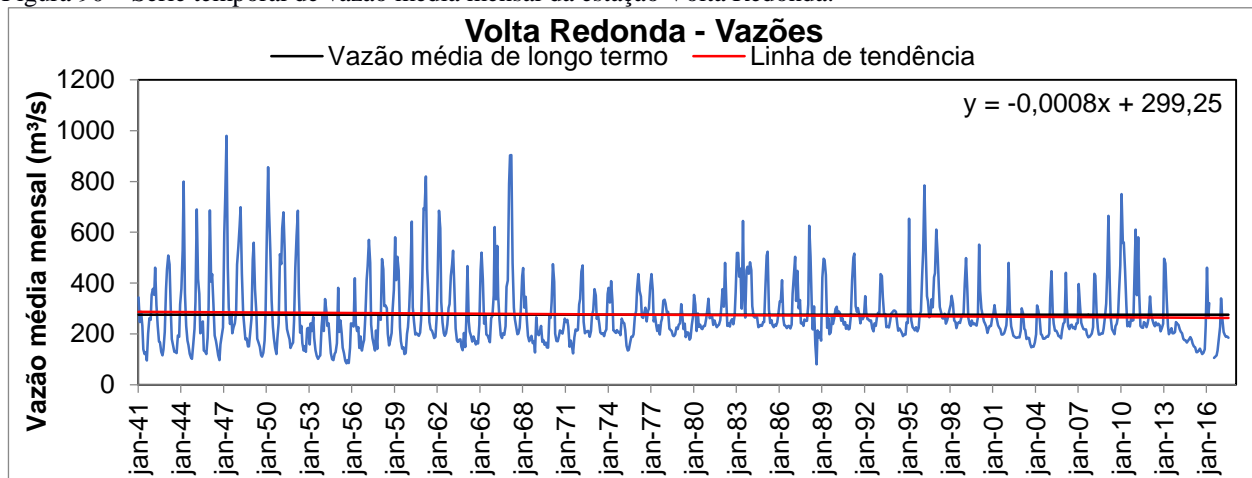
Fonte: A autora, 2019.

A estação Volta Redonda (estação 8, Figura 23), localizada mais de 50 km a jusante da barragem de Funil e a montante da elevatória de Santa Cecília (local da transposição), possui

série completa de vazões de 1941 a 2017 (Figura 90). Sua vazão média de longo termo é 275 m<sup>3</sup>/s e a linha de tendência da série também apresentou comportamento negativo, ao contrário do observado na série temporal de chuvas da estação pluviométrica de mesmo nome, situada no mesmo local (Figura 83). O hidrograma dessa estação (Figura 90) mostrou, assim como nas estações anteriores do curso médio inferior, mudança na assinatura hidrológica após a entrada em operação das obras de regularização do RPS (Santa Branca, em 1961, Funil, em 1969 e Paraibuna, em 1977). Em particular a partir de 1969, com a instalação da barragem de Funil, a amplitude de vazão diminuiu significativamente, o que se intensificou depois de 1977, quando entrou em operação a barragem Paraibuna.

Houve queda na vazão média no período em que a estiagem de 1952-1955 assolava a Região Sudeste (Figura 90). Após 1955, os parâmetros hidrológicos voltaram a subir, recuperando os valores anteriores à estiagem. Embora a transposição do RPS para o rio Guandu já ocorresse desde 1952, o local do desvio das águas situa-se 50 km a jusante dessa estação, não alterando ali, os parâmetros hidrológicos. Outras estiagens também afetaram a assinatura hidrológica na estação Volta Redonda (de 2001-2003 e de 2013-2014); nesses períodos tanto as amplitudes entre os valores extremos como as vazões médias diminuíram (Figura 90).

Figura 90 – Série temporal de vazão média mensal da estação Volta Redonda.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

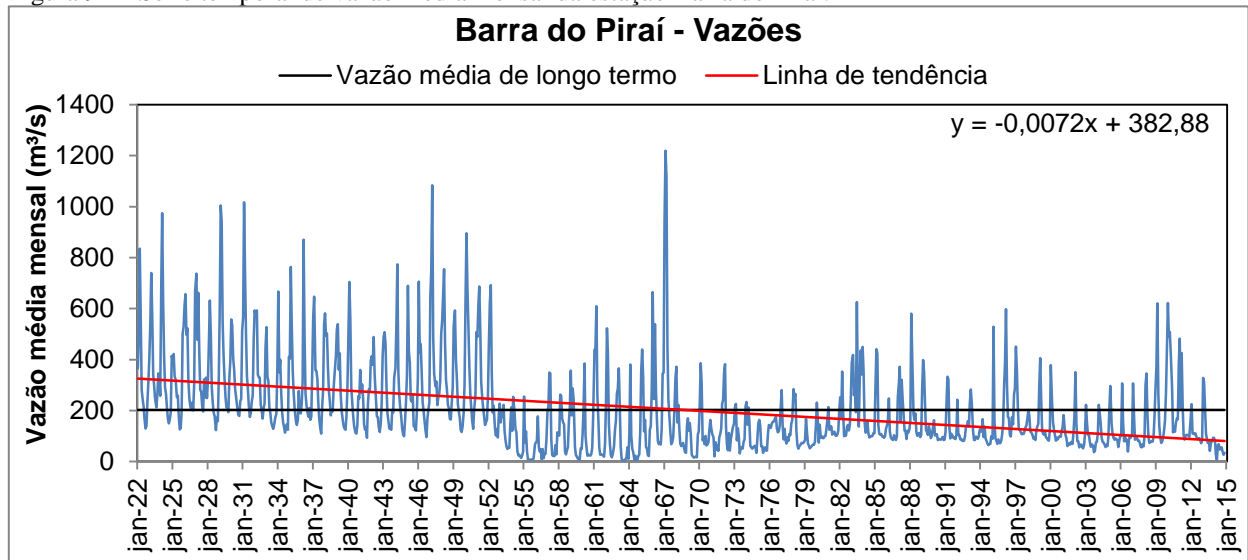
Fonte: A autora, 2019.

Localizada a jusante da barragem de Funil, e imediatamente a jusante da elevatória de Santa Cecília (transposição), a estação fluviométrica Barra do Pirai (estação 9, Figura 23), situada

entre as estações pluviométricas Volta Redonda e Moura Brasil (G e H, respectivamente, Figura 23), possui série histórica completa de vazões de 1922 a 2015 (Figura 91). A vazão média de longo termo dessa estação é 203,0 m<sup>3</sup>/s e o comportamento da série mostrou tendência negativa acentuada (Figura 91), ao contrário do comportamento das séries de chuvas das estações pluviométricas próximas (Figuras 83 e 84, respectivamente).

No hidrograma da estação Barra do Pirai foi bem significativa a mudança de comportamento hidrológico a partir do início da operação de transposição (1952). Também foram observadas alterações após a entrada em operação da barragem de Santa Branca (1961), Funil (1969) e Paraibuna (1977), quando quedas nos valores de vazão média e diminuição da amplitude de vazões extremas também foram registrados na série temporal (Figura 91). No hidrograma também se notam os efeitos das estiagens que assolaram o Sudeste brasileiro no período de 1952-1955, 2001-2003 (MARENGO; ALVES, 2005) e 2013-2014. Os efeitos da estiagem de 1952-1955 foram, nessa estação, intensificados pelo desvio de dois terços de água do RPS para o rio Guandu, a partir de 1952 (Figura 91).

Figura 91 – Série temporal de vazão média mensal da estação Barra do Pirai.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

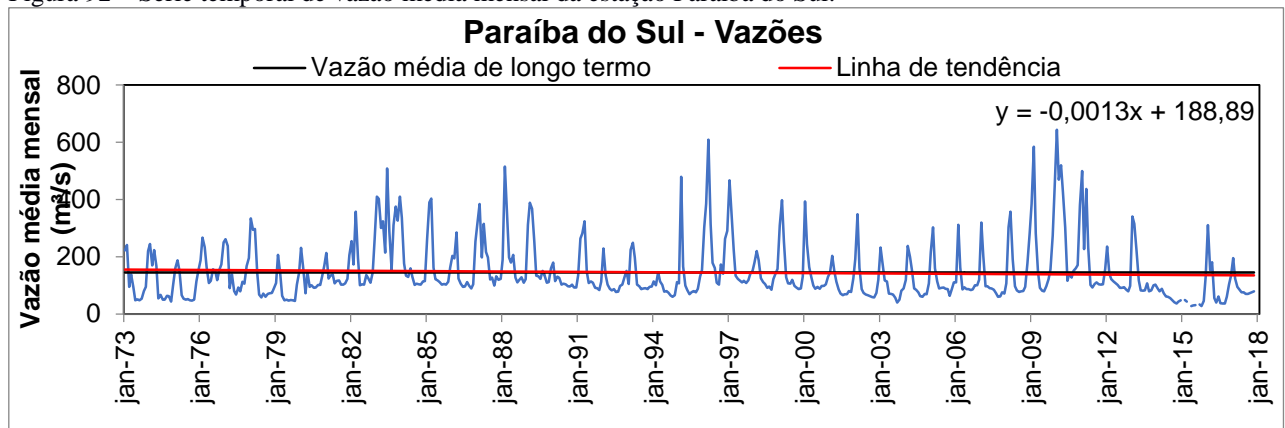
A estação fluviométrica Paraíba do Sul (estação 10, Figura 23), a jusante das barragens de Funil e da elevatória de Santa Cecília (transposição), e a montante da barragem de Anta, possui série de vazões médias mensais de 1973 a 2018 (Figura 92). A vazão média de longo termo é



145,3 m<sup>3</sup>/s e a linha de tendência mostrou comportamento ligeiramente negativo, embora a série de chuvas da estação Moura Brasil, a mais próxima da estação fluviométrica em questão (H, Figura 23), tenha apresentado comportamento oposto (Figura 84).

A série histórica de vazões da estação Paraíba do Sul não possui dados anteriores à instalação de algumas importantes obras de regularização de fluxo do RPS (como Santa Cecília/transposição, Santa Branca e Funil). Embora essa estação possua dados anteriores a 1977, quando a barragem Paraibuna (a montante, no curso superior) entrou em operação, a hidrógrafa não mostra claramente mudanças significativas no comportamento da vazão após essa data (Figura 92). Isso talvez tenha acontecido em função do local do RPS onde esta estação está localizada, a mais de 400 km a jusante da barragem Paraibuna. É provável que o impacto mais significativo nesse trecho tenha ocorrido a partir de 1952, quando entrou em operação a transposição para o rio Guandu, realizada na UEL Santa Cecília (cerca de 50 km a montante). Porém, a série temporal não possui dados dessa época para corroborar essa hipótese (Figura 92). A estiagem que assolou o Sudeste brasileiro em 2013-2014 deixou marcas no hidrograma da série de vazões, no qual foi observada queda acentuada nos valores médios e na amplitude dos valores extremos de vazão (Figura 92).

Figura 92 – Série temporal de vazão média mensal da estação Paraíba do Sul.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

Finalmente, a estação fluviométrica Anta (estação 11, Figura 23), situada na porção final do curso médio inferior e imediatamente a jusante da barragem de Anta, possui série completa de vazões médias mensais de 1923 a 2017 (Figura 93). A vazão média de longo termo é 438,4 m<sup>3</sup>/s e

a linha de tendência da série temporal apresentou comportamento decrescente acentuado, contrário ao das chuvas da estação pluviométrica Anta (Figura 85), no mesmo local (I, Figura 23).

