

354 – ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO RIO SANTO ANASTÁCIO - UGRHI-22

Walison de Carvalho⁽¹⁾

Licenciatura Plena em Química pela Universidade Camilo Castelo Branco. Especialista em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará. Especialista em Geoprocessamento pela PUC/MG. Técnico em Sistemas de Saneamento da Companhia de Saneamento Básico de São Paulo Mestrando em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (Profªgua) pela Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/FEIS).

Bruna Eveline Domingos Petrini⁽²⁾

Bacharelado em Ciências e em Gestão Ambiental pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo. Especialista em Gerenciamento de Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia de Piracicaba. Analista Ambiental na Agência das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. Mestranda em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (Profªgua) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/FEIS).

Priscila Roberta Barreto⁽³⁾

Bacharelado em Ciências Biológicas pela Universidade Braz Cubas. Assessora Técnica da Unidade de Produção de Água da Metropolitana da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Mestranda em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (Profªgua) pela Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/FEIS).

Marlene Pereira Gil Filha⁽⁴⁾

Licenciatura Plena em Letras Português / Inglês pelas Faculdades Integradas de Itararé Fafit-facil. Licenciatura plena em pedagogia pela Faculdade FAVENI. Especialista em Ensino de Língua Portuguesa, literaturas e redação pelo Centro Universitário Claretiano. Especialista em Tutoria EAD pela Faculdade Famart. Mestranda no programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - PROFÁGUA pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP/FEIS).

Paulo Cesar Rocha⁽⁵⁾

Doutor em Ciências Ambientais. Professor Assistente da FCT/UNESP, Presidente Prudente - SP. Bolsista de Produtividade em Pesquisa 2 do CNPq.

Endereço⁽¹⁾: Av. Pirarucu, 3891 – Barueri - SP - Tel: (11) 94110-3091 - walison.carvalho@unesp.br

RESUMO

A superfície terrestre é mutável ao longo do tempo, sendo que as alterações externas, como mudanças climáticas e o movimento tectônico da crosta são capazes de alterar o fluxo das águas e sedimentos que escoam nas bacias hidrográficas, modificando seu tamanho e sua forma. A erosão é um dos processos de degradação do solo mais perceptíveis no meio ambiente, sendo a água o principal agente erosivo. A erosão e o sistema de deposição são fatores responsáveis pela geração excessiva de sedimentos, que podem acarretar prejuízos ambientais e econômicos. A maior parte dos processos fluviais como erosão e transporte de sedimentos ocorrem no período de chuvas, quando as vazões e a energia dos fluxos aumentam significativamente. De acordo com as características dos sedimentos carregados pelo fluxo d'água, o escoamento superficial tende a remover e transportar os produtos do intemperismo e demais formações superficiais para os fundos de vales e canais fluviais. A bacia hidrográfica do Rio Santo Anastácio está localizada na região do Pontal do Paranapanema no Oeste Paulista. Este trabalho analisa variabilidade hidrológica fluvial do Rio Santo Anastácio, com base em dados fluviométricos, e a relação com as descargas de sedimentos sólida e líquida do rio Santo Anastácio, considerando uma série histórica de 1981 a 2019. Com base nas análises estatísticas efetuadas, pode-se inferir que o fluxo de sedimentos em suspensão não possui correlação com a variabilidade de vazão do rio Santo Anastácio, mesmo em períodos em que há picos de precipitação. A partir da análise do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Santo Anastácio foi evidenciada a predominância e expansão das áreas de pastagens e de culturas agrícolas temporárias, o que pode ser apontado como fator de evolução de carga sedimentar e processos de sedimentação e erosão. Desta forma, considera-se que as atividades antrópicas são principais indutoras de erosão acelerada, principalmente a partir da exposição do solo no caso do Rio Santo Anastácio.

PALAVRAS-CHAVE: Sedimentos, sólidos suspensos, Santo Anastácio, qualidade da água

INTRODUÇÃO

O papel dos corpos hídricos na modelagem do relevo tem sido destacado desde os primeiros pesquisadores que estruturaram as bases da Geomorfologia, como James Hutton (1726-1797), William Morris Davis (1850-1934), Walther Penck (1888-1923), John Wesley Powell (1834-1902), John Playfair (1748-1819), entre outros. O modelo teórico concebido por W.M. Davis na segunda metade do século XIX, que procurava elucidar a geodinâmica da superfície do globo, constituiu o primeiro conjunto de concepções que descreviam e explicavam de modo coerente, a gênese e a sequência evolutiva das formas de relevo existentes na superfície terrestre. Por este motivo e tendo em vista o pioneirismo em vários aspectos no que tange a interpretação dos relevos na Terra W.M. Davis ficou conhecido como pai da geomorfologia (BASTOS; MAIA; CORDEIRO, 2019).

Com o decorrer do tempo, a diversificação dos usos múltiplos da água, decorrente do desenvolvimento socioeconômico, foi responsável pelas inúmeras pressões sobre o ciclo hidrológico e sobre as reservas de águas superficiais e subterrâneas, ocasionando impactos que exigem diferentes tipos de avaliações, tanto qualitativos como quantitativos, vinculadas a um monitoramento em longo prazo (FERNANDEZ; ROCHA, 2017). Os cursos d'água atuam diretamente na configuração do relevo e das paisagens a partir dos processos de erosão e sedimentação nos ambientes de leito fluvial e margens. Na evolução das paisagens fluviais são construídas formas deposicionais típicas, como planícies e terraços, que guardam nos sedimentos associados informações sobre o contexto e o regime hidrossedimentológico ao qual o corpo hídrico esteve exposto. Os cursos d'água também se constituem como níveis de base controladores dos processos modeladores de vertentes, como a erosão pluvial e os movimentos de massa, neste sentido processos de incisão vertical ou agradação nos fundos dos vales, que condicionam a dinâmica dos processos de encostas, dando-lhes respectivamente, mais ou menos energia em função da alteração do gradiente de energia potencial gravitacional entre o topo e o fundo do vale (BARROS; MAGALHÃES Jr, 2020).

De acordo com Magalhães Jr, Barros e Lavarini (2020), uma bacia hidrográfica é um sistema espacial geograficamente definido a partir da configuração da rede de drenagem e delimitado por divisores hidrográficos, cujos fluxos fluviais se concentram em um curso d'água principal antes que toda a vazão conflua para uma única saída, denominada exutório. Apesar de ter a sua identidade formada pela conexão entre as artérias hidrográficas, as bacias são formadas principalmente, em termos de extensão areal, por zonas terrestres que formam áreas de contribuição hídrica para os cursos d'água, deste modo, as bacias englobam dimensões que não são apenas físicas, mas sim territoriais (SILVEIRA, 2020). Bacias hidrográficas ocorrem em diferentes escalas espaciais, sendo drenadas por suas respectivas redes hidrográficas, formadas por cursos d'água principais e seus tributários, podendo ser drenadas por cursos hídricos perenes ou intermitentes. A rede hidrográfica é formada pelos elementos lineares representados pelos cursos d'água, não abrangendo a área terrestre entre os canais. Uma rede hidrográfica pode contemplar cursos d'água tributários, que são afluentes de outros, ou distributários, que se originam a partir da ramificação de outros (FIELDING, 2012).

Apesar de individualizadas espacialmente por divisores superficiais, as bacias hidrográficas também apresentam divisores dos fluxos hídricos subsuperficiais. Os divisores superficiais são de origem topográfica e configurados pela morfologia, coincidindo com zonas superiores das elevações. Já os divisores subsuperficiais determinam a configuração da direção dos fluxos subterrâneos e são configurados pela estrutura geológica, podendo ser influenciados pela topografia (OLIVEIRA; VIADANA; PEREIRA, 2019). Assim, a direção dos fluxos superficiais não é necessariamente a mesma dos subterrâneos e estes não respondem pelos limites da bacia (MAGALHÃES Jr; BARROS; LAVARINI, 2020). A bacia hidrográfica é um recorte espacial que permite o estudo das conexões hidrossedimentológicas, dado que há convergência dos fluxos hidrológicos superficiais para um único ponto, seja ele oceano, lago ou outro curso d'água, viabilizando as relações entre as características das águas e sedimentos com as dimensões dos quadros físico e humano. Todo curso d'água possui a sua bacia hidrográfica, ou seja, a área de contribuição em termos hídricos e sedimentares, deste modo, a bacia de um curso d'água principal pode apresentar sub-bacias, assim entendidas como bacias os afluentes (GEURTS et al., 2018). A classificação das bacias hidrográficas pode ocorrer segundo o tamanho, micro, meso e macrobacia, ou padrão geral de escoamento. Para estudos hidrológicos, microbacias são comumente consideradas como de área inferior a 100 Km², porém este critério é muito relativo à luz do que se considera pequeno ou grande em cada contexto, sabendo-se das diferenças entre a área de municípios, de propriedades rurais, dentre outros, portanto, estes critérios devem ser avaliados segundo cada realidade. Para estudos geográficos, é mais coerente considerar microbacias como as situadas próximas às cabeceiras dos rios, cujos cursos d'água são de até segunda ordem (MAGALHÃES Jr; BARROS; LAVARINI, 2020).

Quanto ao padrão geral de escoamento, uma das classificações adotadas propõem bacias exorreicas, endorreicas, criptorreicas e arreicas. As bacias exorreicas ocorrem quando o escoamento se dá de modo contínuo até um oceano, as bacias endorreicas possuem rede de drenagem interior, com exultórios em depressões fechadas, lagos ou depressões cársticas, já as bacias criptorreicas são essencialmente subterrâneas, como em áreas cársticas, onde os cursos d'água podem ter segmentos subterrâneos a partir de sumidouros e voltar a superfície em ressurgências. Por fim, as bacias arreicas são aquelas sem estruturação espacial da drenagem, havendo uma desorganização marcada por desconexões. Este tipo de padrão de escoamento ocorre em muitas áreas desérticas, onde a precipitação é negligenciável na maior parte do ano e a atividade eólica é intensa ((MAGALHÃES Jr; BARROS; LAVARINI, 2020; SILVEIRA, 2020).

O perfil de elevação de uma bacia de drenagem representa a evolução dinâmica da paisagem resultante de processos tectônicos e erosivos impulsionados principalmente pelo clima, e ao mesmo tempo serve de pano de fundo para processos biofísicos como escoamento de rios, biodiversidade e microclimas (DUDOV, 2017; FREEMAN et al., 2018; GALLEN et al., 2011). A relação elevação x área é frequentemente resumida usando histogramas e representações funcionais com base na análise de dados do modelo digital de elevação (MDE) (BAJRACHARYA; JAIN, 2021).

Uma das características principais dos elementos que compõem a paisagem terrestre é a sua mutabilidade ao longo do tempo, onde as alterações externas, como mudanças climáticas e o soerguimento tectônico da crosta são capazes de alterar o fluxo das águas e sedimentos que escoam nas bacias hidrográficas. Entre as múltiplas respostas possíveis, os rios podem rebaixar seus talvegues, dissecando o relevo, entulhar os seus leitos com sedimentos ou desenvolver processos de reorganização espacial da rede de drenagem, modificando o tamanho das bacias hidrográficas, e neste caso, destacam-se os processos de rearranjo espacial no sentido montante a partir da expansão das zonas de cabeceiras (MUDD, 2017).

Processos de reorganização da drenagem tendem a ocorrer até que as cabeceiras estejam posicionadas na mesma cota altimétrica de suas vizinhas, ou seja, que haja um certo equilíbrio de forças de energia dos processos desnudacionais em função da declividade e amplitude altimétrica semelhante (FORTE; WHIPLE 2018). O fluxo natural de um rio tende a variar de acordo com o tempo avaliado, por exemplo horas, dias, estações do ano, anos e adiante. No entanto, muitos anos de observação em uma estação fluviométrica geralmente são necessários para se descrever as características do padrão de fluxo de um corpo d'água, em termos de quantidade, periodicidade e variabilidade, que é o seu regime de fluxo natural. Em bacias hidrográficas que não possuem dados hidrológicos de série longa, as análises podem ser estendidas estatisticamente a partir de outra estação localizada na mesma área geográfica (ROCHA; ARAÚJO; BOTA, 2009).

Geralmente, a determinação de vazões é feita por meio de aferição do nível da água em canais fluviais a partir da instalação de sequências de réguas verticais nas margens ou linígrafos. O nível da água é relacionado com a respectiva largura do canal para a obtenção da área de seção fluvial, a qual é multiplicada pela velocidade do fluxo para a obtenção da vazão. Comumente os registros de níveis d'água são realizados nas estações hidrometeorológicas, cujos dados pluviométricos e/ou fluviométrico podem ser utilizados para o planejamento e projetos de obras hidráulicas, gestão de bacias hidrográficas e estudos de geomorfologia fluvial (MACEDO et al., 2020). No Brasil, os primeiros registros hidrometeorológicos datam de 1855 e atualmente, a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) coordenada pela Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA), é composta por mais de 4500 estações pluviométricas e fluviométricas, distribuídas em cerca de 1800 rios. Por meio do Portal Hidroweb, podem ser acessados dados e séries históricas referentes a níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos dos principais rios do território nacional, subsidiando a gestão de recursos hídricos no Brasil, bem como pesquisas científicas (ANA, 2019).

A apresentação dos dados de monitoramento de vazões pode ser realizada principalmente por meio de curvas-chaves e hidrogramas, onde a curva chave é uma relação ou equação ajustada aos dados de medição de vazão, cujo ajuste pode ocorrer manualmente, de forma gráfica, ou a partir de equações baseadas em regressão (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Uma curva-chave é obtida a partir da plotagem gráfica das cotas altas de uma série histórica de monitoramento e as respectivas equivalentes a cada nível, em m³/s ou L/s. Assim, o conhecimento da curva-chave permite substituir a medição contínua das descargas por uma medição contínuas de cotas, conferindo maior simplicidade e rapidez ao processo, que pode ser, inclusive, automático (MACEDO et al., 2020).

A erosão é um dos processos de degradação do solo mais perceptíveis no meio ambiente e, embora a erosão e o sistema de deposição sejam considerados parte do mecanismo natural de pedogênese, eles são considerados responsáveis pela geração excessiva de sedimentos, perda de lavoura, desmatamento e alteração na qualidade da água, podendo resultar em declínio da agregação e estabilidade do solo (GAYEN; HAQUE, 2022). A água é o principal agente erosivo do solo e a erosão hídrica pode ser categorizada em três grupos, de acordo com as suas características, como: erosão leve causada por lâminas d'água e corpos hídricos, moderada, causadas por voçorocas estreitas e erosão severa, dominada por ravinas profundas e largas (MOLINARIO et al., 2015).