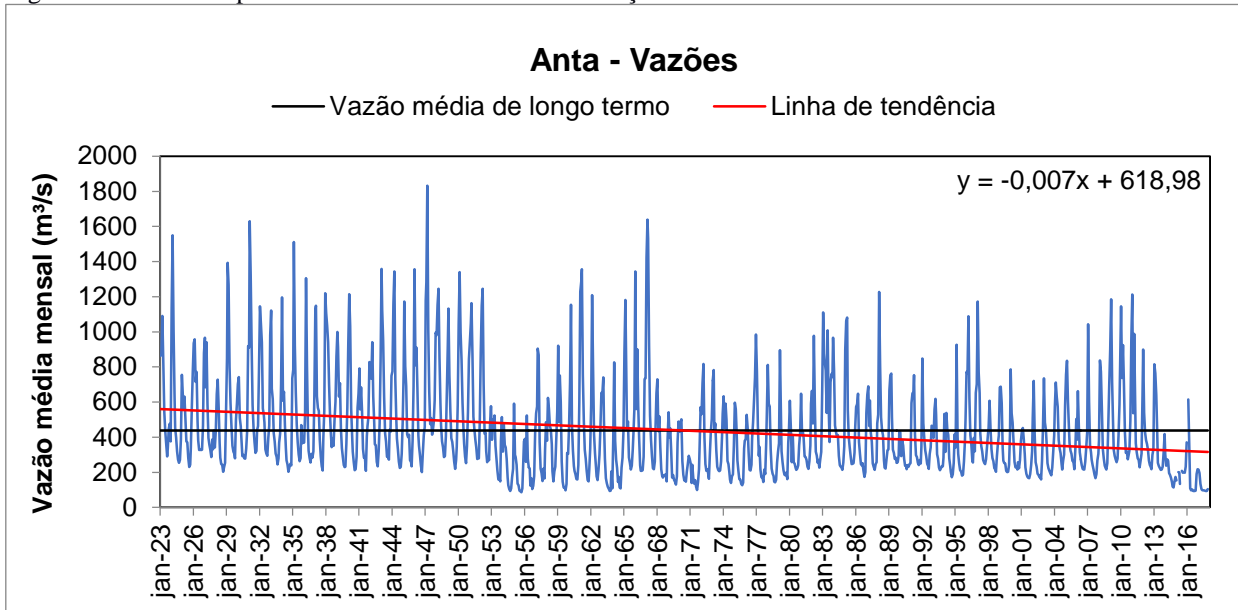
Os efeitos da transposição do RPS para o rio Guandu (a partir de 1952) e da regularização de fluxo realizada a montante, pela barragem de Funil (desde 1969), foram observados no comportamento hidrológico da série temporal desta estação (Figura 93). Após esses anos, ocorreu queda acentuada nos valores de vazão média e na amplitude entre os extremos de vazão, comportamento típico de um rio regularizado (Figura 93).

A partir de 1961 e 1977, quando entraram em operação as barragens Santa Branca e Paraibuna, o hidrograma não mostrou mudanças muito significativas (Figura 93), provavelmente devido à distância dessas obras à estação Anta (que está bem mais próxima de Funil que daquelas) e devido à contribuição hídrica recebida por alguns afluentes a montante, como os rios Paraibuna e Piabanha (Figura 23).

A estiagem de 1952-1955 acentuou os efeitos da transposição na assinatura hidrológica dessa estação; os períodos de seca de 2001-2003 (MARENGO; ALVES, 2005) e de 2013-2014 também puderam ser percebidos no gráfico, que registrou queda dos valores de vazão (Figura 93). A partir de 2013, além dos efeitos da estiagem, a diminuição dos valores de vazão pode também ser atribuída à regularização de fluxo que a barragem de Anta começou a realizar a partir do final daquele ano, quando seu reservatório entrou em operação (Figura 93).

Os correlogramas dos dados de vazão média mensal e de cotas médias mensais das estações fluviométricas do curso médio inferior (Figura 94) mostraram existência de correlação serial, principalmente entre os dados de um determinado ano e do ano anterior, o que é esperado quando se trata de séries hidrológicas de rios submetidos à regularização. Assim, para avaliar o grau de significância estatística das linhas de tendência das séries de vazões/cotas aplicou-se o teste Sazonal de Mann-Kendall em substituição ao teste de Mann-Kendall tradicional, este último mais adequado a séries sem autocorrelação. Na aplicação do teste utilizaram-se dados dos meses de pico de vazão (dezembro a fevereiro), que são os mais afetados pelo controle de fluxo realizado pelas barragens.

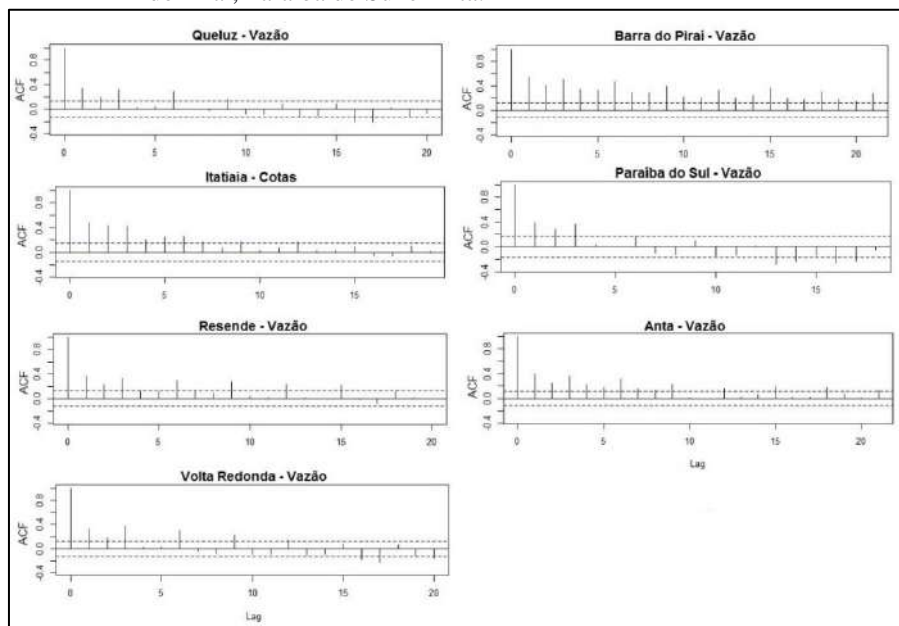
Figura 93 – Série temporal de vazão média mensal da estação Anta.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência da série temporal obtida por regressão linear; a equação da reta está representada no canto superior direito do gráfico.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 94 – Correlogramas das séries temporais de vazões ou cotas médias mensais das estações Queluz, Itatiaia, Resende, Volta Redonda, Barra do Pirai, Paraíba do Sul e Anta.



OBS.: As linhas tracejadas representam os limites de confiança a 95% para a hipótese de não ter correlação serial.

Legenda: ACF – Função de autocorrelação; Lag – Intervalo de tempo em anos.

Fonte: A autora, 2019.

O teste Sazonal de Mann-Kendall, aplicado sobre as séries temporais de vazão média mensal e cotas médias mensais das estações do curso médio inferior, confirmou a tendência negativa e a significância estatística das mesmas (Tabela 8), corroborando os resultados obtidos anteriormente por meio de regressão linear (Figuras 87 a 93).

Tabela 8 – Resultados do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre as séries temporais de vazões ou cotas médias mensais das estações Queluz, Itatiaia, Resende, Volta Redonda, Barra do Piraí, Paraíba do Sul e Anta.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA		TESTE SAZONAL DE MANN-KENDALL		
Código	Nome	S	Tendência	SE
5	Queluz	-0,250	Negativa	Sim
6	Itatiaia	-0,336	Negativa	Sim
7	Resende	-0,253	Negativa	Sim
8	Volta Redonda	-0,243	Negativa	Sim
9	Barra do Piraí	-0,344	Negativa	Sim
10	Paraíba do Sul	-0,289	Negativa	Sim
11	Anta	-0,321	Negativa	Sim

Legenda: S – teste estatístico de Mann-Kendall (Equação 1); SE – significância estatística.

Fonte: A autora, 2019.

Assim como aconteceu nas séries temporais da estação fluviométrica Santa Branca (Figura 32), no curso superior, e em todas as séries das estações do curso médio superior (Figuras 59 e 60), nas séries hidrológicas do curso médio inferior (Figuras 87 a 93) também foi observada tendência negativa nas décadas analisadas. No entanto, as séries de chuvas das estações desse curso (Figuras 82 a 85) apresentaram tendência ligeiramente crescente, assim como as séries das estações pluviométricas dos dois cursos a montante (Figuras 28, 29 e 55 a 57).

A diminuição dos valores de cotas/vazões e a mudança na assinatura hidrológica das séries hidrológicas das estações a jusante de Funil (Figuras 88 a 90), de Santa Cecília/transposição (Figuras 91 e 93) e de Anta (Figura 93) logo após o início de suas operações, sugerem uma relação direta entre as operações de regularização realizadas por essas barragens (com reservatório) e as alterações no comportamento hidrológico do RPS no curso médio inferior. O impacto nas séries hidrológicas tornou-se ainda mais acentuado quando eventos climáticos atípicos (grandes estiagens) atuaram simultaneamente ao controle de fluxo, diminuindo ainda mais os parâmetros hidrológicos.

O mesmo não se pode dizer sobre as barragens sem reservatório (Lavrinhas e Queluz, Figura 23) no curso médio inferior. Em 2011, quando elas entraram em operação, nas estações a sua jusante (Figuras 87, 88, 90, 91, 92 e 93) não foram registradas quedas nos valores de vazão e/ou mudanças na assinatura hidrológica tão significativas como aquelas registradas após a instalação das barragens com reservatório. Essas barragens operam a fio d'água para geração de energia e, a despeito do impacto ambiental que possam ocasionar, não alteraram os parâmetros hidrológicos como as barragens com reservatório.

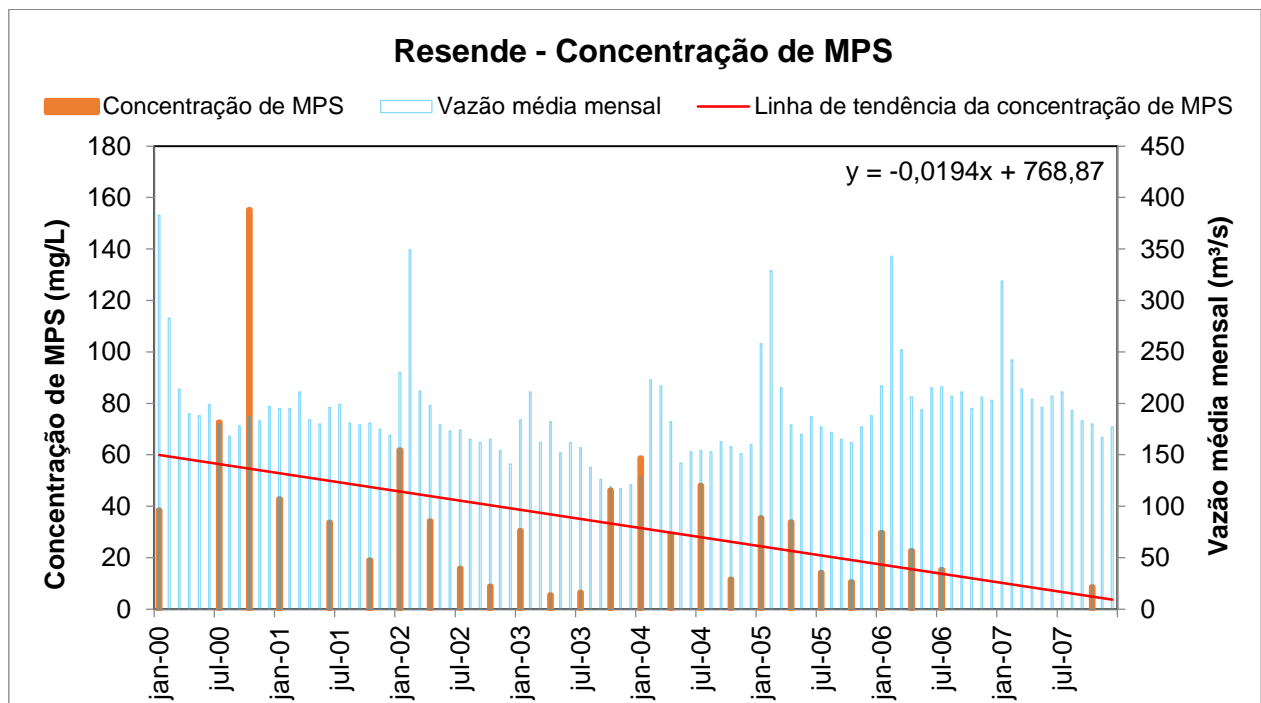
#### 4.3.3 Parâmetros sedimentológicos

No curso médio inferior há três estações fluviométricas que possuem dados de concentração de MPS: estação Resende (estação 7, Figura 23), a jusante da barragem de Funil e a montante da UEL de Santa Cecília (transposição); estação Barra do Piraí (estação 9, Figura 23), a jusante de Funil e de Santa Cecília; e a estação Anta (estação 11, Figura 23), imediatamente a jusante da barragem homônima. Apesar de estas estações possuírem várias décadas de dados de cotas/vazões, as séries de concentração de MPS não são muito longas e apresentam muitas discontinuidades em função da irregularidade na frequência das amostragens (Quadro 4).

A porção do Vale do RPS que vai desde os municípios paulistas de Cruzeiro e Queluz (na parte mais a montante do curso médio inferior) até o município fluminense de Vassouras (na parte mais central desse curso) é uma região de encostas íngremes cobertas por ralas pastagens. Nelas estão presentes muitas ravinas e voçorocas, o que contribui com a acelerada erosão, principalmente entre o canal fluvial e as margens de Rodovia Presidente Dutra. O volume de sedimentos que é carregado para o rio nesse trecho é incalculável, causando elevada turbidez da água (MARENGO; ALVES, 2005). Apesar disso, a concentração de MPS nas amostragens da estação Resende (localizada nesse trecho) mostrou comportamento decrescente no período de 2000 a 2007 (Figura 95). Os valores mais elevados de concentração de MPS normalmente coincidiram com os meses chuvosos (verão). No período de 2000 a 2007, o valor da concentração média de MPS dessa estação foi 34,2 mg/L, mas valores acima de 60 mg/L foram registrados em algumas ocasiões (Figura 95). O valor máximo observado foi de 155,3 mg/L, no verão de 2000.

Durante a estiagem que assolou a Região Sudeste no período de 2001 a 2003, o valor máximo de concentração de MPS das amostras existentes ficou em torno de 60 mg/L; após esse período, os valores voltaram a aumentar um pouco, mas a partir de 2005 nenhuma das amostras apresentou valor acima da média, nem mesmo nos meses chuvosos de verão. Uma série de concentração de MPS mais longa, com dados anteriores à instalação das barragens com reservatório, contribuiria para uma análise mais consistente.

Figura 95 – Série temporal de concentração de MPS e vazão média mensal da estação Resende.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência obtida por regressão linear para a concentração de MPS; a equação da reta está representada no canto superior direito.

Legenda: MPS – Material particulado em suspensão.

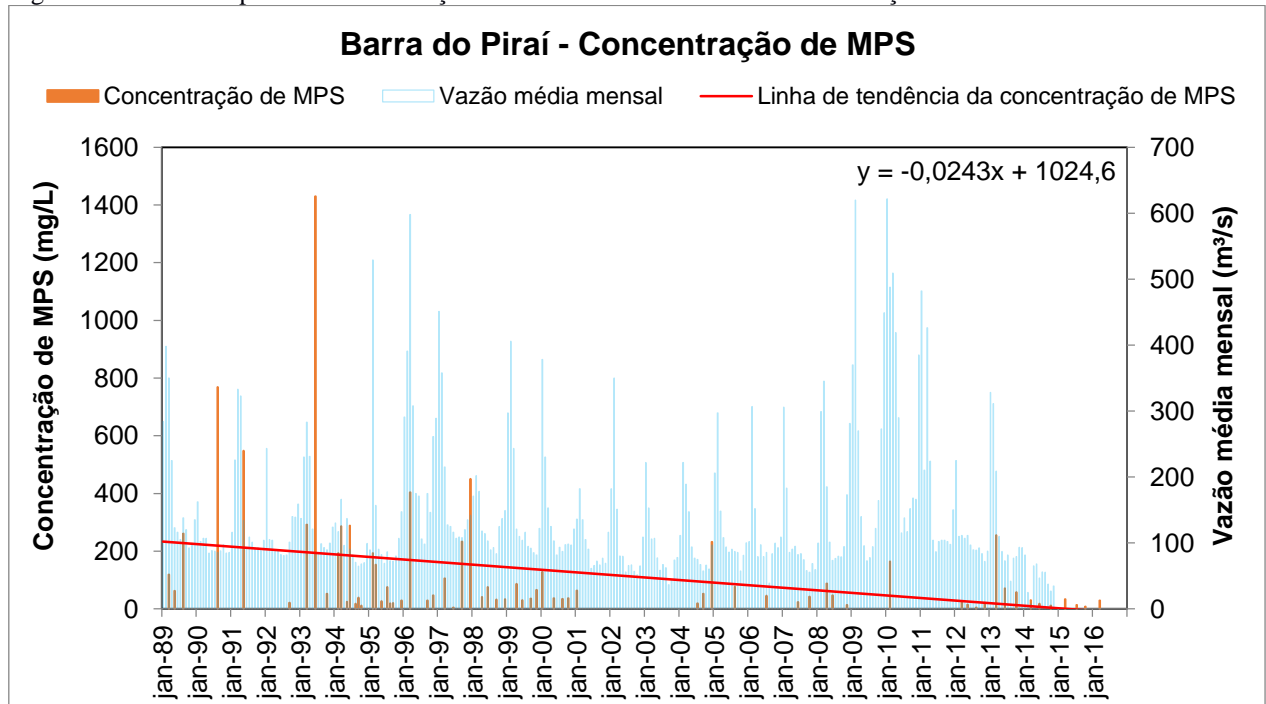
Fonte: A autora, 2019.

A estação Barra do Pirai possui série de concentração de MPS mais longa, de 1989 a 2016 (Figura 96), embora também com irregularidades na frequência de amostragens. Assim como na série da estação Resende (Figura 95), a linha de tendência da série temporal dessa estação também mostrou comportamento negativo. No período de amostragens, a média de concentração

de MPS foi 122 mg/L. Até a década de 1990 foram registrados valores de pico bem elevados, atingindo, em algumas ocasiões, mais de 400 mg/L. Porém, após 2005, a ocorrência de valores elevados diminuiu bastante, ultrapassando a média da série temporal (122 mg/L) somente três vezes (Figura 96).

Além da diminuição dos parâmetros hidrológicos observada nas estações fluviométricas Resende e Barra do Pirai (Figuras 89 e 91), um fator importante deve ser considerado na análise do comportamento decrescente das séries de concentração de MPS destas estações: a retenção de sedimentos no reservatório de Funil que, conforme relatado por Marengo e Alves (2005), sofre intenso processo de assoreamento.

Figura 96 – Série temporal de concentração de MPS e vazão média mensal da estação Barra do Pirai.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência obtida por regressão linear para a concentração de MPS; a equação da reta está representada no canto superior direito.

Legenda: MPS – Material particulado em suspensão.

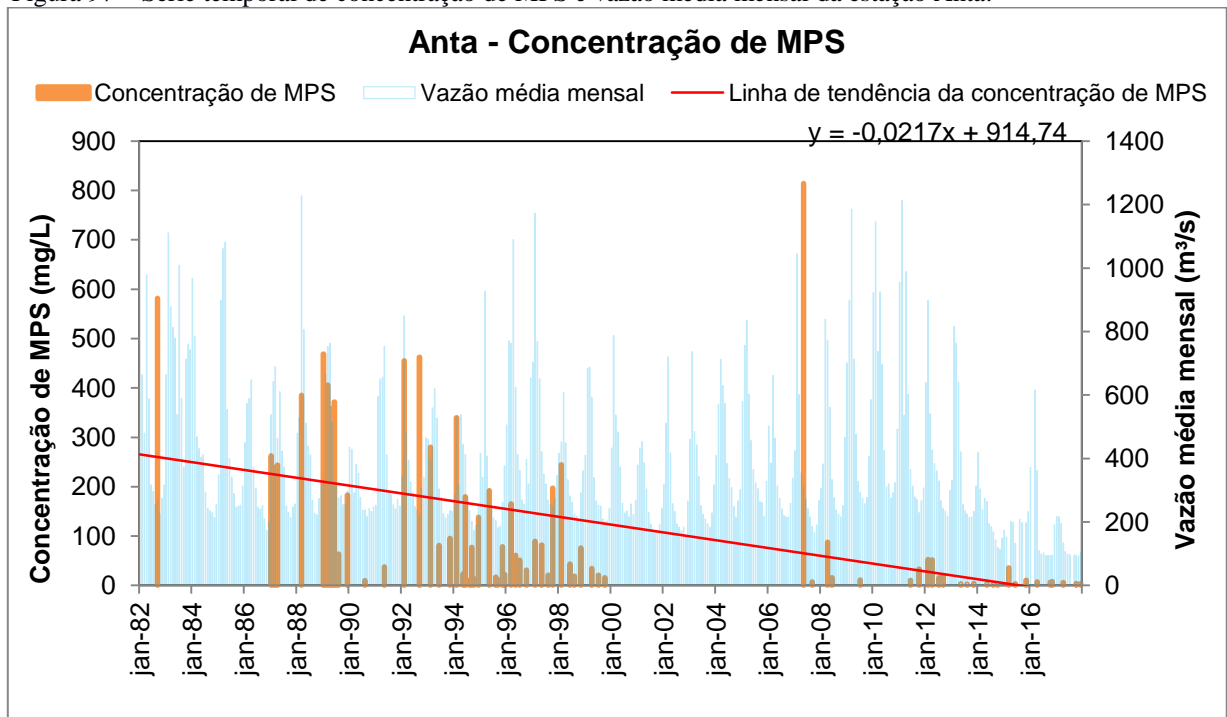
Fonte: A autora, 2019.

Finalmente, a estação fluviométrica de Anta possui série de concentração de MPS de 1982 a 2017 (Figura 97). Assim como observado nas demais estações do curso médio inferior, a série de concentração de MPS de Anta mostrou tendência decrescente ao longo dos anos. Nas décadas de 1980-2000 (período de maior frequência amostral) a média dos valores de concentração de

MPS era de 170,3 mg/L. Houve uma lacuna nas amostragens no período de 2001 a 2007 e, de 2008 a 2017, a média de concentração de MPS caiu para 47,3 mg/L, mesmo considerando, no cálculo da mesma, a concentração atípica (superior a 800 mg/L) observada em 2007 (Figura 97). Se esse valor não tivesse sido utilizado no cálculo da média, ela ficaria em torno de 17 mg/L.

A partir de 2013, quando o reservatório de Anta, imediatamente a montante dessa estação (estação 11, Figura 23) entrou em operação, a média dos valores de concentração de MPS caiu para 8,1 mg/L. Nesse período, além da queda nos parâmetros hidrológicos, também ocorreu a estiagem de 2013-2014 na Região Sudeste, o que certamente acentuou a diminuição da concentração de MPS. Após o fim da estiagem, os valores se mantiveram baixos, e nem mesmo a contribuição de água e sedimentos de dois importantes afluentes do RPS – os rios Paraibuna e Piabanha – imediatamente a montante da estação de Anta (estação 11, Figura 23) conseguiu reverter a situação (Figura 97).

Figura 97 – Série temporal de concentração de MPS e vazão média mensal da estação Anta.



OBS.: Em vermelho, a linha de tendência obtida por regressão linear para a concentração de MPS; a equação da reta está representada no canto superior direito.