Os processos hidrossedimentológicos estão intimamente ligados ao ciclo da água, em que a maior parte dos processos fluviais como erosão e transporte de sedimentos ocorrem no período de chuvas, quando as vazões e a energia dos fluxos aumentam significativamente e podem responder por 70-90% do trabalho fluvial. Assim, as variáveis climáticas associadas às geológicas, ao tipo de solo e ao uso e ocupação da terra, além do quadro morfológico, exercem significativa importância no regime hidrossedimentológico dos cursos d'água (MAGALHÃES; BARROS; COTA, 2020b). Influenciado pelo quadro fisiográfico e características dos sedimentos, o escoamento superficial tende a remover e transportar os produtos do intemperismo e demais formações superficiais para as áreas de menor energia potencial gravitacional nas bacias hidrográficas, ou seja, nos fundos de vales e particularmente nos canais fluviais. Nos cursos d'água, os sedimentos assumem um comportamento e transporte diferenciado, determinado pelas condições de energia e turbulência dos fluxos concentrados, já nos ambientes marginais de planície de inundação, os fluxos tendem a apresentar menor energia, principalmente nos períodos de redução do nível d'água, favorecendo a deposição da carga sedimentar (PIETROBELLI et al., 2019).

O transporte fluvial de sedimentos pode ocorrer de várias maneiras e de acordo com diferentes contextos geomorfológicos ambientais que influenciam o balanço de energia de cada sistema. De acordo com Magalhães, Barros e Cota (2020b), existem três tipos principais de carga sedimentar fluvial, a dissolvida, em suspensão e a de leito. A carga dissolvida é transportada em solução química na água, compreendendo moléculas e íons derivados do intemperismo químico das rochas, como os carbonatos, sulfatos e óxidos, e da decomposição de componentes biogênicos, podendo também englobar poluentes e contaminantes. Considera-se como carga dissolvida, o material que não é retido em um filtro de 0,45 µm, incluindo soluções iônicas e colóides húmicos (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017).

A carga em suspensão, como argila e silte, são sustentadas por forças eletrostáticas e de turbulência. Sua deposição ocorre em ambientes de baixa energia, como planícies fluviais e lagos, por precipitação gravitacional. Os sedimentos em suspensão gerados pela erosão podem causar tanto impactos negativos, como a degradação da qualidade da água decorrente do aumento da turbidez, quanto positivos, associados a renovação de sedimentos que transportam nutrientes e auxiliam na fertilização dos solos (VERCRUYSSSE et al., 2017). Já a carga fluvial de leito pode ocorrer por meio de saltação e arraste, onde na saltação há projeção de partículas do leito na camada externa, ocorrendo a sustentação provisória das partículas pelas forças tangenciais, processo que atinge principalmente areia e grânulos (MAGALHÃES; BARROS; COTA, 2020). Diante do acima exposto, este trabalho tem como objetivo realizar a análise da variabilidade hidrológica fluvial do Rio Santo Anastácio através de dados fluviométricos e de sólidos em suspensão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise do transporte de sedimentos foram utilizados os dados de sólidos em suspensão da estação 8D-002 da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) contidos no Portal Infoáguas. Os dados fluviométricos do Rio Santo Anastácio entre os anos 1981 e 2019 foram obtidos no portal HidroWeb da ANA. Para o processamento dos dados de concentração de sólidos em suspensão e vazão, foi utilizado o software Microsoft Office Excel®, onde foram realizados o cálculo da vazão média anual, elaboração da curva de vazão média anual, determinação dos períodos de variabilidade hidrológica, cálculo da estimativa da carga sedimentar e a evolução da carga sedimentar. O cálculo do fluxo de sedimentos em suspensão (Q_{ss}) foi realizado de acordo com a equação 1:

$$Q_{ss} \left(\frac{t}{dia} \right) = 0,084 \times Q \left(\frac{m^3}{s} \right) \times C_{ss} \left(\frac{mg}{L} \right) \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

Q = Vazão média anual;

Css = Concentração de sólidos em suspensão

O processamento digital das imagens e confecção dos mapas de localização e uso e ocupação da terra foram realizados no software QGIS 3. 12© por meio dos dados do Portal MapBiomias.

Área de estudo

A área que compreende a Bacia Hidrográfica do rio Santo Anastácio possui aproximadamente 2367 Km², está contida na porção oeste do Estado de São Paulo, e situa-se geograficamente entre as coordenadas 21° 48'49" a 22° 16'59" de latitude Sul e 51° 22'05" a 52° 11'15" de longitude Oeste, sendo afluente da margem esquerda do rio Paraná. Além disso, a Bacia Hidrográfica em estudo pertence à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 22, área de atuação do Comitê das Bacias Hidrográficas do Pontal do Paranapanema (CBH-PP), localizada na região do Pontal do Paranapanema no Oeste Paulista (UMBELINO; ROCHA, 2021).