Legenda: MPS – Material particulado em suspensão.

Fonte: A autora, 2019.

Ao contrário do ocorrido com as séries de vazões/cotas das estações fluviométricas do



curso médio inferior (onde a regularização do fluxo gerou autocorrelação entre os dados de um ano e os do ano anterior), não foi detectada correlação serial nos correlogramas das séries temporais de concentração de MPS das estações Resende e Barra do Pirai (Figura 98). Essa ausência de autocorrelação pode ser atribuída ao pequeno número de amostras e à irregularidade das mesmas (os meses de amostragem de um determinado ano nem sempre coincidiram com aqueles do ano seguinte). Caso as amostragens tivessem sido mais frequentes e regulares, a correlação serial provavelmente ocorreria, conforme esperado em séries hidrológicas de rios regularizados. Assim, nenhum teste de tendência estatística foi aplicado às séries de concentração de MPS das estações Resende e Barra do Pirai para confirmar a direção da tendência e a significância estatística do comportamento negativo indicado pela regressão linear de ambas (Figuras 95 e 96).

Em contrapartida, na série da estação Anta, que apresentou relativamente maior regularidade nas amostragens nos períodos de 1980-2000 e de 2011-2017 (realizadas nos mesmos meses do ano), foi observada autocorrelação entre os dados de um ano e do ano anterior (Figura 98), como ocorreu com a série de vazões dessa estação (Figura 93), e conforme esperado para séries hidrológicas de rios regularizados. Por isso, o teste Sazonal de Mann-Kendall foi aplicado à série temporal dessa estação, confirmando, com significância estatística, a tendência negativa apontada pela regressão linear (Figura 97 e Tabela 9).

Tabela 9 – Resultado do teste Sazonal de Mann-Kendall aplicado sobre a série temporal de concentração de MPS da estação Anta.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA		TESTE SAZONAL DE MANN-KENDALL		
Código	Nome	S	Tendência	SE
11	Anta	-0,0636	Negativa	Sim

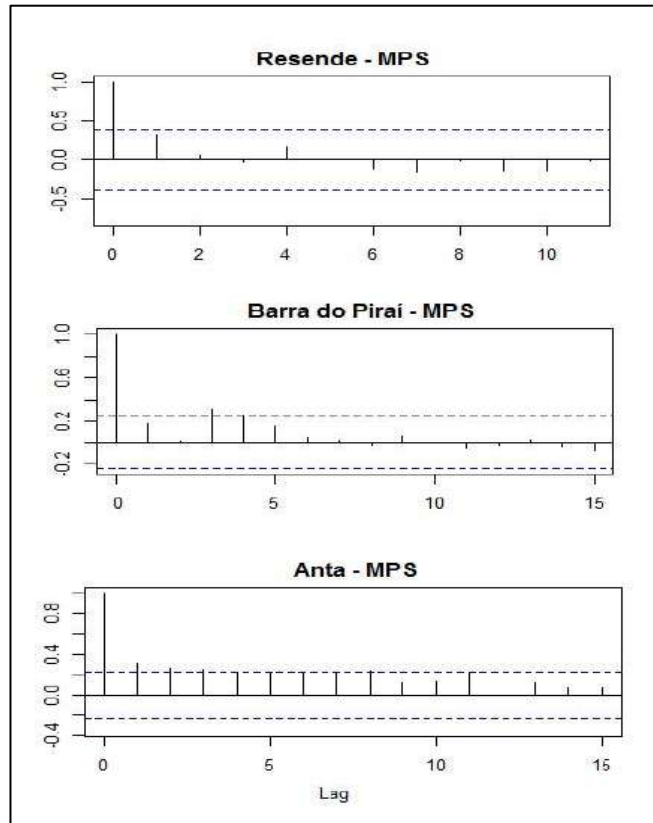
Legenda: S – teste estatístico de Mann-Kendall (Equação 1); SE – significância estatística.

Fonte: A autora, 2019.

Durante a realização deste trabalho, foram coletadas amostras superficiais de água de um ponto localizado a montante e outro a jusante da barragem de Anta (Figura 24) por um período de dois anos (julho de 2015 a junho de 2017). Após a filtração das amostras, valores mais elevados de concentração de MPS foram observados no verão (período mais chuvoso) em ambos os pontos de amostragem. Os valores de concentração de MPS do ponto pré-barragem foram geralmente mais

elevados que aqueles do ponto pós-barragem (Quadro 7 e Figura 99).

Figura 98: Correlogramas das séries temporais de concentração de MPS das estações Resende, Barra do Pirai e Anta.



OBS.: As linhas tracejadas representam os limites de confiança a 95% para a hipótese de não ter correlação serial.

Legenda: ACF – Função de autocorrelação; Lag – Intervalo de tempo em anos.

Fonte: A autora, 2019.

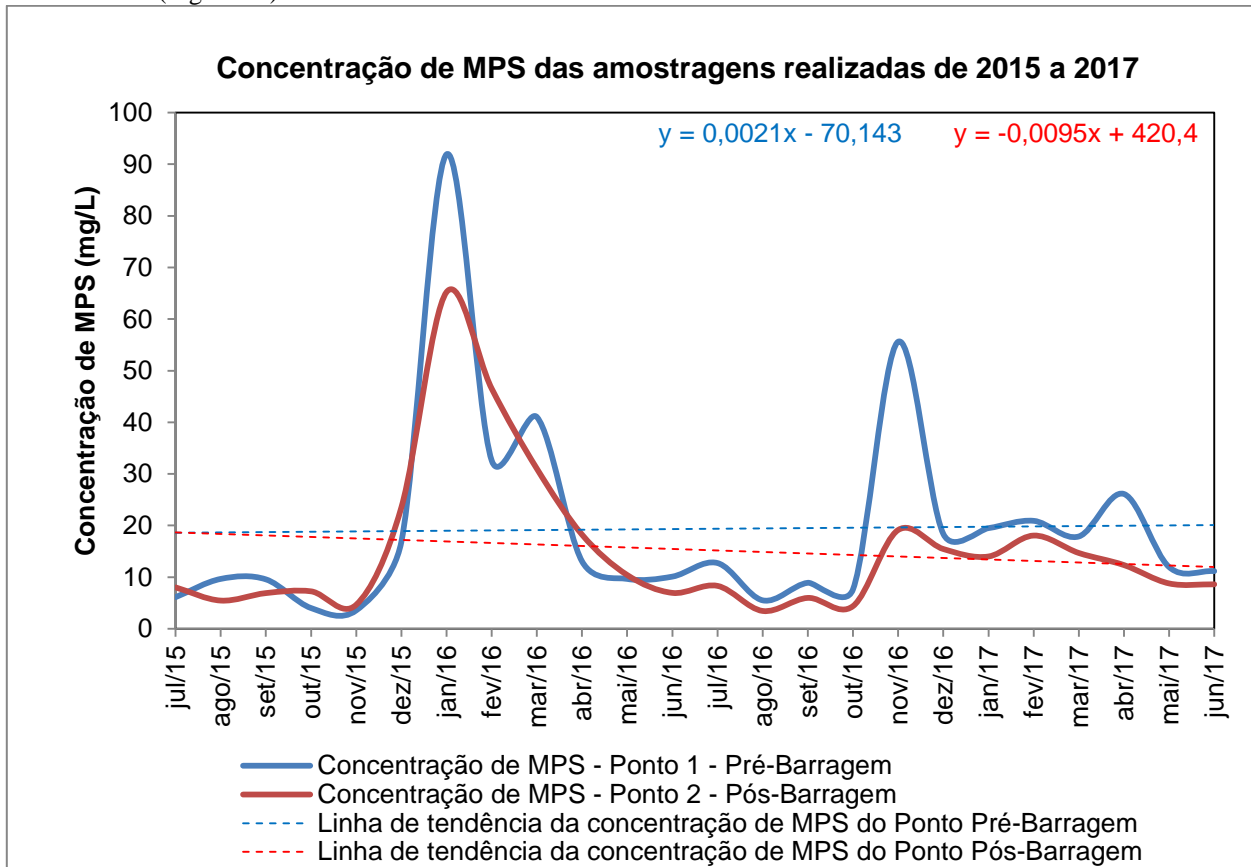
Quadro 7 – Concentração de MPS (mg/L) obtidos a partir de filtração das amostras de superfície da água coletadas nos pontos 1 (pré-barragem) e 2 (pós-barragem) do RPS (localização na Figura 24).

DATA	PONTO DE COLETA	MPS (mg/l)	DATA	PONTO DE COLETA	MPS (mg/l)
jul/15	1 - PRÉ-BARRAGEM	6,12	jul/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	12,73
	2 - PÓS-BARRAGEM	8,02		2 - PÓS-BARRAGEM	8,31
ago/15	1 - PRÉ-BARRAGEM	9,66	ago/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	5,51
	2 - PÓS-BARRAGEM	5,46		2 - PÓS-BARRAGEM	3,45
set/15	1 - PRÉ-BARRAGEM	9,57	set/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	8,91
	2 - PÓS-BARRAGEM	6,91		2 - PÓS-BARRAGEM	5,98
out/15	1 - PRÉ-BARRAGEM	4,01	out/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	7,64
	2 - PÓS-BARRAGEM	7,25		2 - PÓS-BARRAGEM	4,39
nov/15	1 - PRÉ-BARRAGEM	3,56	nov/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	55,61
	2 - PÓS-BARRAGEM	4,65		2 - PÓS-BARRAGEM	19,14
dez/15	1 - PRÉ-BARRAGEM	16,86	dez/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	18,37
	2 - PÓS-BARRAGEM	23,52		2 - PÓS-BARRAGEM	15,45
jan/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	91,91	jan/17	1 - PRÉ-BARRAGEM	19,5
	2 - PÓS-BARRAGEM	65,22		2 - PÓS-BARRAGEM	14,0
fev/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	32,59	fev/17	1 - PRÉ-BARRAGEM	20,91
	2 - PÓS-BARRAGEM	46,52		2 - PÓS-BARRAGEM	18,06
mar/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	41,02	mar/17	1 - PRÉ-BARRAGEM	17,88
	2 - PÓS-BARRAGEM	31,01		2 - PÓS-BARRAGEM	14,68
abr/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	13,06	abr/17	1 - PRÉ-BARRAGEM	26,11
	2 - PÓS-BARRAGEM	18,24		2 - PÓS-BARRAGEM	12,34
mai/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	9,66	mai/17	1 - PRÉ-BARRAGEM	11,95
	2 - PÓS-BARRAGEM	10,41		2 - PÓS-BARRAGEM	8,78
jun/16	1 - PRÉ-BARRAGEM	10,1	jun/17	1 - PRÉ-BARRAGEM	11,16
	2 - PÓS-BARRAGEM	6,95		2 - PÓS-BARRAGEM	8,61

Fonte: A autora, 2019.

O comportamento da série de amostragens foi decrescente de 2015 a 2017 para as amostras do ponto pós-barragem, enquanto para as amostras do ponto pré-barragem, ligeiramente positiva (Figura 99). Embora valores superiores a 100 mg/L tenham sido registrados antes de 2015 na estação fluviométrica da ANA mais próxima dos locais de amostragens (estação 11/Anta, Figuras 23 e 97), ao longo dos dois anos de levantamentos para este trabalho nenhuma das amostras superou esse valor, nem mesmo nos períodos mais chuvosos do verão de 2015-2016, quando Furnas liberou grande volume de água para controlar as inundações que ocorreram nos municípios a montante. O maior valor encontrado no ponto pré-barragem foi em torno de 90 mg/L, em janeiro de 2016, e no ponto pós-barragem, cerca de 65 mg/L, na mesma data (Figura 99).

Figura 99 – Concentração de MPS determinado após filtração das amostras superficiais de água coletadas a montante (Ponto 1 – Pré-Barragem) e a jusante (Ponto 2 – Pós-Barragem) da barragem de Anta (Figura 24).



OBS.: As equações das linhas de tendência estão na parte superior do gráfico, nas respectivas cores dessas linhas.

Fonte: A autora, 2019.

O ponto pós-barragem, selecionado para as amostragens mensais deste trabalho, localiza-se próximo à estação fluviométrica de Anta, da ANA (Figura 24), ambos a jusante da barragem homônima. Embora as amostragens de MPS da estação da ANA tenham sido realizadas durante vários anos, como as mesmas não possuem regularidade mensal, somente em cinco ocasiões, de 2015 a 2017 (período das coletas mensais de água realizadas para este trabalho), houve levantamento de dados naquela estação. Comparando-se os valores das cinco amostragens da estação fluviométrica da ANA com as realizadas no ponto pós-barragem (nos mesmos meses) foi possível observar semelhança entre os valores de concentração de MPS, embora em nenhuma ocasião os dias das coletas da ANA coincidiram com aqueles das coletas realizadas para este trabalho. Informações sobre as condições meteorológicas das datas das amostragens, explicam as discrepâncias encontradas entre os dados (Quadro 8). Em outubro de 2016, por exemplo, com diferença de apenas

dois dias entre as coletas, os valores mostraram a menor diferença; o valor ligeiramente maior da amostra da ANA pode ser explicado pela ocorrência de chuva no dia (Quadro 8).

Quadro 8 – Concentração de MPS obtida a partir das amostras de água coletadas no ponto 2 (pós-barragem) e obtidos da estação fluviométrica de Anta (ANA) e informações pluviométricas dos períodos das amostragens.

Ponto de Coleta 2 (Pós-barragem)			Estação Fluviométrica de Anta (ANA)		
Data	MPS (mg/L)	Tempo	Data	MPS (mg/L)	Tempo
02/11/2015	4,65	Muita chuva no dia anterior à coleta	05/11/2015	10,8	Muita chuva nos dois dias anteriores à coleta
30/04/2016	18,24	Chuva fina nos dois dias anteriores à coleta	21/04/2016	7,5	Tempo bom no dia da coleta e nos dias anteriores
02/10/2016	4,39	Tempo bom no dia e nos dias anteriores à coleta	04/10/2016	6,9	Chuva no dia da coleta
13/11/2016	19,1	Muita chuva nos três dias anteriores à coleta	28/11/2016	8,1	Tempo bom no dia e na semana anterior à coleta
14/04/2017	12,3	Chuva fina durante toda a semana anterior à coleta	28/04/2017	6,0	Tempo bom no dia e na semana anterior à coleta

Fonte: A autora, 2019 (filtração de amostras coletadas para este trabalho), ANA, 2010 e INMET, 2018.

A série de amostragens mensais realizadas durante dois anos nos pontos pré e pós-barragem de Anta, apontaram valores de concentração de MPS mais elevados no ponto pré-barragem. No ponto pós-barragem, além de valores mais baixos, a série mostrou comportamento negativo de 2015 a 2017, corroborando, assim, a hipótese de que, graças à retenção de sedimentos em seu reservatório, a barragem de Anta vem impactando a concentração de MPS do fluxo fluvial a sua jusante.

#### 4.3.4 Morfologia de vista em planta

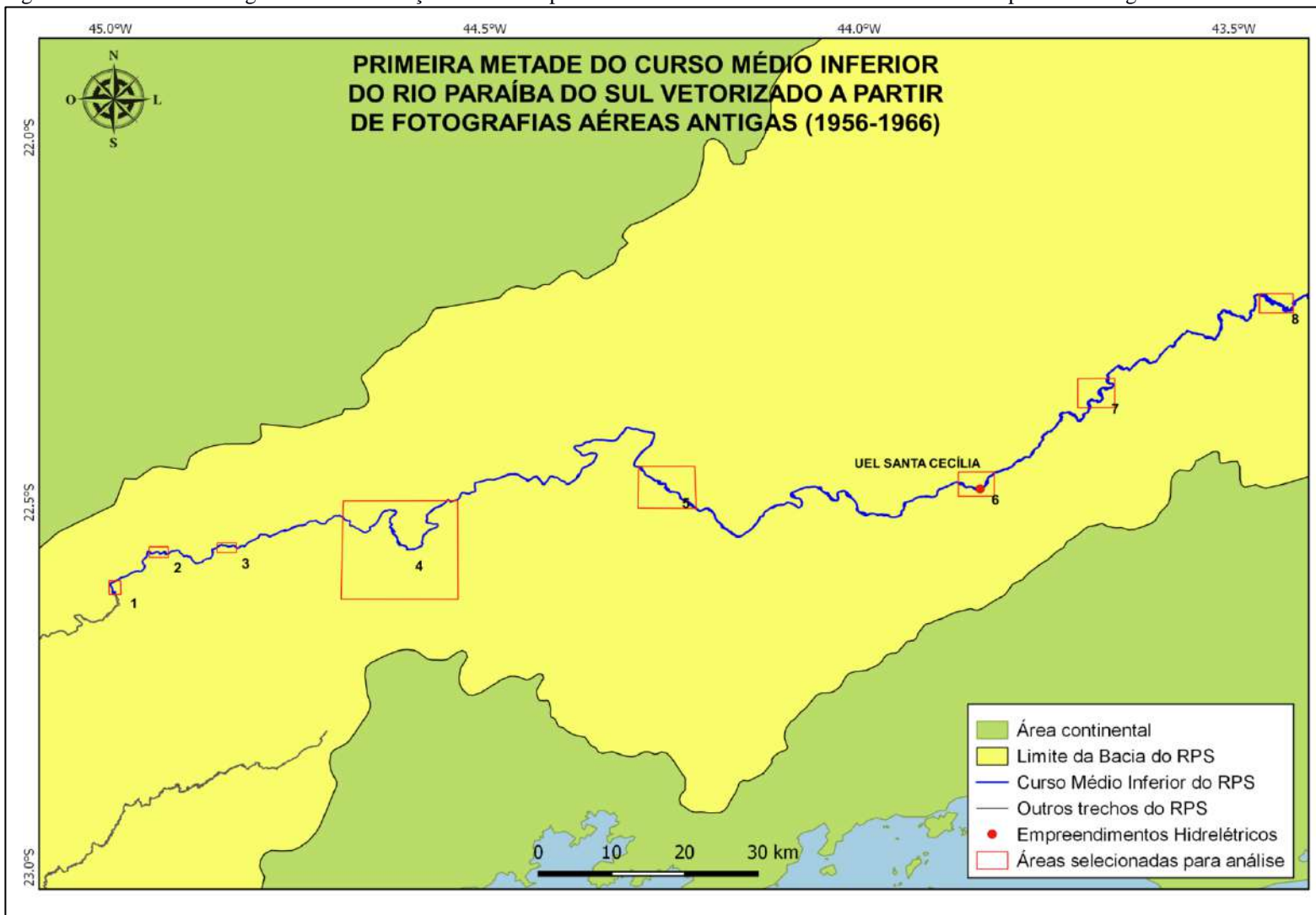
Para a análise da morfologia de vista em planta do curso médio inferior do RPS e suas mudanças ao longo das últimas décadas foram vetorizados os elementos de hidrografia extraídos de fotografias aéreas das seguintes datas: 1956, 1965, 1966, 2005 e 2006 (Figuras 25 e 26). Embora alguns trechos do canal pretérito (extraído de fotografias das décadas de 1950/60) tenham sido vetorizados a partir de fotos com intervalo temporal de 10 anos, pouca discrepância geométrica foi observada na conexão do canal do RPS após o georreferenciamento das mesmas, o que facilitou a análise morfológica de vista em planta. Isso foi possível pois os levantamentos aéreos foram realizados no período do inverno (estiagem), quando as oscilações hidrológicas normalmente são menores.

Em função da instalação do reservatório de Anta em 2013, o mesmo não estava contemplado em nenhuma das fotografias aéreas utilizadas. Assim, somente para a vetorização dos elementos hidrográficos da parte do canal afetada por esta obra foi utilizada imagem de satélite *Digital Globe* de 8 de agosto de 2017, disponível no *Google Earth* (GOOGLE INC., 2017).

Face à extensão do curso médio inferior, o mesmo foi segmentado em dois recortes contíguos (primeira e segunda metade) para sua representação cartográfica em escala compatível com o nível de detalhamento necessário à observação das principais mudanças morfológicas do canal fluvial (Figuras 100 a 103). Nesses recortes, foram selecionadas 14 áreas em escalas maiores para que as alterações mais significativas pudessem ser melhor analisadas nos insumos de diferentes datas (Figuras 100 a 103).

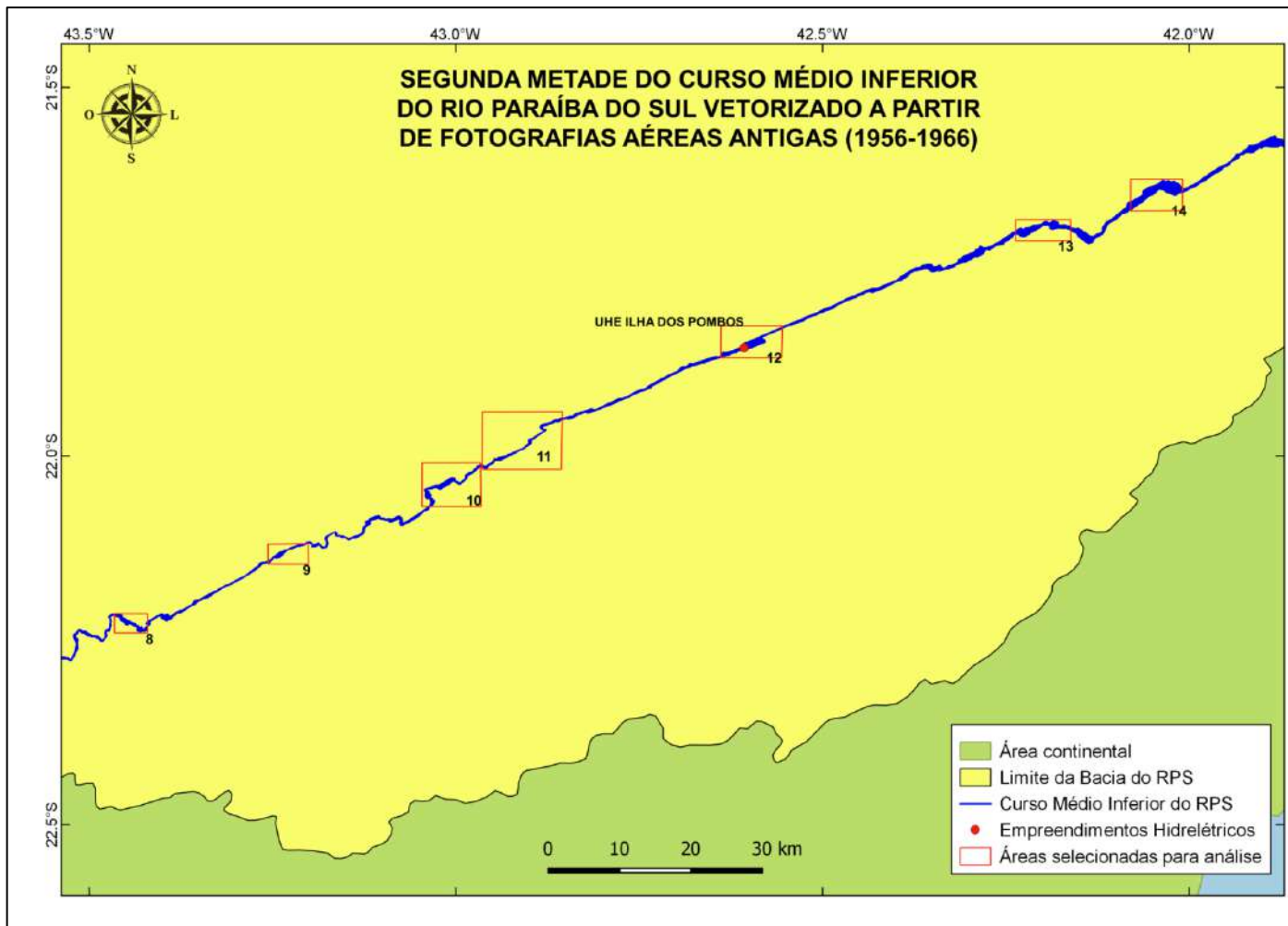
Nos produtos cartográficos de maior detalhe (áreas 1 a 14, Figuras 100 a 103), o canal principal, os meandros abandonados e os reservatórios foram vetorizados em azul, as ilhas em amarelo e as barras arenosas em laranja.