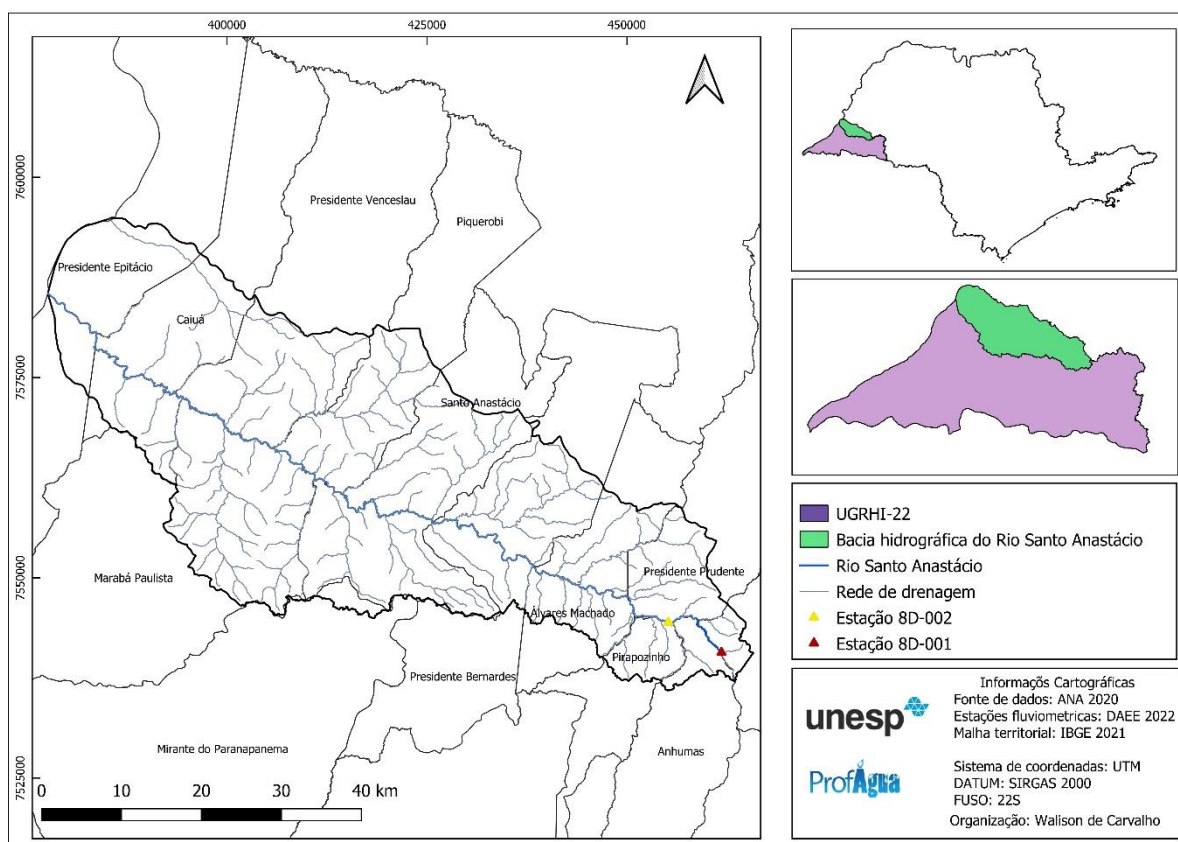


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo

A área da bacia do Santo Anastácio apresenta como substrato geológico, rochas sedimentares cretáceas dos grupos Caiuá e Bauru, recobertas por espessos mantos regolíticos e por sedimentos cenozóicos inconsolidados, que incluem terraços fluviais, colúvios e depósitos aluviais recentes. Ao sudeste da área, afloram basaltos da Formação Serra Geral, que constituem o substrato das bacias sedimentares Caiuá e Bauru. Em termos geomorfológicos gerais, na região dominam os topos tabulares e convexos, no geral com baixos a médios índices de dissecação. Na região dominam os Latossolos e Argissolos com alta suscetibilidade natural a processos erosivos. Nos vales, solos hidromórficos e neossolos flúvicos (UMBELINO; ROCHA, 2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de vazão mensal, vazão média anual, concentração de sólidos em suspensão e fluxo de sedimentos em suspensão estão apresentados nas Tabelas 1 e 2. Para a avaliação da variabilidade hidrológica fluvial do rio Santo Anastácio, foram analisados os dados de vazão fluviométrica. A série histórica dos dados fluviométricos analisada contempla dados mensais para os anos de 1981 a 2018, conforme disponibilidade do banco de dados.

Tabela 1- Dados mensais de vazão do Rio Santo Anastácio

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1981	0,571	0,274	-0,117	0,448	0,173	0,409	0,207	0,122	0,097	0,418	0,110	0,301
1982	0,371	0,291	1,422	0,452	0,210	0,429	0,559	0,190	0,120	0,522	0,238	1,637
1983	0,833	0,701	0,701	0,748	0,470	1,002	0,572	0,251	0,894	0,420	0,163	0,303
1984	0,359	0,489	0,139	0,508	0,216	0,377	0,215	0,192	0,198	0,221	0,064	0,606
1985	0,558	0,208	0,251	0,509	0,232	0,387	0,233	0,112	0,102	0,168	0,083	0,168
1986	0,287	0,203	-0,117	0,339	0,183	0,359	0,133	0,233	0,106	0,187	-0,004	0,430
1987	0,707	0,669	-0,083	0,385	0,261	0,393	0,250	0,088	0,115	0,215	0,297	0,317
1988	0,660	0,558	0,498	0,564	0,298	0,401	0,225	0,102	0,091	0,463	0,083	0,181
1989	0,662	0,910	0,283	0,431	0,202	0,430	0,492	0,365	0,444	0,237	0,097	0,448
1990	1,031	0,300	0,075	0,461	0,281	0,391	0,341	0,332	0,277	0,469	0,305	0,280
1991	0,337	1,391	0,194	0,499	0,208	0,412	0,275	0,123	0,104	0,248	0,035	0,424
1992	0,262	0,270	0,672	0,725	0,493	0,428	0,340	0,181	0,865	0,466	0,212	0,326
1993	0,317	1,952	0,569	0,593	0,249	0,465	0,325	0,227	0,242	0,246	0,104	0,300
1994				0,544	0,203	0,398	0,250	0,112	0,091	0,199	0,037	0,249
1995	0,594	1,018	-0,043	0,428	0,194	0,380	0,243	0,095	0,090	0,390	0,059	0,274
1996	0,701	0,384	0,635	0,436	0,222	0,380	0,206	0,123	0,214	0,282	0,397	0,335
1997	1,007											
1998						0,503	0,481	0,607	0,476	0,592	0,144	1,248
1999	0,956	2,231	0,636	0,955	0,402	0,538	0,526	0,227	0,206	0,260	0,117	0,561
2000	0,329	1,422	2,277	0,454	0,183	0,374	0,329	0,167	0,663	0,250	0,102	0,248
2001	0,272	1,172	0,681	0,469	0,306	0,431	0,314	0,149	0,148	0,277	0,116	0,447
2002	0,564	0,343	-0,013	0,379	0,292	0,414	0,362	0,236	0,244	0,237	0,150	0,656
2003	1,228	1,289	0,839	0,764	0,290	0,524	0,463	0,302	0,313	0,313	0,112	0,301
2004	0,389	0,345	0,759	0,456	0,333	0,492	0,546	0,192	0,166	0,411	0,231	0,315
2005	0,681	0,304	-0,059	0,470	0,247	0,447	0,286	0,141	0,296	0,368	0,058	0,253
2006	0,394	1,038	1,055	0,500	0,207	0,374	0,242	0,130	0,164	0,282	0,038	0,457
2007	1,423	0,964	0,320	0,469	0,234	0,405	1,028	0,219	0,146	0,234	0,128	0,216
2008	0,393	0,381	0,403	0,497	0,280	0,390	0,221	0,187	0,114	0,243	0,064	0,180
2009	1,257	0,968	0,271	0,426	0,217	0,423	0,554	0,618	0,517	0,828	0,278	1,343
2010	1,900					0,472	0,481	0,227	0,588	0,370	0,112	0,336
2011	0,574	1,311	1,315	0,727	0,287	0,497	0,522	0,364	0,255	0,427	0,186	0,392
2012	0,558	0,316	0,430	0,533	0,342	0,976	0,651	0,228	0,488	0,325	0,254	0,736
2013	0,563	0,810	0,838	1,229	0,502	0,729	0,761	0,353	0,439	0,603	0,272	0,382
2014	0,401	0,349	0,213	0,578	0,214	0,393	0,345	0,165	0,219	0,259	0,282	0,712
2015			1,047	0,667	0,386	0,522	1,161	0,295	0,609	0,663	0,602	1,327
2016	1,277	1,910	1,257	0,758	0,468	0,747	0,790	0,544	0,581	0,414	0,129	0,431
2017	0,886	0,602	0,292	0,595	0,550	0,533	0,385	0,316	0,197	0,466	0,459	0,910
2018	1,039	0,889	0,661	0,640		0,452	0,380	0,337	0,386	0,483	0,210	0,396
2019	0,466							0,160		0,302	0,061	0,282
2020	0,427	0,750		0,473	0,232							

Tabela 2- Dados de média, vazão média, concentração de sólidos em suspensão e fluxo de sedimentos em suspensão

Ano	Média anual	Q _{média}	C _{ss} mg/L	Q _{ss}
1981	0,2511468	0,25	86,6	1,83
1982	0,5366535	0,54	69,9	3,15
1983	0,5881698	0,59	84,8	4,19
1984	0,2987617	0,30		
1985	0,2510009	0,25	487,2	10,27
1986	0,1948942	0,19	127,5	2,09
1987	0,301165	0,30	184,8	4,68
1988	0,3436254	0,34	121,7	3,51
1989	0,4166439	0,42	344,3	12,05
1990	0,3786599	0,38	447,8	14,24
1991	0,3540087	0,35	141,8	4,22
1992	0,4367293	0,44	304,0	11,15
1993	0,4658561	0,47	103,2	4,04
1994	0,2313978	0,23	85,2	1,66
1995	0,3101998	0,31	176,8	4,61
1996	0,3595756	0,36	164,5	4,97
1997				
1998	0,5788577	0,58	148,5	7,22
1999	0,6345399	0,63	226,7	12,08
2000	0,5664132	0,57	47,5	2,26
2001	0,3983277	0,40	195,7	6,55
2002	0,3218525	0,32	210,2	5,68
2003	0,5615497	0,56	432,8	20,42
2004	0,3861767	0,39	23,8	0,77
2005	0,2909835	0,29	60,4	1,48
2006	0,4066348	0,41	109,7	3,75
2007	0,4820611	0,48	75,3	3,05
2008	0,2794415	0,28	59,0	1,38
2009	0,6416381	0,64	501,3	27,02
2010	0,5605648	0,56	39,2	1,84
2011	0,5714211	0,57	141,0	6,77
2012	0,4864314	0,49	116,3	4,75
2013	0,6233704	0,62	90,7	4,75
2014	0,3441595	0,34	47,3	1,37
2015	0,7278485	0,73	86,0	5,26
2016	0,7755454	0,78	102,3	6,67
2017	0,5159166	0,52	113,8	4,93
2018	0,5340337	0,53	33,8	1,52
2019			28,2	
2020			275,7	

A partir da análise dos dados, foi realizada a média anual simples para cada ano, bem como a média para a série histórica analisada, conforme apresentado na Figura 2.