Figura 100 – Produto cartográfico da vetorização manual da primeira metade do curso médio inferior do RPS a partir de fotografias aéreas de 1956-1966.



Fonte: A autora, 2019.

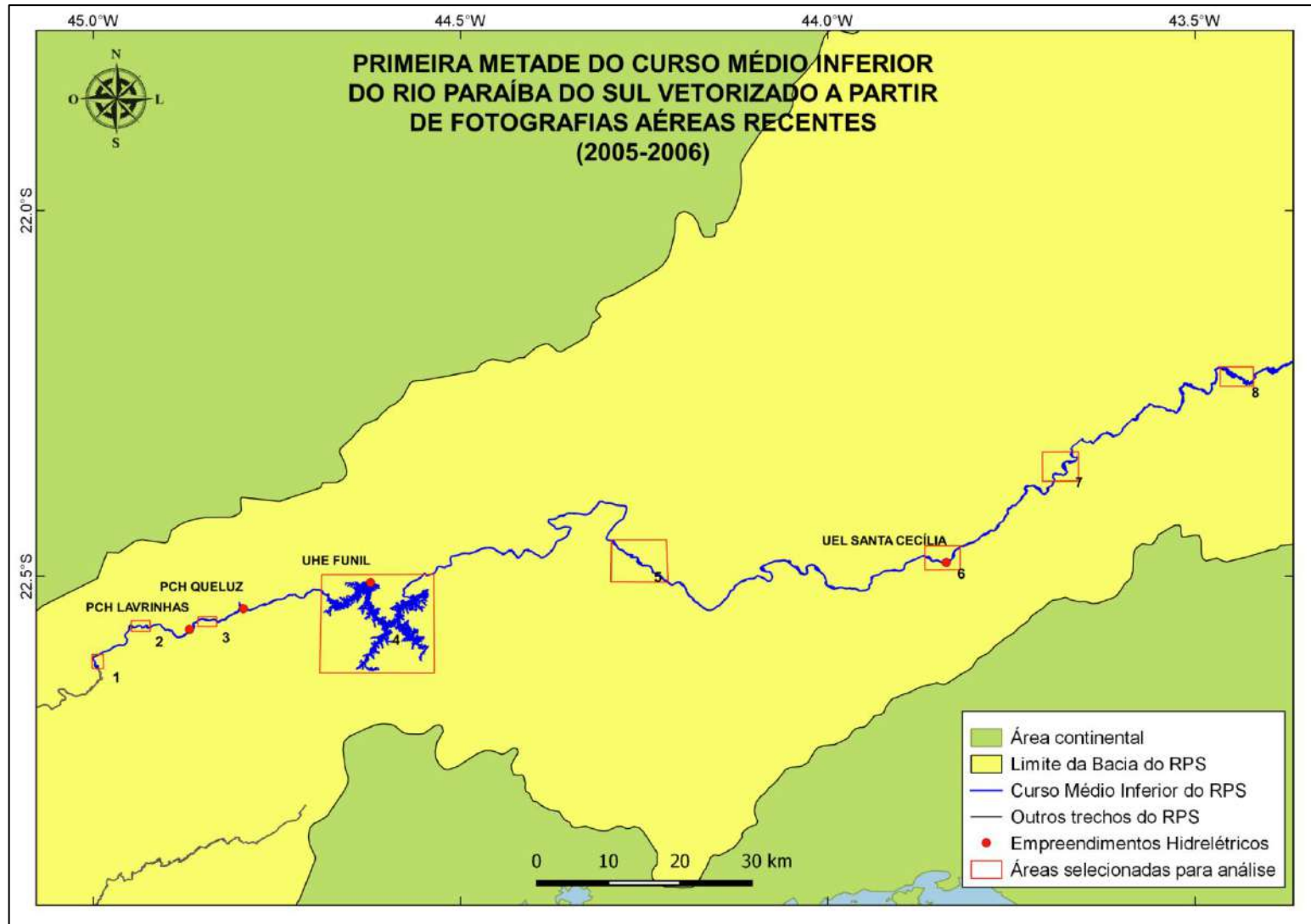
Figura 101 – Produto cartográfico da vetorização manual da segunda metade do curso médio inferior do RPS a partir de fotografias aéreas de 1956-1966.



Fonte: A autora, 2019.

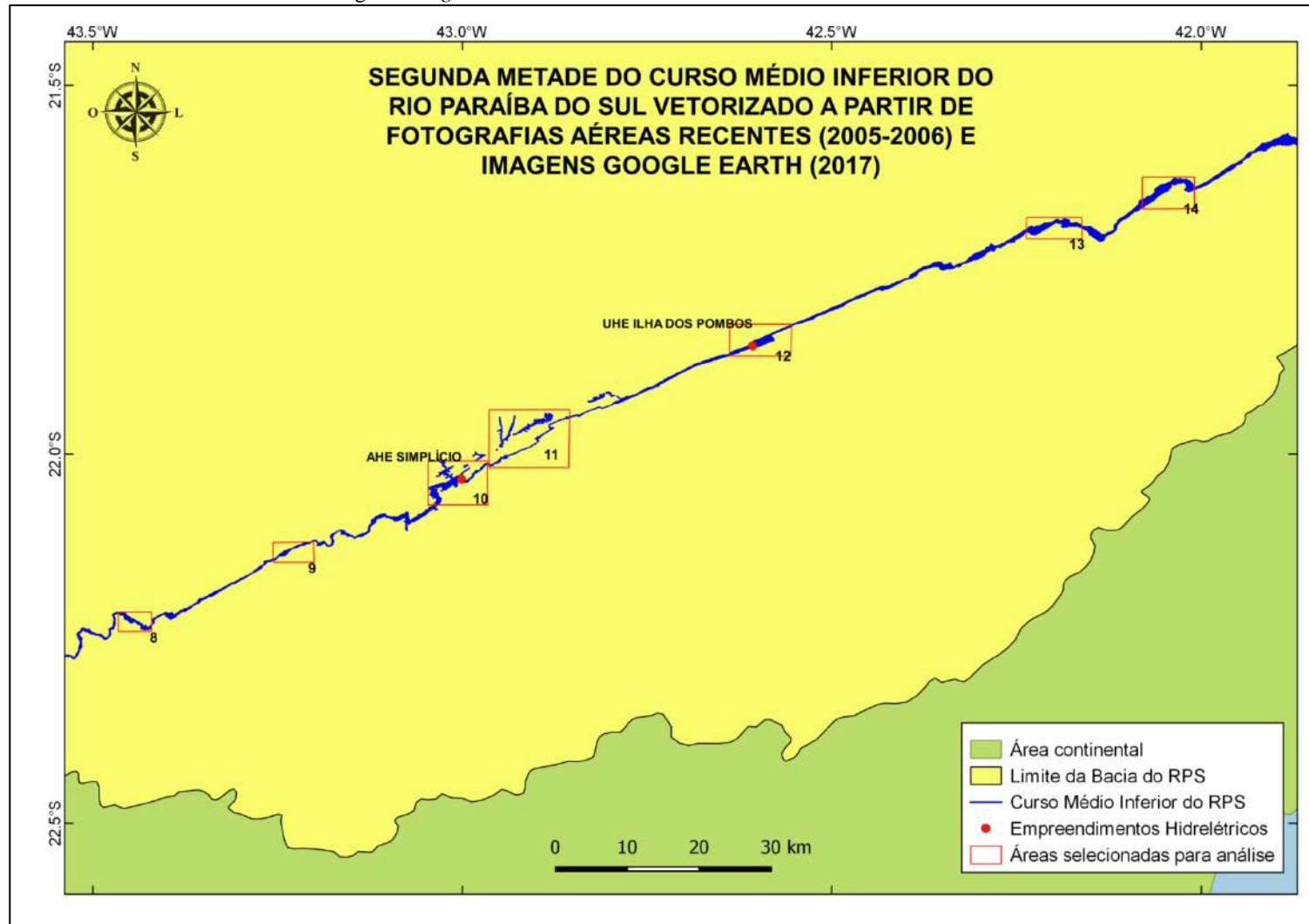


Figura 102 – Produto cartográfico da vetorização manual da primeira metade do curso médio inferior do RPS a partir de fotografias aéreas de 2005 e 2006.



Fonte: A autora, 2019.

Figura 103 – Produto cartográfico da vetorização manual da segunda metade do curso médio inferior do RPS a partir de fotografias aéreas de 2005 e 2006 e imagem *Google Earth* de 2017.



Fonte: A autora, 2019.

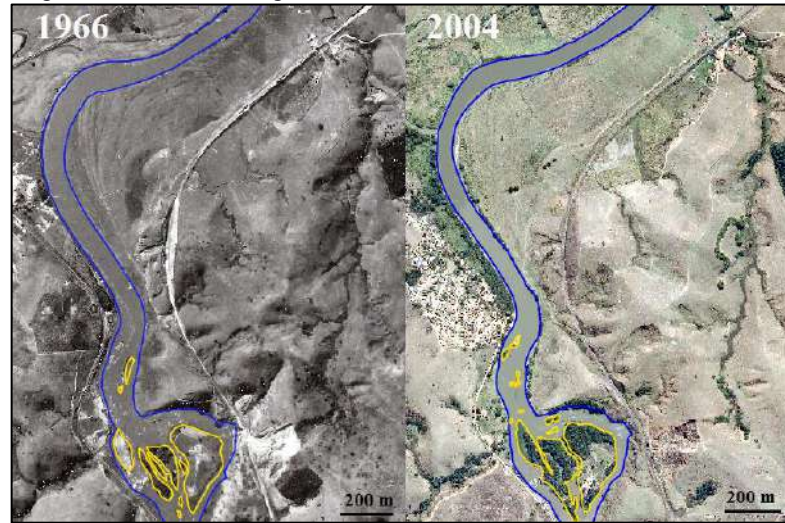
Na área 1 (Figura 104), localizada no início do curso médio inferior (Figuras 100 e 102), a montante das barragens desse curso, houve diminuição na largura média do canal fluvial de cerca de 17 m, aumento na área emersa das ilhas existentes (dando a impressão de ter ocorrido fusão das pequenas ilhas observadas na fotografia de 1966), aumento na quantidade das mesmas (como resultado da redução no volume de água nesse trecho) e aumento da superfície das ilhas coberta por vegetação permanente ao longo dos anos.

A área 2 (Figura 105), localizada 8 km a jusante da primeira área e 10 km a montante da PCH Lavrinhas (Figuras 100 e 102), apresenta semelhanças com a área 1 (Figura 104). De 1966 a 2004 houve aumento no número de ilhas e no tamanho das ilhas existentes (aumento de 32 m na direção longitudinal da maior delas após aumento da área emersa). A diminuição de 12 m na largura média do canal evidencia a diminuição da disponibilidade hídrica ao longo dos anos. Em 2004, a PCH Lavrinhas ainda não havia sido construída.

Na área 3 (Figura 106), localizada 8 km a jusante da área anterior (Figuras 100 e 102), no local atualmente entre as PCH Lavrinhas e Queluz (que não existiam em 2004), ocorreu um aumento de 59 m na largura média do canal graças à proximidade do reservatório da UHE Funil (segundo maior reservatório do RPS, construído em 1969), localizado 20 km a jusante dessa área (Figuras 100 e 102). Com o aumento no volume de água do canal, pequenas ilhas existentes em 1966 desapareceram (tornaram-se submersas), e outras surgiram quando porções das margens do canal foram alagadas (Figura 106).

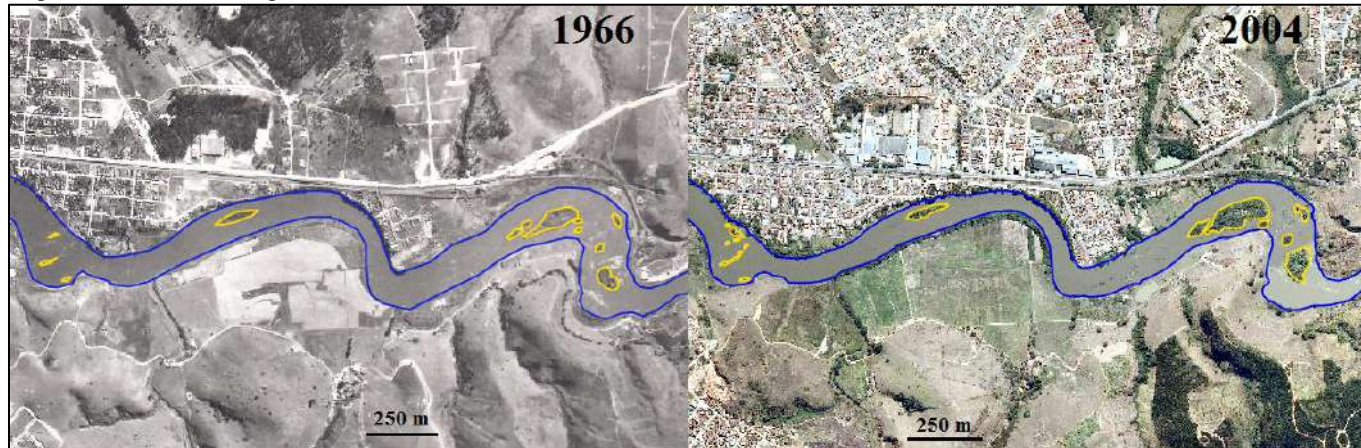
A área 4 (Figura 107) compreende o segmento que foi alagado pelos quase 40 km<sup>2</sup> do reservatório da UHE Funil (Figuras 100 e 102). Em 1966, antes da barragem ser construída, as condições morfológicas eram bem distintas das observadas em 2004. A área alagada ultrapassou o antigo limite do canal fluvial, afogando ilhas e inundando áreas além do entorno. Com o alagamento, ilhas observadas em 1966 ficaram submersas em 2004, e outras surgiram nos locais de maior altitude dos terrenos que foram alagados (Figura 107).

Figura 104 – Área 1 (Figuras 100 e 102) do curso médio inferior.



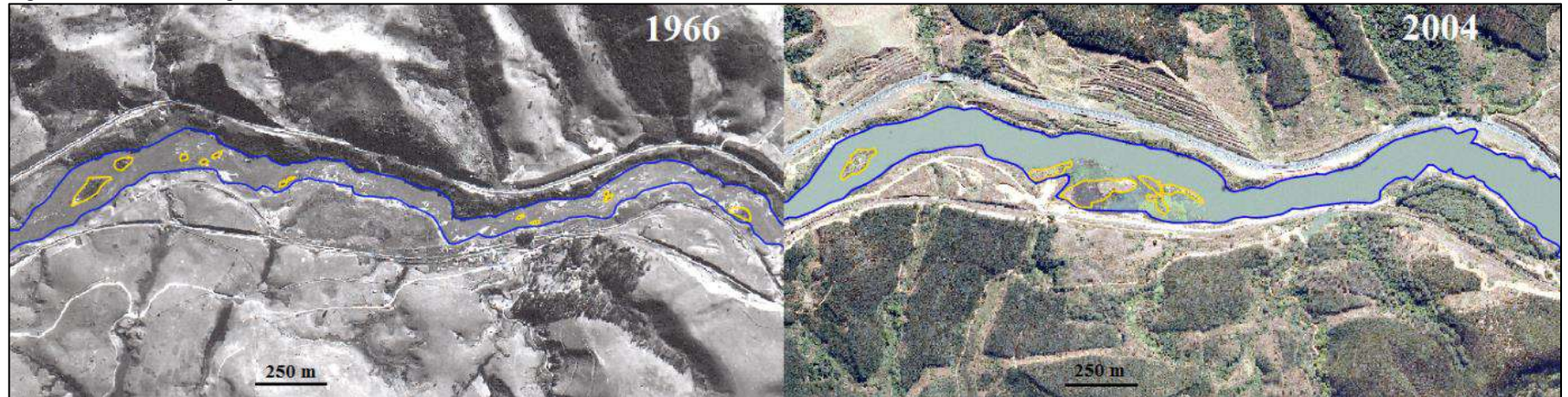
Fonte: A autora, 2019.

Figura 105 – Área 2 (Figuras 100 e 102) do curso médio inferior.



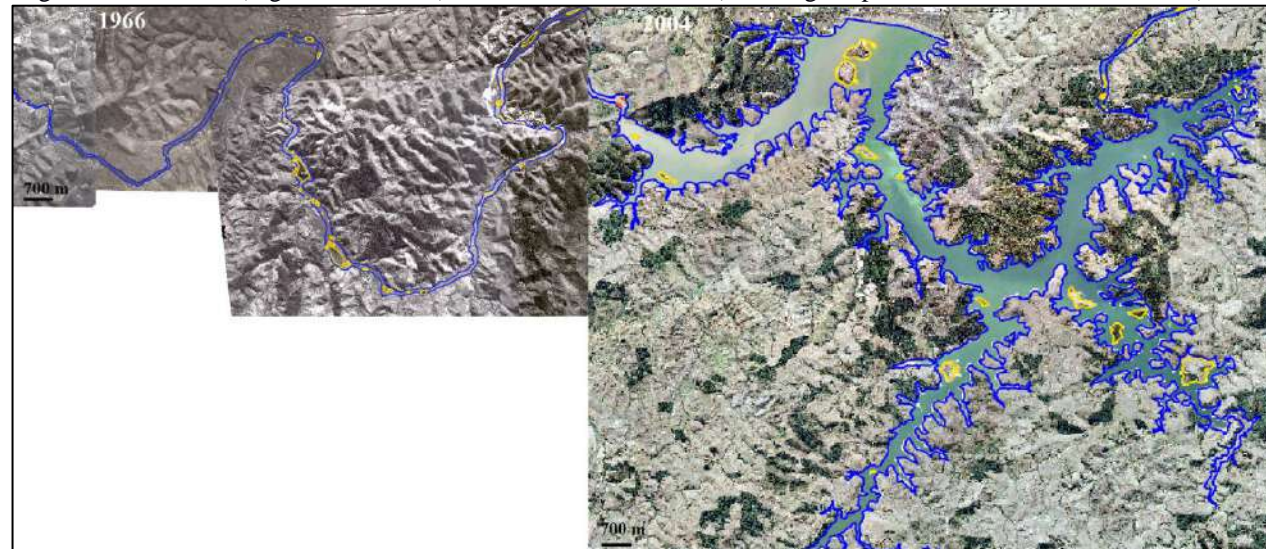
Fonte: A autora, 2019.

Figura 106 – Área 3 (Figuras 100 e 102) do curso médio inferior (localizada 20 km a montante do reservatório de Funil, entre as PCH Lavrinhas e Queluz).



Fonte: A autora, 2019.

Figura 107 – Área 4 (Figuras 100 e 102) do curso médio inferior (área alagada pelo reservatório da UHE Funil).



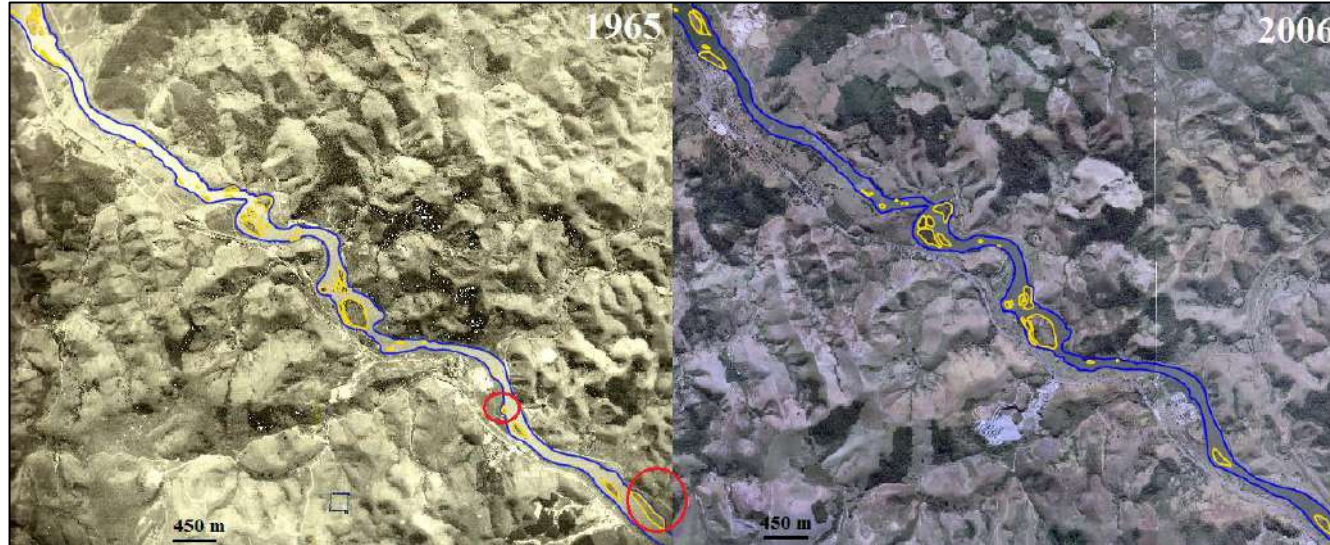
Fonte: A autora, 2019.

Aproximadamente 60 km a jusante do reservatório de Funil (Figuras 100 e 102) foi selecionada a área 5 (Figura 108), na qual foram também observadas as mudanças que ocorreram nos trechos fluviais a jusante dos grandes reservatórios (Paraibuna e Santa Branca) do curso superior. Ali houve considerável diminuição do volume de água e, conseqüentemente, da largura média do canal (73 m). A diminuição da disponibilidade hídrica do canal veio acompanhada do aumento do tamanho das ilhas (a porção emersa de algumas ilhas existentes em 1965 aumentou, levando à fusão de algumas ilhas vizinhas). Na foto de 2006 foi possível observar que algumas ilhas existentes em 1966 foram incorporadas às margens do canal (Figura 108).

Na área 6 (Figura 109), apesar de estar ainda mais distante do reservatório de Funil, a cerca de 130 km a sua jusante, há ainda influência da presença deste e também da UEL Santa Cecília, construída em 1952 e localizada nesta área (Figuras 100 e 102). Nesta usina ocorre o desvio de mais de 60% das águas do RPS para o rio Piraí que, por meio do Complexo de Ribeirão das Lajes alimenta o rio Guandu, que abastece a maior parte da população do Rio de Janeiro e de sua Região Metropolitana. Com essa transposição, o volume de águas do RPS que atualmente flui até a foz ficou reduzido a cerca de um terço do volume original. A fotografia mais antiga data de 1956 e, embora a UEL Santa Cecília já existisse nessa época e uma parte do volume de águas do RPS já fosse transferida para o rio Piraí, foi somente a partir de 1959, quando o Complexo de Ribeirão das Lajes (integrante do sistema de transposição) ficou pronto, e principalmente após 1961, quando entrou no circuito hidráulico a barragem de Santa Branca (no curso superior), que a regularização da vazão foi intensificada para garantir a plena transposição de dois terços do volume de águas do RPS para o Guandu. Assim, pode-se dizer que a fotografia de 1956 ainda retrata a morfologia do canal antes da plena regularização e do intenso controle de fluxo realizado pelas barragens instaladas a montante.