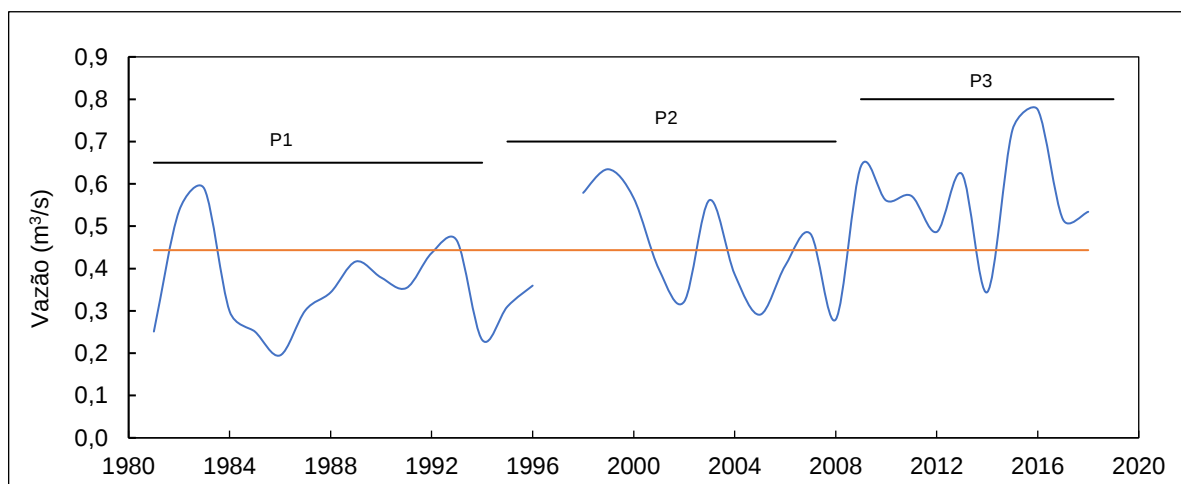


Figura 2: Variabilidade hidrológica do Rio Santo Anastácio para a série histórica de 1981 a 2018

A partir da análise do gráfico, verifica-se que em todo o período há uma variação significativa da vazão total anual, com relação à média da série histórica, que é de $0,443 \text{ m}^3/\text{s}$. Na análise descritiva, observa-se que há um intervalo de período em que as vazões anuais aparentam estar abaixo da média da série histórica em maior parte do período analisado, como é o caso dos anos do início da série histórica até o ano de 1992. É verificado também que a partir de 1993 até o ano de 2009, a média dos anos analisados se aproxima mais da média histórica. E a partir de 2010, é possível observar um padrão que mostra que a maioria dos anos tem média fluviométrica acima da média histórica. Com isso, foi realizada a análise estatística considerando estes três intervalos visíveis no gráfico: P1 = 1981 – 1993; P2 = 1994 – 2009; e P3 = 2010 – 2018, a qual corrobora com esta percepção. Nota-se que a média das vazões para cada período realmente é distinta da série histórica total. Além das médias, foram analisados para cada um destes períodos, o desvio padrão e o coeficiente de variação das amostras (Tabela 3).

Tabela 3- Análise estatística da série histórica, e dos intervalos P1, P2 e P3.

	Série total	P1 (1981-1993)	P2 (1994-2009)	P3 (2010-2018)
Média	0,443	0,371	0,430	0,571
DP	0,15	0,12	0,13	0,13
CV%	33,09	31,26	30,88	22,52

A partir da análise estatística, os dados indicaram que o período P1 possui média de vazão fluviométrica inferior à série histórica. Os valores de desvio padrão e coeficiente de variação calculados indicam a homogeneidade dos dados em torno da média amostral. Quanto ao P2, os resultados indicam que a média do intervalo é muito próxima à série histórica total. Com relação à P3, os dados indicam vazão que a vazão fluviométrica neste período é cerca de 28% superior à média histórica.

Os resultados verificados foram comparados também à série histórica dos dados pluviométricos para o Rio Santo Anastácio, para o mesmo período em análise: 1981 a 2018. Tais dados foram obtidos a partir do banco de dados HydroWeb, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O gráfico que representa a correlação dos dados é apresentado na Figura 3. Por meio da análise do gráfico é possível correlacionar a variação das vazões anuais do Rio Santo Anastácio com os valores da precipitação anual em sua bacia hidrográfica, deste modo, podemos inferir que nos anos em que há picos de vazão do rio coincidem com os maiores valores de chuvas. A evolução da carga sedimentar ao longo do período de estudo é apresentada na Figura 4.

Com base nos resultados de Qss e nas vazões médias anuais, foi possível obter a curva-chave de sedimentos, que representa a correlação entre as descargas de sedimentos sólida e líquida do rio Santo Anastácio, bem como a equação e o coeficiente de determinação (R^2), conforme é apresentado no gráfico da Figura 5.

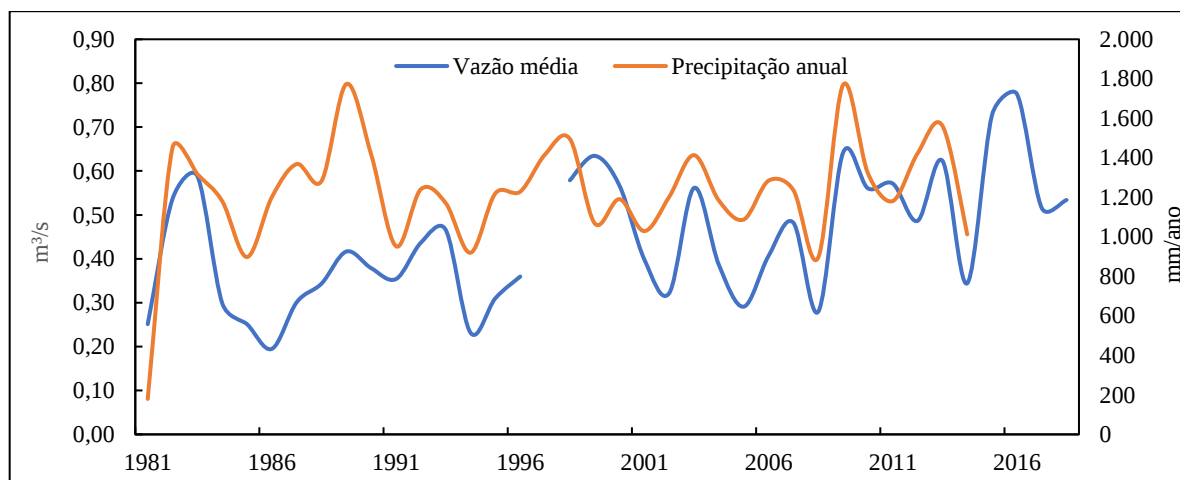


Figura 3: Correlação entre a variabilidade hidrológica e a precipitação anual na Bacia do Rio Santo Anastácio.

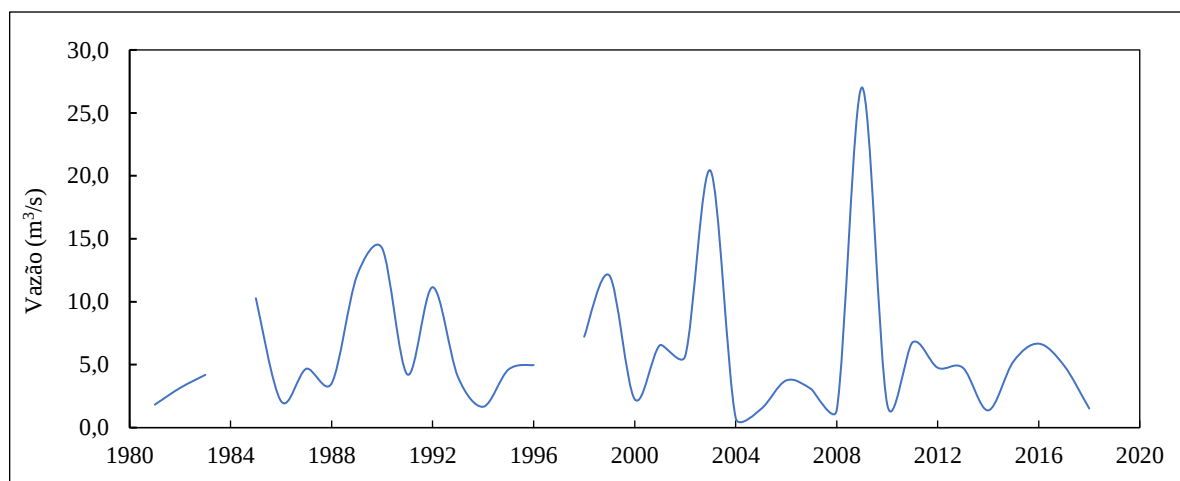


Figura 4: Evolução da carga de sedimentos do rio Santo Anastácio.

De acordo com a análise da curva-chave, o valor de R^2 é baixo e, portanto, podemos supor que o fluxo de sedimentos em suspensão não possui correlação com a variabilidade de vazão do rio Santo Anastácio. Conforme relatam GONÇALVES, ROCHA e FERREIRA (2011), os tipos de usos e as formas de ocupação da terra são os principais fatores que contribuem para a alteração físico-química nos recursos hídricos, através da disponibilização de resíduos orgânicos e compostos químicos de atividades antrópicas. A análise do uso e ocupação do solo é um dos principais aspectos para compreender a evolução da carga sedimentar em rios e bacias hidrográficas. Na bacia hidrográfica do Rio Santo Anastácio, a predominância da classe temática de pastagens indica um uso extensivo do solo para a criação de animais. Essa atividade pode impactar diretamente na qualidade da água, uma vez que a pecuária está relacionada ao aumento da erosão do solo e, consequentemente, à geração de sedimentos. De fato, o sedimento é o principal indicador do processo de erosão do solo em bacias hidrográficas e tem um papel fundamental na dinâmica fluvial e na qualidade da água (JANEIRO et al., 2020).

O aumento da atividade agrícola na bacia hidrográfica do Rio Santo Anastácio, especialmente na expansão das áreas de culturas agrícolas temporárias, pode gerar impactos significativos na qualidade da água. A cana-de-açúcar, por exemplo, é uma cultura que requer o uso intensivo de agrotóxicos, os quais podem contaminar os corpos d'água e causar danos à fauna e flora aquáticas, além de afetar a saúde humana. (SCHMIDT, 2015). O uso intensivo do solo na bacia hidrográfica do Rio Santo Anastácio pode levar à redução da biodiversidade, uma vez que as atividades humanas podem alterar a dinâmica natural dos ecossistemas. A perda de habitats naturais pode afetar a resiliência e a capacidade de adaptação dos ecossistemas aquáticos, tornando-os mais vulneráveis às mudanças ambientais. Assim, é fundamental que sejam adotadas práticas sustentáveis de uso e ocupação do

solo, que permitam conciliar o desenvolvimento econômico com a conservação dos recursos naturais e a qualidade da água.

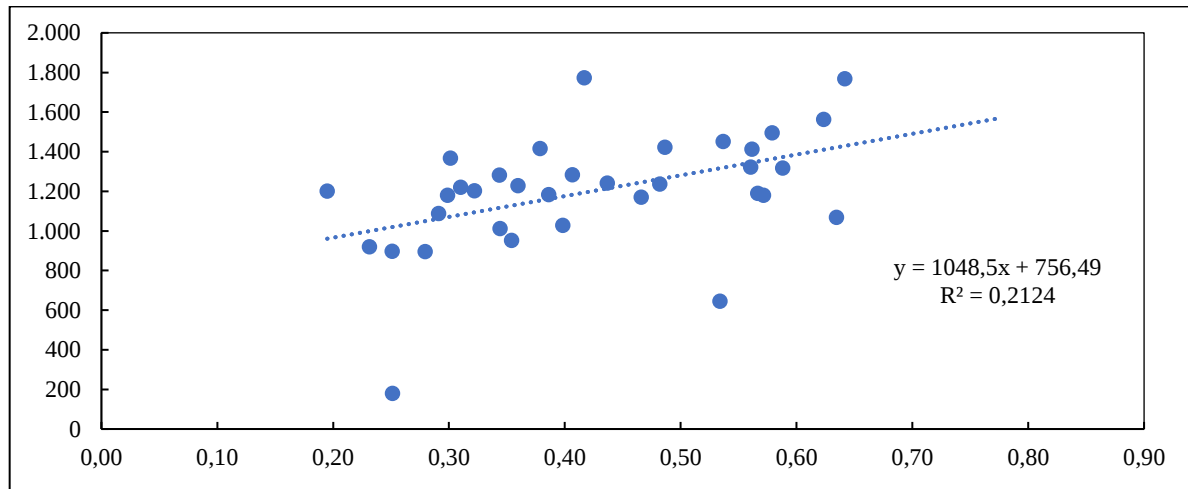


Figura 5: Curva-chave da Qss e vazões médias.

A Figura 6 apresenta o mapa de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Santo Anastácio nos anos 1985, 2000 e 2018, e através da análise dos mapas, verificamos que as pastagens são as classes temáticas predominantes na área da bacia rio Santo Anastácio, ocupando aproximadamente 85, 17% em 1985, 84,11% em 2000 e 66,84% em 2018. Contudo nota-se em um contexto regional, a qual a área da bacia está inserida, da grande abertura e implantação de culturas temporárias, como por exemplo a cana-de-açúcar, que em 1985 ocupavam 1,47% da área total da bacia e em 2018 a área de culturas agrícolas totalizou 6,74%. A gestão integrada de bacias hidrográficas é um processo que visa promover o uso sustentável dos recursos hídricos, considerando as interações entre o uso do solo e as atividades humanas e seus impactos nos corpos d'água. A gestão integrada envolve a participação de diversos atores sociais, como governos, empresas, organizações da sociedade civil e comunidades locais, na definição e implementação de políticas e ações que visem à proteção e recuperação da qualidade da água e dos ecossistemas aquáticos, conforme argumentam Câmara et al. (2019) e Rebouças et al. (2015).