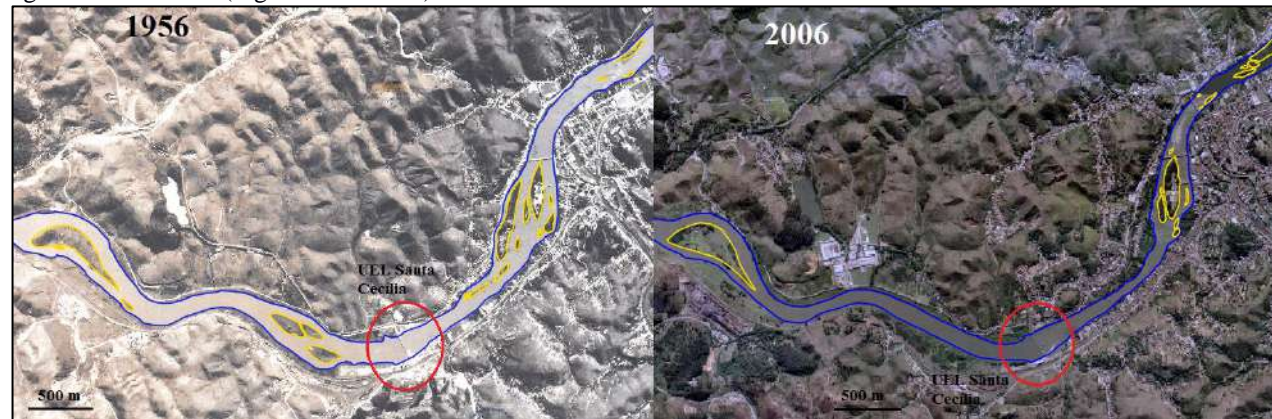
Como resultado da transposição de águas e da retenção de água a montante, no reservatório de Funil, na área 6 (Figura 109) ocorreu, de 1956 a 2006, redução ainda maior no volume de água do canal que na área 5. A diminuição da largura média do canal foi de 93 m e houve aumento do tamanho de algumas ilhas (como resultado do aumento da área emersa das mesmas e também fusão de algumas ilhas após a diminuição do volume d'água). No entanto, algumas pequenas ilhas desapareceram com o tempo (Figura 109).

Figura 108 – Área 5 (Figuras 100 e 102) do curso médio inferior (cerca de 60 km a jusante do reservatório de Funil).



OBS.: Incorporação de algumas delas às margens do canal (circuladas em vermelho).  
Fonte: A autora, 2019.

Figura 109 – Área 6 (Figuras 100 e 102) do curso médio inferior.



OBS.: UEL Santa Cecília circulada em vermelho.  
Fonte: A autora, 2019.

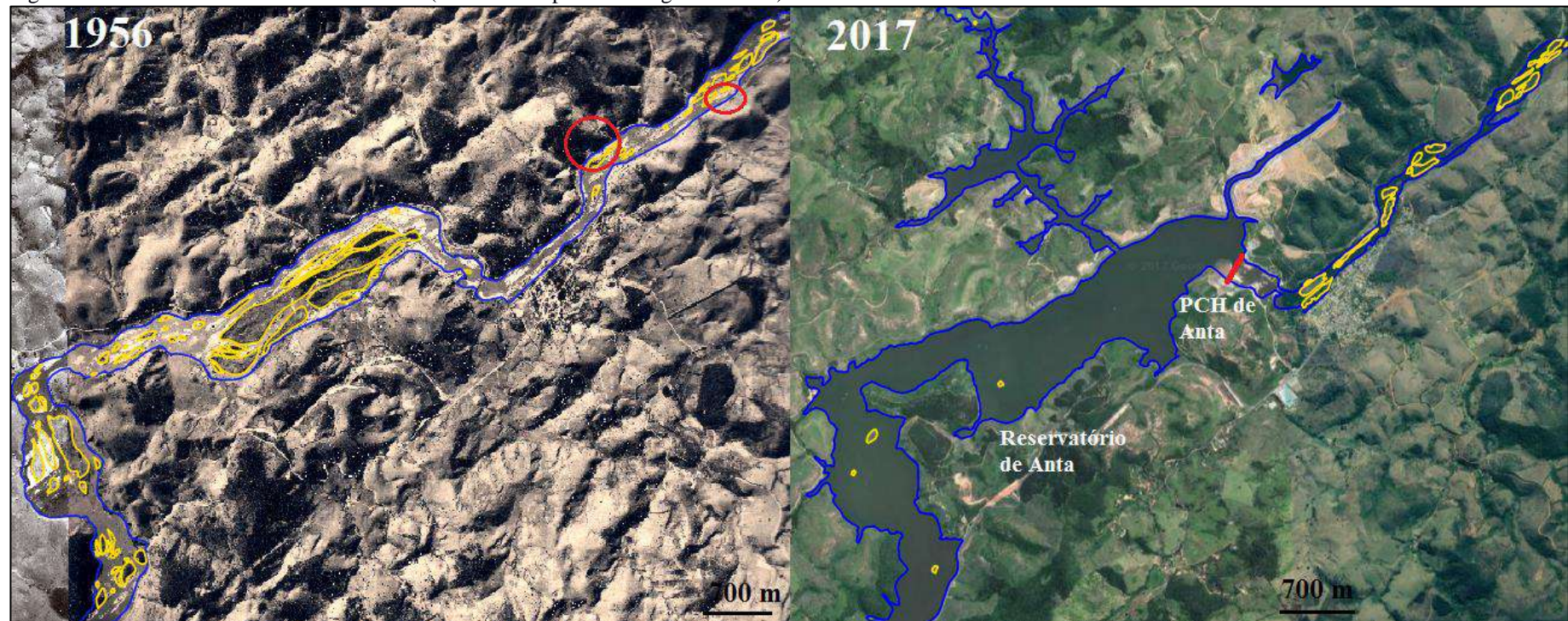
As áreas 7, 8 e 9 (Figuras 100 a 103), ainda mais distantes de Funil (160 km, 210 km e 250 km a jusante, respectivamente) e da UEL Santa Cecília (30 km, 80 km e 120 km a jusante, respectivamente) também foram fotografadas em 1956, antes, portanto, do pleno desvio de águas para o rio Guandu e da construção dos reservatórios de Funil e Santa Branca. Portanto, assim como na área 6 (Figura 109), as características morfológicas do canal anteriores aos impactos causados por essas interferências hidráulicas foram registradas nas fotografias de 1956 dessas três áreas (Apêndices I e J). De 1956 a 2006, nessa (Apêndices I e J) foram observados diminuição da largura média do canal fluvial (de 100 m, atingindo o máximo de 267 m na área 7; de 71 m, com máximo de 164 m na área 8; e de 91 m, atingindo 146 m na área 9), incorporação de ilhas às margens do canal e aumento da dimensão de algumas delas (em função da diminuição do volume de água).

A área 10 (Figura 110) está localizada na porção do curso médio inferior onde foi construído o AHE de Simplício (Figuras 101 e 103), a jusante da confluência de dois afluentes importantes do RPS, o Paraibuna e o Piabanha (Figura 20). Embora esse AHE seja considerado por Furnas como um empreendimento que opera a fio d'água, uma área superior a 15 km<sup>2</sup> foi alagada (reservatório de Anta). Nessa área (Figura 110) foi possível observar, a montante da barragem de Anta, aumento do volume de água do canal e de sua largura média (de 181 m), além de desaparecimento de várias ilhas após a elevação do nível d'água (restando apenas o topo emerso de algumas delas). Houve transformação de um ambiente lótico, anteriormente caracterizado por corredeiras (observadas na fotografia de 1956) em um ambiente lêntico (Figura 110). A jusante da barragem, em face do menor volume de águas no canal, ocorreu diminuição de 73 m em sua largura média, incorporação de ilhas às margens e aumento na superfície emersa das ilhas existentes (Figura 110).

Além do reservatório principal, que alagou parte do próprio canal do RPS a montante da barragem de Anta, outros menores foram construídos no entorno do canal principal para armazenamento de água com objetivo de alimentar uma série de canais (Figura 110) que chegam às turbinas da UHE de Simplício, a jusante. Apesar de essa UHE não estar instalada imediatamente a jusante do reservatório de Anta, ela depende de, que após passarem por uma série de canais e diques, chegam até suas turbinas com força suficiente para movimentá-las por gravidade. Mesmo que Furnas classifique o AHE de Simplício como um complexo hidrelétrico que opera a fio d'água, a área alagada pelo reservatório de Anta (Figura 110), construído para garantir que a água chegue com vazão suficiente para permitir o pleno funcionamento do complexo hidrelétrico, contradiz essa assertiva.



Figura 110 – Área 10 do curso médio inferior (AHE de Simplício/Barragem de Anta).



OBS.: Circuladas em vermelho na fotografia de 1956 estão algumas ilhas que foram incorporadas às margens do canal. A barragem de Anta está destacada em vermelho, na imagem de satélite de 2017 (GOOGLE INC., 2017).

Fonte: A autora, 2019.

As áreas 11 a 14, a jusante da barragem de Anta e dos demais empreendimentos hidrelétricos do RPS, apresentam características semelhantes às encontradas no trecho final da área 10 (Figura 110).

A área 11 (Figuras 101 e 103 e Apêndice L), por exemplo, apresentou diminuição da largura média do canal (de 206 m), incorporação de ilhas às margens do mesmo e aumento da área emersa de ilhas (Apêndice L). Sem a contribuição dos rios Paraibuna e Piabanha a montante, provavelmente as condições hidrológicas e morfológicas deste trecho estariam ainda mais impactadas.

Na área 12 (Figuras 101 e 103 e Apêndice L), 17 km a jusante do AHE de Simplício, está localizado o sexto empreendimento hidrelétrico do curso médio inferior do RPS e último instalado antes da foz: a UHE Ilha dos Pombos, a mais antiga do canal fluvial, em operação desde 1924, a fio d'água. Não há fotografias anteriores à instalação desta UHE para análise da morfologia do canal. Assim como as áreas 10 e 11 (Figura 110 e Apêndice L), nos trechos a jusante da barragem de Anta, essa área sofreu os mesmos efeitos da redução da disponibilidade hídrica decorrente da instalação do reservatório daquela barragem: houve diminuição da largura média do canal em 63 m, incorporação de ilhas às margens do mesmo e aumento na área emersa das ilhas existentes (Apêndice L).

Os efeitos do represamento de água no reservatório de Anta foram também observados nas duas áreas da porção final do curso médio inferior. Tanto na área 13, localizada 60 km a jusante do AHE de Simplício, como na área 14, 80 km a jusante daquele empreendimento (Figuras 101 e 103), houve diminuição da largura média do canal e aumento no tamanho das ilhas (Apêndice M).

Na área 14 (Apêndice M) também ocorreu incorporação de ilhas às margens fluviais. Mesmo com a contribuição de dois afluentes nessas áreas (rios Pirapetinga e Pomba), os impactos das obras a montante sobre a hidrologia e a morfologia do canal foram significativos: na área 13, a diminuição da largura média do canal foi de 49 m (mesmo estando localizada na confluência com o rio Pirapetinga), e na área 14, de 309 m (apesar de esta receber diretamente as águas do rio Pomba).

As principais alterações observadas nas áreas 1 a 14 do curso médio inferior do RPS foram organizadas em um quadro (Apêndice N).