Nesse sentido, a gestão integrada da bacia hidrográfica do Rio Santo Anastácio é fundamental para garantir a qualidade da água e a conservação dos ecossistemas aquáticos da região. Além disso, é importante ressaltar a importância da educação ambiental e da conscientização da população sobre a relação entre o uso do solo e a qualidade da água. Ações educativas e de comunicação podem contribuir para sensibilizar a população sobre a importância de adotar práticas sustentáveis de uso e ocupação do solo, que promovam o desenvolvimento econômico e social sem comprometer a qualidade da água e a conservação dos recursos naturais.

Portanto, é necessário o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem práticas sustentáveis de uso do solo, como a adoção de sistemas agroflorestais, que promovem a recuperação e conservação do solo, reduzem a necessidade de agrotóxicos e fertilizantes químicos e aumentam a biodiversidade. Além disso, é importante incentivar a utilização de tecnologias de conservação do solo, como a terraceamento, a construção de curvas de nível e o plantio direto, que contribuem para reduzir a erosão do solo e, consequentemente, a geração de sedimentos (SZALIŃSKA et al., 2020). Em suma, a análise do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Santo Anastácio indica a predominância das pastagens e a expansão das áreas de culturas agrícolas temporárias, como a cana-de-açúcar. Essa expansão pode gerar impactos significativos na qualidade da água, na biodiversidade e no clima regional. Portanto, é fundamental que sejam adotadas práticas sustentáveis de uso e ocupação do solo, bem como a gestão integrada da bacia hidrográfica, que envolva a participação de diversos atores sociais e a promoção da educação ambiental.

Um das principais causas de erosão e aumento da carga sedimentar nos corpos d'água é a remoção da cobertura vegetal, pois torna o solo desprotegido frente a agentes erosivos e reduz a velocidade e a quantidade dos fluxos superficiais por meio de uma estrutura física e da formação das coberturas mortas, como as serrapilheiras. Em termos subsuperficiais, as raízes conferem maior resistência dos solos a ação erosiva, freando a velocidade de percolação. Conforme relatam Antoneli et al (2008), quando áreas florestadas são substituídas por pastagens, as

taxas de erosão podem atingir ordem de grandezas até dez vezes maiores, mas quando ocorre a substituição por culturas, o processo erosivo pode aumentar em até mil vezes. Porém, as taxas de erosão variam muito de cultura para cultura e dependem também das práticas agrícolas utilizadas.

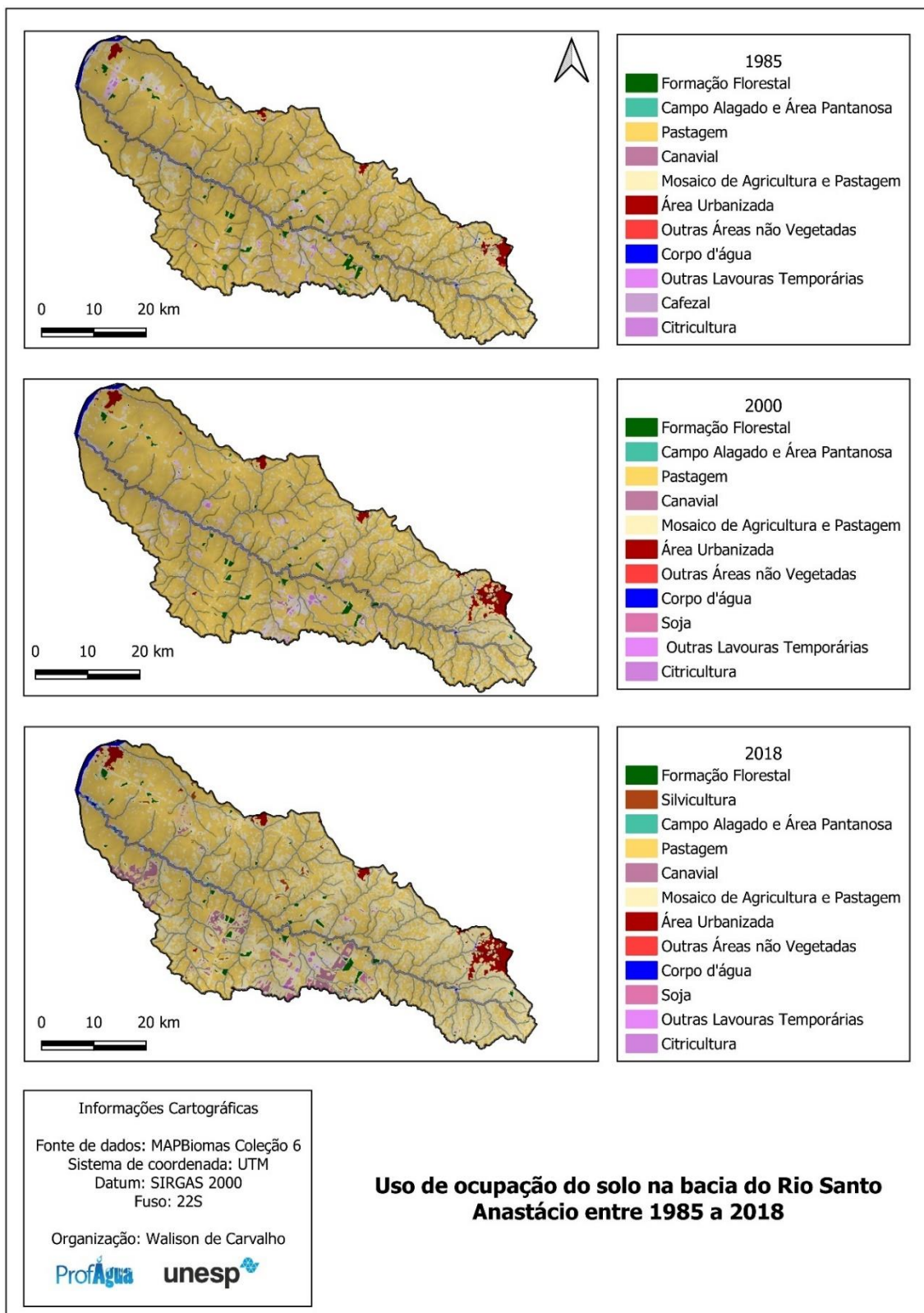


Figura 6: Mapa de uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio Santo Anastácio

CONCLUSÕES

Todo evento ou processo em uma bacia de drenagem repercute direta ou indiretamente nos cursos d'água, podendo alterar fatores hidrodinâmicos como a vazão, velocidade de fluxo, forma do canal, carga sedimentar e processos de sedimentação e erosão, deste modo, as atividades antrópicas indutoras de erosão acelerada, principalmente a partir da exposição do solo, podem levar a mudança do grau de sinuosidade e dos padrões fluviais de um corpo hídrico, como no caso do Rio Santo Anastácio.

A evolução da carga sedimentar em um rio é um tema complexo e desafiador, que envolve a combinação de dados de campo, observações hidrológicas e modelagem numérica. O estudo da carga sedimentar de um rio é importante para entender a dinâmica fluvial e os processos de erosão e sedimentação, além de ser fundamental para o planejamento e gestão de recursos hídricos e ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA – Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico. Portal Hidroweb, 2019. <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>.
2. BASTOS, F.H.; MAIS, R.P.; CORDEIRO, A.M.N. Geomorfologia, Editora EdUECE, Fortaleza, 2015.
3. BARROS, L.F.P; MAGALHÃES Jr, A.P.M. Bases teóricas e fatores controladores da dinâmica fluvial. In MAGALHÃES Jr, A.P.M; BARROS, L.F.P, Hidrogeomorfologia: Formas, processos e registros sedimentares fluviais, 1º ed, Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2020.
4. BAJRACHARYA, P.; JAIN, S. *Characterization of drainage basin hypsometry: A generalized approach*, *Geomorphology*, v. 381, 107645, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107645>.
5. COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais, Editora ABRHI, 2013.
6. DUDOV, S. *Modeling of species distribution with the use of topography and remote sensing data on the example of vascular plants of the Tukuringra Ridge low mountain belt (Zeya State Nature Reserve, Amur Oblast)*. *Biol. Bull. Rev.*, n. 7, p. 246-257, 2017. <https://link.springer.com/article/10.1134/S2079086417030021>.
7. FERNANDES, P.R.; ROCHA, P.C. Análise da variabilidade de magnitude de fluxo do Rio Aguapeí, região Oeste Paulista, Brasil. In... XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, 2017. <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP022805.pdf>.
8. FIELDING, C.R.; ASHWORTH, P.J.; BEST, J.L.; PROKOCKI, E.W.; SMITH, G.H. *Tributary, distributary and other fluvial patterns: what really represents in the continental rock record?* *Sedimentary Geology*, v. 15, n. 18, p. 261-262, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.004>.
9. FREEMAN, B.G.; SCHOLER, M.N.; RUIZ-GUTIERREZ, V.; FITZPATRICK, J.W. *Climate change causes upslope shifts and mountaintop extirpations in a tropical bird community*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 115, p. 11982-11987, 2018. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804224115>.
10. FORTE, A.M.; WHIPPLE, K.X. *Criteria and tools for determining drainage divide stability*. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 493, p. 102-117, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.02>.
11. GALLEN, S.F.; WEGMANN, K.W.; FRANKEL, K.L.; HUGHES, S. et al. *Hillslope response to knickpoint migration in the Southern Appalachians: implications for the evolution of postorogenic landscapes*. *Earth Surf. Process. Landf.*, v. 36, n. 1254-1267, 2011. <https://doi.org/10.1002/esp.2150>.
12. GAYEN, M.; Haque, S.M. *Soil erodibility assessment of laterite dominant sub-basin watersheds in the humid tropical region of India*, *CATENA*, v. 213, 106161, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106161>.
13. GEURTS, A.H.; COWIE, P.A.; DUCLAUX, G.; GAWTHORPES, R.L. et al. *Drainage integration and sediment dispersal in active continental rifts: a numerical modelling study of the central Italian Apennines*, *Basin Res.*, v. 30, n. 5, p. 1-25, 2018. <https://doi.org/10.1111/bre.12289>.
14. MACEDO, D.R.; LOPES, F.W.A.; MAGALHÃES Jr., A.P. Restauração de rios urbanos, vulnerabilidade ambiental e percepção da comunidade: o caso do Córrego Baleares, Programa Drenurbs – Belo Horizonte. In: XVII Encontro Nacional de Estudos Populacionais, Caxambu. Anais. 2010. <https://www.scielo.br/j/sn/a/WCLd9Xd4Lb9hS5frP6bTQZf/?lang=pt>.
15. MAGALHÃES Jr, A.P.M.; BARROS, L.F.P; LAVARINI, C. Unidades espaciais de estudo e elementos do sistema fluvial: bases conceituais. In MAGALHÃES Jr, A.P.M; BARROS, L.F.P, Hidrogeomorfologia: Formas, processos e registros sedimentares fluviais, 1º ed, Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2020.
16. MAGALHÃES Jr, A.P.M.; BARROS, L.F.P; COTA, G.E.M. Morfodinâmica fluvial. In MAGALHÃES Jr, A.P.M; BARROS, L.F.P, Hidrogeomorfologia: Formas, processos e registros sedimentares fluviais, 1º ed, Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2020.

17. MOLINARIO, G.; HANSEN, M.; POTAPOV, P.V., 2015. *Forest cover dynamics of shifting cultivation in the Democratic Republic of Congo: a remote sensing-based assessment for 2000–2010*. *Environ. Res. Lett.* v. 10, 094009, 2015. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/9/094009>.
18. MUDD, S.M. *Detection of transience in eroding landscapes*. *Earth Surface Process and Landform*, v. 42, n. 1 p. 24-41, 2017. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/esp.3923>.
19. OLIVEIRA, T.A.; VIADANA, A.G.; PEREIRA, A.A. *Fragilidade ambiental e dinâmica geossistêmica: mapeamento da paisagem na bacia hidrográfica do Rio Lourenço Velho, Sul do estado de Minas Gerais-Brasil*. *Caminhos de Geografia*, v. 20, n. 71, p. 504–516, 2019. <https://doi.org/10.14393/RCG207146666>.
20. PIETROBELLI, G.; MACHADO, E.; TRATZ, E.B.; CAMARGO FILHO, M. et al. *Análise macroscópica e micromorfológica de estruturas sedimentares aplicada à interpretação de eventos de deposição de sedimentos em depósitos de baixa encosta no sul do Segundo Planalto do Estado Paraná (Brasil)*. *Revista caminhos da Geografia*, v. 20, n. 72, p. 537559, 2029. <https://doi.org/10.14393/RCG207247083>.
21. ROCHA, P.C.; ARAÚJO, A.P.; BOTA, G.B. Variabilidade no regime de fluxo dos Rios Aguapé e Peixe, Oeste Paulista: Alterações e formas de impacto. In. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, 2009. <https://abrh.s3.saeast-1.amazonaws.com/Sumarios/110/42df4957946b42582bdf7ebb072107b39011aa343fcb219de87592161430dcf.pdf>.
22. SILVEIRA, A.L.L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In TUCCI, C. E.M. org. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, 4º ed. Editora ABRH, Porto Alegre, 2020.
23. STEVAUX, J.C.; LATRUBESSE, E.M. *Geomorfologia Fluvial*, Editora Oficina de Textos, 2017, São Paulo.
24. UMBELINO, B.A.; ROCHA, P.C. Estudo do Meio Físico na Perspectiva da Fragilidade Ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Santo Anastácio - UGRHI 22. In. FARIA et al (orgs). *Planejamento e desenvolvimento sustentável em bacias hidrográficas – Coletânea II*, Editora Cegraf UFG, Goiânia, 2021.
25. VERCRUYSE, K.; GRABOWSKI, R.C.; RICKSON, R.J. *Suspended sediment transport dynamics in rives: Multi-scale drivers of temporal variation*. *Earth-Science Reviews*, Elsevier, v. 166, p. 38-57, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.016>.
26. CÂMARA, G.; VINHAS, L; FERREIRA, K.R.; QUEIROZ, G.R. et al. *TerraLib: an open-source GIS library for large-scale environmental and socio-economic applications*. In: *Proceedings of the 25th annual ACM international conference on Multimedia*. ACM, 2017. p. 1553-1556. <https://www-di.inf.puc-rio.br/~casanova/Publications/Papers/2007-Papers/2007-OSASDH-Camara.pdf>
27. SCHMIDT, J. Comparative life cycle assessment of rapeseed oil and palm oil. *International journal of life cycle assessment*, v. 15, n. 2, p. 183-197, 2015. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-009-0142-0>.
28. SZALIŃSKA, E.; ORLIŃSKA-WOŹNIAK, P.; WILK, P. *Sediment load variability in response to climate and land use changes in a Carpathian catchment (Raba River, Poland)*. *J Soils Sediments*, v. 20, n. 2641–2652, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02600-8>.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PROFÁGUA (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) — UNESP, com apoio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — código financeiro 001) e ANA (Agência Nacional de Águas) — CAPES/ANA AUXPE nº 2717/2015.